

УДК 697.35; 536.24

DOI 10.18698/0536-1044-2016-8-60-69

Повышение эффективности термосифонных радиаторов отопления структурированием наружной поверхности греющей трубы*

Н.Н. Зубков¹, К.В. Барсков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ООО «Эффективные тепловые системы», 123458, Москва, Российская Федерация, ул. Твардовского, д. 8

Improving the Efficiency of Thermosiphon Radiators by Structuring the Outer Surface of the Heating Tube

N.N. Zoubkov¹, K.V. Barskov²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² ООО Efficient Heat System, 123458, Moscow, Russian Federation, Tvardovsky St., Bldg. 8

@ e-mail: zoubkovn@bmstu.ru, barskovkv@gmail.com

i Основными преимуществами термосифонных радиаторов отопления перед классическими аналогами являются низкая металлоемкость, изотермичность поверхности, существенное снижение объема греющей воды в радиаторе, высокая коррозионная стойкость и эстетичность формы. Однако они имеют такие недостатки, как недостаточно эффективная теплопередача при фазовом переходе теплоносителя и характерный шум при пузырьковом кипении, существенно сужающий область применения термосифонных радиаторов для установки в жилых помещениях. В связи с этим предложено использовать метод деформирующего резания для создания развитой теплообменной микроструктуры на наружной поверхности греющей трубы. Развитый микрорельеф, полученный методом деформирующего резания, обладает капиллярным эффектом. При этом он позволяет интенсифицировать фазовый переход за счет многократного развития площади теплообменной поверхности. Фазовый переход в микроканалах не сопровождается образованием пузырей, что устраняет шум при работе радиатора. Высокая технологичность метода деформирующего резания минимально влияет на себестоимость радиатора. Проведено исследование процесса испарения изопропилового спирта для различных вариантов микроструктурированных поверхностей, полученных деформирующим резанием. По сравнению с гладкой трубой у испытуемых образцов с микрорельефом в широком диапазоне температур выявлено двукратное повышение передаваемой мощности от греющей трубы при отсутствии шума, характерного для пузырькового кипения.

Ключевые слова: термосифонный радиатор, система отопления, пузырьковое кипение, интенсификация теплоотдачи, деформирующее резание, микроструктурированная поверхность.

i The main advantages of thermosiphon radiators over classic analogues are low metal consumption, an isothermal surface, a significant reduction of the heating water volume in

* Работа выполнена при поддержке руководства ООО «Эффективные тепловые системы» и Министерства образования и науки РФ.

the radiator, high corrosion resistance and aesthetics. At the same time there are also disadvantages such as insufficient heat transfer during the phase transition of the heat transfer liquid, and a characteristic humming noise at the nucleate boiling stage that significantly narrows the area of application of thermosiphon radiators in residential buildings. The authors propose a method of deformational cutting to obtain a complex heat exchange microstructure on the outer surface of the heating tube. The microrelief obtained by deformational cutting has a capillary effect, thus supporting intensification of the phase transition due to the significant enlargement of the heat exchange surface area. The phase transition in microrelief does not generate bubbles and therefore eliminates the noise when the radiator is in operation. High processibility of the deformational cutting method has a minimal effect on the cost of the radiator. Isopropyl alcohol evaporation process is studied for various micro-structured surfaces obtained by deformational cutting. Compared to a smooth surface, the tested microrelief surfaces have shown a two-fold increase in heat exchange capacity, without the noise typical of nucleate boiling.

Keywords: thermosiphon radiator, heating system, nucleate boiling, heat transfer intensification, deformational cutting, micro-structured surface.

В последнее время на рынке отопительных приборов жилых, общественных и промышленных помещений появились зарубежные и отечественные конденсационно-испарительные радиаторы, основанные на принципе термосифона [1]. Принцип действия таких радиаторов известен и описан в работах [2, 3]. Радиатор представляет собой герметичную вакуумированную пустотелую панель, внутри которой в нижней части горизонтально проходит труба, затопленная целиком или частично низкокипящей жидкостью. Жидкость и давление внутри панели выбирают таким образом, чтобы кипение начиналось при температуре 35...40 °С. В качестве жидкости обычно используют воду, этанол, раствор бромида лития или спирты. Труба подключена к стандартной системе отопления, при работе внутри нее протекает горячий теплоноситель. На внешней поверхности трубы жидкость испаряется, отбирая тепло от ее поверхности, при этом пар заполняет внутреннее пространство панели и конденсируется на боковых стенках трубы, отдавая тепло. Возврат конденсата в нижнюю часть панели осуществляется под действием сил гравитации (рис. 1).

Термосифонные радиаторы лишены ряда недостатков, свойственных традиционным чугунным, алюминиевым и биметаллическим аналогам. Для того чтобы выдерживать большие давления сетевой воды и возможные гидроудары, классические радиаторы изготавливают с большой толщиной стенок, что существенно повышает их металлоемкость. В термосифонном радиаторе теплоотдающая панель заполнена паром и не испытывает давления сетевой воды.

