

УДК 536.24

## СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

**А. В. ШАПОВАЛОВ, Н. М. КИДУН, Т. Н. НИКУЛИНА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлен обзор современных исследований по интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах. Рассмотрены доступные в реализации методы модификации поверхностей для интенсификации теплообмена.*

**Ключевые слова:** термосифон, пародинамический термосифон, энергосберегающая технология, интенсификация теплообмена, модификация поверхностей теплообмена, кипение в мини-каналах.

## METHODS OF INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN HEAT TRANSFER DEVICES

**A. V. SHAPOVALOV, N. M. KIDUN, T. N. NIKULINA**

*Educational institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus*

*An overview of modern studies on intensification of heat exchange in heat transfer devices is presented. Methods of surface modification for intensification of heat exchange are considered.*

**Keywords:** thermosyphon, parodynamic thermosyphon, energy-saving technology, intensification of heat exchange, modification of heat exchange surfaces, boiling in mini-channels.

### **Введение**

С целью повышения эффективности энерготехнологических установок предусмотрено совершенствование теплообменного оборудования с помощью внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена.

Посредством интенсификации теплообмена увеличивается количество тепла, передаваемого через единицу поверхности теплообмена и, соответственно, уменьшаются массогабаритные показатели теплообменного оборудования; достигается более выгодное соотношение между передаваемым количеством тепла и мощностью оборудования; улучшаются общие характеристики энерготехнологических установок [1].

Различные способы интенсификации теплообмена разработаны и исследованы в неодинаковой степени, лишь часть из них доведена до уровня промышленного использования. Общие физические принципы, объясняющие возможность получения положительного эффекта в случае их применения, известны давно, однако зависимости для расчета теплообмена при изменении геометрических параметров интенсификаторов теплообмена в различных условиях определены далеко не в полной мере.

### **Основная часть**

При проведении анализа работ по экспериментальному исследованию интенсивности процесса теплообмена при фазовых переходах теплоносителей в современных теплообменниках определены следующие основные способы интенсификации теплообмена [1]–[42]:

### 1. Способы интенсификации теплообмена путем модификации теплообменных поверхностей

Доступными для широкого применения и при этом эффективными в плане интенсификации теплоотдачи при кипении и испарении являются различные промышленные и авторские способы создания микроструктурированных двух- и трехмерных поверхностей с применением накатки, фрезерования, резания и прочих методов механической обработки материалов (включая использование проволочных/сеточных покрытий), увеличивающих площадь, пористость и шероховатость теплообменной поверхности [2], [3].

#### Применение коммерческих интенсифицирующих поверхностей и авторских поверхностей, полученных механической обработкой

В работе [4] описаны результаты экспериментального исследования пузырькового кипения хладона R123 на интенсифицирующей поверхности – горизонтально ориентированной трубе с трехмерной микроструктурой, произведенной Wolverine Tube, Inc. (рис. 1). Наименование трубы и характеристики ее микроструктуры авторами не указаны. Сообщается об увеличении теплоотдачи при кипении на модифицированной трубе по сравнению с эталонной гладкой от шести до десяти раз.

