

УДК 536.248

Влияние типа микроструктурирования стенки на теплообмен при кипении в стекающих пленках маловязкой жидкости*

О. А. Володин¹, Н. И. Печеркин¹, А. Н. Павленко¹, К. А. Степанов¹, Н. Н. Зубков²

¹ *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия*
e-mail: volodin_o@mail.ru

Поступила в редакцию 2.11.2018

После доработки 16.11.2018

Принята к публикации 16.11.2018

Представлены экспериментальные данные по влиянию геометрических характеристик микроструктуры поверхности на интенсификацию теплоотдачи при кипении в стекающих пленках жидкости. Исследовались два типа микроструктурирования: микрообребнение с полужакрытыми подповерхностными порами и микроштырьковые структуры. В качестве рабочей жидкости использовалась бинарная смесь хладонов R114/R21. Течение пленки осуществлялось по наружной поверхности вертикальных цилиндров в ламинарно-волновом режиме. Показано, что теплообменные поверхности с полужакрытыми подповерхностными микропорами имеют значительное преимущество в интенсификации теплоотдачи в режиме кипения по сравнению с микроструктурированными поверхностями, не имеющими прикрытых пор, а также с гладкой поверхностью.

Ключевые слова: стекающие пленки, интенсификация теплоотдачи, пузырьковое кипение, хладоны, метод деформирующего резания.

Введение

Стекающие тонкие пленки жидкости широко применяются в различных технологических процессах (абсорбция, ректификация, выпаривание, охлаждение и др.). Для интенсификации теплообмена в различных условиях (свободная конвекция, испарение, кипение, конденсация) эффективно используются сложные микро- и наноструктурированные поверхности, технологии изготовления которых заметно развились за последнее время [1]. Изучение влияния различных типов структурирования поверхности на теплообмен проводилось многими исследователями [2], ниже остановимся лишь на некото-

рых публикациях, наиболее близких по тематике к настоящей работе.

В работе [3] изучались теплообмен и гидродинамика при течении пленки смеси хладонов R114/R21 по наружной поверхности вертикальных труб с различной текстурой: гладкая поверхность, горизонтальное оребрение и ромбовидная текстура. Были измерены коэффициенты теплоотдачи для режимов испарения и пузырькового кипения, критические тепловые потоки, а также гидродинамические характеристики течения. Для исследованных поверхностей не было отмечено интенсификации теплообмена в режиме кипения, рост коэффициента теплоотдачи при испарении также был незначителен.

В статье [4] на поверхностях с трехмерным микрообребрением в условиях свободной конвекции было получено увеличение коэффициен-

* Работа выполнена в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00489), а также Программы ФНИ ГАН на 2013–2020 гг. (тема III.18.2.3).

та теплоотдачи при кипении дистиллированной воды в 4–5 раз и увеличение критического теплового потока до 6 раз. Микроструктурирование поверхности было получено методом деформирующего резания [5].

Авторами [6] проведено экспериментальное исследование теплообмена при кипении хладагента R21 на трубках с трехмерными капиллярно-пористыми покрытиями в условиях большого объема. Были использованы покрытия различной толщины, полученные методом плазменного напыления. На основе сравнения опытных данных показано, что коэффициенты теплоотдачи для трубки с пористым покрытием толщиной 500 мкм более чем в два раза превышают соответствующие значения для кипения жидкости на трубке без покрытия. Для покрытия с толщиной 100 мкм интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения не наблюдалась.

В работе [7] изучался теплообмен при кипении жидкого азота на горизонтальных трубках с капиллярно-пористыми покрытиями в условиях большого объема. Исследованные покрытия, изготовленные с помощью новой технологии плазменного напыления, имели различную толщину (400 и 1390 мкм), морфологию и степень пористости (до 80%). Было показано, что максимальная интенсификация (300%) теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью наблюдалась на покрытии толщиной 1390 мкм при низких тепловых потоках. Также авторы [7] показали, что переход к пленочному кипению при нестационарном тепловыделении на поверхностях с пористыми покрытиями различной толщины происходил при тепловых потоках, вдвое превышающих значения критических тепловых потоков, полученных для стационарных условий.

