

К. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ, к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vovic@ukr.net

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЖИДКОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С КАВЕРНА-ШТЫРЕВЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Рассматривается возможность интенсификации теплопередачи в жидкостных теплообменниках с каверна-штыревым оребрением путем изменения формы каверн. Показано, что переход от круглых каверн к эллиптическим приводит не только к существенной интенсификации теплопередачи, но и позволяет уменьшить размеры и массу теплообменника.

Ключевые слова: теплообменник, каверна-штыревое оребрение, CFD-моделирование.

Современные микропроцессоры при функционировании выделяют значительное количество теплоты (порядка 150–200 Вт), и для обеспечения их оптимального теплового режима требуется применение эффективных систем охлаждения, использующих, в том числе, жидкостные теплообменники с микро- и мини-каналами различной формы и с выступами различного сечения. Проведенные ранее экспериментальные исследования и CFD-моделирование жидкостных теплообменников с каверна-штыревым оребрением, которые находят применение в испытательном оборудовании ряда производителей мощных микропроцессоров, позволили не только количественно определить преимущества оребрения такого типа, но и выявить те резервы, использование которых позволяет еще больше интенсифицировать теплопередачу в каверна-штыревой структуре. Так, в [1] было показано, что в каверна-штыревой структуре охлаждающая жидкость разделяется на два потока — прямолинейный, протекающий в зазоре между сосед-

ними рядами штырей, и волнообразный, протекающий между кавернами горячего основания теплообменника, к которому подводится тепловой поток от микропроцессора, и кавернами относительно холодной крышки (рис. 1).

В [2] было установлено, что одним из резервов интенсификации теплопередачи в каверна-штыревой структуре является всемерное усиление волнообразного течения и как можно более сильное его преобладание над прямолинейным, реализации чего посвящена настоящая работа.

Как правило, конструкция теплообменников с каверна-штыревым оребрением предусматривает форму каверн в виде круга. Однако, при всех достоинствах круглой формы каверн с точки зрения технологии изготовления теплообменника, такая структура обладает существенным недостатком — зазор между соседними рядами штырей достаточно велик при любых соотношениях размеров штырей и каверн (рис. 2), поэтому прямолинейный поток всегда превалирует над волнообразным. Очевидно, что этот зазор можно уменьшить, незначительно изменив ширину штырей в направлении, перпендикулярном течению. Это можно достичь, если кавернам придать форму, например, эллипса.

Исследование эффективности такого подхода проводилось методом CFD-моделирования с использованием системы численного моделирования Salome для создания 3D-модели, системы математического моделирования OpenFoam для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, энергии и неразрывности, а также системы ParaView для визуализации полученного решения [3, 4].

Исследование характера течения и температурного поля охлаждающей жидкости в теплообменнике при изменении формы каверн проводилось с использованием 3D-модели (рис. 3), которая имела следующие основные параметры:

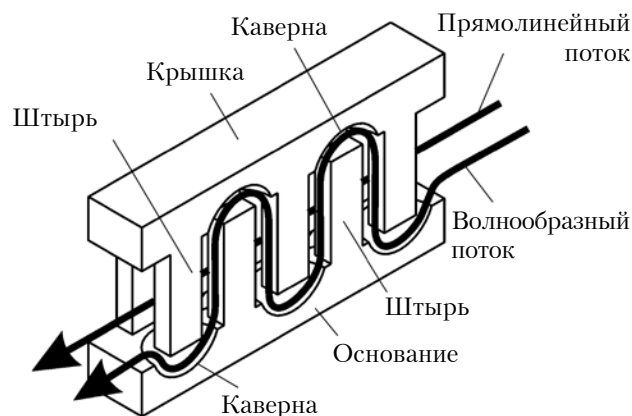


Рис. 1. Разделение потока охлаждающей жидкости в каверна-штыревой структуре

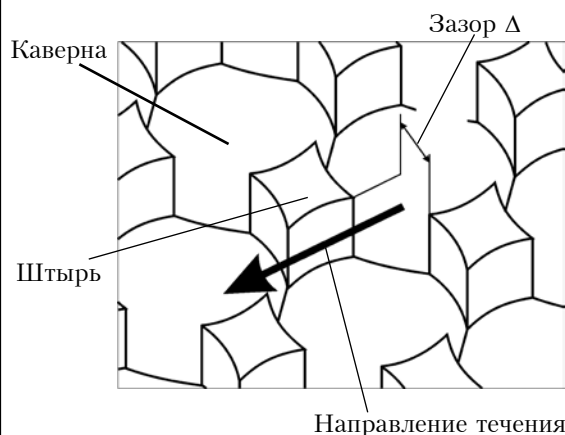


Рис. 2. Зазор между соседними рядами штырей

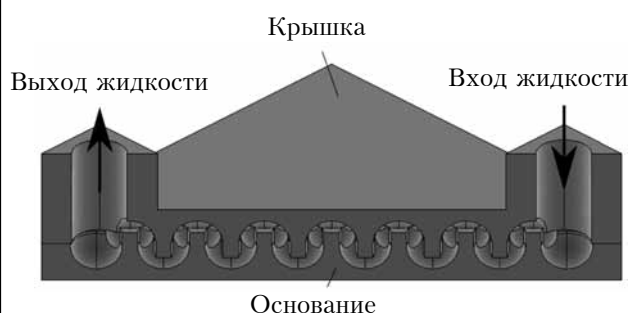


Рис. 3. 3D-модель теплообменника (симметричная половина)

- габаритные размеры 63,5×63,5×19,8 мм;
- диаметр входного и выходного отверстий 8,4 мм;
- материал основания и крышки теплообменника медь;
- охлаждающая жидкость вода;
- температура охлаждающей жидкости на входе в теплообменник 20°C;
- расход охлаждающей жидкости через теплообменник 0,4 – 1,0 л/мин;
- размер площадки подвода теплового потока к основанию теплообменника 29×29 мм с расположением в геометрическом центре основания;
- подводимый тепловой поток к основанию теплообменника 180 Вт.

На наружных поверхностях модели, за исключением площадки подвода теплового потока к основанию, задавались граничные условия 3-го рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ при температуре окружающей среды 24,6°C.

Пример расположения каверн на основании и в крышке теплообменника показан на рис. 4.

Моделирование проводилось для трех вариантов геометрии каверна-штыревой структуры: одной — с кавернами в форме круга и двух — с кавернами в форме эллипсов (табл. 1).

Для всех исследованных вариантов геометрии структур выдерживалось требование параллельности воображаемых линий, соединяющих геометрические центры каверн в одном ряду, внешним контурам теплообменника. При этом разме-

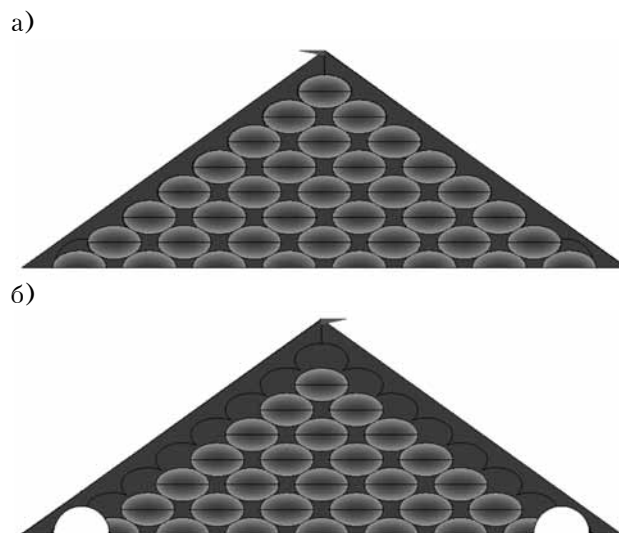


Рис. 4. Расположение каверн на основании (а) и на крышке (б)

Таблица 1

Параметры геометрии исследуемых каверна-штыревых структур

Геометрия	Размеры каверны*, мм	Размеры штыря**, мм	Зазор Δ, мм
Г_1	8/8	2,97×2,97×2,5	2,23
Г_2	8/6	3,46×2,99×2,5	1,21
Г_3	8/5	4,16×3,13×2,5	0,57

* $D_{\max}/D_{\min}$ — отношение большой и малой осей эллипса;

** длина×ширина×высота (длина — размер в направлении течения, ширина — поперек течения).

ры и расположение входного и выходного отверстий, а также площадки подвода теплового потока не изменялись. В результате при переходе от круглой формы каверн к эллиптической форма теплообменника в плане трансформировалась из квадратной в ромбическую, а габариты и вес уменьшились (рис. 5, табл. 2).