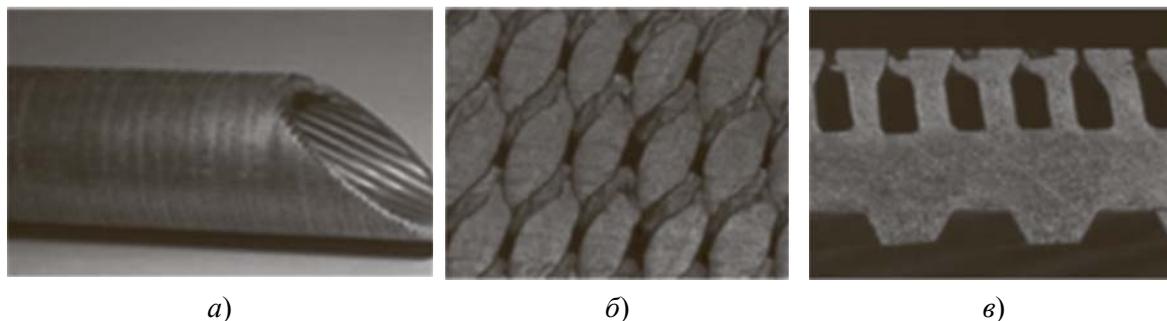


Рис. 1. Снимки экспериментальной трубы: а – сегмент трубы, демонстрирующий ее наружную и внутреннюю поверхности; б – увеличенное изображение наружной микроструктурированной поверхности; в – увеличенное изображение поперечного разреза стенки трубы [66]

Ли и другими [5] проводились экспериментальные исследования теплообмена при испарении пленок, стекающих по пакету из шести горизонтальных модифицированных труб в условиях вакуума. Были протестированы новые интенсифицирующие трубы двух типов: Turbo-SAB (с количеством штырьков 19 и 26 шт./дюйм) и Korodense при изменении пленочного числа Рейнольдса  $Re$  от 10 до 110 (рис. 2). Режим пузырькового кипения не рассматривался. Сообщается, что трубы, имеющие помимо внешней также внутреннюю структуру (т. е. Korodense), показали наилучшие результаты по теплоотдаче при испарении. В работе также предложены корреляции для расчета коэффициента теплоотдачи и величин интенсификации для модифицированных труб, описывающие полученные опытные данные с точностью  $\pm 30\%$ .

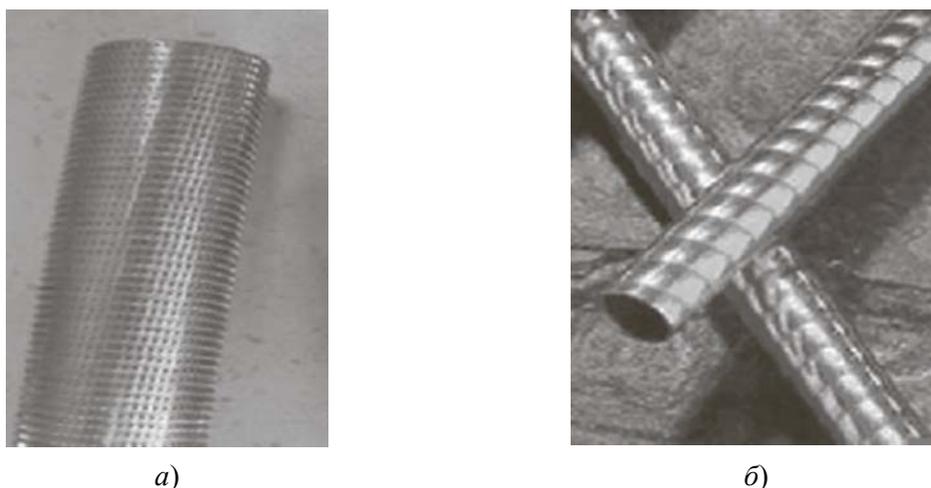


Рис. 2. Интенсифицирующие поверхности:  
а – Turbo-SAB (19 шт./дюйм); б – Korodense [5]

В качестве конкурентоспособного метода создания интенсифицирующих теплообменных поверхностей можно назвать метод деформирующего резания (МДР – метод, разработанный российскими учеными для создания микроструктурированных поверхностей). Это доступный и эффективный метод прецизионной механической обработки пластичных материалов, основанный на подрезании поверхностного слоя заготовки и последующей его деформации с формированием макро- и микрорельефа в виде ребер, шипов, ячеек или резьбовых профилей. Он дает возможность создавать сложные поверхности для интенсификации теплообмена при кипении (рис. 3, а) с увеличением площади обрабатываемой поверхности до 12 раз (см. [6]–[9]), а с учетом нового патента [10] и вплоть до 48 раз, позволяя создавать сверхплотные микроштырьковые структуры с количеством штырьков до 400 шт./мм<sup>2</sup> (рис. 3, б). Подробное описание метода приведено в [11].