В работе [8], посвященной изучению теплообмена в стекающих пленках, представлены результаты расчета, моделирующего быстрое охлаждение стекающими пленками азота перегретой вертикальной медной пластины с капиллярно-пористым покрытием. Наличие пористого покрытия оказывает заметное влияние на динамику захлаживания, позволяя уменьшить время захлаживания более чем в три раза. Достоверность результатов проведенного численного моделирования подтверждается прямым сравнением с экспериментальными данными по динамике изменения температуры пластины, скорости и формы фронта захлаживания.

Следует отметить, что большинство современных работ, посвященных изучению интенсификации теплоотдачи на структурированных поверхностях, проводилось в условиях большого объема. В то же время известно, что теплообмен в гравитационных пленках жидкости обладает рядом особенностей (снос пузырей, брызгонос, вклад испарения со свободной поверхности в режиме кипения и др.), непосредственно связанных с тем, что процессы испарения и кипения развиваются в данном случае в стекающих под действием силы тяжести тонких слоях жидкости [9].

Также можно заметить, что промышленное изготовление ряда исследованных структурированных поверхностей (например, поверхностей, изготовленных с помощью методов плазменного напыления, 3D-печати и др.), потенциально весьма эффективных в плане интенсификации теплоотдачи, может оказаться слишком затратным, что делает необходимым поиск более экономичных и высокопроизводительных методов обработки.

Настоящая работа продолжает цикл исследований по интенсификации теплоотдачи [10] при течении пленок маловязкой высокосмачивающей жидкости на микроструктурированных поверхностях, полученных высокопроизводительным и экономичным методом деформирующего резания. Приведено сопоставление теплообменных характеристик исследованных авторами поверхностей, а также сравнение с теплообменными характеристиками известных коммерческих поверхностей серии «Gewa».

Методика эксперимента и объекты исследования

Схема экспериментальной установки для изучения теплообмена при пленочном течении бинарных смесей хладагентов показана на рис. 1. Подробное описание экспериментальной установки и методики эксперимента приведено в [11, 12]. Течение пленки смеси хладагентов R114/R21 осуществлялось на вертикально ориентированных цилиндрах диаметром 50 мм. Рабочая жидкость находилась в состоянии насыщения при давлении в рабочем объеме 2 бар. Толщина стенок цилиндров составляла 1.5 мм. Протяженность области микроструктурирования – 80 мм, зоны тепловыделения – 70 мм. Начало зоны тепловыделения располагалось после участка гидродинамической

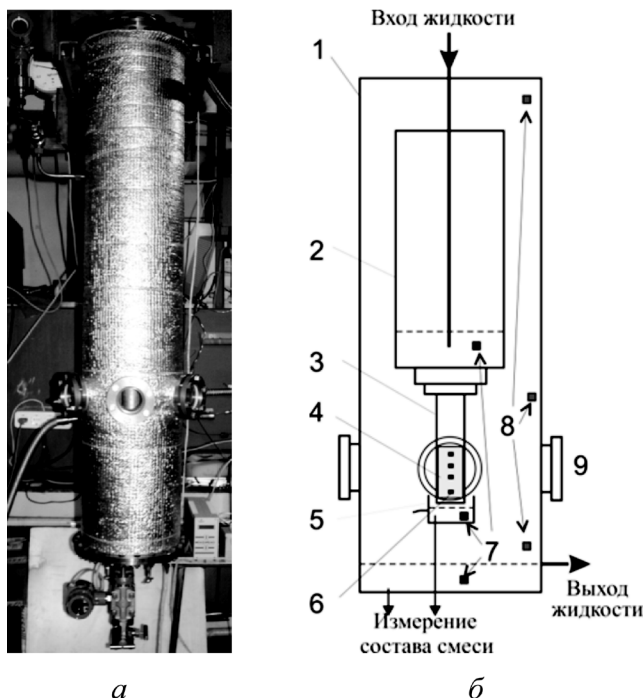


Рис. 1. Фотография (а) и схема экспериментальной установки (б): 1 – теплоизолированная колонна; 2 – расходный бак; 3 – рабочий участок; 4 – зона обогрева рабочего участка; 5 – приемный коллектор; 6 – медь-константановые термопары; 7 – места измерения температуры жидкой фазы; 8 – места измерения температуры паровой фазы

