

## Математическое моделирование теплообмена и гидродинамики в пластинчатых радиаторах с круглыми фасками

*О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.З. Шакурова, Я.П. Голубев*

*Казанский государственный энергетический университет*

**Аннотация:** Путем численного моделирования проведено исследование теплообмена в пластинчатых радиаторах с круглыми фасками различной глубины: 0,55 мм; 1,1 мм; 1,65 мм. Решена задача обтекания радиатора потоком воздуха с массовым расходом от  $10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/с и температурой 293 К. К радиатору подводилось тепло с помощью нагревателя, на котором задавалась температура от 323 до 353 К. По результатам расчетов построены графики изменения теплового потока, перепада давления и показателя энергетической эффективности в зависимости от массового расхода воздуха. Результаты исследований показали, что радиатор с круглыми фасками глубиной 1,65 мм обеспечивает самые высокие значения теплового потока и показателя энергетической эффективности, а также наименьший перепад давления.

**Ключевые слова:** радиатор, система охлаждения, численное моделирование, вычислительная гидродинамика, теплообмен, тепловой поток, перепад давления, энергоэффективность, расчет, электроника.

### Введение

Разработка эффективных стратегий охлаждения необходима для обеспечения надежной и быстрой работы устройств микроэлектроники [1]. Повышение температуры устройства выше предельных значений (80-85 °С) приводит к снижению его производительности, сбоям в работе и поломке. Для регулирования температуры электроники применяют системы охлаждения [2]. Основным элементом системы является радиатор, имеющий пластинчатую или штыревую конструкцию. Геометрия ребер радиатора оказывает значительное влияние на теплообмен и гидродинамику [3]. С целью улучшения теплогидравлических характеристик радиатора специалистами в данной области проведены исследования по оптимизации геометрии ребер [4-6]. Известно о применении гофрированных [7,8], перфорированных [9,10], трапециевидных [11,12] и V-образных ребер [13], ребер с плавниками и вырезами [14]. Исследования [9] показали, что радиаторы с круглыми и квадратными перфорациями ребер имеют на 26,5%

---

и 23,2% более высокие значения числа Нуссельта и на 29-41% меньший перепад давления, чем радиатор без перфораций. В работе [10] авторы исследовали влияние количества и диаметра перфораций на тепловые характеристики радиатора и выяснили, что существуют оптимальное количество перфораций и оптимальный их диаметр, при которых достигаются лучшие тепловые характеристики. Авторы [11,12] предложили трапециевидную геометрию ребер и исследовали влияние конического угла наклона ( $1^\circ$ ,  $2^\circ$  и  $3^\circ$ ) на теплопередачу. Результаты исследований показали, что радиатор с коническим наклоном ребер  $2^\circ$  обеспечивает самые высокие числа Нуссельта (до 968 при скорости воздуха 12, 2 м/с). В работе [13] исследовали характеристики радиаторов с ребрами прямоугольной и V-образной формы с коридорным и шахматным расположением. Результаты исследований показали, что прямоугольные ребра с шахматным расположением обеспечивают лучшее рассеивание тепла. Авторы [14] добавили к ребрам радиатора плавники и вырезы овальной, треугольной и квадратной геометрии. Численные и экспериментальные исследования показали, что по сравнению с радиатором с обычными прямыми ребрами, радиатор с плавниками и вырезами лучше рассеивает тепло.

Итак, в известной литературе исследован ряд способов оптимизации конструкции радиатора с целью улучшить его тепловые характеристики. Однако, в литературе не исследовано влияние геометрии фаски радиатора на теплообмен и гидродинамику. Целью данной работы является исследование влияния геометрии и глубины фаски на теплообмен и гидродинамику в пластинчатом радиаторе.

### **Постановка задачи и метод решения**

Решена задача обтекания нагретых пластинчатых радиаторов потоком воздуха. Построены 3D-модели радиаторов без фасок (Рисунок 1, а) и с

---

круглыми фасками (Рисунок 1, б), при этом глубина фаски  $h$  составляла: 0,55; 1,1 и 1,65 мм.