Например, при работе на этаноле при температуре панели 50 °С внутреннее давление составляет 0,027 МПа, а при 70 °С — 0,076 МПа. Поскольку давление внутри панели радиаторов всегда меньше атмосферного, их иногда называют вакуумными. Благодаря этому корпус радиатора может быть выполнен тонкостенным, что существенно снижает себестоимость изделия.

Для алюминиевых и биметаллических радиаторов необходимо развитие площади поверхности ребрами, которые должны распределять тепло от теплоносителя и отдавать его окружающему воздуху. Однако в силу ограниченной

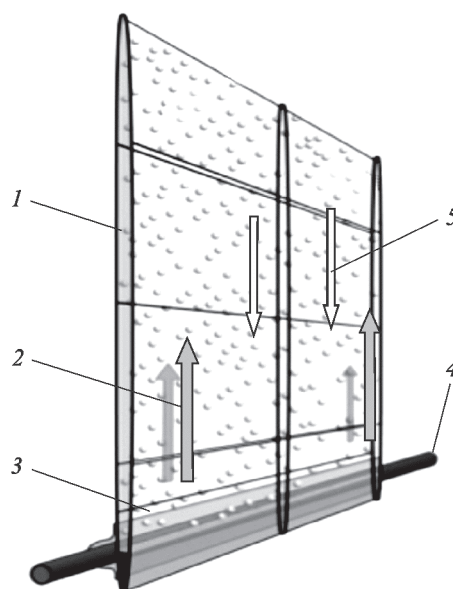


Рис. 1. Устройство термосифонного радиатора отопления:

- 1 — пустотелая герметичная панель; 2 — поток пара;
3 — испаряющаяся жидкость; 4 — труба отопления;
5 — стекание конденсата

теплопроводности материала ребер и их большой протяженности температура ребер в наиболее удаленной части от источника тепла существенно ниже температуры теплоносителя. Усугубляет ситуацию неравномерное движение теплоносителя внутри радиатора и его возможное заиливание, что также ухудшает равномерность распределения температуры по площади теплообменной поверхности, отдающей тепло воздуху. Термосифонный радиатор обеспечивает изотермичность поверхности теплоотдающей панели, поскольку пар, равномерно заполняя объем, конденсируется на наиболее холодных поверхностях панели.

Стандартные панельные радиаторы не приспособлены для использования в системах с неподготовленной водой, оказывающей сильное коррозионное воздействие на отопительные приборы. Системы с неподготовленной водой достаточно распространены в сельской местности. Термосифонный радиатор этого недостатка лишен, так как в его конструкции непосредственно с теплоносителем из системы отопления взаимодействует только толстостенная труба, а не сама теплоотдающая панель.

Для систем индивидуального отопления, использующих, как правило, антифризы, немаловажным является объем этого дорогостоящего теплоносителя в системе отопления, который для стандартных радиаторов определяется в первую очередь суммарным объемом радиаторов отопления. Для стандартных радиаторов при расчетах на стадии технико-экономического обоснования допускается принимать удельную объемную емкость системы отопления 15 л/кВт [4], поэтому для котла мощностью 60 кВт требуется ориентировочно 900 л дорогостоящего антифриза. Объем греющего теплоносителя в одном термосифонном радиаторе составляет не более 0,5 л, поэтому общий объем системы отопления включает в себя только объем котла, расширительного бака и трубопроводов. В случае периодического использования системы отопления (например, приезд в загородный дом по выходным) важнейшим преимуществом термосифонных радиаторов является малая инерционность системы отопления, обусловленная необходимостью нагрева на порядок меньшего количества теплоносителя.

Несмотря на преимущества, термосифонные радиаторы имеют ряд недостатков. Тепло от теплоносителя к поверхности радиатора передается в три этапа: сначала теплоноситель отда-

ет тепло трубе, затем труба — легкокипящей жидкости, испаряя ее, и, наконец, пар, конденсируясь, — стенкам радиатора. Эти процессы сопровождаются падением температуры. Например, по результатам тепловизионных измерений, приведенных в работе [5], температура на поверхности радиатора составляет 65...70 °С при температуре теплоносителя 75 °С. Основные потери в температуре происходят при испарении легкокипящей жидкости. Данное явление обусловлено недостаточно высоким коэффициентом теплоотдачи при кипении теплоносителя на поверхности теплоотдающей трубы. Для повышения теплоотдачи от сетевой воды к испаряющемуся теплоносителю использовались гладкотрубные медные змеевики [2]. Однако это существенно усложняло и удорожало конструкцию.

Вторым недостатком термосифонного радиатора, существенным для жилых помещений, является шум, обусловленный пузырьковым кипением на поверхности трубы (аналогично шуму при закипании электрического чайника). Для устранения этого недостатка предпринимались попытки использования не погруженной в жидкость греющей трубы, а трубы, обернутой металлической сеткой, опущенной в конденсат. Сетка выполняла функцию фитиля, поднимая жидкость до греющей трубы и распределяя ее по поверхности испарения, что обеспечивало отсутствие пузырькового кипения и, как следствие, шума [6]. Однако прикрепленная сетка имела высокое термическое сопротивление в месте контакта с трубой, при этом пропускная способность сетки, которая капиллярными силами поднимала и распределяла жидкость по поверхности трубы, была недостаточна для обеспечения расходных параметров по тепловой мощности испаряющейся жидкости. Сетка как дополнительный элемент и операция ее крепления к греющей трубе значительно повышали стоимость радиатора.

