

## ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ В СЕЧЕНИИ ТРУБЫ ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА В ИСПАРИТЕЛЯХ СУДОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

*В. Г. Букин, А. В. Букин*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

В качестве объекта исследования приведён экспериментальный испаритель, рассматривается модель испарителя с кипением холодильного агента R406a внутри труб. Эксперимент по теплоотдаче выполнен на специальном стенде в гладкой трубе из стали марки 1X18H9T диаметром 0,013 м, длиной 3,3 м, толщиной стенки 0,5 мм. Исследовано влияние режимов движения двухфазного потока рабочего тела на теплообмен при его кипении как по длине трубы, так и в её сечении, даны сопоставления коэффициентов теплоотдачи. Проведены визуальные наблюдения за структурой потока. Определены четыре режима движения двухфазного потока: эмульсионный, снарядный (пробковый), волновой и расслоенный. Представлено изменение коэффициентов теплоотдачи в верхней, средней и нижней частях сечения трубы в каждом из них, выявлено изменение теплообмена по мере развития режимов. Подтверждено наличие сухой стенки в верхней части трубы в волновом и расслоенном режимах, где отмечена минимальная теплоотдача. Проиллюстрированы графические зависимости изменения коэффициентов теплоотдачи в сечении трубы для различных режимов. Отмечено, что интенсивность теплоотдачи к пару зависит от скорости его движения, а теплоотдача к кипящей жидкости – от двух составляющих: интенсивности кипения и скорости движения жидкости. Сделаны выводы о том, что хладагент поступает в испарители судовых холодильных установок после дросселирования с начальным массовым паросодержанием от 0,1 до 0,15 кг/кг, что соответствует снарядному или волновому режиму; эмульсионный режим возможен только в насосных схемах; протяжённость расслоенного режима с малой интенсивностью теплоотдачи будет наиболее значительной.

**Ключевые слова:** теплоотдача, коэффициент теплоотдачи, двухфазный поток, кипение, испаритель.

**Для цитирования:** Букин В. Г., Букин А. В. Изменение интенсивности теплоотдачи в сечении трубы при кипении хладагента в испарителях судовых холодильных установок // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 80–84. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-80-84.

### Введение

Одним из достоинств испарителей с внутритрубным кипением является их малая заправка хладагентом, что особенно важно в судовых установках. Однако в этих аппаратах интенсивность теплоотдачи к хладагенту изменяется по ходу его движения, что связано с изменением гидродинамики потока.

Экспериментальное исследование теплоотдачи выполнено на специальном стенде в гладкой трубе из стали марки 1X18H9T диаметром 0,013 м, длиной 3,3 м и толщиной стенки 0,5 мм. В пяти сечениях по длине трубы установлено по четыре термомпары: три на трубе, в верхней, средней и нижней части, и одна в термогильзе для измерения температуры потока. Диапазон изменения режимных параметров: массовая скорость  $w_r = 30 \div 150$  кг/(м<sup>2</sup>·с); температура кипения  $t_0 = 5 \div -20$  °С; плотность теплового потока  $q = 1 \div 10$  кВт/м<sup>2</sup>, что соответствует условиям работы судовых холодильных установок [1]. Для визуальных наблюдений за структурой потока на входе и выходе трубы установлены стеклянные трубки, изготовленные из кварцевого стекла. Рабочее тело – смесевой холодильный агент R406a.

### Результаты визуальных наблюдений и опытов по кипению хладагента R406a в трубах

Участки для наблюдений за потоком позволили выделить следующие режимы движения двухфазного потока при полном выкипании жидкости в конце трубы: эмульсионный, снаряд-

ный (пробковый), волновой и расслоенный. При больших значениях массовой скорости –  $\omega_r > 100 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  – и плотностях теплового потока  $q > 7 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , при неполном выкипании жидкости в конце трубы наблюдались переходный (серповидный) и кольцевой режимы [2].

Интенсивность теплоотдачи к пару зависит от скорости его движения, а теплоотдача к кипящей жидкости – от двух составляющих: интенсивности кипения  $\alpha_{\text{кип}}$  и скорости движения жидкости  $\alpha_{\text{кон}}$ .