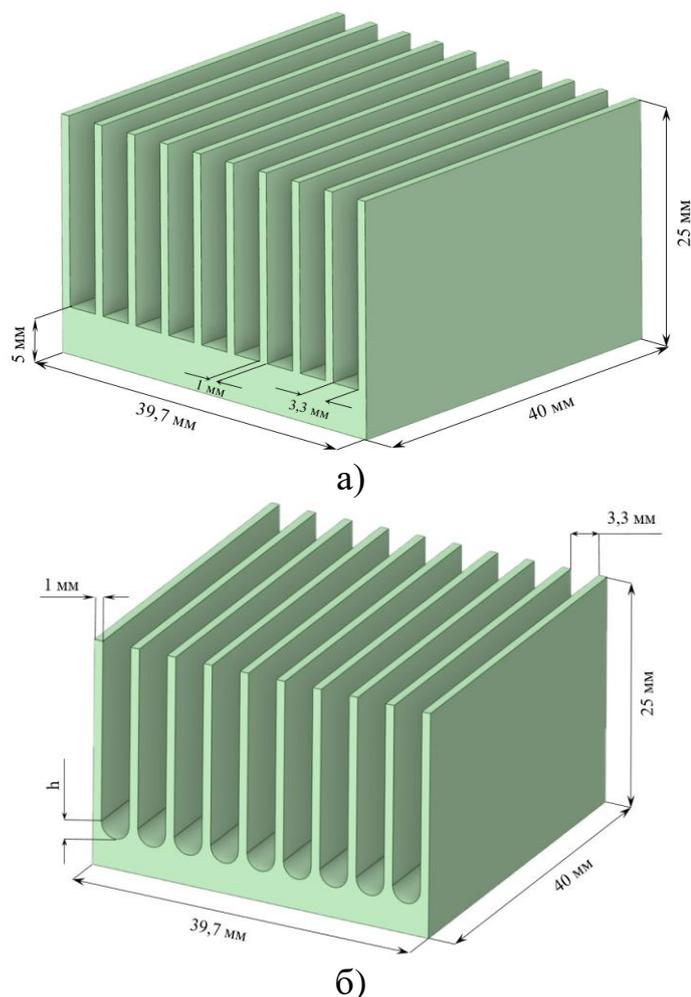


Рис. 1. – Изображения 3D-моделей пластинчатых радиаторов без фаски (а) и с круглой фаской (б).

Путем вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS (v.19.2) проведены параметрические расчеты теплового потока, перепада давления и показателя энергетической эффективности в приближении стационарного потока. В расчетах применялась SST  $k-\omega$  модель турбулентности. На входе в расчетную область задавали температуру воздуха  $T_{\text{возд}}=293$  К и массовый расход  $G_m$ :  $10^{-3}$ ,  $2 \cdot 10^{-3}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Температура нагревателя, имитирующего работу электронного устройства  $T$

составляла: 323; 328; 333; 338; 343; 348; 353 К. Нагреватель расположен под теплообменником и на рисунках условно не показан. Исследования проводились для двух вариантов положения вентилятора: сбоку и сверху, соответственно осуществлялся горизонтальный или вертикальный обдув радиатора.

Показатель энергетической эффективности рассчитывали по следующей формуле (1) [15]:

$$E = Q / \delta P, \quad (1)$$

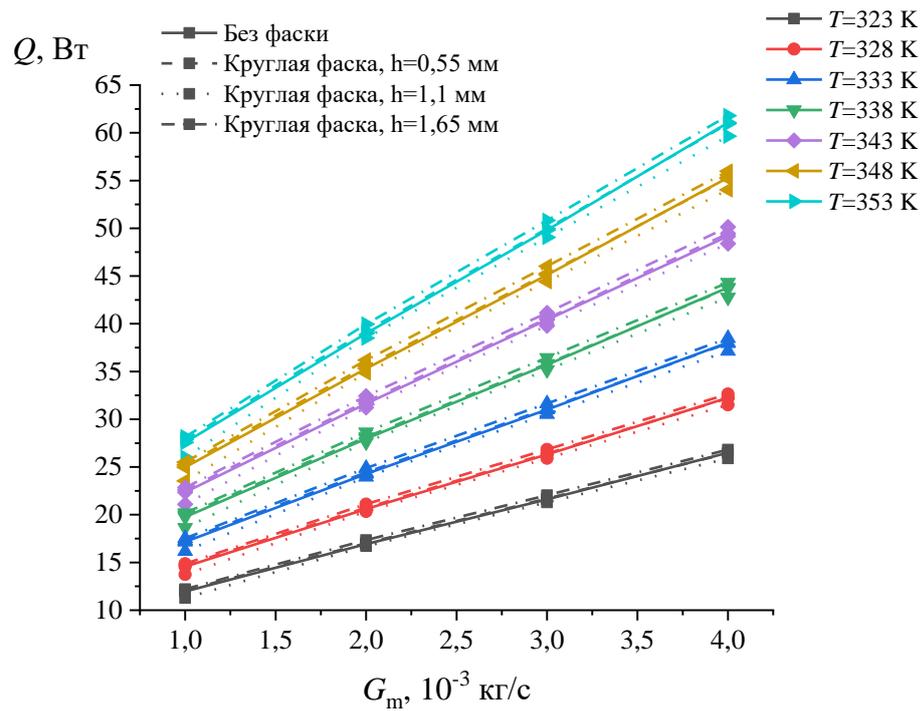
где  $Q$  – тепловой поток с поверхности радиатора, Вт;  $\delta P$  – мощность, затрачиваемая на прокачку воздуха через радиатор, Вт, которая определяется по формуле (2) [15]:

$$\delta P = G_v \cdot \Delta p = G_m / \rho \cdot \Delta p, \quad (2)$$

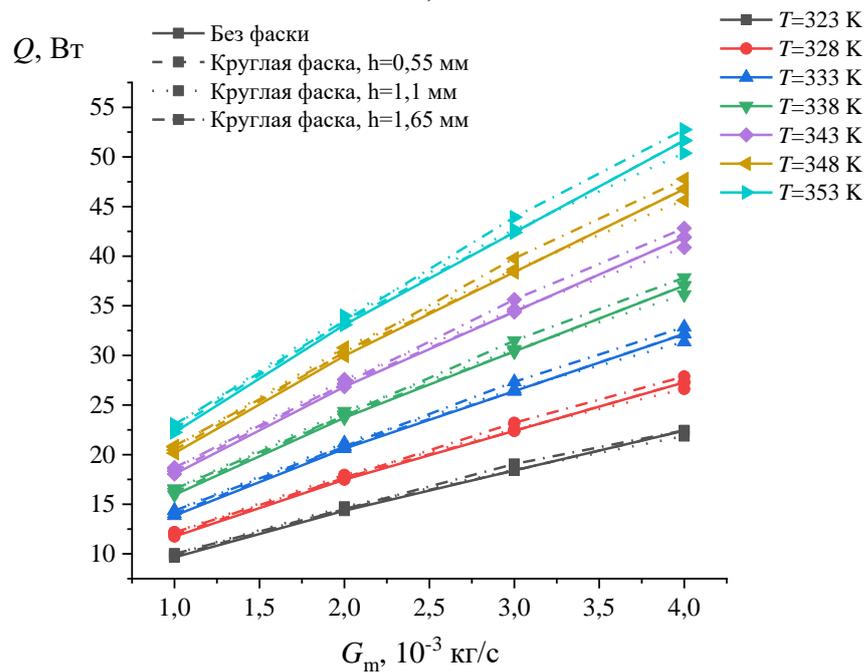
где  $G_v$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $G_m$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $\Delta p$  – перепад давления, Па.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчетов теплового потока представлены на рисунке 2. Как мы видим из графиков, геометрия фаски и её глубина незначительно влияют на тепловой поток. При горизонтальном обдуве круглые фаски глубиной 0,55 обеспечивают тот же тепловой поток, что и радиатор без фаски. В то же время фаски глубиной 1,1 мм и вовсе показывают снижение теплового потока относительно стандартной модели без фаски. Только радиатор с круглыми фасками глубиной 1,65 мм обеспечивает до 2,5% более высокий тепловой поток. При вертикальном обдуве, напротив, круглые фаски обеспечивают более высокий тепловой поток, но только при небольшом массовом расходе (до  $3 \cdot 10^{-3}$  кг/с). Максимальный прирост по тепловому потоку (до 3,6%) показал радиатор с круглыми фасками глубиной 1,65 мм. Также мы можем заметить, что при горизонтальном обдуве в целом обеспечивается более высокий тепловой поток.



