

УДК 533.6.08:532.527

## CFD–МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ І ТЕПЛООБМІНУ РАДІАТОРА З ПЛАСТИНЧАСТО–РОЗРІЗНИМ ОРЕБРЕННЯМ В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Баранюк О.В., к.т.н.,

[aleksandrW@i.ua](mailto:aleksandrW@i.ua), ORCID: 0000–0001–6008–6465

Воробйов М.В., к.т.н.,

[vorobiov.nikv@gmail.com](mailto:vorobiov.nikv@gmail.com), ORCID: 0000–0001–9621–7658

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

*Авторами проведено аналіз можливості використання радіатора з пластинчасто-розрізним ребренням в умовах вільної конвекції. Використання природної конвекції не вимагає встановлення нагнітачів для організації примусового руху потоку, що забезпечує високу надійність, економічність та зручність в експлуатації охолоджуваних систем електронних приладів. Це особливо актуально для забезпечення надійного функціонування радіоелектронної апаратури рухомих апаратів. В статті наведені результати CFD–моделювання теплообміну та аеродинамічного опору радіаторів з пластинчасто-розрізним ребренням. Виконаний порівняльний аналіз теплообміну і аеродинаміки для чотирьох варіантів радіаторів з пластинчастим гладким та розрізним ребреннями і ребренням з повернутими розрізними частинами на кути 30 і 45° вздовж ребра радіатора. Обчислення проводились за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student. Дана ліцензія є абсолютно безкоштовною (з 2015 року) і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі. Проведена верифікація отриманих даних і відомих експериментальних даних, її розбіжність не перевищує 7%. Показано, що розрізання ребра та поворот їх частин призводить до підвищення інтенсифікації теплообміну на 30% і зростання аеродинамічного опору на 40%. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні систем охолодження процесорів персональних комп'ютерів, підсилювачів потужності передавальних модулів, перспективних енергозберігаючих твердотільних джерел світла, в апаратурі ракетно-космічної техніки та інших.*

*Запропонована численна методика спрямована на удосконалення систем повітряного охолодження при теплофізичному проектуванні електронних приладів з використанням високоефективних ребрених поверхонь.*

*Ключові слова: електронний елемент, система охолодження, числове моделювання, радіатор, пластинчасто-розрізне ребрення, теплообмін, вільна конвекція.*

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день досягнення мікропроцесорної техніки та радіоелектронної апаратури (РЕА) супроводжується різким збільшенням щільності монтажу і мініатюризацією елементної бази, що в свою чергу призводить до підвищення вимог надійності їх елементів. Під елементами розуміють вироби електронної техніки певного функціонального призначення: інтегральні мікросхеми різного ступеня інтеграції, напівпровідникові прилади, транзистори, діоди, резистори, конденсатори, процесори і т.д., які монтуються у блоки і складальні одиниці РЕА.

З метою забезпечення безвідмовної роботи радіоелектронної апаратури, що призначена для експлуатації у широкому діапазоні температур, дослідники і конструктори практикують застосування різних методів охолодження, які забезпечують збереження та стабільність параметрів в допустимих межах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Помітний внесок у теоретичні, числові та експериментальні дослідження з проблем забезпечення теплових режимів елементів РЕА, їх теплофізичного проектування зробили вітчизняні та зарубіжні вчені Г.Н. Дульнев, А.А. Чернишов, Г.В. Резников, Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойний, В.М. Легкий, А. Краус (A. Kraus), Д. Керн (D. Kern), М. Макгуайр (M. McGuire), Р. Уэслати (R. Oueslati), Б. Арпачи (B. Arpacı), А. Бешли (A. Bensely), С. Хариш (S. Harish).

В залежності від характеру та призначення РЕА застосовуються відповідно і різні методи відводу теплоти: природне охолодження (повітряне, рідинне); вимушене повітряне охолодження; вимушене рідинне (без кипіння або з поверхневим кипінням); охолодження на основі зміни агрегатного стану речовини; термоелектричне охолодження. Ефективність того чи іншого способу охолодження залежить від рівня інтенсивності теплообміну [1–10].

Важливою проблемою, що виникає при створенні автономних систем охолодження РЕА, залишається розсіювання теплової енергії. Це пов'язано з тим, що кінцевим елементом у ланцюгу передачі теплоти, як правило, є повітроохолоджувана і розвинена за допомогою оребрення тепловідвідна поверхня. Особливістю такого методу тепловідводу є відносно низькі значення коефіцієнтів тепловіддачі, що для вільної конвекції становлять (5...12) Вт/(м<sup>2</sup>·К). В умовах вимушеної конвекції ці значення досягають (70–170) Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2–4]. Для інтенсифікації теплообміну в цих системах необхідно виконати пошук нових конструкцій ребер, а також ретельну оптимізацію геометрії оребрення тепловідвідної поверхні і способи підвищення її ефективності.