Цель работы — анализ возможных вариантов устранения указанных недостатков термосифонных радиаторов за счет использования специальной наружной поверхности греющей трубы.

Для устранения шума при кипении очевидным является минимизация пузырькового кипения в большом объеме, т. е. греющая труба должна быть не полностью погруженной в жидкость, а только касаться ее. Поверхность трубы должна иметь структуру, выполняющую не-

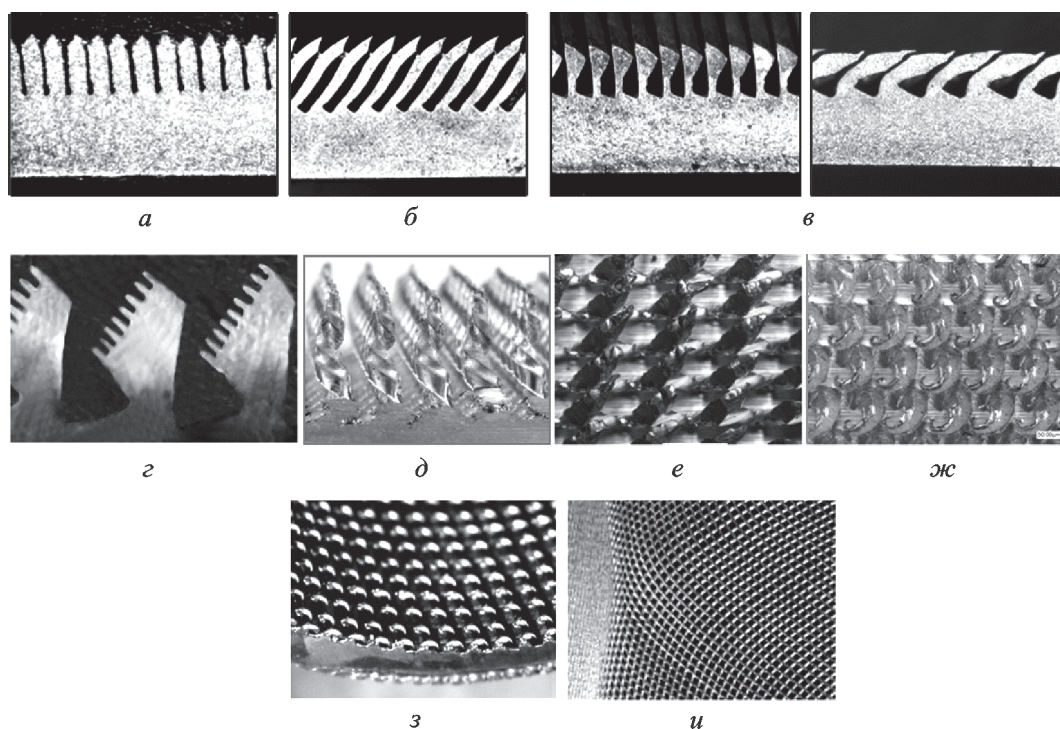


Рис. 2. Варианты поверхностей для интенсификации кипения, получаемые методом ДР

сколько функций. Во-первых, чтобы труба была смоченной по всей поверхности, структура должна обладать капиллярным эффектом с максимальной пропускной способностью (максимальной проницаемостью). Во-вторых, структура должна иметь высокоразвитую поверхность для интенсификации теплоотдачи при переходе теплоносителя из жидкого состояния в парообразное. В-третьих, структура теплообменной поверхности должна обладать минимальным термическим сопротивлением, т. е. иметь хороший тепловой контакт с материалом трубы (обладать максимальной каркасной теплопроводностью).

Обобщая изложенное, можно сформулировать следующие требования для наружной поверхности стальных труб, используемых в термосифонных радиаторах: наличие капиллярного эффекта для подъема жидкости и распределения ее по поверхности трубы, невысокое гидравлическое сопротивление капиллярной структуры, низкое термическое сопротивление структуры в радиальном направлении и обеспечение интенсификации процесса кипения теплоносителя при невысокой стоимости технологии получения таких поверхностей.

Для создания поверхности, соответствующей перечисленным требованиям, предлагается использовать метод деформирующего резания (ДР), разрабатываемый в МГТУ им. Н.Э. Бау-

мана. Метод имеет широкие технологические возможности, в том числе для получения разнообразных теплообменных поверхностей.

