

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 536.24:533.6.011

## CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗВИТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МИНИКАНАЛАМИ

Баранюк А.В., Николаенко Ю.Е.

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2018-12-64-56>

Представлены результаты численного исследования теплообмена и гидравлического сопротивления в миниканалах, перпендикулярно расположенных на плоском основании развитой поверхности. Исследование выполнено средствами методами CFD-моделирования. Проведена верификация результатов моделирования с расчетными данными, полученными по известным инженерным методикам расчета теплогидравлических характеристик развитых поверхностей. Результаты исследования могут быть использованы для оценки интенсификации теплообмена и анализа течения с целью использования такой поверхности для охлаждения радиоэлектронной и микропроцессорной техники.

**Ключевые слова:** миниканалы, численное исследование, теплообмен, течение, моделирование.

**Постановка проблемы.** Мини- и микроканалы используются для охлаждения радиоэлектронной и микропроцессорной техники во всем мире. Этому способствует их высокая компактность и высокая интенсивность теплообмена.

На сегодня в из доступной литературы известно множество экспериментальных и численных работ, посвященных анализу теплообмена и гидродинамики различных форм мини- и микроканалов [1-7]. Однако, несмотря на непрерывный рост публикаций по данной тематике, при этом большинство исследователей используют средства численного моделирования с помощью известных программных продуктов для моделирования процесса, известны случаи, когда наблюдается значительное отклонение расчетных данных по сравнению с экспериментальными данными (более 50%) [2]. Это свидетельствует о том, что процессы, протекающие в таких поверхностях, сложны и разнообразны и не всегда поддаются существующим методам численного моделирования. Поэтому при разработке новых поверхностей теплообмена необходимо разработать соответствующую CFD-модель и с помощью методов CFD-моделирования оценить эффективность разработанной поверхности и возможность использования ее для охлаждения конкретных электронных элементов разрабатываемой радиоэлектронной техники.

В данной статье анализируются возможности применения развитых поверхностей теплообмена с ребрами, образующими на поверхности систему миниканалов, проводится сравнение тепловых характеристик разработанной поверхности с существующими развитыми поверхностями.

**Формирование целей статьи.** Целью настоящей работы является разработка новой теплообменной поверхности, предназначенной для охлаждения элементов радиоэлектронной техники. В качестве новой теплообменной поверхности подразумевается развитая поверхность

с плоским основанием, на которой расположены образующие систему щелевых миниканалов разрезные ребра. В работе использованы численные методы компьютерного моделирования процессов теплообмена и гидродинамики такой поверхности теплообмена с применением программного обеспечения, которое широко применяется в мире для прогнозирования теплообмена и течения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- разработать CFD-модель, предназначенную для анализа процессов теплообмена и аэродинамики в миниканалах, расположенных на поверхности с плоским основанием;
- обработать и представить результаты моделирования в графическом виде распределения искомых тепловых и гидродинамических характеристик.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализируя доступные литературные источники, можно отметить существование тенденции миниатюризации элементов радиоэлектронной техники. Поскольку большинство этих элементов при работе выделяют тепло, очень важно охлаждать их, чтобы они хорошо работали и обеспечивали срок службы таких компонентов. Например, в компьютерных чипах мощность увеличивается в десять раз каждые 6 лет [1]. Стандартные методы охлаждения не справляются с отводом все возрастающих тепловых потоков, и электронные элементы начинают выходить из строя. Поэтому использование более эффективных методов охлаждения, таких как микроканальное охлаждение может быть решением этой проблемы.

Авторы [2] провели численное моделирование с использованием Fluent 14.5 для исследования однофазного потока и сопряженного теплообмена в медных прямоугольных микроканалах (рис. 1).

Моделировались одиночный канал с гидравлическим диаметром 0,561 мм и многоканальная конфигурация, состоящая из впускного и вы-

пускного коллекторов и 25 каналов с гидравлическим диаметром 0,409 мм. Для верификации полученных данных авторы провели также экспериментальные исследования. При исследовании одного канала использовалась в качестве тестовой жидкости вода, а в многоканальной конфигурации использовался хладагент R134a. Авторы показали, что использование микроканалов – эффективное средство охлаждения с высоким уровнем интенсивности теплоотдачи. Однако, если тепловой поток неравномерно распределен по каналу, это приводит к значительному отклонению результатов численного моделирования по сравнению с экспериментальными данными (более 50%).