При эмульсионном движении, когда в потоке отмечаются отдельные паровые пузыри, движущиеся со скоростью жидкости, перегрев стенки трубы в верхней, средней и нижней точках по отношению к жидкости одинаков, поскольку теплоотдача здесь определяется в основном скоростью движения, поэтому по всему сечению коэффициенты теплоотдачи в верхней, средней и нижней точках  $\alpha_v, \alpha_{\text{ср}}, \alpha_n$  – равны. Известно, что отдельные паровые пузыри практически не интенсифицируют теплообмен, поэтому  $\alpha_{\text{кип}}$  отсутствует. С увеличением массовой скорости  $\omega_r$  возрастает длина эмульсионного потока, растут и коэффициенты теплоотдачи, с ростом теплового потока  $q$  уменьшается длина режима, а с ростом числа центров парообразования также возрастает коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

При снарядном режиме в верхней части трубы движутся большие паровые пузыри (пробки) со скоростью несколько большей скорости жидкости, но верх трубы постоянно смочен или перемычками жидкости между пузырями, или плёнкой жидкости в пузыре. Известно, что интенсивность теплоотдачи к испаряющейся плёнке очень высока и это приводит к росту  $\alpha_v$  и уменьшению нагрева стенки в этом месте. В средней части сечения за счёт контакта с быстро движущимися пузырями скорость жидкости несколько больше, чем внизу, поэтому  $\alpha_{\text{ср}} > \alpha_n$ ; отношение  $\alpha_{\text{ср}}$  и  $\alpha_v$  к  $\alpha_n$  представлено на рис. 1

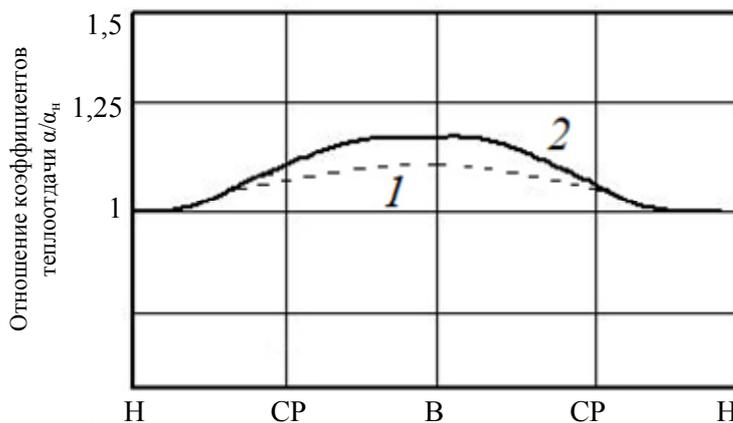


Рис. 1. Отношение  $\alpha/\alpha_n$  в сечении трубы при снарядном режиме ( $\omega_r = 50 \text{ кг}/\text{м}^2$ ;  $q = 1 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ;  $t_0 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ): 1 – начало режима; 2 – конец режима

С увеличением массового расхода  $\omega_r$  протяжённость участка трубы со снарядным режимом увеличивается, и в том же сечении разность температур стенки становится меньше. С увеличением плотности теплового потока  $q$  протяжённость снарядного режима сокращается. Он смещается ближе к входу трубы и раньше переходит в волновой.

По сравнению с эмульсионным потоком теплоотдача, как локальная, так и средняя, за счёт увеличения скорости становится выше, а перегрев стенки по отношению к температуре жидкости – меньше.

В волновом режиме скорость жидкости и особенно пара значительно выше, паровые объёмы больше, чем в снарядном режиме. За волной в верхней части трубы остаётся плёнка жидкости, но, в отличие от снарядного режима, перед следующей волной она успевает испариться, и волна набегаёт на сухую стенку, происходит частичное «запаривание» верхней части трубы. По мере развития волнового режима эффект «запаривания» возрастает, что приводит к ухудшению теплоотдачи.

На рис. 2 приведено соотношение коэффициентов теплоотдачи в одном сечении трубы при различной степени развития волнового движения.