стабилизации течения пленки. Пленочное число Рейнольдса изменялось в диапазоне 300–1400 и определялось как $Re=4Q/(\pi \cdot d \cdot \nu)$, где Q – объемный расход жидкости, м³/с; d – диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Величина плотности теплового потока q во время опытов варьировалась от нуля до критических значений. Эксперименты проводились как на гладком эталонном участке с шероховатостью поверхности $R_a=2.5$ мкм, так и на участках с микроструктурированными поверхностями. Локальные температуры стенки измерялись дифференциальными медь-константановыми термопарами с диаметром проводов 0.15 мм. Горячие спаи термопар заделаны заподлицо с поверхностью, хо-

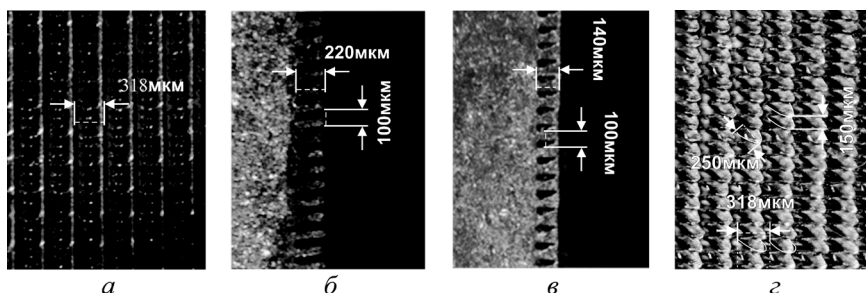


Рис. 2. Структура с полужакрытыми порами № 1: а – фронтальный вид; б – разрез вдоль ребер; в – разрез вдоль накатки. Микроштырьковая структура № 3 (г), вид сверху

лодные спаи погружены в слой жидкости на дне колонны. Температура в различных участках колонны, в том числе и в слое жидкости на дне колонны, измерялась с помощью малоинерционных термисторов серии HEL-700. Видеозапись течения пленки, развития процесса пузырькового кипения и кризисных явлений проводилась высокоскоростной видеокамерой с частотой до 2000 кадров в секунду. Во время проведения эксперимента также измерялись: расход жидкости, падение напряжения на нагревателе и ток в цепи, концентрация хладона R114 на входе и выходе участка (с помощью газового хроматографа), давление в объеме установки.

В работе исследовались два типа микроструктур: микрооребрение с полужакрытыми подповерхностными порами, полученными за счет накатки роликом, сплюсывающим вершины ребер (рис. 2, а–в) и микроштырьковые структуры, при формировании которых с помощью накатки создавался разрыв ребер в поперечном направлении (глубиной 100 мкм), формируя ряды вертикальных микроштырьков, рис. 2, г.

Для создания микроструктурированных поверхностей использовался метод деформирующего резания [5]. Это метод механической обработки, основанный на подрезании поверхностного слоя материала заготовки и последующей деформации подрезанного слоя с формированием макро- и микро рельефа в виде ребер, шипов, ячеек, резьбовых профилей. Метод деформирующего резания безотходен, не требует применения смазочно-охлаждающих жидкостей, реализуется на стандартном металлорежущем оборудовании и позволяет обрабатывать широкий диапазон пластичных материалов (медные и алюминиевые сплавы, титан, стали, термопластичные полимеры) с возможностью увеличения площади поверхности до 12 раз [5].

В таблице приведены типы и характерные параметры исследуемых в работе микроструктур.

Результаты исследований

На рис. 3 приведены кадры видеосъемки процесса кипения на эталонной гладкой поверхности и на поверхностях № 1 и № 4 (см. таблицу) при близких значениях рас-

ходов жидкости и плотностей теплового потока. Видно, что на микроструктуре № 1 с полузакрытыми подповерхностными порами центры парообразования расположены достаточно плотно, в то время как на микроштырьковой поверхности № 4 процесс парообразования в режиме развития кипения может происходить недостаточно равномерно.