Исследование тепловых и гидравлических характеристик жидкостных теплообменников со щелевыми каналами для охлаждения микропроцессоров изучалось в [3-6]. Было показано, что при высоте щелевого канала в пределах от 0,1 до 0,3 мм и небольших расходах охлаждающей воды (3-6 мл/с) коэффициент теплоотдачи достигает значений, близких к значениям коэффициента теплоотдачи, достигаемым при кипении. Авторы объясняют это тем, что теплопередача от стенок щелевого канала к жидкости осуществляется через тонкий приграничный слой жидкости путем теплопроводности, по аналогии с кипением, когда теплота от стенки к паровому пространству пузыря также осуществляется теплопроводностью через тонкий слой жидкости у основания пузыря. Так, например, при использовании одноканального щелевого теплообменника с высотой щели 0,2 мм и расходе воды через щелевой канал 3 мл/с с температурой воды на входе +16°C от тепловыделяющего элемента можно отвести тепловой поток 230 Вт при температуре основания теплообменника +65°C [3].

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Анализ приведенных публикаций свидетельствует, что недостатками систем охлаждения на основе водяных щелевых теплообменников является необходимость включения в замкнутый контур системы охлаждения фильтра очистки воды и внешнего теплообменника для поддержания постоянной температуры воды на входе в теплообменник. В этой связи представляет практический и научный интерес разработка и исследование тепловых характеристик воздушных щелевых теплообменников с миниканалами. Кроме того, в доступной литературе исследуемые мини- и микроканалы представляют собой щелевые каналы с шероховатостью и без. Пока нет исследований миниканалов стенки которых разрезаны и их разрезные части повернуты относительно набегающего потока. В этом случае возникающие отрывы и срывы потока могут способствовать увеличению интенсивности теплообмена внутри таких каналов. Исследование стоит провести средствами CFD-моделирования и в случае положительного результата подготовить рекомендации к подготовке физического эксперимента.

**Изложение основного материала исследования.** Разработанная CFD-модель представляет собой трехмерную модель развитой поверхности (рис. 2а) и позволяет рассчитывать тепло- и гидравлические характеристики потоков, движущихся

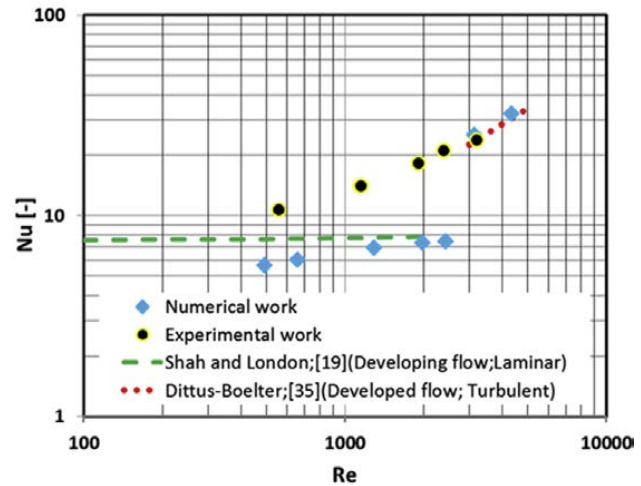


Рис. 1. Сравнение чисел Нуссельта, полученных средствами численного моделирования, с экспериментальными результатами [2]

шихся в межреберном пространстве. Процедура моделирования предполагает дискретизацию основных конструктивных элементов и жидкой фазы расчетной области с помощью неравномерных расчетных сеток, позволяющих представить физико-математическое описание течения внутри пространства между пластинами, которое основывается на численном решении усредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью RNG модели турбулентности с неравновесными пристенными функциями.