Самий простий метод охолодження РЕА це пасивний відвід теплоти з використанням радіаторів з певною конфігурацією оребрення. При природному охолодженні відвід теплоти від елементів РЕА відбувається за рахунок теплопровідності, природної конвекції навколишнього

середовища та випромінювання. В даному випадку циркуляція теплоносія підтримується перепадом тисків, що виникає за рахунок різниці густин гарячої та холодної областей теплоносія. Спосіб природного охолодження рекомендується для елементів наземних РЕА, до яких не пред'являються жорсткі вимоги по масі та габаритам і який ефективний та економічно доцільний для відносно невеликих розсіюваних потужностей, приблизно на 1 Вт потужності вимагається 25–30 см<sup>2</sup> поверхні охолодження. Такий спосіб може бути застосований у випадках обмеженого і необмеженого простору. При природній конвекції випромінювання може складати біля 40% від загального теплового потоку та зростати зі зниженням тиску (густини) навколишньої середовища. При природній конвекції необхідно розташовувати ребра в такому напрямку, щоб вони найкращим чином омивалися потоком навколишнього середовища.

При природному повітряному способі відводу теплоти від теплонавантаженого елемента РЕА застосовують тепловідвідні поверхні (радіатори) різних конструкцій та різної форми ребрення [1, 5–7]. Ці поверхні необхідно застосовувати не для того, щоб збільшити потужність розсіювання елемента понад встановлену за технічними умовами, а задля максимального зниження робочої температури приладу, наприклад, р-п переходу або температури корпусу при заданій потужності з метою підвищення надійної роботи РЕА. Використання природної конвекції не вимагає додаткових витрат енергії та застосування спеціальних тепловідвідних систем, що забезпечує високу надійність, економічність та зручність в експлуатації охолоджуваних систем електронних приладів та особливо важливо при роботі на рухомих об'єктах. Проте, у зв'язку з невеликими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі тепловідвід природною конвекцією можливий тільки при відносно високому температурному напорі і вимагає великих площ поверхонь теплообміну. В умовах жорстких обмежень по масо-габаритним параметрам це викликає необхідність детального аналізу та розрахунку навантажень теплорозсіюючих поверхонь.

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена та експериментально досліджена нова тепловідвідна поверхня з розрізними пластинчастими ребрами для систем повітряного охолодження [6–9]. Виконані експериментальні дослідження показали, що розрізка пластинчастого ребра є ефективним засобом інтенсифікувати процес теплообміну і суттєво знизити робочу температуру теплонавантаженого елемента РЕА. Проте, дослідження працездатності такої форми ребра в умовах вільної конвекції не виконувалось, тому дана робота напружена на визначення саме цього аспекту.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної статті є розробка методу CFD–моделювання нової конструкції радіатора з пластинчато-розрізним ребренням для роботи в умовах вільної конвекції. Робота виконується для подальшої оптимізації геометричних характеристик

тепловідвідної оребреної поверхні охолоджуючої системи і підвищення ефективності роботи РЕА в цілому.

**Основна частина.** Моделювання термоконвективних явищ, що мають місце при омиванні твердотільних поверхонь радіатора з пластинчасто-розрізним оребренням, виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей тепловідвідних поверхонь в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent. Об'єктами дослідження було обрано базову конструкцію радіатора з гладким пластинчастим оребренням та дві нові модифіковані конструкції цього радіатора: з пластинчасто-розрізним оребренням та з пластинчасто-розрізним оребренням і повернутими під певним кутом „пелюстками”. Результати чисельних досліджень теплових та аеродинамічних характеристик нових модифікацій радіатора порівнювались з аналогічними характеристиками базової конструкції та з експериментальними даними, отриманими раніше.

Геометричні характеристики поверхні, що не змінювались в процесі досліджень: розміри основи  $L \times L = 70 \times 70$  мм, товщина основи  $b = 3$  мм, пластинчасті ребра мають товщину  $\delta = 1$  мм, висоту  $h = 35$  мм і крок між ними  $t = 6,9$  мм. Матеріал моделей – мідь.