Принцип ДР заключается в подрезании поверхностных слоев заготовки и их последующем деформировании, что позволяет формировать развитые теплообменные структуры разных типов [7]. На рис. 2 приведены поверхности, обеспечивающие интенсификацию кипения: *a* — оребренные с возможностью получения межреберных зазоров от единиц микрометров (шаг 40 мкм, межреберный зазор 6 мкм); *б* — оребренные с наклонным оребрением [8]; *в* — оребренные с расширяющимся к низу межреберным зазором; *г* — оребренные с формированием микроструктур на вершинах ребер [9]; *д-е* — штырьковые с винтовыми, наклонными игольчатыми и крючкообразными штырьками соответственно [10]; *з* — штырьковые, создаваемые на внутренней стороне трубы [11]; *и* — сетчатые, получаемые из листовых материалов, с размером ячейки от 20 мкм [12].

Описание образцов. С учетом результатов ранее проведенных исследований по кипению различных жидкостей на поверхностях, полученных методом ДР [13–15], а также рекомендаций, изложенных в работах [16–19], для лабораторных испытаний было изготовлено

шесть образцов с разными вариантами развития наружной поверхности (см. таблицу и рис. 3). Все образцы выполнены из стали марки В20 с исходными размерами — диаметром 20 мм и толщиной стенки трубы 2,5 мм. Длина всех образцов составляла 1 100 мм с гладкими законцовками по 50 мм и длиной участка с микрорельефом 1 000 мм. Развитие наружной поверхности заключалось в формировании поперечного оребрения различной конфигурации методом ДР.

Для образца № 3 шаг поперечного оребрения составлял 0,5 мм, а для всех остальных образцов — 0,4 мм. После оребрения образца № 2 вершины его ребер дополнительно обрабатывались накатным роликом с прямым зубом с шагом рифлений 0,8 мм. Площадь внутренней поверхности трубы со стороны греющей воды на испарительном участке составляла 0,0471 м².

В качестве испаряющегося теплоносителя был выбран изопропиловый спирт (С₃Н₈О). Схема и фотографии испытательной установки представлены на рис. 4.

Установка состоит из двух контуров (рис. 4, а). Первый контур представляет собой испытуемую трубу 3, внутри которой прокачивалась греющая вода, имитирующая теплоноситель системы отопления. Меняя расход и температуру теплоносителя, можно получать характеристики теплоотдачи при разных режимах работы. Датчики 2 измеряют температуру воды, входящей в трубу Т₁ и выходящей из трубы Т₂. Расходомер 5 измеряет расход воды. Второй контур представляет собой замкнутый герметичный объем с пониженным давлением. Внутри второго контура испаряется и конденсируется изопропиловый спирт. В зоне кипения 4 спирт испаряется и/или кипит на внешней поверхности испытуемой трубы 3. Уровень погружения трубы в спирт регулируется специальным резервуаром 1, соединенным с областью испарения по принципу сообщающихся сосудов. С помощью этого резервуара система наполняется спиртом до необходимого уровня, после чего сосуд отключается, чтобы избежать неконтролируемого испарения. Пар проходит

Параметры оребренной структуры на поверхности образцов

Параметр	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Шаг ребер, мм	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
Средняя высота структуры, мм	0,95	0,72	0,75	0,65	1,15	0,87
Средняя ширина межреберного зазора, мкм	130	130/80*	250/100*	100	40	Практически плотная упаковка ребер
Отклонение ребер от вертикали, град	0	0	0	15	15	26

* Ширина зазора в узкой части.