Работа посвящена анализу результатов CFD-моделирования процессов теплообмена и аэродинамики развитой поверхности с плоским основанием. Развитая поверхность состояла из плоского основания размерами 30×50 мм и толщиной 1 мм. На внешней поверхности плоского основания расположены с шагом 0,6 мм ребра высотой 20 мм и длиной 30 мм. Толщина ребра составляла 0,3 мм. Материал – медь. Таким образом, расстояние между ребрами совпадало с толщиной ребра и составляло 0,3 мм (рис. 2).

Омывание воздушным потоком осуществлялось вдоль поверхности ребер. На нижней поверхности плоского основания задавалась постоянная температура 70°C. Развитая поверхность омывалась сухим и чистым воздухом с постоянной температурой 26°C. Обдув осуществлялся в диапазоне скоростей набегающего потока от 10 до 0,03 м/с. С целью увеличения интенсивности теплообмена внешние торцы ребер разрезались на отдельные "лепестки", так чтобы не уменьшить поверхность теплообмена, а потом "лепестки" поворачивались на угол 30° относительно набегающего потока. Значения глубины разрезки торцов ребер и угла поворота разрезных частей ребер-"лепестков" выбирались на основании анализа литературных данных, которые свидетельствуют о том, что оптимальная глубина разрезки составляет 60% от высоты ребра [7].

В полном объеме такую задачу существующими методами конечно-элементного анализа решить невозможно. Поэтому разработанная CFD-модель содержит только один канал, который

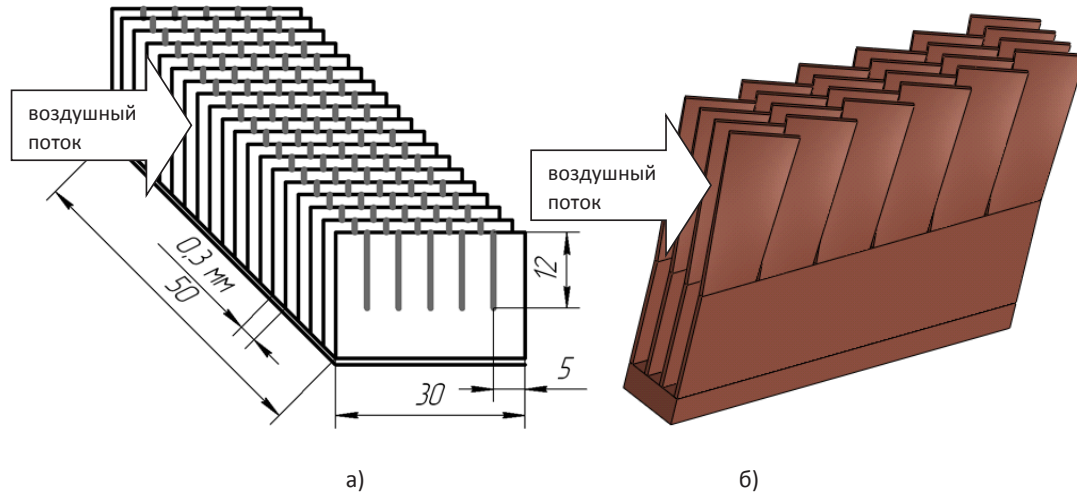


Рис. 2. Общий вид исследуемой развитой поверхности (а) и расчетная область для CFD-модели (б)

создан двумя соседними ребрами и два смежных канала, выбранные в виде охранных. Для разработки конечно-элементной сетки использовался метод под названием Cat Cell Meshing, который позволяет дробить размер расчетных ячеек в месте сужения сечения для прохода потока. Для аппроксимации расчетной области выбран конечный элемент в форме параллелепипеда.

В результате расчетов получено поле температур потока и стенок развитой поверхности. Данные распределений температур усреднялись по объему и использовались для расчета среднеповерхностных конвективных ( $\alpha_{\text{к}}$ ) и приведенных ( $\alpha_{\text{пр}}$ ) коэффициентов теплоотдачи. Эти коэффициенты необходимы для определения коэффициента эффективности оребрения.

Для исследованного диапазона скоростей и температур коэффициент эффективности оребрения достаточно высокий и меняется в пределах от 0,65 до 0,95 в зависимости от скорости набегающего потока. Так, скорости набегающего потока 10 м/с соответствует коэффициент эф-

фективности 0,65, а при уменьшении скорости до 0,4 м/с коэффициент эффективности уже составляет 0,95.