Відомо, що термоконвективні явища в рідинах загалом описуються досить складною нелінійною системою рівнянь в часткових похідних. Ця система містить рівняння збереження енергії, імпульсу і маси та рівняння стану. В числовому моделюванні широко застосовуються різноманітні наближені підходи, найбільш поширеним є підхід Буссінеска. При використанні цього підходу вважають, що фізичні параметри середовища постійні, густина залежить тільки від температури і цю залежність необхідно враховувати тільки в виразі для сили тяжіння. Тому в розробленій моделі, ця відома вихідна система рівнянь для ньютонівських рідин містить [10]:

Рівняння нерозривності потоку:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0. \quad (3)$$

Рівняння Нав'є-Стокса для ламінарного режиму течії:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{v} + \beta g \vec{g}. \quad (4)$$

Рівняння Фур'є-Кірхгофа:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \nabla \vartheta = a \nabla^2 \vartheta. \quad (5)$$

де  $\rho_0$  – середнє значення густини середовища при температурі  $T_0$ , а  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення води, що може бути обчислений за допомогою залежності:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_T. \quad (6)$$

В дану систему, яка визначає невідомі функції  $\vec{v}$ ,  $p/\rho_0$ ,  $\vartheta$  входять три

параметри: коефіцієнт теплопровідності  $a$ , коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$ , прискорення вільного падіння  $g$  і коефіцієнт об'ємного розширення повітря  $\beta$ . Всі вище перераховані коефіцієнти в моделі описуються за допомогою поліноміальних залежностей від температури.

На рис. 1 представлена тепловідвідна поверхня, що розміщена в плоскопаралельному каналі аеродинамічної труби. Тонкими лініями виділений дослідний елемент поверхні, стрілками показаний напрям повітряного потоку і підведений тепловий потік, що у сукупності визначає область рішення поставленої задачі.

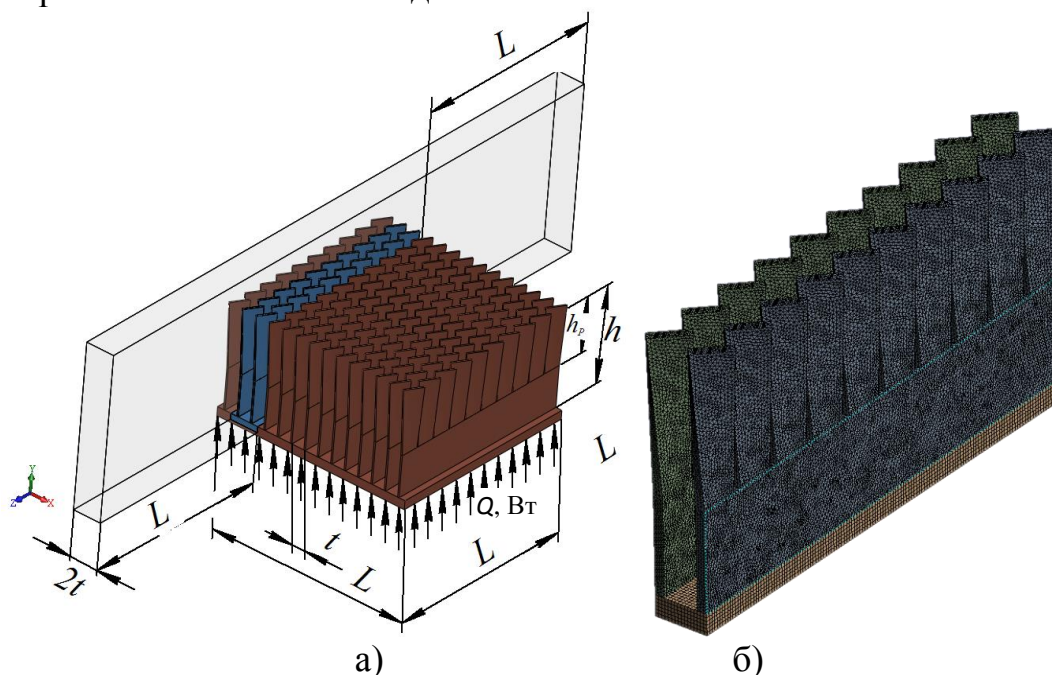


Рис. 1. Область рішення задачі (а) та фрагмент розрахункової сітки для твердотільних об'ємів (б)

В розробленій CDF-моделі для моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки в рідині використовувалась тетраедрична нерівномірна, зі згущенням до стінок тетраедрична сітка. При цьому в місцях де рідина омиває твердотільну поверхню моделювалась область примежового шару за допомогою функції Inflation (ця функція дозволяє створювати дрібну сітку, густина якої збільшується в напрямку встановленої грані. Використовується переважно для дослідження примежових шарів потоку). Форма скінченого елемента, що моделює примежовий шар – паралелепіпед. Мінімальний та максимальний кроки при цьому складали  $1 \cdot 10^{-6}$  і  $1 \cdot 10^{-3}$  м. Кількість чарунок в примежовому шарі не перевищувала 10 од.

Поставлена задача вирішувалась в нестационарній постановці з дотриманням вимоги досягнення незалежності рішення від щільності розрахункової сітки. Модель розроблювалась для оптимальної глибини розрізки  $h_p/h = 0,6$ , що визначена експериментально в роботі [8]. При моделюванні для всіх типорозмірів вибирались незмінними наступні

граничні умови:

- 1) температура повітря навколо тепловідвідної поверхнею ( $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- 2) теплова потужність, яку потрібно розсіяти ребреною поверхнею рівномірно підводилась до її основи ( $Q = 100; 80; 60; 40\text{ Вт}$ ) (рис.1).

