

УДК536.423.4

## **Влияние искусственных центров парообразования на теплообмен при кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных оребренных труб\***

**И.И. Гогонин**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: gogonin@itp.nsc.ru

В промышленности встречается целый класс теплообменников, где реализуются низкие значения удельных тепловых потоков: испарители холодильных машин, парогенератор бинарной фреоновой станции, парогенератор теплового насоса и т.д. Такие режимы теплообмена реализуются, когда кипение в пленке только начинается, а интенсивность теплообмена при испарении соизмерима с теплообменом при кипении. В статье излагаются результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении на медных оребренных трубах, вся поверхность которых полностью подвергалась специальной обработке в воздушном потоке, содержащем частицы корунда размером менее 500 микрон. Результатом такой обработки явилось заметное снижение температурного напора, при котором начиналось кипение и заметная интенсификация теплоотдачи по сравнению с оребренной трубой без обработки частицами корунда.

**Ключевые слова:** пакет оребренных труб, теплообмен при испарении, интенсификация теплообмена.

### **Введение**

Аппараты пленочного типа успешно используются во многих отраслях промышленности. Оребрение труб пакета является одним из основных способов интенсификации теплообмена. Установлено, что оребрение приводит к существенной стабилизации пленочного течения за счет сил поверхностного натяжения, которые на оребренных трубах играют определяющую роль [1]. К настоящему времени исследования по испарению и кипению пленки, орошающей пакет горизонтальных оребренных труб, ведутся интенсивно во многих странах [1–15]. Однако не решенными остаются несколько принципиальных вопросов:

- как правильно выбрать параметры оребрения;
- как уменьшить температурный напор, при котором начинается кипение в пленке;
- как определить минимальную плотность орошения пакета оребренных труб;
- как вычислить критический тепловой поток при кипении пленки.

Задача настоящего исследования — выяснение влияния искусственных центров парообразования на характеристики теплоотдачи при кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных оребренных труб, по сравнению со случаем использования пучка гладких оребренных труб, имеющих техническую чистоту теплообменной поверхности.

---

\* Исследования выполнены в рамках гос. задания ИТ СО РАН на 2021–2025 годы (№ АААА-121031800216-1).

Специально поставленные эксперименты, результаты которых приводились в работе [4], позволяют утверждать, что оптимальное расстояние между ребрами может быть вычислено из соотношения

$$\bar{a} \approx 0,6 \div 0,8,$$

где  $\bar{a} = a/l_\sigma$ ,  $l_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$ ,  $a$  — расстояние между трапецевидными ребрами, вычисленное по эмпирической зависимости, приведенной в [6].

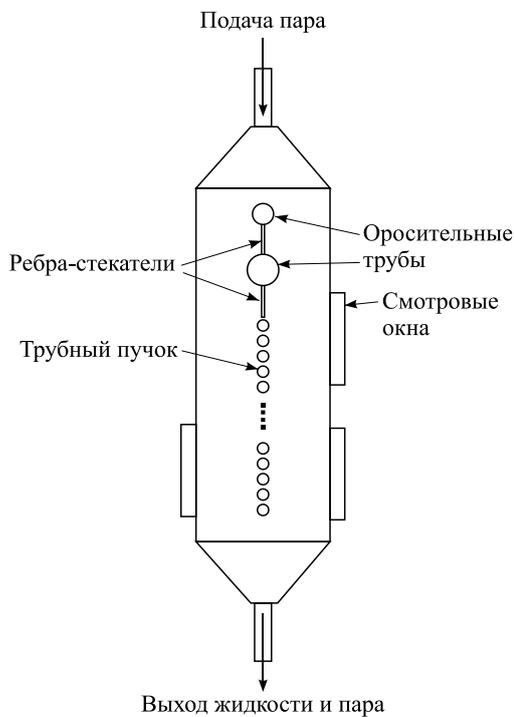
Оребренную трубу из меди можно считать изотермической стенкой, так как эффективность ребра, определенная по зависимости, приведенной в [16], близка к единице:

$$E = \frac{\text{th}\left(L\sqrt{2\alpha\delta / \lambda_w}\right)}{L\sqrt{2\alpha\delta / \lambda_w}}, \quad (1)$$

где  $L = h/\delta$  — относительная высота ребра,  $\delta$  [м] — толщина ребра у основания,  $\lambda_w$  [Вт/(м·К)] — коэффициент теплопроводности материала трубы,  $h$  [м] — высота ребра,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи при кипении [Вт/(м<sup>2</sup> · К)].