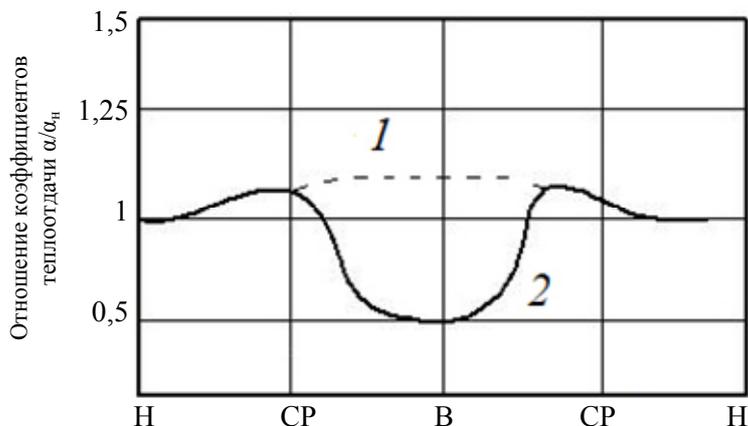


Рис. 2. Отношение  $\alpha/\alpha_n$  в сечении трубы при волновом режиме ( $\omega\rho = 100$  кг/м<sup>2</sup>;  $q = 2$  кВт/м<sup>2</sup>;  $t_0 = -20$  °С): 1 – начало режима; 2 – конец режима

В начале, когда сухая стенка невелика, за счёт высокой теплоотдачи к испаряющейся плёнке  $\alpha_b > \alpha_n$ . А  $\alpha_{cp} > \alpha_n$  потому, что середина трубы постоянно смочена или волной, или невысыхающей плёнкой. В конце волнового режима, когда число волн, достигающих верхней части трубы, мало, сухая стенка становится больше и за счёт малой теплоотдачи к пару  $\alpha_b$  значительно уменьшается, в то время как  $\alpha_{cp}$  и  $\alpha_n$  растут, что может в среднем компенсировать уменьшение  $\alpha_b$ . В сравнении со снарядным режимом средняя теплоотдача в потоке несколько выше.

При расслоенном режиме (рис. 3) волны не соприкасаются с верхом трубы, а по мере развития режима – и со средней её частью.

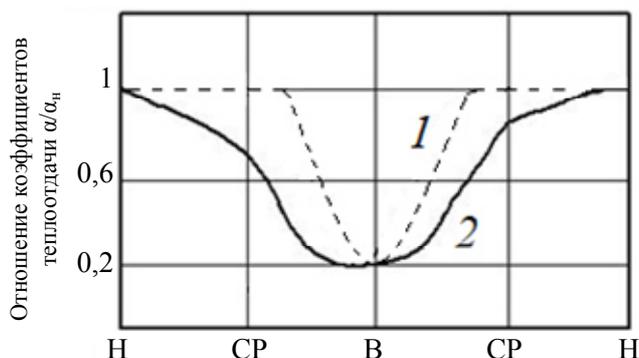


Рис. 3. Отношение  $\alpha/\alpha_n$  в сечении трубы при расслоенном режиме ( $\omega\rho = 100$  кг/м<sup>2</sup>;  $q = 10$  кВт/м<sup>2</sup>;  $t_0 = -10$  °С): 1 – начало режима; 2 – конец режима

Здесь теплообмен значительно хуже, чем в волновом режиме, но теплоотдача  $\alpha_n$  сначала растёт по мере роста скорости движения донного ручья, однако в хвостовой части трубы скорость ручья снижается из-за уменьшения уровня и трения о стенку трубы, несмотря на возрастающую скорость пара.

### Заключение

В испарителе судовых холодильных установок хладагент поступает после дросселирования с начальным массовым паросодержанием  $X = 0,1 \div 0,15$  кг/кг, что соответствует снарядному или волновому режиму. Эмульсионный режим может быть только в насосных схемах. Учитыв-

вая, что в компрессор не должна попасть жидкость из испарителя, протяжённость расслоенного режима с малой интенсивностью теплоотдачи будет значительной, поэтому коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , средний по трубе, в испарителях с внутритрубным кипением будет меньше, чем в затопленных испарителях судовых холодильных установок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин А. Ю., Букин В. Г., Минеев Ю. В. Экспериментальное исследование интенсивности теплообмена при движении двухфазового потока внутри горизонтальных труб // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2005. № 4 (27). С. 692–697.

2. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Минеев Ю. В. Обобщение экспериментальных данных по пародинамике и теплообмену при вынужденном движении двухфазного потока в трубах // НКТЭ – 2006: материалы докл. Нац. конф. по теплоэнергетике (Казань, 05–08 сентября 2006 г.). Казань: Изд-во КГТУ, 2006. Т. 1. С. 172–175.

3. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Влияние добавки масла на гидродинамику потока при кипении смесового хладагента в горизонтальной трубе // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 06–07 июня 2011 г.). СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. С. 139.

Статья поступила в редакцию 26.03.2019

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Букин Владимир Григорьевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

**Букин Александр Владимирович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.



### CHANGING INTENSITY OF HEAT TRANSFER IN THE PIPE SECTION DURING REFRIGERANT BOILING IN THE EVAPORATORS OF SHIP REFRIGERATING PLANTS

*V. G. Bukin, A. V. Bukin*

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the experimental evaporator as a research object, the evaporator model being given with boiling refrigerant R406A inside the pipe. The experiment in heat transfer was performed on a special stand inside a smooth pipe made of 1X18H9T grade steel with a diameter of 0.013 m, a length of 3.3 m, and a wall thickness of 0.5 mm. There has been studied the influence of the two-phase regimes of the working medium movement on heat exchange where it is boiling both along the length of the pipe and in its section. The comparison between heat transfer coefficients has been given. The visual observations over the flow structure were held. There were determined four regimes of two-phase flow: emulsion, slug, wavy, and stratified. Changing heat transfer coefficients in the upper, medium and bottom parts of the tube section has been shown. Changing of heat transfer was identified in the dependence of developing of the regimes. There has been proved the existence of dry wall in the upper part of the pipe under wave and stratified regimes, where the minimal heat transfer was recorded. Graphic dependences of changing the heat transfer coefficients in the pipe section for various regimes are presented. It has been stated that the intensity of heat transfer to steam depends on the speed of its movement, and the heat transfer to a boiling liquid depends on two components: boiling intensity and speed of the liquid movement. It

has been inferred that the refrigerant enters the evaporators of the ship refrigeration units after throttling with initial mass of steam content from 0.1 to 0.15 kg/kg, which corresponds to the projectile or wave mode; emulsion mode is possible only in pumping circuits; the length of the stratified regime with low heat transfer intensity will be the most significant.

**Key words:** heat transfer, heat transfer coefficient, two-phase flow, boiling, evaporator.

**For citation:** Bukin V. G., Bukin A. V. Changing intensity of heat transfer in the pipe section during refrigerant boiling in the evaporators of ship refrigerating plants. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;2:80-84. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-80-84.

#### REFERENCES

1. Kuz'min A. Iu., Bukin V. G., Mineev Iu. V. Eksperimental'noe issledovanie intensivnosti teploobmena pri dvizhenii dvukhfazovogo potoka vnutri gorizontaľnykh trub [Experimental study of heat transfer intensity during the movement of a two-phase flow inside horizontal pipes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 4 (27), pp. 692-697.
2. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Mineev Iu. V. Obobshchenie eksperimental'nykh dannykh po parodinamike i teploobmenu pri vynuždennom dvizhenii dvukhfaznogo potoka v trubakh. NKTE – 2006 [Generalization of experimental data on vapor dynamics and heat transfer under forced two-phase flow in pipes. NKTE – 2006]. *Materialy doklada Natsional'noi konferentsii po teploenergetike (Kazan', 05–08 sentiabria 2006 g.)*. Kazan', Izd-vo KGTU, 2006. Vol. 1. Pp. 172-175.
3. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Ezhov A. V. Vliianie dobavki masla na gidrodinamiku potoka pri kipenii smesevogo khladagenta v gorizontaľnoi trube. Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke [Influence of oil addition on hydrodynamics of flow at boiling of a mixed refrigerant in a horizontal pipe. Low-temperature and food technologies in the XXI century]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Sankt-Peterburg, 06–07 iyunia 2011 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGU ITMO, 2001. P. 139.

The article submitted to the editors 26.03.2019

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Bukin Vladimir Grigorevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinv@mail.ru.

**Bukin Aleksandr Vladimirovich** – Russia, 414056, Astrakhan, Astrakhan State Technical University; Assistant Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinv@mail.ru.