а)



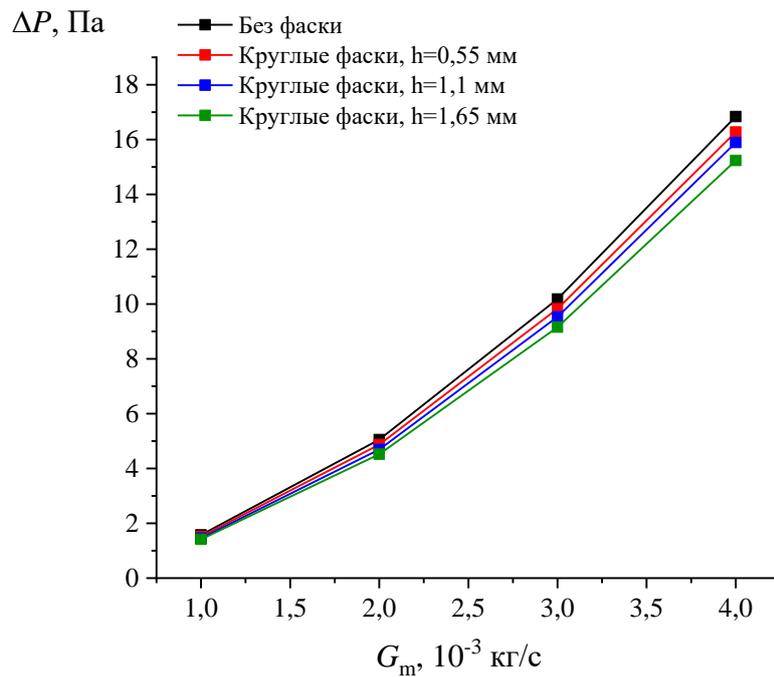
б)

Рис. 2. – Изменение теплового потока от массового расхода воздуха для радиаторов без фасок и с круглыми фасками различной глубины  $h$  при горизонтальном (а) и вертикальном (б) обдуве.

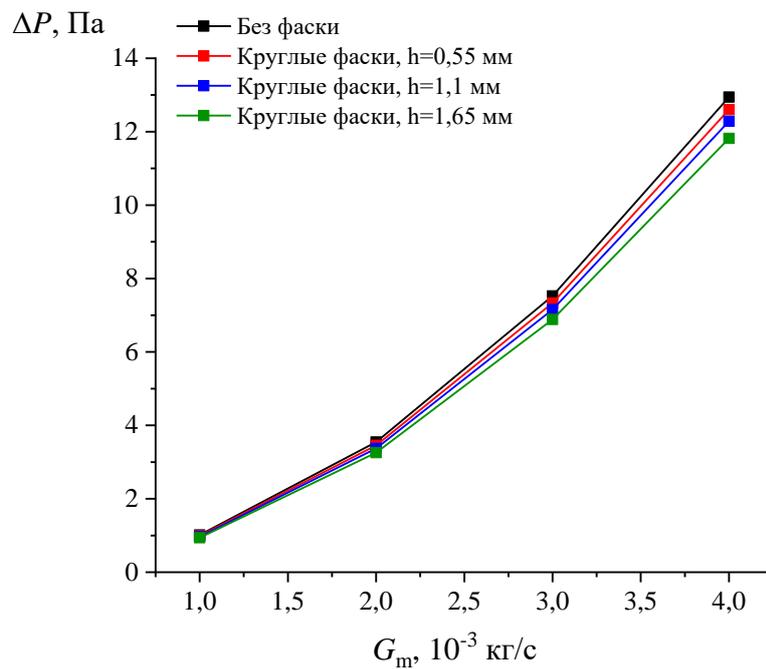
Результаты расчетов перепада давления представлены на рисунке 3. Как мы видим из графиков, во всех исследованных случаях радиатор с круглыми фасками обеспечивает меньший перепад давления, чем радиатор без фаски. С увеличением глубины фаски перепад давления снижается. Так, относительно радиатора без фаски, снижение перепада давления составляет до 3,66% для круглых фасок глубиной 0,55 мм, до 7,25% для круглых фасок глубиной 1,1 мм, до 10,5% для круглых фасок глубиной 1,65 мм. Также необходимо отметить, что при вертикальном обдуве обеспечивается меньший перепад давления, чем при горизонтальном.