Приведенные зависимости позволяют вычислить оптимальные параметры оребрения, при которых капиллярное удерживание жидкости между ребрами близко к минимуму. Параметры ребра, вычисленные по (1), позволяют получить максимально возможный коэффициент оребрения для конкретных условий, при которых работает оребренная труба. Материал для труб выбирается с учетом коррозионной стойкости металла в данном теплоносителе, его стоимости, условий эксплуатации и т.д.

### Экспериментальная установка и принятая методика измерений



Опыты выполнялись на стенде из нержавеющей стали с вынужденной циркуляцией рабочего вещества. Принципиальная схема стенда приводилась в монографии [10]. Жидкий фреон с помощью бессальникового насоса через подогреватель при  $T_L \approx T_S$  поступает в экспериментальный объем. Рабочим веществом являлся фреон R21(CHFCL<sub>2</sub>), опыты выполнялись при  $P = 0,296$  МПа ( $T_S \approx 40$  °С). Поперечное сечение экспериментального объема схематично изображено на рис. 1. Корпус экспериментального объема имеет шесть оптических окон диаметром 150 мм, позволяющих проводить визуальные наблюдения и видеосъемку процессов, происходящих в пленке. Пучок экспериментальных труб представлял собой вертикальный ряд из сорока горизонтальных труб, расположенных с шагом 12 мм и

Рис. 1. Схема экспериментального объема.

орошаемых пленкой фреона. Длина труб составляла 625 мм. В рассматриваемой серии опытов горячая вода подавалась только через нижние 20 труб пучка.

В состав пакета входят 36 латунных труб, имеющих насечку в виде винтовой канавки с шагом 0,435 мм, выполненную на токарном станке. Высота ребра этих труб колебалась в диапазоне  $0,13 \div 0,22$  мм, а ширина торца — в пределах  $0,13 \div 0,2$  мм. Капиллярные силы позволяли относительно равномерно распределять жидкость по всей длине экспериментальных труб и обеспечивать равномерное орошение труб, расположенных в нижней части пакета. В состав экспериментальных труб входили гладкая труба из меди М-1 наружным диаметром 10 мм с толщиной стенки 2 мм, а также две оребренные трубы из меди М-1 наружным диаметром 10 мм с начальной толщиной стенки 2 мм. Оребрение выполнено по всей длине трубы и имеет вид поперечной винтовой канавки с шагом 1,07 мм, глубиной канавки 0,42 мм, шириной торца 0,16 мм и коэффициентом оребрения 1,46. Геометрические параметры этих труб представлены на рис. 2. Поверхность одной из оребренных труб была подвергнута обработке в воздушном потоке, содержащем частицы корунда размером менее 500 микрон. Шероховатость этой трубы находилась в пределах  $20 \div 30$  микрон. Шероховатость другой оребренной трубы составляла  $3 \div 6$  микрон.

Измерения на всех экспериментальных трубах происходили одновременно. Расход обогревающей воды при изменении других параметров оставался всегда неизменным, а величина удельного теплового потока менялась за счет изменения температуры воды ( $\Delta T_1 = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$ ) на входе в экспериментальные участки. Падение температуры воды в экспериментальной трубе измерялось дифференциальным полупроводниковым датчиком температуры и контролировалось термопарами на входе и выходе из участка. Тепловые потоки вычислялись по изменению энтальпии и измеренному расходу обогревающей воды для каждой трубы.

Орошение экспериментальных труб пучка выполнялось через щелевой ороситель, состоящий из двух горизонтальных труб, верхняя труба которого имела диаметр 20 мм и горизонтальную щель шириной 0,4 мм, а нижняя труба имела диаметр 30 мм и щель шириной 1,1 мм. Плотности орошения, при которых производились измерения, соответствовали числам Рейнольдса пленки  $Re = 380, 600, 1000, 1500$ . Здесь  $Re = G/2\mu$ . В зависимости от плотности орошения включался один или другой ороситель. Между нижним и верхним оросителями, а также между нижним оросителем и верхней трубой пучка располагались ребра-стекатели. Расход фреона R-21, орошающего пучок, измерялся турбинным расходомером и регулировался игольчатым вентилем.

Вода для обогрева экспериментальных труб поступала из бака постоянного уровня, что исключало пульсации расхода и обеспечивало постоянный температурный напор  $\Delta T = T_w - T_s$  для данной серии опытов. В линиях экспериментальных труб расход воды контролировался вихревыми расходомерами PF2D5 и поддерживался почти постоянным в диапазоне чисел  $Re = 11000 \div 12000$ . Давление пара фреона в экспериментальном объеме поддерживалось постоянным за счет регулирования расхода охлаждающей воды в конденсаторе.