На рис. 4 представлены характерные данные по влиянию теплового потока на коэффициент теплоотдачи для микроструктурированной поверхности № 1 для различных чисел Рейнольдса. При расчете плотности теплового потока значения подводимой мощности были отнесены к величине площади гладкой поверхности. Из рис. 4 видно, коэффициент теплоотдачи слабо возрастает с ростом q в режиме испарения ($q < 1$ Вт/см²), влияния расхода в этом режиме не наблюдается. В режиме пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи увеличивается с увеличением числа Re, расхождение значений более выражено при больших тепловых потоках – при достижении околокризисных значений теплового потока, когда на поверхности возникают замываемые сухие пятна.

На рис. 5 приведено сравнение коэффициента теплоотдачи для исследованных поверхностей. Видно, что в режиме кипения на микроструктурированных поверхностях № 1 и № 2 коэффициент теплоотдачи возрастает до трех раз по сравнению с гладкой поверхностью. Коэффициент теплоотдачи для микроструктурированной поверхности № 1 превышает значения, полученные для поверхности № 2 (с более крупными характеристиками), примерно на 25% в области развитого кипения. Коэф-

Параметры микроструктур

№	Тип микроструктуры	Шаг ребер, мкм	Высота ребер, мкм	Шаг накатки, мкм
1	Микроструктура с полузакрытыми порами	100	220	318
2	Микроструктура с полузакрытыми порами	200	440	318
3	Микроштырьковая структура	150	250	318
4	Микроштырьковая структура	300	500	318

фициенты теплоотдачи для микроштырьковых поверхностей № 3 и № 4 близки к значениям для гладкой поверхности, в режиме испарения наблюдается интенсификация теплообмена в два раза для поверхности № 3 и несколько меньшая интенсификация для поверхности № 4.

Таким образом, показано, что наличие полузакрытых подповерхностных микропор (поверхности № 1 и № 2), создающих готовые центры

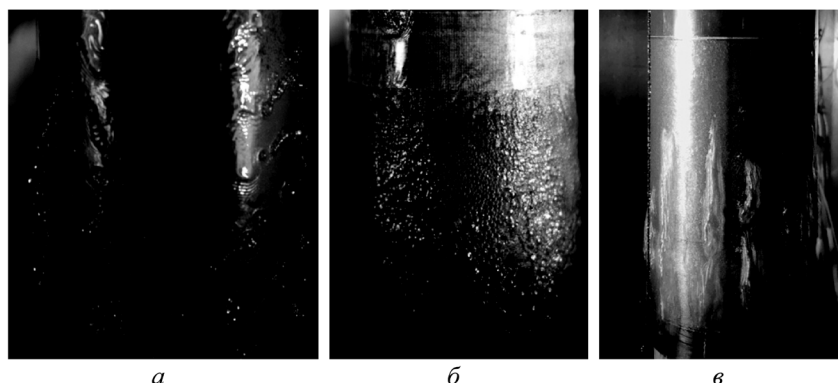


Рис. 3. Кипение на гладкой поверхности ($Re = 318, q = 3.5$ Вт/см²) (а); кипение на микроструктурированной поверхности № 1 ($Re = 370, q = 3.5$ Вт/см²) (б); кипение на микроштырьковой поверхности № 4 ($Re = 388, q = 2.3$ Вт/см²) (в)

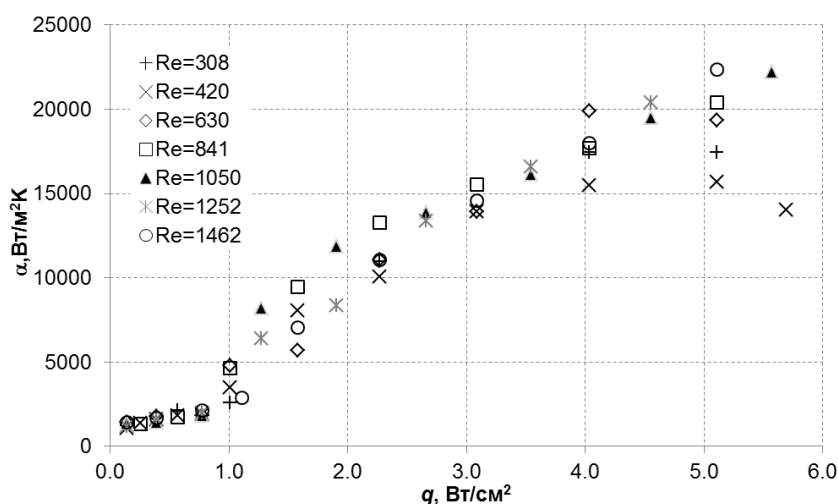


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных значений числа Re (микроструктура № 1)