На рис. 2–5 представлено візуалізацію зміни в часі траєкторій руху висхідних потоків та полів температур в поздовжньому і поперечному перерізах міжреберного каналу радіатора. Представлена візуалізація отримана у випадку, коли до основи ребреної поверхні підведено  $100\text{ Вт}$  теплової потужності.

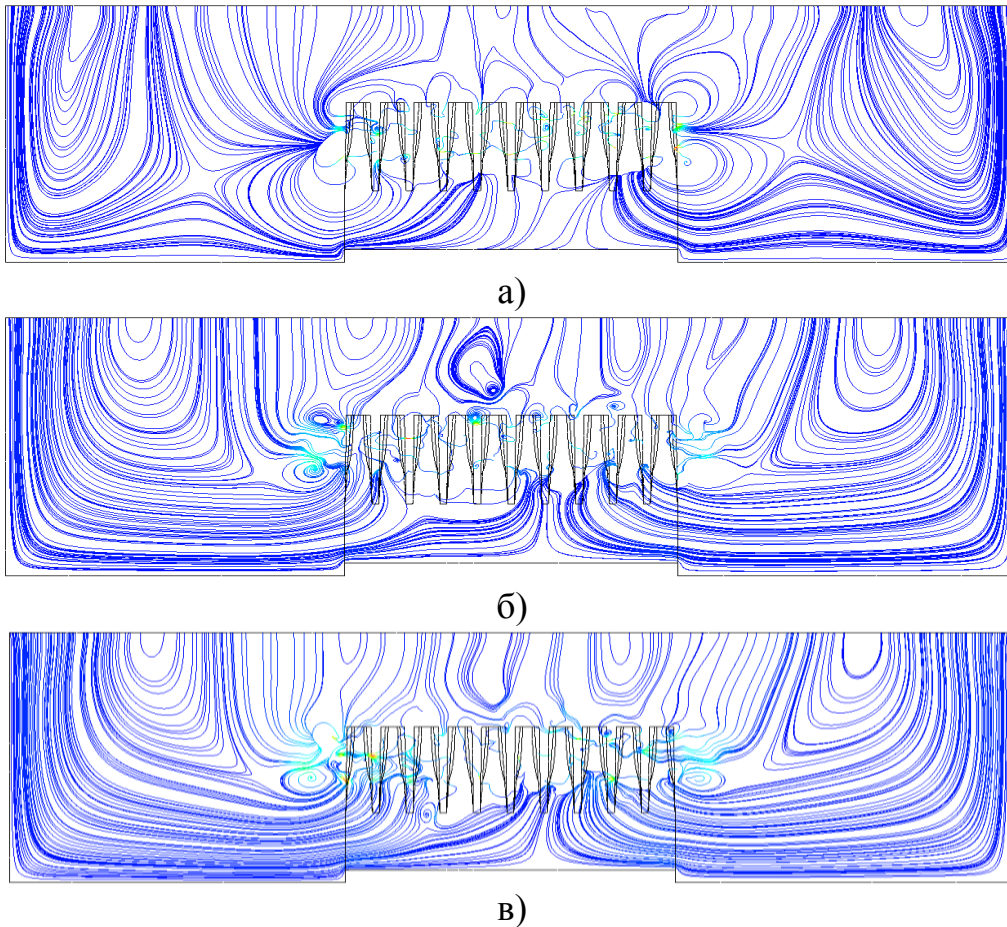


Рис. 2. Візуалізація висхідних потоків по центру міжреберного каналу радіатора з поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 30^{\circ}$  в поздовжньому напрямку для  $\tau = 2\text{ сек}$  (а),  $\tau = 8\text{ сек}$  (б) та  $\tau = 100\text{ сек}$  (в)

Як свідчить аналіз даних рис. 2, вздовж висоти ребра, до початку розташування „пелюсток” спостерігається лінійний розподіл траєкторій руху частинок, який співпадає з аналогічним розподілом в радіаторі з пластинчастим ребренням. Як тільки потік, потрапляє в область розташування „пелюсток”, спостерігається складна тривимірна структура траєкторій руху частинок, яка погано піддається опису. При чому слід зазначити, що у випадку використання повороту „пелюсток” на кути  $\varphi = 30^{\circ}$  і  $45^{\circ}$  швидкість потоку, порівняно з гладким пластинчастим радіатором, зростає від  $0,35\text{ м/с}$  до  $1,2\text{ м/с}$ .