Изменяемыми параметрами в опытах являлись температура обогревающей воды на входе и выходе из экспериментальных труб, температура жидкости и пара фреона в экспериментальном объеме, температура воды до и после подогревателя перед подачей ее в бак постоянного уровня, давление в рабочем объеме и конденсаторе, расход жидкого фреона для орошения трубного пучка, расход обогревающей воды, мощность омических подогревателей горячей воды,

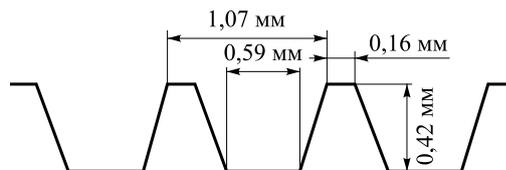


Рис. 2. Геометрические параметры оребренной медной трубы диаметром  $D = 10$  мм.

изменение энтальпии обогревающей воды через каждую экспериментальную трубу, геометрические параметры трубного пучка. К числу вычисляемых параметров необходимо отнести: значение удельного теплового потока на каждой экспериментальной трубе и коэффициент теплоотдачи на ней, число  $Re$  пленки, число  $Re$  воды, число Нуссельта обогревающей воды, коэффициент теплопередачи и теплоотдачи на границе раздела стенка – пленка. Теплоотдача внутри трубы вычислялась по формуле, приведенной в справочнике [17], а коэффициент теплоотдачи на границе раздела стенка – фреон вычислялся через коэффициент теплопередачи.

### Результаты эксперимента

Перед началом измерений стенд работал не менее 16 часов при  $q = 210^4 \cdot \text{Вт/м}^2$  и разных плотностях орошения. При этом тепловом потоке на всех экспериментальных трубах наблюдался режим развитого кипения. Измерения начинались только приработкой экспериментальных труб. Выяснилось, что очень важную роль играет химическая чистота материала теплоотдающей стенки. На медной трубе из высококачественной меди марки М-1 «старение» центров парообразования не наблюдалось в течение четырех месяцев работы стенда. Ранее проводившиеся при тех же условиях исследования на трубах из меди марки М-3 или латунных трубах показали, что происходит постоянное снижение коэффициента теплоотдачи во времени. На четвертом месяце работы стенда снижение коэффициента теплоотдачи достигало 40 % первоначального. Этот вопрос требует дальнейшего изучения и систематических опытов. Сделать окончательные выводы пока не представляется возможным.

Результаты опытов по теплообмену на гладкой и оребренных трубах приведены в координатах  $q = f(\Delta T)$  на рис. 3 при  $Re = 1000$ . Здесь удельный тепловой поток вычислен по отношению к поверхности гладкой трубы диаметром 10 мм, то есть для оребренных труб является условным. Видно, что на технически гладкой трубе из меди кипение начиналось при  $\Delta T = 4,5 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $q = 10^4 \text{ Вт/м}^2$ ). Результаты опытов на оребренной трубе оказались нетрадиционными. Обычно кипение на оребренных трубах начинается при меньших температурных напорах, чем на гладких трубах. В проведенных экспериментах кипения на оребренной трубе (без обработки корундом) не было обнаружено во всем диапазоне исследованных тепловых потоков. Особенно отчетливо это отражено на рис. 4 (значки 2), где видно, что для оребренной трубы  $\alpha \approx \text{const}$  во всем диапазоне исследованных параметров. Результаты измерений на оребренной шероховатой трубе после обработки корундом представлены на рис. 3 и 4 значками 3. Видно, что кипение начинается при  $\Delta T \leq 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При  $\Delta T = \text{idem}$  тепловой поток на оребренной трубе с искусственными центрами парообразования

по сравнению с гладкой трубой увеличивается до четырех раз (рис. 3). При  $q = 20 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  искусственные центры парообразования позволяют интенсифицировать теплоотдачу по сравнению с оребренной трубой (символы 2) примерно в 1,5 раза, а по сравнению с гладкой более чем в два раза (рис. 4).

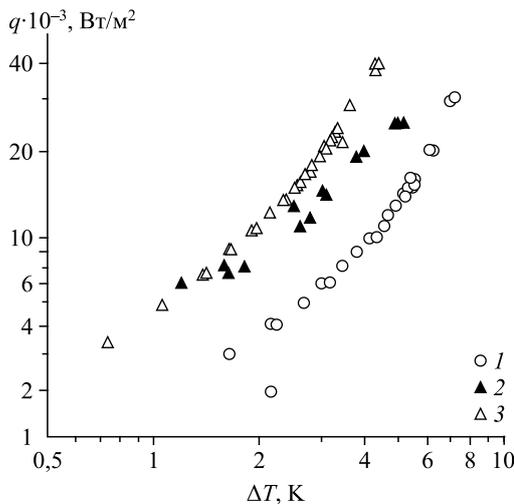


Рис. 3.  $q$ - $\Delta T$  зависимость при испарении и кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных труб.