Моделирование гидравлических характеристик исследованной поверхности теплообмена позволило получить картину локальных скоростей в межреберном канале CFD-модели (рис. 3а) и зависимость аэродинамического сопротивления от скорости набегающего воздушного потока (рис. 3б). Из рис. 3б видно, что с увеличением скорости набегающего потока существенно возрастает аэродинамическое сопротивление. Так, при скорости 10 м/с перепад давления достигает 3200 Па, что необходимо учитывать при выборе напорного вентилятора.

Зависимость безразмерных чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса приведена на рис. 4. На этом же рисунке также приведены данные для конвективного теплообмена поверхностей, в которых шаг между ребрами составлял 6,9 мм при толщине ребра 1,4 мм. Размеры основания такой поверхности составляли 70×70 мм, а высота реб-

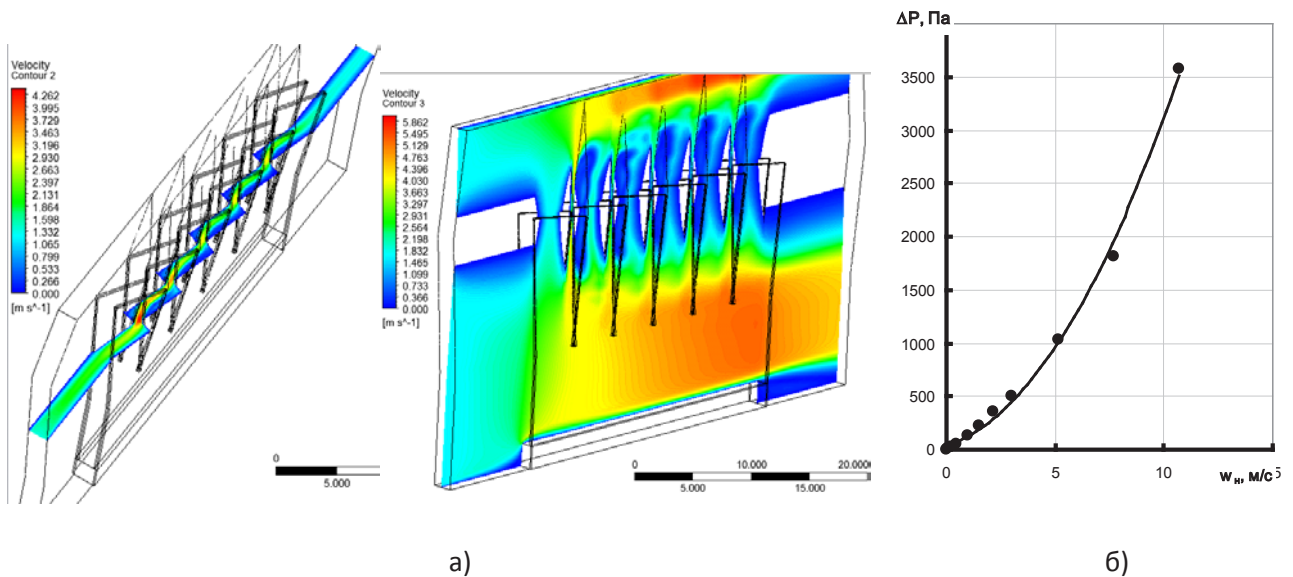
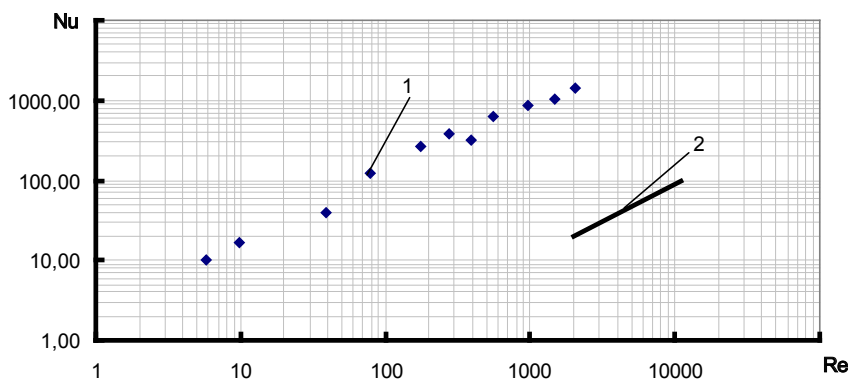