Результаты расчетов показателя энергетической эффективности радиаторов при температуре нагревателя 338 К представлены на рисунке 4. Наибольшие значения энергетической эффективности показал радиатор с круглыми фасками глубиной 1,65 мм. В сравнении с радиатором без фасок, повышение показателя энергетической эффективности составило до 14,5% при горизонтальном обдуве и до 13,2% при вертикальном обдуве. Это связано с тем, что радиатор с круглыми фасками обеспечивает меньший перепад давления. Также необходимо отметить, что с изменением массового расхода прирост по энергетической эффективности относительно радиатора без фаски меняется. Так, при  $G_m=10^{-3}$  кг/с прирост по энергетической эффективности радиатора с круглыми фасками глубиной 1,65 мм относительно радиатора без фасок составляет 13,73%, при  $G_m=2 \cdot 10^{-3}$  кг/с прирост  $E$  повышается до 14,5%, при  $G_m=3 \cdot 10^{-3}$  кг/с прирост  $E$  снижается до 13,44%, при  $G_m=4 \cdot 10^{-3}$  кг/с прирост  $E$  снижается до 11,82%. Также необходимо отметить, что при вертикальном обдуве значения показателя энергетической эффективности выше. Таким образом, несмотря на то, что радиатор с круглыми фасками не показал значительного прироста по тепловому потоку, он обеспечил наименьший перепад давления, что поспособствовало повышению энергетической эффективности в целом.

---

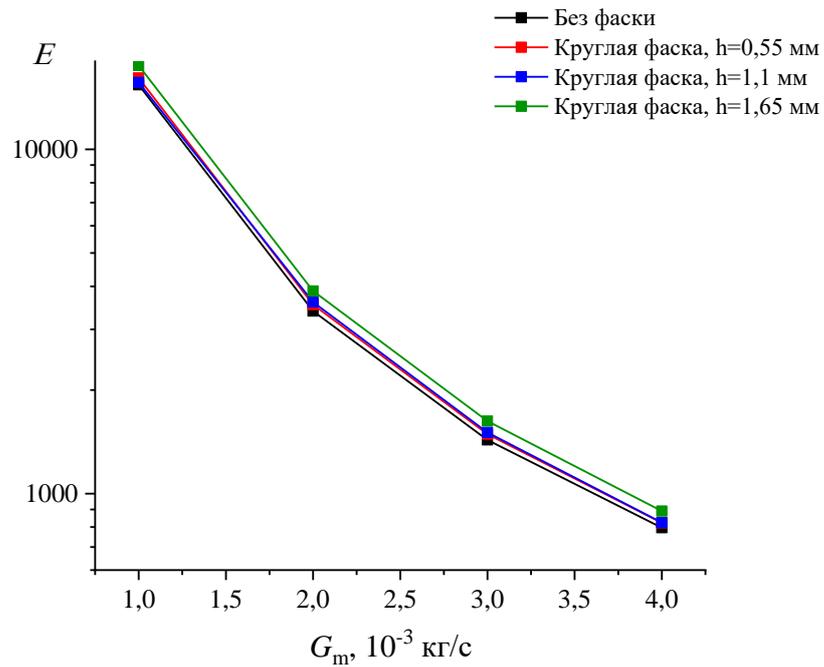


а)