1 — гладкая медная труба диаметром  $D = 10 \text{ мм}$ ,  
 2 — оребренная медная труба диаметром  $D = 10 \text{ мм}$   
 с  $R_z \approx 3 \div 5 \text{ мкм}$ , 3 — оребренная труба  
 диаметром  $D = 10 \text{ мм}$  с  $R_z \approx 20 \div 30 \text{ мкм}$   
 (после обработки корундом).

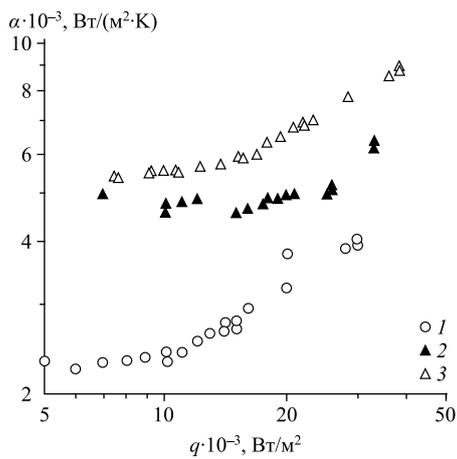


Рис. 4.  $\alpha$ - $q$  зависимость при испарении и кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных труб.

1 — гладкая труба, 2 — оребренная труба с  $R_z \approx 3 \div 5$  мкм, 3 — оребренная труба с  $R_z \approx 20 \div 30$  мкм (после обработки корундом).

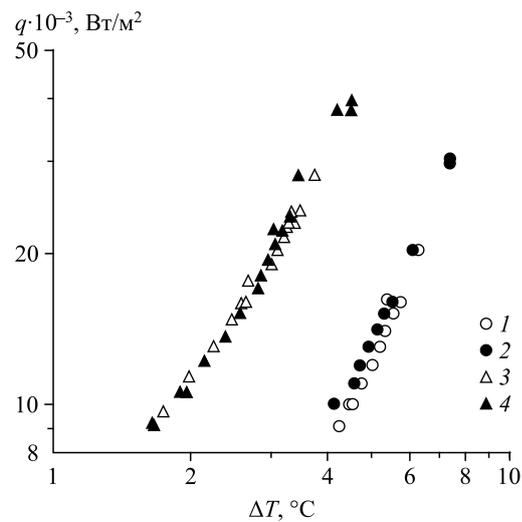


Рис. 5. Зависимость теплоотдачи при кипении от плотности орошения.

Пакет гладких труб:  $Re = 600$  (1),  $1500$  (2); пакет оребренных труб:  $Re = 600$  (3),  $1500$  (4).

Как следует из данных, приведенных на рис. 5, теплообмен при кипении практически не зависит от плотности орошения и определяется значением теплового потока как для гладких, так и для оребренных труб с искусственными центрами парообразования. Алгоритм расчета теплоотдачи при испарении и кипении пленки на пучке гладких и оребренных труб был изложен в публикациях [1, 8, 10]. При ряде допущений данные расчета удовлетворительно согласуются с данными эксперимента.

### Заключение

Искусственные центры парообразования на пучке оребренных труб приводят к значительному снижению температурного напора, при котором начинается кипение, а также к многократной интенсификации теплоотдачи по сравнению с пучком гладких труб при прочих равных условиях. При  $\bar{a} = 0,6$  и  $E > 0,9$  задавался один из линейных размеров ребра (например, толщина стенки у основания), далее определялись все остальные размеры ребра. Изменяя задаваемый параметр, такой расчет необходимо многократно повторить и выбрать оптимальный размер. Окончательный выбор, видимо, должен делаться с учетом технологии изготовления оребренной трубы и ее стоимости. Шероховатость следует выбирать из условия  $\bar{R}_z = R_z / l_v > 0,9$ , где  $l_v = (v^2/g)^{1/3}$ .

Теплообмен при кипении пленки в исследованном диапазоне чисел  $Re$  не зависит от плотности орошения на пучке как гладких, так и оребренных труб с искусственными центрами парообразования.

Автор статьи выражает благодарность за участие в экспериментальном исследовании И.Б. Мироновой и А.И. Катаеву.