Рис. 3. Распределение локальных скоростей в межреберном канале CFD-модели (а) и зависимость аэродинамического сопротивления от скорости набегающего потока (б)

ра 35 мм. Поверхность должна иметь глубину разрезки 21 мм, что соответствует условию оптимальности, и угол поворота разрезных частей ребер 30°.

Из рис. 4 видно, что применение системы щелевых мини-каналов на плоском основании позволяет в два раза интенсифицировать теплообмен по сравнению с традиционными развитыми поверхностями. Это свидетельствует о том, что такая теплообменная поверхность способна рассеять значительные тепловые потоки, вплоть до 400 Вт при скорости набегающего воздушного потока 10 м/с (рис. 5).



1 – исследуемая CFD-модель; 2 – данные [7]

Рис. 4. Зависимость безразмерных чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса

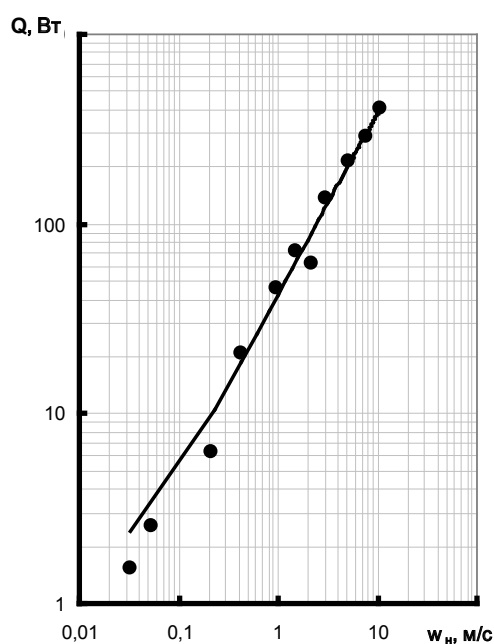


Рис. 5. Зависимость тепловой нагрузки  $Q$  от скорости набегающего потока  $w$

Вместе с тем, необходимо заметить, что приведенное на рис. 4 сравнение результатов интенсивности теплообмена проведено в условиях значительного отклонения площади сравниваемых поверхностей. Так площадь поверхности теплообмена радиатора с традиционным оребрением (шаг между ребрами 6,9 мм) составляла 557 см<sup>2</sup>, а площадь поверхности теплообмена радиатора с предложенным оребрением, ребра которого образуют систему миниканалов (шаг между ребрами которого составляет 0,3 мм) – 1038,6 см<sup>2</sup>.

Используя результаты CFD-моделирования, приведенные на рис. 4, можно определить наи-

более приемлемый диапазон скоростей, который необходимо обеспечить для рассеивания заданной величины теплового потока, или определить диапазон отводимого теплового потока при заданном диапазоне скорости набегающего воздушного потока. Так, например, в заданном диапазоне скорости набегающего воздушного потока от 1 до 2 м/с разработанная развитая поверхность теплообмена способна рассеять подводимую охлаждаемым элементом мощность в пределах от 50 до 90 Вт. Именно такой уровень тепловых нагрузок характерен для большинства электронных элементов радиоэлектронной и компьютерной техники.

**Выводы из представленного исследования.** Основные выводы по проведенной работе следующие:

1. Применение системы щелевых миниканалов на поверхности с плоским основанием позволяет в два раза увеличить интенсивность теплообмена по сравнению с радиатором с традиционным оребрением.

2. Полученные результаты свидетельствуют, что количество теплоты, которое способна рассеять исследованная поверхность с установленными на ней миниканалами, пропорционально скорости обдува. Если при скорости набегающего потока 1 м/с такая поверхность способна рассеять 50 Вт подводимой мощности, то при скорости 5 м/с она же способна рассеять 250 Вт, а при скорости 10 м/с – 400 Вт.