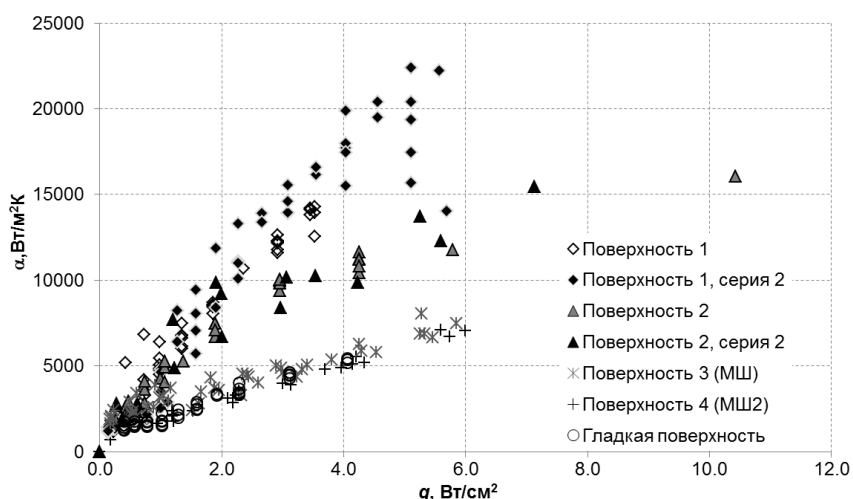


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных поверхностей

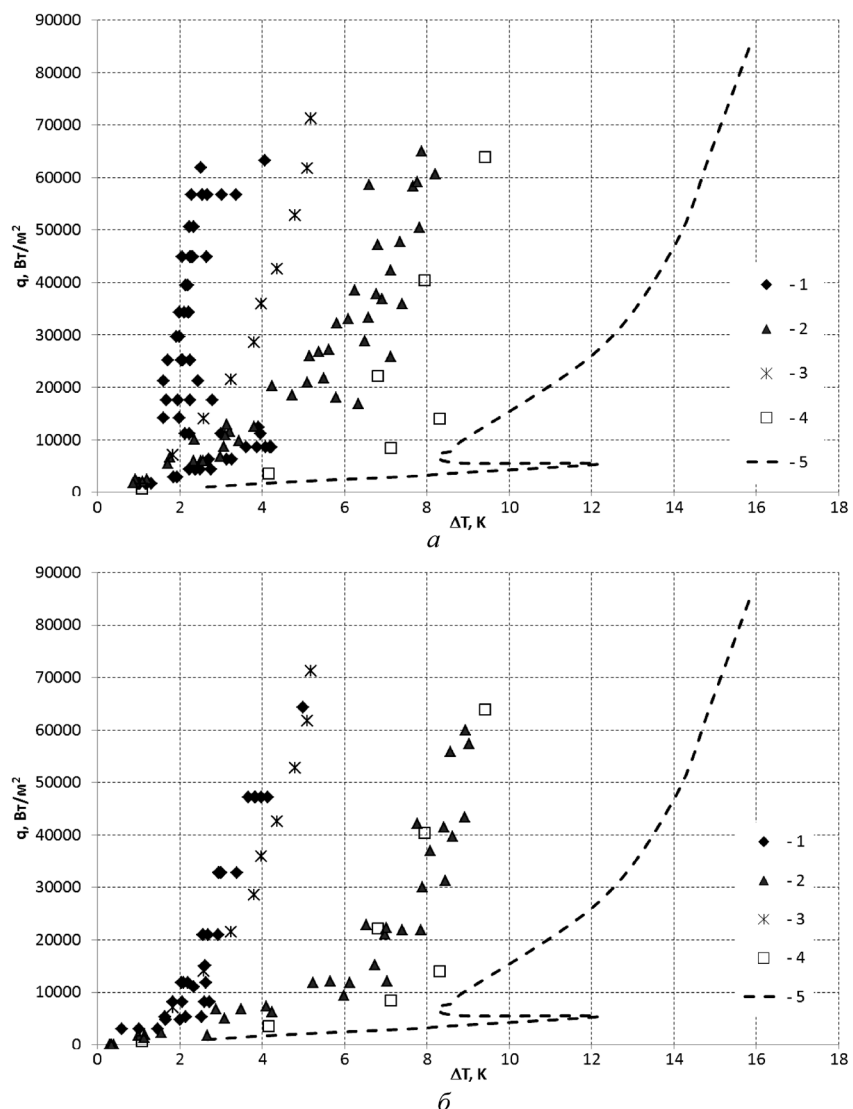


Рис. 6. Сравнение данных по зависимости теплового потока от температурного напора для различных поверхностей: а) 1, 2 – поверхности № 1 и 3; 3 – Gewa-T19D; 4 – Gewa-K19; 5 – гладкая поверхность [13]; б) 1, 2 – поверхности № 2 и 4; 3 – Gewa-T19D; 4 – Gewa-K19; 5 – гладкая поверхность [13]

парообразования, позволяет значительно интенсифицировать процесс пузырькового кипения. Микроштырьковые поверхности № 3 и № 4, не имеющие полузакрытых пор, в режиме кипения практически не дают преимущества по сравнению с гладкой поверхностью. Однако коэффициенты теплоотдачи в режиме испарения для таких поверхностей могут до двух раз превышать коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности.

На рис. 6, а, б в координатах $q-dT$ приведено сравнение полученных данных для микроструктурированных поверхностей №№ 1–4 с опытными данными [13]. Приведенные данные [13] получены для кипения хладона R113 на гладкой и структурированных поверхностях (Gewa-K19, Gewa-T19D) в условиях большого объема. Текстура поверхности Gewa-K19 представляет собой поперечное оребрение трубы, в то время как вершины ребер поверхности Gewa-T19D имеют расплюснутую Т-образную форму, близкую к форме сплюснутых накатным роликом ребер микроструктур № 1 и № 2.

Из рис. 6, а видно, что значения теплового потока для микроструктуры № 1 в области кипения лежат значительно выше значений, полученных для Gewa-K19 и Gewa-T19D, а кривая кипения имеет более крутой наклон, чем у приведенных на рис. 6, а зависимостей для других поверхностей. Величины тепловых потоков для микроштырьковой поверхности № 3, не имеющей прикрытых микропор, превышают значения для Gewa-K19, однако лежат ниже точек для