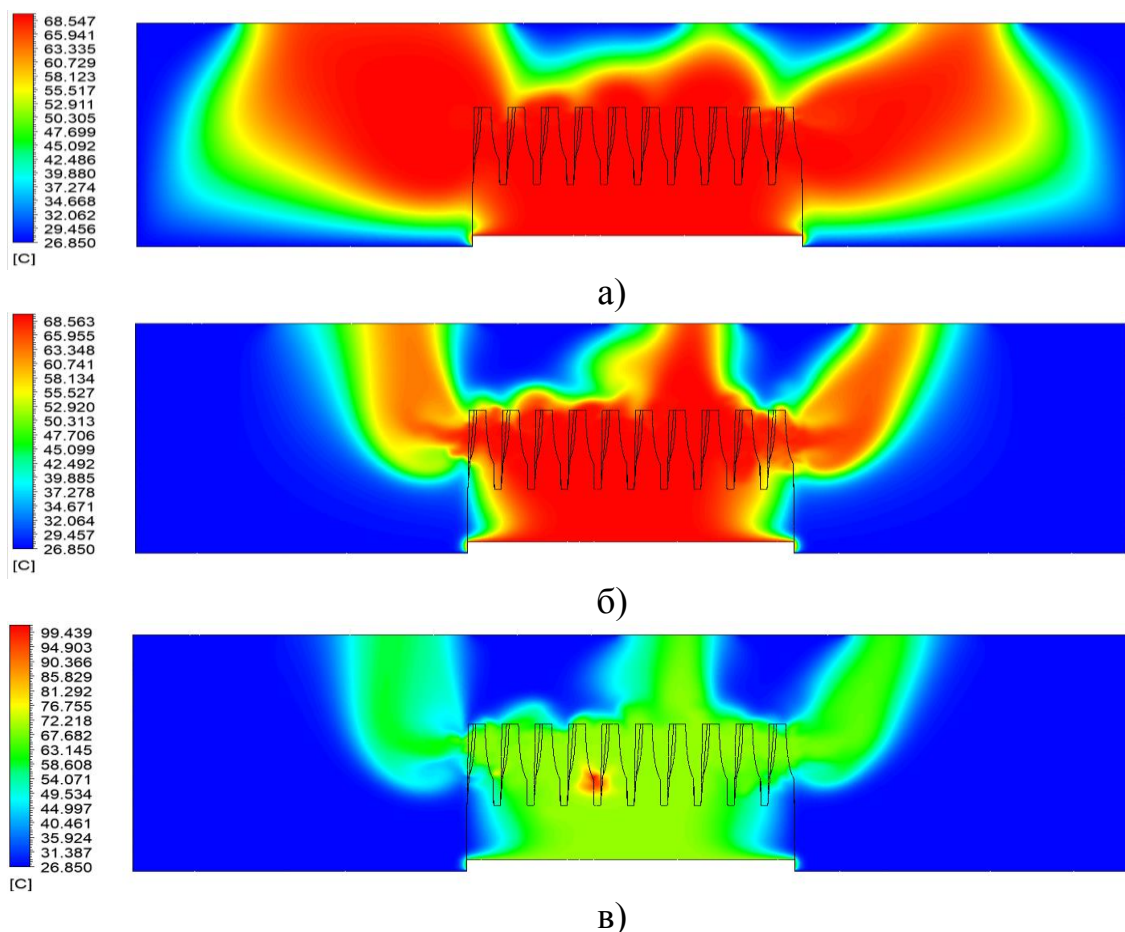


Рис. 3. Візуалізація поля температур по центру міжреберного каналу радіатора з поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 30^\circ$  в поздовжньому напрямку для  $\tau = 2$  сек (а),  $\tau = 8$  сек (б) та  $\tau = 100$  сек (в)

Аналіз рис. 3 і 4 свідчить, що в нестационарному полі температур періодично виникають області з перегріті відносно основного потоку. Їх виникнення, на нашу думку, пов'язано з флуктуаціями поля швидкостей внаслідок зміни поля густин повітряного потоку. Проте, слід зазначити, що наявність масиву „пелюсток” призводить до інтенсивного охолодження торців ребреної поверхні (рис.3б та рис. 3в) внаслідок утворення бічних вихорів, що інтенсифікують процес теплообміну і-за того, що рухаються з більш високою відцентровою швидкістю. Згадана обставина призводить до зменшення температури основи радіатора. Так, для підведеної потужності 100 Вт на момент початку роботи радіатора ( $\tau = 2$  сек) вона становила  $68,5^\circ\text{C}$  і поступово зменшувалась до  $54,1^\circ\text{C}$ . При зменшенні теплового навантаження до 80, 60 і 40 Вт температура основи на момент часу становила  $43,3^\circ\text{C}$ ,  $32,5^\circ\text{C}$ ,  $21,6^\circ\text{C}$  відповідно.