Результаты моделирования распределения линий тока для трех вариантов геометрии каверна-штыревой структуры приведены на рис. 6. Здесь видно, что чем больше форма каверн отличается от круглой, тем интенсивнее становится волнообразный поток и тем слабее прямолинейный.

Таблица 2

Массо-габаритные характеристики исследуемых вариантов теплообменника

Геометрия	Размер 2А (см. рис. 5), мм	Масса, г
Г_1	89,8	163
Г_2	72,5	135
Г_3	63,9	122

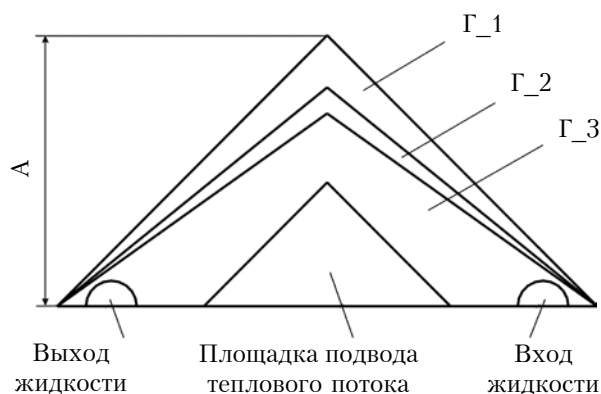


Рис. 5. Форма исследуемых вариантов теплообменника

Для анализа влияния формы каверн на гидравлические характеристики теплообменника было рассчитано тепловое сопротивление R_ϵ , а также потери давления охлаждающей жидкости H_ϵ при различной степени сжатия каверны $\epsilon = D_{\min}/D_{\max}$ (тепловое сопротивление определялось как отношение разности между максимальной температурой основания и температурой жидкости на входе в теплообменник к величине подводимого теплового потока). В табл. 3 приведены их относительные значения:

$$r_\epsilon = R_\epsilon / R_{\epsilon=1};$$

$$h_\epsilon = H_\epsilon / H_{\epsilon=1}.$$

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что:

- при изменении степени сжатия каверн от 1 до 0,625 зазор Δ между соседними рядами штырей уменьшается в 3,9 раза (см. табл. 1), при этом практически полностью исключается прямолинейное течение и резко интенсифицируется волнообразное (см. рис. 6);

- вследствие изменения характера течения охлаждающей жидкости тепловое сопротивление теплообменника уменьшается на 25% (см. табл. 3);

Таблица 3

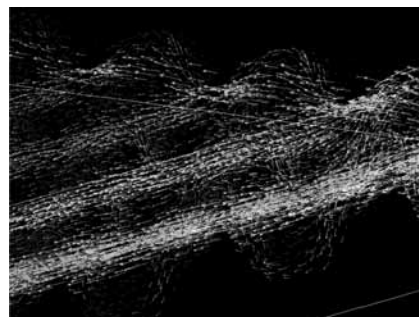
Относительные гидравлические характеристики исследуемых вариантов теплообменника

Геометрия	ϵ	r_ϵ	h_ϵ
Г_1	1	1	1
Г_2	0,75	0,83	2,4
Г_3	0,625	0,75	7,3
Г_3*	0,625	0,75	3,7
Г_3**	0,625	0,75	4,4

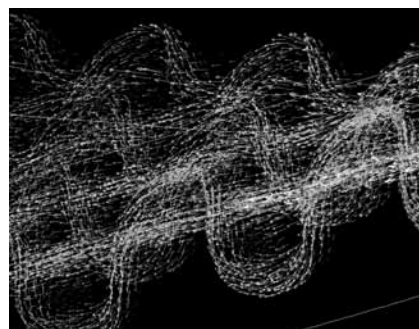
* Диаметр входного и выходного отверстий увеличен с 8,4 до 10 мм;

** В основании и крышке теплообменника удалено по одному штырю возле входного и выходного отверстий.

а)



б)



в)

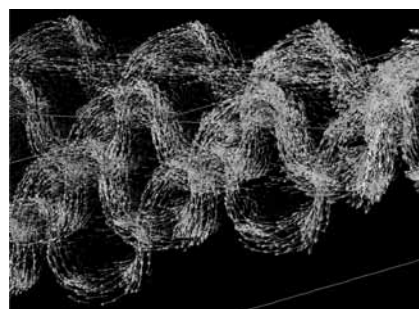


Рис. 6. Распределение линий тока в исследованных вариантах теплообменника:

а — Г_1; б — Г_2; в — Г_3

- придание кавернам формы эллипса позволяет уменьшить один из габаритных размеров теплообменника в 1,4 раза и массу в 1,3 раза (см. табл. 2).