Gewa-T19D. Переход к режиму кипения для всех приведенных структурированных поверхностей начинается заметно раньше, чем для гладкой поверхности по данным [13].

Зависимость q от dT для микроструктурированной поверхности № 2 (рис. 6, б) примерно совпадает с зависимостью для Gewa-T19D, имея немного более крутой наклон в области развитого кипения. Значения теплового потока для микроштырьковой поверхности № 4 приблизительно совпадают с результатами для Gewa-K19.

Следует отметить, что величины теплового потока для стекающих по гладкой поверхности пленок жидкости (совпадающие со значениями, полученными для поверхности № 4, см. рис. 5), превышают величины q как для гладкой поверхности для условий большого объема [13], так и для поверхности Gewa-K19, – это в первую очередь связано с характерными особенностями испарения и кипения в тонких пленках жидкости, интенсифицирующими теплоотдачу [9].

Интенсификация теплоотдачи для микроструктурированных поверхностей № 1 и № 2 в сравнении с данными для Gewa-T19D и Gewa-K19, помимо отличий, обусловленных спецификой теплообмена в стекающих пленках, напрямую связана с меньшими характерными размерами микротекстур № 1 и № 2 и, как следствие, большим количеством готовых центров парообразования на единицу площади. Шаг оребрения для поверхностей № 1 и № 2 равен 100 и 200 мкм (см. таблицу), в то время как шаг для поверхностей Gewa-K19 и Gewa-T19D составлял 1.35 мм [13].

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи в режимах испарения и кипения для микроструктурированных поверхностей с полужакрытыми порами и для поверхностей с микроштырьковыми структурами. Показано, что наличие подповерхностных полужакрытых пор имеет существенное значение для интенсификации процессов кипения, в том числе для стекающих пленок.

Коэффициенты теплоотдачи для поверхностей с полужакрытыми микропорами в три и более раза превышают коэффициенты теплоотдачи для гладкой поверхности и исследованных микроштырьковых поверхностей.