Приведена на рис. 4 змінна в часі візуалізація висхідних потоків підтверджує, що розрізка і поворот розрізних частин ребер призводить до інтенсифікації теплообміну порівняно з гладкою, нерозрізною поверхнею.

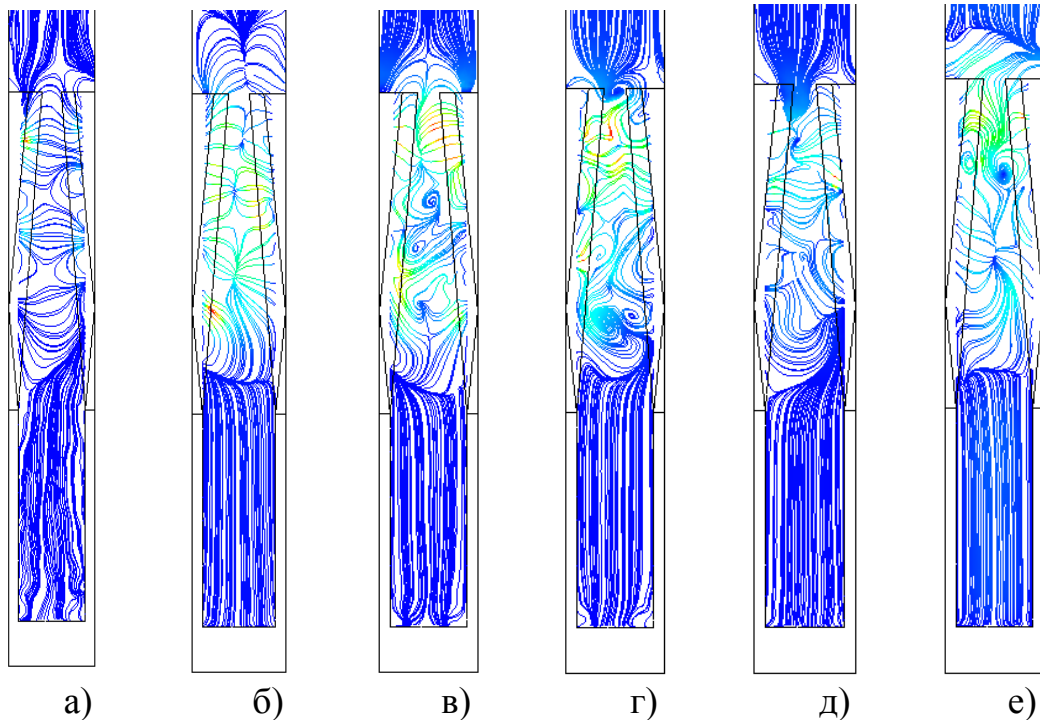
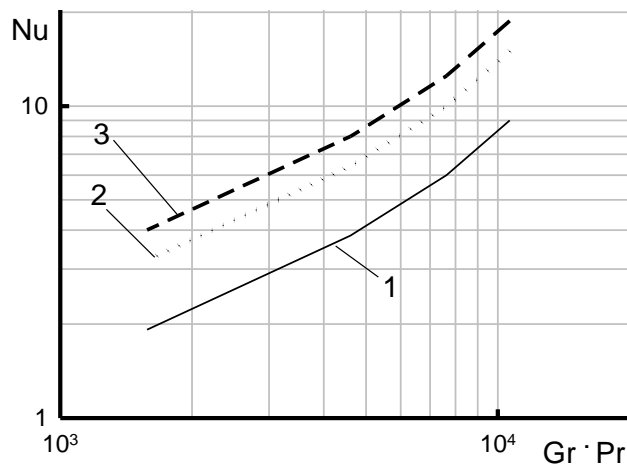


Рис. 4. Візуалізація висхідних потоків по центру міжреберного каналу радіатора з поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 30^\circ$  в поперечному напрямку для  $\tau = 2$  с (а),  $\tau = 4$  с (б),  $\tau = 6$  с (в),  $\tau = 8$  с (г),  $\tau = 10$  с (д) та  $\tau = 100$  с (е)

Для визначення середніх характеристик теплообміну, а саме діапазону чисел Нусельта, Грасгофа і Прандтля засобами ANSYS–Fluent визначено їх складові. В якості характерного розміру використовувався еквівалентний діаметр поперечного прохідного перерізу поверхні, який розраховувався за формулою:

$$d_e = 4 \frac{H}{P} = 4 \frac{(s - \delta)h + s(58 - h)}{2h + s} = 4 \frac{(12 - 4) \times 42 + 6 \times (58 - 42)}{2 \times 42 + 12} = 18 [\text{мм}]$$



1 – радіатор з суцільним гладким пластинчастим оребренням; 2 – радіатор з поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 30^\circ$ ; 3 – радіатор з поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 45^\circ$