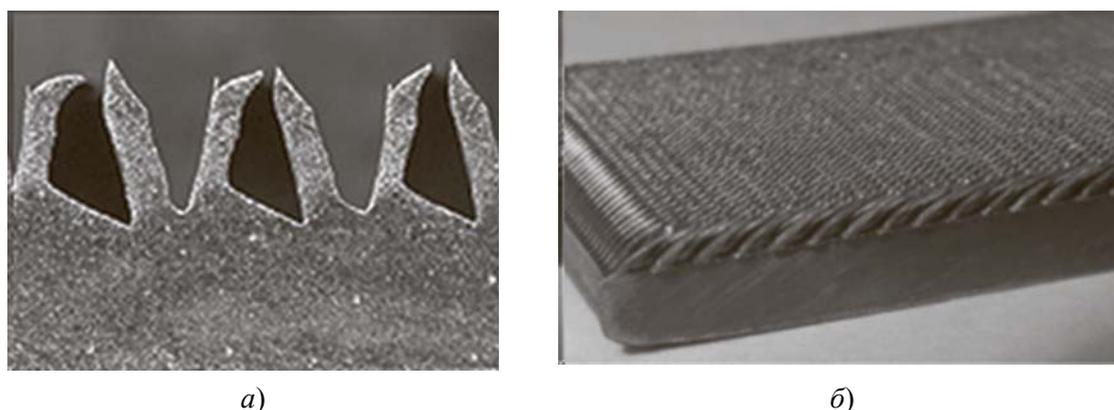


Рис. 3. Поверхности, полученные методом деформирующего резания:  
а – микроструктурированная поверхность кипения [12];  
б – сверхплотная микроштырьковая структура [10]

В работе [13] представлены результаты испытаний теплонасосной установки, в испарителе и конденсаторе которой были установлены пучки труб, обработанных по технологии деформирующего резания. Произведена оценка повышения эффективности кипения и конденсации фреона в рассматриваемых аппаратах по сравнению с аналогичными процессами на гладких трубах. Показано, что при вынужденном течении хладагента в межтрубном пространстве испарителя коэффициенты теплоотда-

чи при кипении возрастают в 3–5 раз, а при конденсации пара на ошпированной поверхности – в 9–21 раз по сравнению с гладкими трубами.

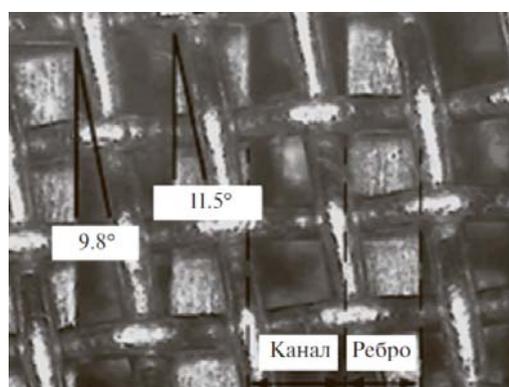
Причиной такого существенного повышения эффективности теплоотдачи конденсирующегося фреона может служить появление капиллярного эффекта на пучке труб конденсатора вследствие особенностей макрорельефа поверхности.

Исследования по интенсификации теплообмена с применением модифицированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, также проводились в работах И. А. Попова и др. [14], О. А. Володина и др. [15]–[19], А. Н. Павленко и др. [20], а также К. Степанова и др. [21].

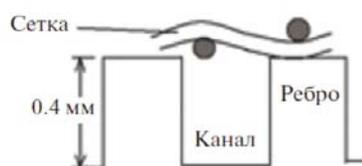
### Интенсификация кипения и испарения с помощью проволочных покрытий

Применение сеточных покрытий является достаточно простым и доступным, но не слишком популярным способом интенсификации теплоотдачи. Как показано ниже, развитие данного метода в современных экспериментальных работах [22]–[24] позволяет добиваться результатов сопоставимых, а иногда и превышающих результаты, полученные с применением специализированных коммерческих поверхностей кипения или авторских микроструктурированных поверхностей, полученных более сложными методами.