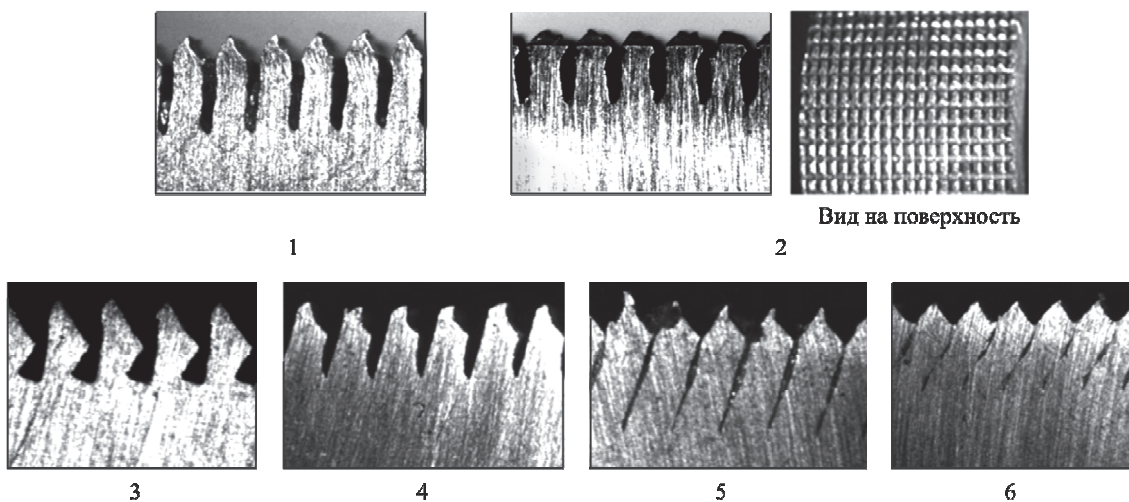


Рис. 3. Образцы с разными вариантами развития наружной поверхности

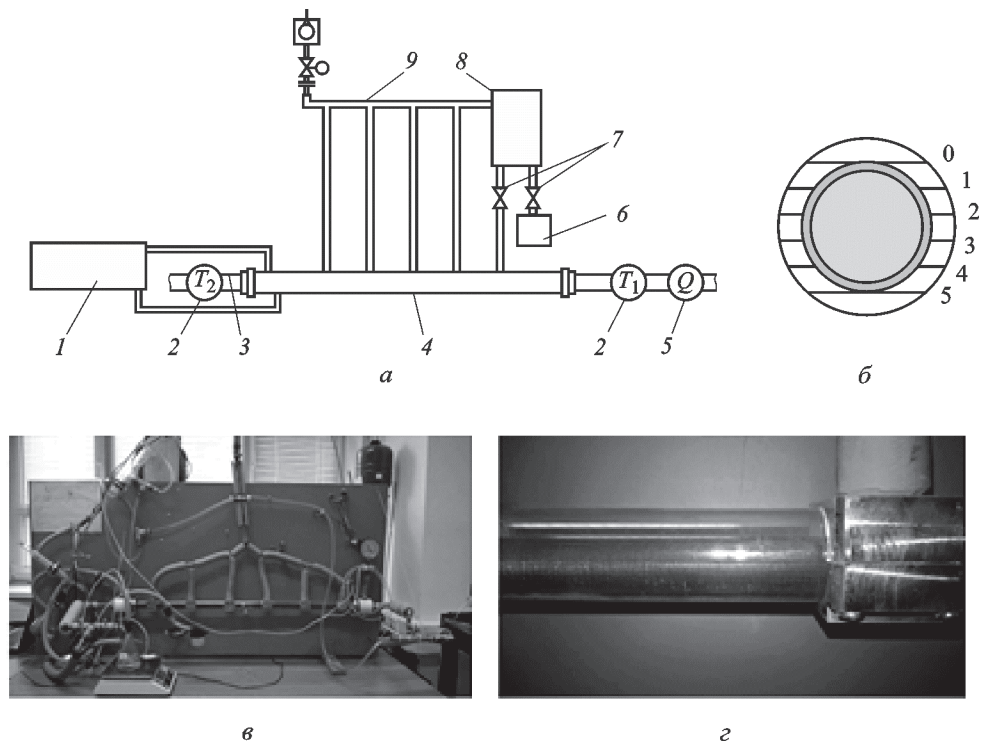


Рис. 4. Установка для испытательной установки:
 а — схема; б — схематичное изображение уровней погружения трубы в теплоноситель;
 в — внешний вид установки; г — испарительный участок

по паротводам 9 в конденсатор 8. Сконденсировавшаяся жидкость в зависимости от положения кранов 7 попадает либо обратно в зону кипения 4, либо в мерный сосуд 6.

Методика проведения испытаний. В испытуемой трубе устанавливался заданный расход воды при заданной входной температуре T_1 . Во втором контуре откачивался воздух до давления, равного давлению насыщенных паров спирта при данной температуре. Положение кранов 7 может обеспечивать возврат конденсата в зону испарения. Система считалась вышедшей на стационарный режим при постоянстве температуры выходящей воды T_2 .

По достижении системой установившегося режима работы сконденсировавшийся спирт направлялся кранами 7 в мерный сосуд 6, находящийся на лабораторных весах. В течение эксперимента синхронные показания весов и секундомера фиксировали с помощью видеокамеры, записывающей видеофайл. Впоследствии зависимость количества испаренного спирта от времени определяли путем обработки видеофайла. Также измеряли такие параметры, как зависимость массы сконденсировавшегося спирта от времени, температуры воды T_1 и T_2 ,

расход воды, давление паров в области испарения и температуру паров спирта в области испарения.

Поскольку уровень спирта в области испарения со временем падает, его измеряли по нанесенной на стенку испарителя шкале, равномерной по высоте, где уровень «0» соответствует полному погружению испытуемой трубы в спирт, уровень «5» — касанию поверхности спирта нижней точки трубы (см. рис. 4, а, б).

Для каждой трубы проводили измерения при температуре входящей воды $T_1 = 40...90$ °С, что соответствует диапазону температур центрального отопления.