Проведено сравнение с теплообменными характеристиками поверхностей Gewa-T19D и Gewa-K19, демонстрирующее эффективность разработанных авторами теплообменных поверхностей с полужакрытыми подповерхностными порами, полученных методом деформирующего резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Attinger D., Frankiewicz C., Betz A.R., Schutzius T.M., Ganguly R., Das A., Kim C.-J. and Megaridis C.M.** Surface engineering for phase change heat transfer: A review // *MRS Energy & Sustainability: A Review Journal*. 2014. V. 1. E4. DOI:10.1557/mre.2014.9
2. **Kim D.E., Yu D.I., Jerng D.W., Kim M.H., Ahn H.S.** Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. V. 66. P. 173–196. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2015.03.023
3. **Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A.** Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces // *Heat Transfer Engineering*. 2016. V. 37. N 3–4. P. 257–268. DOI: 10.1080/01457632.2015.1052657
4. **Shchelchkov A.V., Popov I.A. and Zubkov N.N.** Boiling of a liquid on microstructured surfaces under free-convection conditions // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. V. 89. N 5. P. 1152–1160. DOI: 10.1007/s10891-016-1478-5
5. **Thors P., Zoubkov N.** Pat.US 8573022 B2, Int. Cl. B21D53/01 Method for making enhanced heat transfer surfaces // Issued November 5, 2013.
6. **Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Kalita V.I., Kuznetsov D.V., Komlev D.I., Radyuk A.A., Ivannikov A.Yu.** The influence of three-dimensional capillary-porous coatings on heat transfer at liquid boiling // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. N 4. P. 391–394. DOI: 10.1134/S106378501604026X
7. **Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Kalita V.I., Komlev D.I., Ivannikov A.Yu., Radyuk A.A.** Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 108. P. 146–155. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.100
8. **Starodubtseva I.P., Pavlenko A.N.,** Quenching by falling cryogenic liquid film of extremely overheated plate with structured capillary-porous coating // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2018. V. 27. N 3. P. 294–302. DOI: 10.1134/S1810232818030049
9. **Гогонин И.И.** Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести // *ИФЖ*. 2010. № 4. С. 821–826. DOI:10.1007/s10891-010-0409-0
10. **Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.I.** Heat transfer and crisis phenomena at boiling of refrigerant films falling down the surfaces obtained by deformational cutting // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2017. V. 5. P. 215–222. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2018025507
11. **Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A.** Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in ref-

- rigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 90. N. 11. P. 149–158. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.050
12. 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.
 13. Ayub Z. H. Pool boiling from GEWA surfaces in water and R-113 (1986). *Retrospective Theses and Dissertations*. Paper 7979. DOI:10.1007/BF01004023

The effect of wall microstructuring type on heat transfer while boiling in the flowing-down films of low-viscosity liquid

O. A. Volodin¹, N. I. Pecherkin¹, A. N. Pavlenko¹, K. A. Stepanov¹, N. N. Zubkov²

¹*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, 630090, Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia*

e-mail: volodin_o@mail.ru

Being an effective mean of interfacial heat transfer, the flowing-down thin liquid films are widely used in various industrial processes, such as absorption, rectification, evaporation, cooling, etc. To intensify heat transfer in various technical applications, various types of complex structured surfaces are used. The problem of their geometry impact on heat transfer remains an important issue of heat power engineering due to the processing technologies development.

The paper presents experimental data on the surface microstructure geometric characteristics impact on the heat transfer enhancement while boiling in flowing-down liquid films. The authors studied two types of microstructures: micro-fins with semi-closed subsurface pores and micro-pin structures. A binary mixture of R114/R21 refrigerants, which is a low-viscosity and well-wetting fluid, was used as a working fluid. The liquid film flow was realized over the outward surface of vertical cylinders in the laminar-wave mode. The heat flux density varied from zero to critical values.

To create microstructured surfaces, the authors employed the method of deforming cutting (patent of the Russian Federation, Zubkov N. N.). This is a method of mechanical processing, based on the undercutting of the surface layer of the workpiece material and subsequent deformation of the trimmed layer with macro- and microrelief formation in the form of ribs, pins, cells, and screwed profiles. The method of deformational cutting is non-waste. This method does not require the cutting coolants application. It is being implemented with standard metal-cutting equipment and allows processing of various materials with possibility of the surface area increasing up to 12 times.