В [22] исследовали теплообмен при кипении и испарении хладона R245fa на горизонтальных медных модифицированных трубах. Были протестированы оребренная труба с высотой ребер 0,4 мм и частотой оребрения 60 ед./дюйм, а также труба с комбинированной поверхностью – сеточным покрытием поверх микрооробрения (рис. 4). Для комбинированного покрытия получены четырех- и семикратные значения интенсификации теплоотдачи при кипении в большом объеме хладона R245fa при температурах насыщения 5 и 20 °С соответственно.



а)



б)

Рис. 4. Комбинированное покрытие (оробрение + сетка) [22]:  
а – фотоснимок, вид сверху; б – схематическое изображение, вид сбоку

В [23] исследовалась интенсификация теплообмена при применении тонких металлических сеток с различным количеством слоев (1–4). Рабочей жидкостью служил спирт. Авторами достигнута значительная интенсификация теплоотдачи в ре-

жиме кипения – около восьми раз, продемонстрировано значительное снижение температурного напора. Показано, что применение четвертого слоя сетки ухудшает теплоотдачу.

С целью интенсификации кипения в [24] применялись многослойные медные сеточные покрытия с градиентной пористостью. Максимальные увеличения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи получены авторами при использовании градиентного покрытия из трех мелких и трех более грубых сеток (наложенных сверху) и составили 6,6 и 3 раза соответственно.

В работе [25] проводились исследования по интенсификации кипения с использованием диэлектрического фторуглерода PF5060. Эксперименты проводились как в условиях большого объема, так и в геометрически ограниченных условиях. Использовались три типа проволочных покрытий (из меди или бронзы) с параметрами 8 проволок/см (диаметр – 406 мкм), 20 проволок/см (диаметр – 229 мкм) и 59 проволок/см (диаметр – 66 мкм). Наибольшее увеличение коэффициента теплоотдачи достигало четырех раз по сравнению с гладкой поверхностью и наблюдалось для покрытия, содержащего 20 проволок/см.

#### **Применение оребрения, изменение шероховатости, влияние материала**

С помощью относительно простых методов модификации поверхностей (накатка, фрезерование, шлифование) также можно заметно интенсифицировать теплоотдачу при кипении и испарении жидкости и увеличить значения критического теплового потока.

В [26] исследовалось кипение хладона R134a на гладкой и микрооробренной поверхностях в диапазоне давлений 6,1–12,2 бар (рис. 5). Основываясь на измерениях локальных температур стенки, авторами показано, что теплоотдача для микрооробренной трубы с канавками треугольной формы несколько выше, чем для гладкой. Однако интенсификация заметна только при относительно высоких тепловых потоках и лишь на нижней части трубы, что связано с ростом крупных пузырей с «сухими пятнами» в основании трубы, тогда как в случае микрооробренной поверхности часть жидкости продолжает удерживаться в канавках, затягивая развитие кризиса пузырькового кипения.

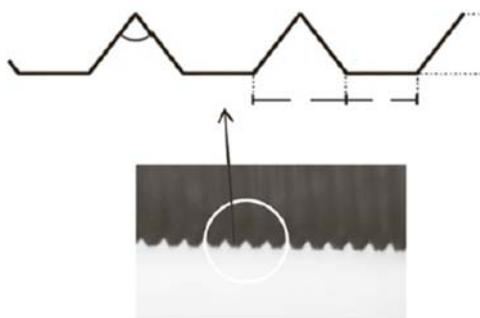


Рис. 5. Микрооробренная поверхность с канавками треугольной формы [26]:  
высота ребер  $h = 148$  мкм, межреберный зазор  $b = 172$  мкм;  
основание ребра  $s = 228$  мкм;  $\alpha = 75^\circ$

Хорошо известным и доступным способом интенсификации кипения является создание шероховатости поверхности, получаемое с помощью пескоструйной обработки, шлифования, химического травления и т. д. Еще в 1962 г. Беренсоном [27] сообщалось об увеличении теплоотдачи при кипении на шероховатых поверхностях до 600 %. Исследования по уточнению влияния шероховатости на интенсификацию теплообмена в настоящее время продолжают в отдельных работах.