Для обработки результатов измеряемую массу испаренного спирта переводили в тепловой эквивалент $Q = qm$, где q — удельная теплота испарения спирта при данной температуре. Значение Q соответствует количеству теплоты, переданной теплообменной трубой спирту. Далее строили зависимость переданного количества теплоты Q от времени τ (рис. 5), где тангенс наклона графика показывает мощность теплообмена в данный момент времени. График разбивали на участки, соответствующие разным уровням погружения трубы в спирт. На этих участках график с высокой точностью ап-

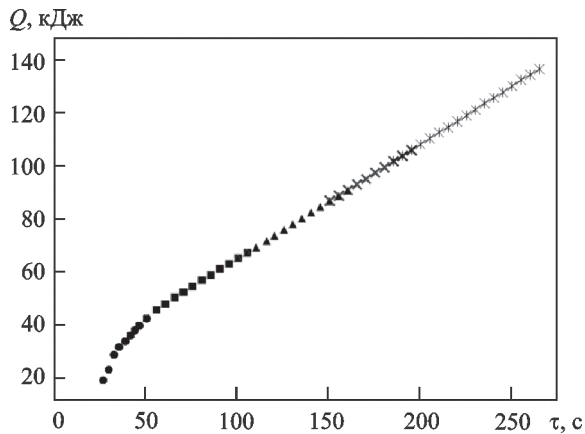


Рис. 5. Зависимость количества теплоты, переданной от поверхности образца № 5 спирту, от времени при температуре поверхности $t = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$

проксимируется прямой линией, что соответствует постоянной тепловой мощности.

Массу измеряли лабораторными весами с точностью $\Delta m = 0,1\text{ г}$, а время — секундомером с точностью $\Delta t = 0,5\text{ с}$. На каждом измеряемом участке при его продолжительности $\tau = 20\text{...}50\text{ с}$ суммарная масса испаренного спирта составляла $m = 15\text{...}20\text{ г}$. Таким образом, на каждом участке относительную погрешность измерения тепловой мощности определяли по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t}\right)^2}.$$

Расчет показал, что относительная погрешность во всех экспериментах не превышала $\varepsilon = 2\%$.

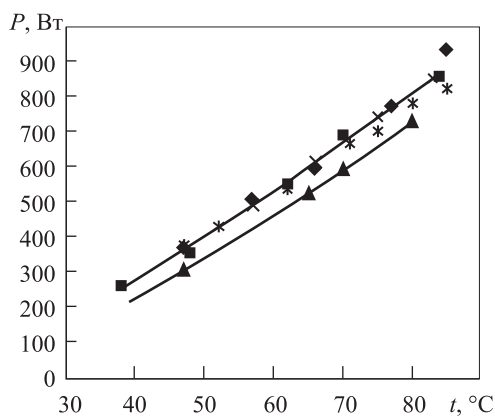
Результаты испытаний. Сравнение зависимости тепловой мощности (вычисленной по количеству испарившегося спирта) от температуры греющей воды проводили для шести испытуемых образцов с микрорельефами и гладкой трубы при разных уровнях погружения трубы в спирт.

На рис. 6 приведена зависимость тепловой мощности, затраченной на испарение спирта, от температуры греющей воды при уровнях погружения трубы «2» и «4».

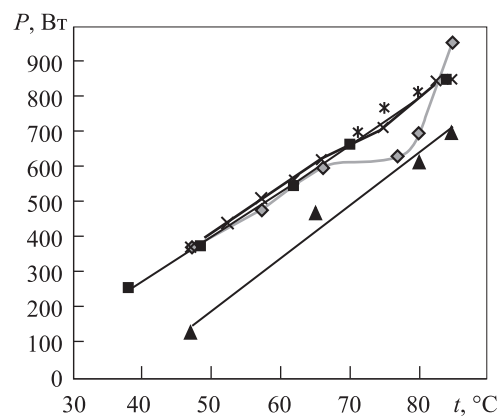
Обсуждение результатов. При уровне погружения «2» все трубы работают в режиме активного пузырькового кипения и по отдаваемой мощности показали результат лишь на 13...20 % выше. При этом мощность практически не зависит от типа микрорельефа на поверхности трубы. Можно предположить, что увеличение отдаваемой мощности микрорельефной поверхности по сравнению с гладкой обусловлено более активным образованием пузырей на развитой поверхности.

Эффект влияния микрорельефа проявляется более существенно при небольших уровнях погружения. При уровне погружения «4» (рис. 6, б) все образцы с микрорельефом по сравнению с гладкой трубой показывают значительно большую (от 30 до 100 %) теплоотдачу. Это обусловлено тем, что узкий межреберный зазор микрорельефа, полученного ДР, выполняет роль капиллярных каналов, благодаря которым вся поверхность трубы смачивается даже при ее незначительном погружении, что обеспечивает активное испарение со всей поверхности труб с

◆ – тип 1 ■ – тип 3 ▲ – гладкая поверхность × – тип 4 * – тип 5



а



б

Рис. 6. Зависимости мощности теплопередачи от температуры для труб с разными типами поверхностей при уровнях погружения трубы «2» (а) и «4» (б)

микрорельефом. При этом у разных типов поверхностей проявляются разные особенности.

Труба с микрорельефом типа 1 при температуре греющей воды менее 65 °С активно испаряет со всей поверхности. При этом теплоотдача обеспечивается испарением, не попадая в область пузырькового кипения, что существенно устраняет шум при работе трубы. В диапазоне температур греющей воды 65...75 °С капиллярные каналы начинают пересыхать, часть трубы перестает смачиваться, в результате чего мощность практически не увеличивается с ростом температуры (наблюдается так называемый провал мощности), и процесс по-прежнему не переходит в область пузырькового кипения. При температуре греющей воды более 75 °С процесс переходит в фазу активного пузырькового кипения, а поскольку зазор между трубой и стенкой испарителя достаточно мал, брызги смачивают всю поверхность трубы, и мощность значительно возрастает.