Рис. 5. Інтенсивність теплообміну досліджених типів радіаторів



Згідно з даними рис. 5, найменшим рівнем конвективної тепловіддачі володіє поверхня з гладким пластинчастим ребренням ( $h_p/h = 0$ ). Вище розташовані дані з розрізкою ребер  $h_p/h = 0,6$  і поворотом „пелюсток” на кут  $\varphi = 30^\circ$ , при цьому інтенсивність теплообміну підвищується на 45%. Поворот „пелюсток” на кут  $\varphi = 45^\circ$  призводить до додаткового зростання інтенсивності теплообміну. Аналіз отриманих даних показав, що поворот „пелюсток” на кут  $\varphi = 45^\circ$  інтенсифікує теплообмін і ще на 15%, порівняно з гладкою пластинчасто-ребристою поверхнею ( $h_p/h = 0$ ).

В якості перспективи подальших досліджень, отримані розрахункові дані слід порівняти з експериментальними.

**Висновки.** Результати моделювання теплообміну дослідних поверхонь свідчать, що розрізка ребер і поворот „пелюсток” сприяють підвищенню інтенсивності теплообміну. Розроблена CFD–модель теплообміну і аеродинамічного опору для радіатора з пластинчасто-розрізним ребренням, який можна застосовувати в системах повітряного охолодження різних радіоелектронних засобів. Зокрема, отримані результати можуть бути корисними при проектуванні центральних процесорних пристроїв, підсилювачів потужності передавальних модулів, перспективних енергозберігаючих твердотільних джерел світла, в апаратурі ракетно-космічної техніки та інших.

Запропонована численна методика спрямована на удосконалення систем повітряного охолодження при теплофізичному проектуванні електронних приладів з використанням високоефективних ребрених поверхонь.

### *Література*

1. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
2. Xiaoling Yu, Jianmei Feng, Quanke Feng, Qiuwang Wang. Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 2005. No. 25. P.173–182. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.06.016
3. Kwang-Yong Kim, Mi-Ae Moon. Optimization of a stepped circular pin-fin array to enhance heat transfer performance. *Heat Mass Transfer*. 2009. No. 46. P.63–74. DOI: 10.1007/s00231–009–0544–3
4. H. R Goshayeshi, F. Ampofo. Heat Transfer by Natural Convection from a Vertical and Horizontal Surfaces Using Vertical Fins. *Energy and Power Engineering*. 2009, P.85–89. DOI:10.4236/epe.2009.12013
5. S. Sadrabadi Haghighi, H.R. Goshayeshi, Mohammad Reza Safaei. Natural convection heat transfer enhancement in new designs of plate-fin based heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. No. 125. P.640–647. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122
6. Pis'mennyi, E.N., Terekh, A.M., Rogachev, V.A., Burlei, V.D., Rudenko,

- A.I. Calculation of convective heat transfer of plane surfaces with wire-net finning immersed in a cross-flow. *Heat Transfer Research*. 2005. No. 36(1–2), P. 39–46. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i12.60
7. Pismennyi, Ye.N., Rogachev, V.A., Bosaya, N.V. Investigation into efficiency characteristics of a new heat transfer surface with mesh finning under free convection. *Heat Transfer Research*. 1999. No. 30(1), P.30–35.
  8. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции. *Промышленная теплотехника*. 2005. Т. 27. №4. С.11–16.
  9. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д., Баранюк А.В. Аэродинамическое сопротивление пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции. *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28. №4. С.29–33.
  10. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно конвективный теплообмен. М.: Наука и технологии. 1982. 400 с.

## **CFD–МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА РАДИАТОРА С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ**

Баранюк А.В., Воробьев Н.В.

*Авторами проведен анализ возможности использования радиатора с пластинчато-разрезным оребрением в условиях свободной конвекции. Использование естественной конвекции не требует установки нагнетателей для организации принудительного движения потока, обеспечивает высокую надежность, экономичность и удобство в эксплуатации охлаждаемых систем электронных приборов. Это особенно актуально для обеспечения надежного функционирования радиоэлектронной аппаратуры подвижных аппаратов. В статье приведены результаты CFD моделирования теплообмена и аэродинамического сопротивления радиаторов с пластинчато-разрезным оребрением. Выполненный сравнительный анализ теплообмена и аэродинамики для четырех вариантов радиаторов с пластинчатым гладким и разрезным оребрением и оребрением с обращенными разрезными частями на углы 30 и 45° вдоль ребра радиатора. Вычисления проводились с помощью академической лицензии программного комплекса ANSYS Student. Данная лицензия является абсолютно бесплатной (с 2015 года) и предназначена для решения ознакомительных и образовательных задач в академической среде. Проведена верификация полученных данных и известных экспериментальных данных, ее расхождение не превышает 7%. Показано, что разрезания ребра и поворот их частей приводит к повышению интенсификации теплообмена*

на 30% и рост аэродинамического сопротивления на 40%. Полученные результаты могут быть полезными при проектировании систем охлаждения процессоров персональных компьютеров, усилителей мощности передающих модулей, перспективных энергосберегающих твердотельных источников света, в аппаратуре ракетно-космической техники и др.