В [28] изучалось влияние микрошероховатости при кипении воды и FC-77 на микрошероховатых поверхностях, полученных методом электрического разряда. Показано значительное влияние используемой рабочей жидкости на получаемую интенсификацию. Теплоотдача при кипении FC-77 сильнее зависела от степени шероховатости, чем в случае кипения воды. Для FC-77 наиболее шероховатая поверхность показала увеличение коэффициента теплоотдачи на 210 % в сравнении с полированной, тогда как для воды наблюдалась более умеренная интенсификация на 100 %.

Применение только наносероховатых поверхностей не дает возможности достичь высоких значений интенсификации. Современные исследования лишь уточняют влияние наносероховатости на теплоотдачу.

Следует отметить, что для корректной постановки экспериментов и сопоставления опытных данных важно учитывать влияние материала поверхности и толщины стенки на теплоотдачу. В [29] показано, что теплообмен при кипении криогенных жидкостей существенно зависит от теплофизических характеристик стенки и ее толщины, в то время как в [30] считают, что при кипении обычных жидкостей на поверхностях из латуни, меди, мельхиора и нержавеющей стали материал не оказывает влияния на теплоотдачу. И. И. Гогонин [31] показывает, что теплофизические свойства тепловыделяющей поверхности могут существенно влиять на теплообмен не только криогенных жидкостей, но и хладагенов.

В экспериментальном исследовании [32] было выявлено заметное влияние материала поверхности на теплоотдачу. Медная поверхность показала наибольшие значения коэффициента теплоотдачи, алюминиевая – наименьшие. Наблюдаемая разница была незначительной в области низких тепловых потоков, однако при высоких тепловых потоках достигала 23 % для медной поверхности и 18 % для латунной при сравнении с теплоотдачей алюминиевой поверхности.

## 2. Способы интенсификации теплообмена в стесненных условиях

В работах [34]–[38] экспериментально изучались теплогидродинамические характеристики при кипении воды, R134a в мини-, микроканалах с гидравлическим диаметром от 0,2 до 1 мм.

П. Хрнъяк [34] изучал процессы кипения хладагентов R134a, R410A и водовоздушные смеси в мини-каналах с гидравлическим диаметром канала 1 мм. В работах Д. Ховалыг и А. В. Бараненко [33] исследовалось кипение хладагента R134a в канале с гидравлическим диаметром  $D_h = 0,5$  мм при положительных температурах. В этих работах были отмечены следующие преимущества миниканальных технологий:

- высокий коэффициент теплоотдачи;
- высокая коррозионная стойкость, надежность;
- малый объем заправки рабочего вещества;
- малые габариты и масса теплообменника и т. д.

В работе [39] также было отмечено превышение интенсивности теплообмена при кипении в мини-каналах в 2÷4 раза по сравнению с теплоотдачей в трубах.

Между тем, наряду с высокой тепловой эффективностью мини-каналов, была выявлена область неустойчивого течения двухфазных потоков при значении массовой скорости  $w_p < 160$  кг/(с · м<sup>2</sup>) [37], что сопровождалось резким возрастанием потерь давления и пульсации в канале. Это явление не отмечалось ни одним из исследователей кипения в трубах.

Из анализа литературных источников следует, что накоплен значительный экспериментальный материал, посвященный изучению процессов кипения различных жидкостей в мини-, микроканалах. При этом в основном результаты исследований относятся к решению отдельных вопросов теплообмена либо гидродинамики.

В работах [5]–[7], [9], основываясь на изучении процессов кипения хладагентов в трубах [33], были разработаны основы комплексного подхода к исследованию и моделированию теплогидродинамических процессов в трубах и мини-каналах. Комплексный метод включает: разработку методики прогнозирования режимов течения, методику расчета скольжения фаз, локального теплообмена с учетом режимов течения и истинных скоростей фаз.