В трубах с поверхностями типа 3 и 4 при температуре греющей воды до 65 °С наблюдаются процессы, аналогичные происходящим в трубе с микрорельефом типа 1. При больших температурах начинается пузырьковое кипение, поэтому провала мощности не наблюдается.

У труб с микрорельефом типа 5 поверхностное испарение продолжается до 80 °С, при этом расхода по капиллярным каналам хватает для того, чтобы труба не пересыхала. Провала мощности не наблюдается. При больших температурах процесс переходит в фазу пузырькового кипения.

У образца № 6 вследствие малой ширины капиллярных каналов теплообмен при всех

температурах осуществлялся активным пузырьковым кипением.

Выводы

1. Интенсивность теплопередачи (отдаваемая мощность) для всех рассмотренных образцов в зависимости от температуры превышает соответствующий показатель для гладкой трубы на 30...100 %.

2. Эффект влияния микрорельефа проявляется более существенно при небольших уровнях погружения.

3. Трубы с поверхностями типа 1 и 5 с высотой оребрения около 1 мм и шириной межреберного зазора 40 и 130 мкм обеспечили максимальное увеличение передаваемой мощности при устранении шума в широком диапазоне температур.

4. Для трубы с микрорельефом типа 1 отмечается провал мощности в диапазоне температур греющей воды 65...75 °С, вызванный пересыханием поверхности трубы из-за недостаточной пропускной способности капиллярного межреберного зазора.

5. Наилучшие показатели по интенсивности теплопередачи и отсутствию шума при кипении показала труба с поверхностью типа 5 с шириной капиллярного зазора 40 мкм и глубиной зазора 1,15 мм.

6. Теплообменные поверхности, полученные методом ДР, перспективны для интенсификации теплоотдачи при изменении агрегатного состояния (кипение, испарение) изопропилового спирта при их использовании в термосифонных радиаторах.

Литература

- [1] Петренко С.В. Фокин В.М. Нагревательный прибор для повышения энергоэффективности систем отопления помещений. *Вестник энергоэффективности*, 2015, № 2, с. 88–92.
- [2] Богословский В.Н., Сканава А.Н. *Отопление*. Москва, Стройиздат, 1991. 735 с.
- [3] Tayali N., Shiret A. *Thermosyphon radiators*. Patent US, no. 20020134427 A1, 2002.
- [4] Полякова Е. Подбор и установка мембранных баков для систем отопления и ГВС. *Аква-Терм*, 2010, № 6 (58), с. 54–57.
- [5] *Определение наиболее эффективных режимов работы 6-секционного стального радиатора с «литиево-бромидной жидкостью» с условным названием «Вакуумный Литиево-Бромидный Суперпроводящий Радиатор»*. URL: http://is34.ru/files/radiator_1.pdf (дата обращения 07 апреля 2016).
- [6] Scurrah Norman Hugh. *Heat transfer panels*. Patent GB, no. 2099980 A, 1982.
- [7] Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Серия: Машиностроение*, 1993, № 4, с. 79–82.

- [8] Zubkov N.N., Polyakov A.F., Shekhter Yu.L. The hydraulic characteristics of porous materials for a system of transpiration cooling. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 231–237.
- [9] Зубков Н.Н. Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения. *Вестник машиностроения*, 2014, № 11, с. 75–79.
- [10] Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И., Цфасман Г.Ю., Городников В.В. Получение штырьковых структур для кипения азота. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*, 2013, № 1 (90), с. 100–109.
- [11] Thors P., Zoubkov N. *Method and tool for making enhanced heat transfer surfaces*. European Patent no. 1692447. 2009.
- [12] Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of Slotted Polymer Filter Tubes by Deformational Cutting. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233.
- [13] Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Зубков Н.Н., Каськов С.И., Щелчков А.В. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях. *Труды Академэнерго*, 2012, № 1, с. 14–31.
- [14] Попов И.А., Щелчков А.В., Зубков Н.Н., Лэй Р.А., Гортышов Ю.Ф. Теплоотдача при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2014, № 4, с. 49–53.
- [15] Морской Д.Н. Процессы кипения на поверхностях, полученных методом деформационного резания. *Будущее машиностроения России. Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 22–25 сентября 2010 г.*, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, с. 163–164.
- [16] Poniewski M.E., Thome J.R. *Nucleate Boiling on Micro-Structured Surfaces*. USA, Heat Transfer Research Inc., 2008. 366 p.
- [17] McHale J.P., Garimella S.V. Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, vol. 36, pp. 249–260.
- [18] Sarbu I., Valea E.S. Correlations for enhanced boiling heat transfer on modified surfaces tubes. *International journal of energy and environment*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 444–451.
- [19] Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. *Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена*. Казань, Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.