### Обозначения

$D$  — диаметр трубы, м,  
 $G$  — плотность орошения, кг/(мс) или  $m^3/(мс)$ ,  
 $h$  — высота ребра, м,  
 $L$  — безразмерная высота, м,  
 $l_\sigma, l_v$  — капиллярная и вязко-гравитационная постоянная, м,

$y$  — координата, м,  
 $\alpha$  — коэффициенты теплоотдачи при кипении, Вт/( $m^2K$ )  
 $\delta$  — толщина ребра у основания, м,  
 $\lambda$  и  $\lambda_w$  — коэффициенты теплопроводности жидкости и охлаждаемой стенки, Вт/(м·К),

$q$  — удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>,  
 $R_z$  — высота неровностей охлаждаемой стенки, мкм,  
 $\bar{R}_z = R_z / l_v$  — безразмерная шероховатость,  
 $T_S$  — температура насыщения К, °С,  
 $\Delta T_1 = T_{вх} - T_{вых}$  — изменение температуры  
 обогревающей воды К, °С,  
 $\Delta T = T_w - T_S$  — температурный напор  
 в пленке К, °С,  
 $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с,  
 $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с,  
 $\rho_l, \rho_v, \rho_w$  — плотность жидкости, пара  
 и охлаждаемой стенки, кг/м<sup>3</sup>,  
 $Re$  — число Рейнольдса пленки для пакета  
 горизонтальных труб.

### Индексы

L — жидкость,  
 S — насыщение,  
 T — турбулентный,  
 v — пар,  
 w — стенка,  
 $\delta$  — пленка.

### Список литературы

1. Gogonin I.I., Misyuza S.Ya. Film heat exchangers: hydrodynamics and heat transfer (review) // J. of Eng. Thermophys. 2020. Vol. 29, No. 4. P. 686–710.
2. Roques J.F., Thome J.R. Falling films on arrays of horizontal tubes with R134a. Part I. Boiling heat transfer results for four types of tubes // Heat Transfer Engng. 2007. Vol. 28. P. 398–414.
3. Fujita J., Tsatsui M. Experimental and analytical study of evaporation heat transfer in falling films on horizontal tubes. // Proc. of 10th Int. Heat Transter Conf., Brighton, U.K. 1994. Vol. 6. P. 175–180.
4. Гогонин И.И., Кабов О.А. Влияние капиллярного удерживания жидкости на теплообмен при конденсации на оребренных трубах // Изв. СОАН СССР. Сер. техн. наук. 1983. Вып. 2, № 8. С. 3–8.
5. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 196 с.
6. Bressler R.J., Wyatt P.W. Surface wetting through capillary grooves // Trans. ASME. Ser. C. 1971. Vol. 92. P. 132–139.
7. Akesjö A., Gourdon M., Vamling L., Innigs F., Sasic S. Modified surfaces to enhance vertical falling film heat transfer — an experimental and numerical study // Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 131. P. 237–251.
8. Гогонин И.И. Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 225 с.
9. Wen T., Lu L., He W., Min Y. Fundamentals and applications of CFD technology on analyzing falling film heat and mass exchanges: A comprehensive review // Appl. Energy. 2020. Vol. 261. P. 114473–114477.
10. Gogonin I.I. Experimental studies of the influence of hydrodynamics on heat transfer at evaporation and boiling of film irrigating a bundle of horizontal finned tubes // IOP J. Conf. (TPEAC-2019). 2020. Vol. 1565. P. 012049-1–012049-6.
11. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Chernyavskiy A.N., Radyuk A.A. Study of the effect of three-dimensional capillary-porous coatings with various microstructural parameters on heat transfer and critical heat flux at pool boiling of nitrogen // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012089-1–012089-7.
12. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Radyuk A.A., Komlev D.I., Kalita V.I. Features of heat transfer during pool boiling of nitrogen on surfaces with capillary-porous coatings of various thicknesses // J. of Engng Thermophys. 2020. Vol. 29, No. 3. P. 1–13.
13. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Experiments on heat transfer and quenching enhancement by the different coatings of surface at liquid nitrogen film flow // J. of Engng Thermophys. 2020. Vol. 29, No. 4. P. 531–541.
14. Moiseev M.I., Fedoseev A., Shugaev M.V., Surtaev A.S. Hybrid thermal lattice Boltzmann model for boiling heat transfer on surfaces with different wettability // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 81–91.
15. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Volodin O.A., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat transfer in falling films on a package of horizontal pipes with MAO coating // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012091-1–12091-7.
16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1980. 417 с.
17. Справочник по теплообменникам. Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2021 г.,  
 после доработки — 13 июля 2021 г.,  
 принята к публикации 30 июля 2021 г.