При этом необходимо отметить, что при переходе от круглой формы каверн к эллиптической и уменьшении зазора Δ гидравлическое сопротивление теплообменника вследствие очевидных причин возрастает: для геометрии Г_3 оно в 7,3 раза больше, чем для Г_1. Этот недостаток, однако, можно в какой-то мере компенсировать путем увеличения диаметра входного и выходного отверстий и оптимизации количества штырей на входном и выходном участках теплообменника. Как видно из табл. 3, при увеличении диаметра отверстий теплообменника Г_3 от 8,4 до 10 мм его гидравлическое сопротивление падает в 1,97 раза, а при удалении в основании и в крышке по одному штырю возле входного и выходного отверстий — в 1,66 раза, при этом тепловое сопротивление теплообменника не из-

меняется. Определение влияния указанных параметров на тепловые и гидравлические характеристики теплообменников в широком диапазоне их изменения требует проведения отдельного исследования.

Таким образом, исследования теплообменников с каверна-штиревым оребрением показали, что в придание кавернам формы эллипса приводит к существенной интенсификации теплопередачи, улучшению их массо-габаритных характеристик и, вместе с тем, к повышению гидравлического сопротивления, что необходимо учитывать при проектировании систем охлаждения на основе теплообменников такого типа.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // Proc. 9th AIAA/ASME

Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. — San Francisco, CA. — 2006. — 21 p.

2. Спокойный М. Ю., Трофимов В. Е., Шевчук М. В. CFD-моделирование теплообмена в прямоугольном канале с каверна-штиревым оребрением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 2-3. — С. 33–38.

3. Трофимов В. Е., Павлов А. Л. Анимация взаимодействия встречных струй в радиаторе для жидкостного охлаждения микропроцессора // Тр. XV МНПК «СИЭТ-2014». — Украина, г. Одесса. — 2014. — С. 26–27.

4. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Жмуд Е. В. Визуализация взаимодействия струи с тупиковой полостью радиатора для жидкостного охлаждения микропроцессора // Тр. XVI МНПК «СИЭТ-2015». — Украина, г. Одесса. — 2015. — С. 160–161.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.12 2015 г.

В. Є. ТРОФІМОВ, О. Л. ПАВЛОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: vovic@ukr.net

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В РІДИННИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ З КАВЕРНА-ШТИРЬОВИМ ОРЕБРЕННЯМ

Розглядається можливість інтенсифікації теплопередачі в рідинних теплообмінниках з каверна-штирєвим оребренням шляхом зміни форми каверн. Показано, що перехід від круглих каверн до еліптичних призводить не тільки до суттєвої інтенсифікації теплопередачі, але й дозволяє зменшити розміри і масу теплообмінника.

Ключові слова: теплообмінник, каверна-штирєве оребрення, CFD-моделювання.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.23
UDC 536.24

V. Ye. TROFIMOV, A. L. PAVLOV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: vovic@ukr.net

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN LIQUID HEAT EXCHANGERS WITH DIMPLE-PIN FINNING

The authors consider the possibility of intensification of heat transfer in fluid heat exchangers with cavity-pin finning by changing the shape of the cavities. It is shown that the transition from circular to elliptic cavities leads not only to a significant intensification of heat transfer but also reduces the size and weight of the heat exchanger.

Keywords: heat exchanger, cavity-pin finning, CFD modeling.

REFERENCES

1. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples. Proc. 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, 2006, 21 p.

2. Spokoyny M. Yu., Trofimov V. E., Shevchuk M. V. [CFD modeling of heat transfer in a rectangular channel with dimplepin finning]. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyure, 2013, no.2-3, pp. 33-38. (Rus)

3. Trofimov V. Ye., Pavlov A. L. [Animation of contrary jets interaction in the radiator for microprocessor liquid cooling]. Proc. of XV ISPC "MIET-2014", Ukraine, Odessa, 2014, pp. 26-27. (Rus)

4. Trofimov V. Ye., Pavlov A. L., Zhmud E. [Visualization of Jets Interaction in the Deadlock Cavity Radiator for Microprocessor Liquid Cooling]. Proc. of XV ISPC "MIET-2015", Ukraine, Odessa, 2015, pp. 160-161. (Rus).