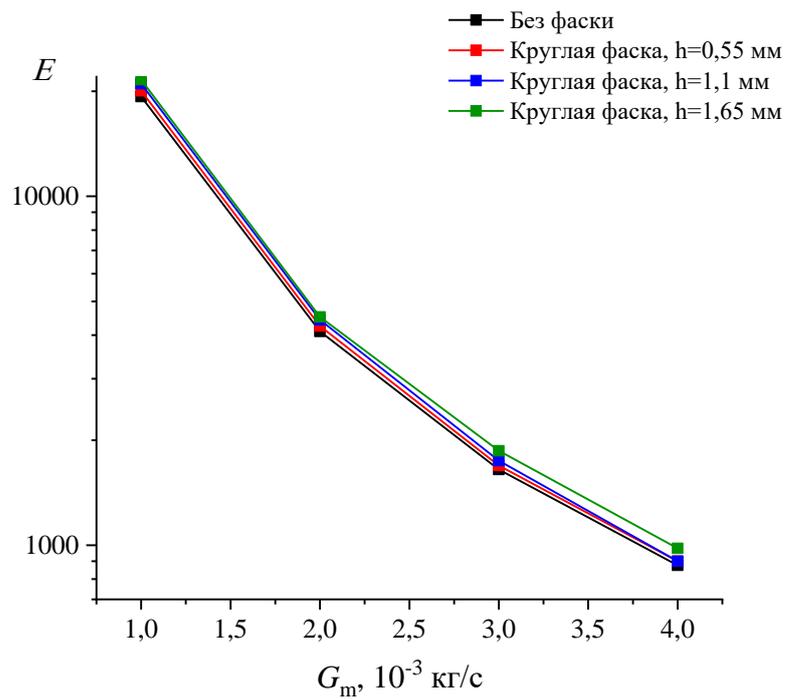


б)

Рис. 3. – Изменение перепада давления от массового расхода воздуха для радиаторов без фасок и с круглыми фасками различной глубины  $h$  при горизонтальном (а) и вертикальном (б) обдуве.



а)



б)

Рис. 4. – Изменение показателя энергетической эффективности от массового расхода воздуха для радиаторов без фасок и с круглыми фасками различной глубины  $h$  при горизонтальном (а) и вертикальном (б) обдуве.

## Выводы

Проведено численное исследование теплообмена и гидродинамики в моделях пластинчатых радиаторов с различной геометрией и глубиной фаски: 0,55 мм, 1,1 мм и 1,65 мм. Результаты исследования показали, что увеличение глубины фаски способствует повышению теплового потока и снижению перепада давления. Относительно модели радиатора без фаски, радиатор с круглыми фасками глубиной 1,65 мм обеспечивает повышение теплового потока до 3,6% и показателя энергетической эффективности до 14,5%, а также снижение перепада давления до 10,5%. Таким образом, геометрия фаски и её глубина оказывают влияние на тепловые и гидравлические характеристики радиатора.

***Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.*

## Литература

1. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Голубев Я.П., Шакурова Р.З. Математическое моделирование процесса осаждения частиц пыли на поверхности пористых теплообменников // Инженерный вестник Дона, 2024, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/).
2. Al-Damook A., Alkasmoul F.S. Heat transfer and airflow characteristics enhancement of compact plate-pin fins heat sinks—a review // Propulsion and Power Research. 2018. V. 7. №2. pp. 138-146.
3. Khattak Z., Ali H.M. Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: A critical review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 130. pp. 141-161.
4. Adhikari R.C., Wood D.H., Pahlevani M. An experimental and numerical study of forced convection heat transfer from rectangular fins at low Reynolds

numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120418.