Реализация комплексного метода, помимо проведенной расчетно-теоретической проработки, требует экспериментальной апробации в широком диапазоне температур, геометрических параметров и, кроме того, необходимо уточнение вопроса устойчивости двухфазного потока в мини-канале и потерь давления.

### 3. Модернизация экспериментальной установки

На кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» проводятся экспериментальные исследования работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств. Создан экспериментальный стенд, разработана методика работы двухфазных пародинамических термосифонов с внутренними кольцевыми вставками (рис. 6, б) и термосифонов классической конструкции без внутренних циркуляционных вставок (рис. 6, а), заправленных разными теплоносителями (водой, R134а, R404А, R407С, R410А). Подробно результаты экспериментов представлены в [43], [44].

На основании проведенного обзора существующих методов интенсификации теплообмена теплопередающих поверхностей были определены варианты модернизации экспериментальной установки:

а) в зоне конденсации предложено выполнить наружное поперечное оребрение поверхности конденсатора. Материал ребра – латунь, толщиной 15 мм. Всего необходимо припаять 202 ребра, шаг оребрения выбран 2 мм, высота ребер 16 мм. Данный тип оребрения позволит увеличить тепловой поток без увеличения затрат мощности;

б) в зоне парообразования предложено изменить кольцевой зазор, за счет изменения диаметров внутренней трубки (материал трубки – медь, диаметр – 20 и 15 мм, длина – 1 м). За счет изменения ширины парового канала планируется увеличить теплообмен в зоне парообразования.

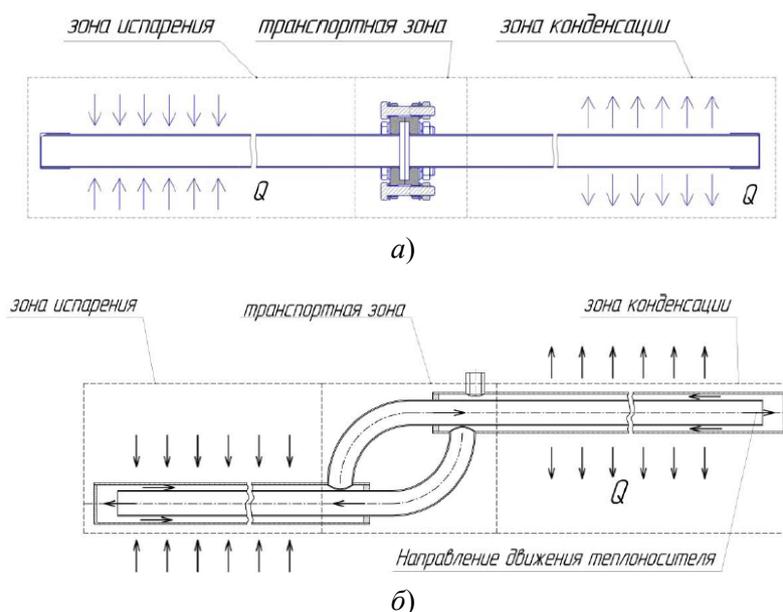


Рис. 6. Термосифон классической конструкции (а) и пародинамический термосифон с внутренними цилиндрическими вставками (б)

### Заключение

Подводя итоги, можно отметить следующее:

- существует достаточное количество известных и современных методов модификации поверхностей для интенсификации теплообмена;
- решение о применении того или иного метода интенсификации теплообмена необходимо принимать, руководствуясь специфическими аспектами для каждого рассматриваемого случая;
- о влиянии различных методов модификации теплообменной поверхности на интенсификацию теплообмена можно судить только после проведения экспериментов и сравнения полученных результатов с уже известными.