The authors obtained new experimental data on heat transfer coefficients in evaporation and boiling regimes for microstructured surfaces with semi-closed pores, and for surfaces with micro-pin structures. It was demonstrated that the presence of semi-closed subsurface micropores, creating active nucleation sites, could significantly intensify the nucleate boiling process.

The studied micro pin-type surfaces without semi-closed micropores in the boiling regime practically do not offer advantages compared to a smooth surface. However, the heat transfer coefficients in the evaporation regime for such surfaces can be up to two times higher than the heat transfer coefficient for a smooth one.

It was shown that the heat transfer coefficients in the boiling regime for surfaces with semi-closed micropores are three times or more higher than the heat transfer coefficients for a smooth surface. The results were compared with the heat transfer characteristics of Gewa-T19D and Gewa-K19 industrial surfaces. It demonstrates the effectiveness of heat transfer surfaces with semi-closed subsurface pores developed by the authors, obtained by high-performance and economical deformational cutting method.

Keywords: falling films, heat transfer intensification, nucleate boiling, refrigerants, deformational cutting method.

REFERENCES

1. Attinger D., Frankiewicz C., Betz A. R., Schutzius T. M., Ganguly R., Das A., Kim C.-J., Megaridis C. M. Surface engineering for phase change heat transfer: A review. *MRS Energy & Sustainability: A Review Journal*, 2014, vol. 1, E4. DOI:10.1557/mre.2014.9
2. Kim D. E., Yu D. I., Jerng D. W., Kim M. H., Ahn H. S. Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces. *Experimental Thermal and Fluid*

- Science*, 2015, vol. 66, pp. 173–196. DOI: 10.1016/j.exphemflusci.2015.03.023
3. **Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A.** Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces. *Heat Transfer Engineering*, 2016, vol. 37, no. 3–4, pp. 257–268. DOI: 10.1080/01457632.2015.1052657
 4. **Shchelchikov A. V., Popov I. A., Zubkov N. N.** Boiling of a liquid on microstructured surfaces under free-convection conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1152–1160. DOI: 10.1007/s10891-016-1478-5
 5. **Thors P., Zoubkov N.** *Method for making enhanced heat transfer surfaces*. Patent US, no. 8573022 B2, Int. Cl. B21D53/01, 2013.
 6. **Surtaev A. S., Pavlenko A. N., Kalita V. I., Kuznetsov D. V., Komlev D. I., Radyuk A. A., Ivannikov A. Yu.** The influence of three-dimensional capillary-porous coatings on heat transfer at liquid boiling. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 4, pp. 391–394. DOI: 10.1134/S106378501604026X
 7. **Surtaev A. S., Pavlenko A. N., Kuznetsov D. V., Kalita V. I., Komlev D. I., Ivannikov A. Yu., Radyuk A. A.** Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings. *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 108, pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.100
 8. **Starodubtseva I. P., Pavlenko A. N.** Quenching by falling cryogenic liquid film of extremely overheated plate with structured capillary-porous coating. *Journal of Engineering Thermophysic*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 294–302. DOI: 10.1134/S1810232818030049
 9. **Gogonin I. I.** Heat transfer in boiling of liquid in a film moving under gravity. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 876–881. DOI:10.1007/S10891-010-0409-0
 10. **Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Zubkov N. I.** Heat transfer and crisis phenomena at boiling of refrigerant films falling down the surfaces obtained by deformational cutting. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2017, vol. 5, pp. 215–222. DOI:10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2018025507
 11. **Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A.** Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 90, no. 11, pp. 149–158. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.050
 12. **Pavlenko A. N., Pecherkin N. I., Volodin O. A.** *Teploobmen i krizisnye yavleniya v stekayushhikh plenках zhidkosti pri isparenii i kipenii* [Heat transfer and crisis phenomena in the falling liquid films at evaporation and boiling]. Novosibirsk: SB RAS Press, 2016. 196 p. In Russ.
 13. **Ayub Z. H.** *Pool boiling from GEWA surfaces in water and R-113 (1986)*. Retrospective Theses and Dissertations. Paper 7979. DOI:10.1007/BF01004023