3. С увеличением скорости набегающего воздушного потока существенно возрастает аэродинамическое сопротивление теплообменной поверхности и перепад давления, что необходимо учитывать при выборе напорного вентилятора.

4. Необходимо отметить, что полученные результаты справедливы для сухого воздуха и не запыленных потоков.

## Список литературы:

1. A.J.H. Frijns, S.V. Nedeя, A.J. Markvoort, A.A. van Steenhoven, and P.A.J. Hilbers. Molecular Dynamics and Monte Carlo Simulations for Heat Transfer in Micro and Nano-channels, in: Marian Bubak, G. Dick van Albada, Peter M.A. Sloop, Jack J. Dongarra (Eds.), Proceedings of the Workshop on Modelling and Simulation of Multi-Scale Systems, ICCS 2004, Part IV, Springer-Verlag, Berlin, 2004, LNCS 3039, pp. 666-671. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-25944-2\\_85](https://doi.org/10.1007/978-3-540-25944-2_85).
2. Amirah M. Sahar, Mehmed R. Özdemir, Ekhlās M. Fayyadh, Jan Wissink, Mohamed M. Mahmoud, Tassos G. Karayiannis. Single phase flow pressure drop and heat transfer in rectangular metallic microchannels // Applied Thermal Engineering, 93 (2016), pp. 1324-1336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.087>.

3. Николаенко Ю.Е. Экспериментальное исследование одноканального щелевого теплообменника жидкостной системы охлаждения для микропроцессора / Ю.Е. Николаенко, Э.С. Малкин, И.Э. Фуртат, Т.Ю. Николаенко // Технологические системы. – 2007. – № 4(40). – С. 54-62. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/16870>.
4. Малкін Е.С. Методика розрахунку нових високоефективних двокавальних теплообмінників на базі щілинних мікроканалів для відводу теплоти за допомогою води / Е.С. Малкін, І.Е. Фуртат, Ю.Е. Николаенко, Т.Ю. Николаенко // Нова тема. – 2007. – № 4. – С. 11-12. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17801>.
5. Малкин Э.С. Сравнительные исследования двухканального щелевого теплообменника и существующего на рынке аналога / Э.С. Малкин, Ю.Е. Николаенко, И.Э. Фуртат, А.М. Данилов, Т.Ю. Николаенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 3. – С. 50-54. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/52429>.
6. Малкин Э.С. Исследование характеристик щелевого теплообменника с развитой поверхностью теплообмена / Э.С. Малкин, Ю.Е. Николаенко, М.И. Дьячков, Т.Ю. Николаенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 2. – С. 36-39.
7. Письменный Е.Н. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции / Е.Н. Письменный, В.Д. Бурлей, А.М. Терех, А.В. Баранюк, Е.В. Цвященко // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 4. – С. 11-16.

**Баранюк О.В., Николаенко Ю.Е.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗВИНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ З МІНІКАНАЛАМИ

### Анотація

Представлені результати чисельного дослідження теплообміну і гід-равлічного опору в мініканалах, що розташовані перпендикулярно на плоскій основі розвиненої поверхні. Дослідження виконано за допомогою CFD-моделювання. Проведена верифікація результатів моделювання з розрахунковими даними, отриманими за відомим інженерним методикам розрахунку теплогідрравлічних характеристик розвинених поверхонь. Результати дослідження можуть бути використані для оцінки інтенсифікації теплообміну і аналізу течії з метою використання такої поверхні для охолодження радіоелектронної та мікропроцесорної техніки.

**Ключові слова:** мініканали, чисельне дослідження, теплообмін, протягом, моделювання.

**Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E.**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE DEVELOPED SURFACES WITH MINICHANNELS

### Summary

The results of a numerical study of heat transfer and hydraulic resistance in mini-channels located on a flat base of a developed surface are presented. The study was performed using CFD modeling methods. Verification of simulation results with calculated data obtained by well-known engineering methods for calculating the thermal-hydraulic characteristics of developed surfaces was carried out. The results of the study can be used to assess the intensification of heat transfer and flow analysis to use such a surface for cooling electronic and microprocessor technology.

**Keywords:** minichannels, numerical study, heat exchange, flow, simulation.