References

- [1] Petrenko S.V. Fokin V.M. Nagrevatel'nyi pribor dlia povysheniia energoeffektivnosti sistem otopleniia pomeshchenii [A heating device for energy efficiency space heating systems]. *Vestnik energoeffektivnosti* [Energy Bulletin]. 2015, no. 2, pp. 88–92.
- [2] Bogoslovskii V.N., Skanavi A.N. *Otoplenie* [Heating]. Moscow, Stroizdat publ., 1991. 735 p.
- [3] Tayali N., Shiret A. *Thermosyphon radiators*. Patent US, no. 20020134427 A1, 2002.
- [4] Poliakova E. Podbor i ustanovka membrannykh bakov dlia sistem otopleniia i GVS [Selection and installation of membrane tanks for heating and hot water]. *Akva-Term* [Aqua-Therm]. 2010, no. 6(58), pp. 54–57.
- [5] *Opredelenie naibolee effektivnykh rezhimov raboty 6-i sektionnogo stal'nogo radiatora s «litiievo-bromidnoi zhidkost'iu» s uslovnym nazvaniem «Vakuumnyi Litiievo-Bromidnyi Superprovodiashchii Radiator»* [Determine the most effective modes of 6 and section steel radiator with «lithium bromide liquid» with the provisional name «Vacuum Lithium bromide Super-Radiator»]. Available at: http://is34.ru/files/radiator_1.pdf (accessed 07 April 2016).
- [6] Scurrah Norman Hugh. *Heat transfer panels*. Patent GB, no. 2099980 A, 1982.
- [7] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Kononov O.V. Izgotovlenie teploobmennyykh poverkhnostei novogo klassa deformiruiushchim rezaniem [Production of heat transfer surfaces of a new class deforming cutting]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 1993, no. 4, p. 79.
- [8] Zubkov N.N., Polyakov A.F., Shekhter Yu.L. The hydraulic characteristics of porous materials for a system of transpiration cooling. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 231–237.

- [9] Zubkov N.N. Poluchenie podpoverkhnostnykh polostei deformiruiushchim rezaniem dlia intensifikatsii puzyr'kovogo kipeniia [Obtaining of subsurface cavities by deforming cutting for enhancement of bubble boiling]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 11, pp. 75–79.
- [10] Zubkov N.N., Trofimovich A.S., Ovchinnikov A.I., Tsfasman G.Iu., Gorodnikov V.V. Poluchenie shtyr'kovykh struktur dlia kipeniia azota [Making of pin fin structures for boiling of nitrogen]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2013, no. 1(90), pp. 100–109.
- [11] Thors P., Zoubkov N. *Method and tool for making enhanced heat transfer surfaces*. European Patent no. 1692447, 2009.
- [12] Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of Slotted Polymer Filter Tubes by Deformational Cutting. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233.
- [13] Gortyshov Iu.F., Popov I.A., Zubkov N.N., Kas'kov S.I., Shchelchikov A.V. Kipenie vody na mikrostrukturirovannykh poverkhnostiakh [Boiling water microstructured surface]. *Trudy Akademenergo* [Transactions of Academenergo]. 2012, no. 1, pp. 14–31.
- [14] Popov I.A., Shchelchikov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian Aeronautics*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 395–401.
- [15] Morskoi D.N. Protsessy kipeniia na poverkhnostiakh, poluchennykh metodom deformatsionnogo rezaniia [The process of boiling on the surfaces obtained by the method of strain cutting]. *Budushchee mashinostroeniia Rossii: sb. tr. Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov, Moskva, 22-25 sentiabria 2010* [Future engineering of Russia: proceedings of all-Russian conference of young scientists and specialists, Moscow, 22-25 September 2010]. Moscow, Bauman Press, 2010, pp. 163–164.
- [16] Poniewski M.E., Thome J.R. *Nucleate Boiling on Micro-Structured Surfaces*. USA, Heat Transfer Research Inc., 2008. 366 p.
- [17] McHale J.P., Garimella S.V. Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, vol. 36, pp. 249–260.
- [18] Sarbu I., Valea E.S. Correlations for enhanced boiling heat transfer on modified surfaces tubes. *International journal of energy and environment*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 444–451.
- [19] Popov I.A., Makhianov Kh.M., Gureev V.M. *Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primenenie intensifikatsii teploobmena: Intensifikatsiia teploobmena* [Physical basics and industrial applications of heat transfer intensification: heat transfer]. Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologii publ., 2009. 560 p.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Информация об авторах

ЗУБКОВ Николай Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru).

БАРСКОВ Кирилл Владиславович (Москва) — зав. лабораторией. ООО «Эффективные тепловые системы» (123458, Москва, Российская Федерация, ул. Твардовского, д. 8, e-mail: barskovkv@gmail.com).

Information about the authors

ZUBKOV Nikolay Nikolaevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru).

BARSKOV Kirill Vladislavovich (Moscow) — Head of Laboratory. ООО Efficient Heat System (123458, Moscow, Russian Federation, Tvardovsky St., Bldg. 8, e-mail: barskovkv@gmail.com).