### Литература

1. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушно-го охлаждения : справочник / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш ; под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессоного. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
2. Дзюбенко, Б. В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б. В. Дзюбенко, Ю. А. Кузма-Китча, А. И. Леонтьев. – М. : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. – 539 с.
3. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 280–312.
4. Chen, T. An Experimental Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer from an Enhanced Cylindrical Surface / T. Chen // Appl. Therm. Eng. – 2013. – Vol. 59, iss. 1–2. – P. 355.
5. Falling Water Film Evaporation on Newly-Designed Enhanced Tube Bundles / W. Li [et al.] // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2011. – Vol. 54, iss. 13–14. – P. 2990.
6. Thors, P. Heat Transfer Tube Including Enhanced Heat Transfer Surfaces / P. Thors, N. Zoubkov. – US. Patent 7311137, 2007.
7. Thors, P. Method for Making Enhanced Heat Transfer Surfaces / P. Thors, N. Zoubkov. – US. Patent 8573022, 2013.
8. Zoubkov, N. N. Tool-Workpiece Interaction in Deformational Cutting / N. N. Zoubkov, A. I. Ovchinnikov, S. G. Vasil'ev // Russ. Eng. Res. – 2016. – Vol. 36, № 3. – P. 209.
9. Yakomaskin, A. A. Investigation of Heat Transfer in Evaporator of Microchannel Loop Heat Pipe / A. A. Yakomaskin [et al.] // J. Heat Transfer. – 2013. – Vol. 135, № 10. – P. 101006.
10. Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности : пат. 2679815 Рос. Федерация : МПК В21D53/02 (2006.01) / Зубков Н. Н., Битюцкая Ю. Л. ; заявитель МГТУ им. Н. Э. Баумана ; заявл. 28.12.17 ; опубл. 13.02.2019, Бюл. № 5.
11. Битюцкая, Ю. Л. Получение штырьковых теплообменных структур повышенной теплогидравлической эффективности методом деформирующего резания : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Ю. Л. Битюцкая. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.
12. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением / И. А. Попов [и др.] // ТВТ. – 2017. – Т. 55, вып. 4. – С. 537.
13. Антаненкова, И. С. Теплотехнические характеристики испарителя и конденсатора ТНУ на R22 с поверхностями, обработанными по технологии деформирующего резания / И. С. Антаненкова, А. А. Сухих, Е. В. Ежов // Холод. техника. – 2016. – № 10. – С. 30.

14. Теплоотдача при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях / И. А. Попов [и др.] // Изв. вузов. Авиац. техника. – 2014. – № 4. – С. 49.
15. Влияние типа структурирования поверхности на теплоотдачу при испарении и кипении в стекающих пленках / О. А. Володин [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 157.
16. Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling Down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting / O. A. Volodin [et al.] // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2017. – Vol. 5. – P. 215.
17. Transfer at Boiling of R114/R21 Refrigerants Mixture Film on Microstructured Surfaces / O. A. Volodin [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. – 2017. – Vol. 917, № 1. – P. 012035.
18. Влияние типа микроструктурирования стенки на теплообмен при кипении в стекающих пленках маловязкой жидкости / О. А. Володин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 16.
19. The Influence of the Surface Structuring Type on Heat Transfer in Falling Films of Refrigerant Mixture / O. A. Volodin [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. – 2019. – Vol. 1369, № 1. – P. 012046.
20. Heat Transfer and Dynamics of Transient Processes at Liquid Film Flowing on Smooth and Modified Surfaces / A. N. Pavlenko [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. – 2019. – Vol. 1369, № 1. – P. 012052.
21. Stepanov, K. Desorption of Aqueous Solution of Lithium Bromide on Enhanced Surfaces in a Single-Stage Lithium-Bromide Absorption Chiller / K. Stepanov, D. Mukhin, N. Zubkov // J. Eng. Thermophys. – 2019. – Vol. 28, № 4. – P. 529.
22. Chien, L. H. An Experimental Study of Pool Boiling and Falling Film Vaporization on Horizontal Tubes in R-245fa / L. H. Chien, Y. L. Tsai // Appl. Therm. Eng. – 2011. – Vol. 31, № 17/18. – P. 4044.
23. Dąbek, L. Ethyl Alcohol Boiling Heat Transfer on Multilayer Meshed Surfaces AIP Conference Proceedings / L. Dąbek, A. Kapjor, Ł. J. Orman // AIP Publ. LLC. – 2016. – Vol. 1745, № 1. – P. 020005.
24. Extraordinary Boiling Enhancement through Micro-Chimney Effects in Gradient Porous Micromeshes for High-Power Applications / S. Zhang [et al.] // Energy Convers. Manage. – 2020. – Vol. 209. – P. 112665.
25. Gerlach, D. W. Boiling Performance of Fluorinert PF 5060 on Confined and Unconfined Wire Meshes Soldered to the Substrate / D. W. Gerlach, Y. K. Joshi // ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2005. – P. 807–811.
26. Nucleate Pool Boiling of R-134a on Plain and Micro-Finned Tubes / S. P. Rocha [et al.] // Int. J. Refrigeration. – 2013. – Vol. 36, № 2. – P. 456.
27. Berenson, P. J. Experiments on Pool-Boiling Heat Transfer / P. J. Berenson // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1962. – Vol. 5, № 10. – P. 985.
28. Jones B. J. The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer / B. J. Jones, J. P. McHale, S. V. Garimella // J. Heat Transfer. – 2009. – Vol. 131, № 12. – P. 121009.
29. Григорьев, В. А. Кипение криогенных жидкостей / В. А. Григорьев, Ю. М. Павлов, Е. В. Аметистов. – М. : Энергия, 1977. – 289 с.

30. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высш. шк., 1986. – 447 с.
31. Гогонин, И. И. Зависимость теплообмена при кипении от свойств и геометрических параметров теплоотдающей стенки / И. И. Гогонин // ТВТ. – 2006. – Vol. 44, № 6. – С. 918.
32. Concerning the Effect of Surface Material on Nucleate Boiling Heat Transfer of R-113 / R. Hosseini [et al.] // ASME/JSME 2011 8th Therm. Eng. Joint Conf. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
33. Khovalyg, D. Two phase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels / D. M. Khovalyg, A. V. Baranenko // TechnicalPhysics. – 2015. – Vol. 85, № 3. – P. 34–41.
34. Niño V. G., P. S. Hrnjak and T. A. Newell Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October 2002.
35. Кузнецов, В. В. Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладагона R318с в кольцевом миниканале / В. В. Кузнецов, А. С. Шамирзаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 57–65.
36. Исследование теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды в канале малого диаметра / К. Сузуки [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 7. – С. 307–311.
37. Ховалыг, Д. М. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах / Д. М. Ховалыг, А. В. Бараненко // Холод. техника. – 2013. – № 10. – С. 45–47.
38. Шустов, М. В. Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / М. В. Шустов ; Моск. экон. ин-т. – М., 2015. – 26 с.
39. Малышев, А. А. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов : учеб.-метод. пособие / А. А. Малышев, В. О. Мамченко, К. В. Киссер. – СПб. : Ун-т ИТМО, 2016. – 116 с.
40. Малышев, А. А. Разработка карты режимов кипения R134a, R12, R22, NH<sub>3</sub>, водовоздушных смесей и воды в каналах диаметром 6 мм / А. А. Малышев, К. В. Киссер // НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2015. – № 4. – С. 46–51.
41. Малышев, А. А. Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах / А. А. Малышев, К. В. Киссер, А. В. Зайцев // Вестн. Междунар. акад. холода. – 2017. – № 2. – С. 53–56.
42. Малышев, А. А. Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах / А. А. Малышев, К. В. Киссер, А. С. Филатов // Вестн. Междунар. акад. холода. – 2016. – № 2. – С. 67–70.
43. Экспериментальное исследование пародинамического термосифона с кольцевыми каналами в испарителе и конденсаторе / Л. Л. Васильев [и др.] // Тепло- и массоперенос 2015 : сб. науч. тр. – Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 18–23.
44. Экспериментальное исследование работы термосифонов, заправленных хладагентами R404A, R407C, R410A / А. В. Шаповалов [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4 (82, 83) – С. 87–93.