Предложенная многочисленная методика направлена на совершенствование систем воздушного охлаждения при теплофизическом проектировании электронных устройств с использованием высокоэффективных ребренных поверхностей.

Ключевые слова: электронный элемент, система охлаждения, численное моделирование, радиатор, пластинчато-разрезное ребрение, теплообмен, свободная конвекция.

## **SIMULATION OF FLOW AND HEAT EXCHANGE OF A RADIATOR WITH PLATE-SPLIT FINNING IN THE CONDITIONS OF FREE CONVECTION**

Alexander Baranyuk, Mykyta Vorobiov

*The authors analyzed the possibility of using a radiator with plate-split fins in free convection. The use of natural convection does not require the installation of superchargers to organize the forced movement of the flow, which provides high reliability, efficiency and ease of operation of cooled systems of electronic devices. This is especially important to ensure the reliable operation of electronic equipment of mobile devices. The article presents the results of CFD-modeling of heat transfer and aerodynamic resistance of radiators with plate-split fins. A comparative analysis of heat transfer and aerodynamics for four variants of radiators with lamellar smooth and split fins and fins with rotated split parts at angles of 30 and 45 ° along the edge of the radiator. The calculations were performed using the academic license of the ANSYS Student software package. This license is absolutely free (since 2015) and is designed to solve educational and educational problems in the academic environment. Verification of the obtained data and known experimental data, its discrepancy does not exceed 7%. It is shown that cutting the ribs and rotating their parts leads to an increase in heat exchange intensification by 30% and an increase in aerodynamic drag by 40%. The obtained results can be useful in the design of cooling systems for personal computer processors, power amplifiers of transmission modules, promising energy-saving solid light sources, in the equipment of rocket and space technology and others.*

*Numerous methods are proposed to improve air cooling systems in thermophysical design of electronic devices using highly efficient ribbed surfaces.*

*Keywords: electronic element, cooling system, numerical simulation, radiator, plate-split fins, heat transfer, free convection.*

### **References**

1. Dulnev G.N. (1984) *Heat and mass transfer in electronic equipment: Textbook for universities in the specialty «Design and production of radio equipment»*. Moscow: Higher school. [in Russian].
2. Xiaoling Yu, Jianmei Feng, Quanke Feng, Qiuwang Wang. (2005) Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink. *Applied Thermal Engineering*. No. 25. P.173–182. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.06.016
3. Kwang-Yong Kim, Mi-Ae Moon. (2009) Optimization of a stepped circular pin-fin array to enhance heat transfer performance. *Heat Mass Transfer*. No. 46. P.63–74. DOI: 10.1007/s00231–009–0544–3
4. H. R Goshayeshi, F. Ampofo. (2009) Heat Transfer by Natural Convection from a Vertical and Horizontal Surfaces Using Vertical Fins. *Energy and Power Engineering*. P.85–89. DOI:10.4236/epe.2009.12013
5. S. Sadrabadi Haghighi, H.R. Goshayeshi, Mohammad Reza Safaei. (2018) Natural convection heat transfer enhancement in new designs of plate-fin based heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. No. 125. P.640–647. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122
6. Pis'mennyi, E.N., Terekh, A.M., Rogachev, V.A., Burlei, V.D., Rudenko, A.I. (2005) Calculation of convective heat transfer of plane surfaces with wire-net finning immersed in a cross-flow. *Heat Transfer Research*. No. 36(1–2), P. 39–46. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i12.60 [in Ukrainian].
7. Pismennyi, Ye.N., Rogachev, V.A., Bosaya, N.V. (1999) Investigation into efficiency characteristics of a new heat transfer surface with mesh finning under free convection. *Heat Transfer Research*. No. 30(1), P.30–35. [in Ukrainian].
8. Pismenny E.N., Burlei V.D., Terekh A.M., Baranyuk A.V., Tsvyashchenko E.V. (2005) Heat transfer of flat plate surfaces with split finning under forced convection. *Industrial heating technology*. Vol. 27. №4. P.11–16. [in Ukrainian].
9. Pismenny E.N., Terekh A.M., Rogachov V.A., Burley V.D., Baranyuk A.V. (2006) Aerodynamic drag of plate surfaces with split ribbing under forced convection. *Industrial heating technology*. Vol. 28. №4. P.29–33. [in Ukrainian].
10. Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. (1982) Free convective heat transfer. *Moscow: Science and technology*. [in Russian].