5. Nilpueng K., Wongwises S. Thermal performance investigation of a plate fin heat sink equipped with twisted tape and perforated twisted tape // Journal of Thermal Science and Technology. 2021. V. 16. №2. P. JTST0024.

6. Shaharudin M.Z.B., Shawal S., Mahat M., Rahman M.R.A. Numerical Investigation on Thermal Performance of Various Designs Plate-Fin Heat Sinks Subject to Parallel and Impinging Flow // Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer. 2023. V. 13. №1. pp. 66-80.

7. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. Numerical simulation of dust particle deposition and heat transfer in fin-plate radiators // International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 08006.

8. Soloveva O., Solovev S., Golubev Y., Sabirov N. Study of the influence of fin-plate heat exchanger geometry on dust particle deposition and heat transfer based on numerical calculation // International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 07014.

9. Tariq A., Altaf K., Ahmad S.W., Hussain G., Ratlamwala T.A.H. Comparative numerical and experimental analysis of thermal and hydraulic performance of improved plate fin heat sinks // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 182. P. 115949.

10. Chingulpitak S., Ahn H.S., Asirvatham L.G., Wongwises S. Fluid flow and heat transfer characteristics of heat sinks with laterally perforated plate fins // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 138. pp. 293-303.

11. Rao A.K., Somkuwar V. Investigation of taper sloped fin for heat transfer enhancement in plate fin heat sink // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 51. pp. 422-429.

---

12. Rao A.K., Somkuwar V. Heat transfer of a tapered fin heat sink under natural convection // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 46. pp. 7886-7891.
13. He Z., Yu Q., Ye J., Yan F., Li Y. Optimization of plate-fin heat exchanger performance for heat dissipation of thermoelectric cooler // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. V. 53. P. 103953.
14. Khudhur D.S., Al-Zuhairy R.C., Kassim M.S. Thermal analysis of heat transfer with different fin geometry through straight plate-fin heat sinks // *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. V. 174. P. 107443.
15. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. Москва: Машиностроение, 1989. 200 с.

### References

1. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Golubev Ya.P., Shakurova R.Z. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2024, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/).
  2. Al-Damook A., Alkasmoul F.S. *Propulsion and Power Research*. 2018. V. 7. №2. pp. 138-146.
  3. Khattak Z., Ali H.M. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. V. 130. pp. 141-161.
  4. Adhikari R.C., Wood D.H., Pahlevani M. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 163. pp. 120418.
  5. Nilpueng K., Wongwises S. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2021. V. 16. №2. pp. JTST0024.
  6. Shaharudin M.Z.B., Shawal S., Mahat M., Rahman M.R.A. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. 2023. V. 13. №1. pp. 66-80.
  7. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. *International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023)*. Les Ulis, 2023, pp. 08006.
-

8. Soloveva O., Solovev S., Golubev Y., Sabirov N. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, pp. 07014.

9. Tariq A., Altaf K., Ahmad S.W., Hussain G., Ratlamwala T.A.H. Comparative numerical and experimental analysis of thermal and hydraulic performance of improved plate fin heat sinks. Applied Thermal Engineering. 2021. V. 182. pp. 115949.

10. Chingulpitak S., Ahn H.S., Asirvatham L.G., Wongwises S. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 138. pp. 293-303.

11. Rao A.K., Somkuwar V. Investigation of taper sloped fin for heat transfer enhancement in plate fin heat sink. Materials Today: Proceedings. 2022. V. 51. pp. 422-429.

12. Rao A.K., Somkuwar V. Heat transfer of a tapered fin heat sink under natural convection. Materials Today: Proceedings. 2021. V. 46. pp. 7886-7891.

13. He Z., Yu Q., Ye J., Yan F., Li Y. Optimization of plate-fin heat exchanger performance for heat dissipation of thermoelectric cooler. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. V. 53. pp. 103953.

14. Khudhur D.S., Al-Zuhairy R.C., Kassim M.S. International Journal of Thermal Sciences. 2022. V. 174. pp. 107443.

15. Bazhan P.I., Kanevecz G.E., Seliverstov V.M. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Handbook of Heat Exchangers]. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 200 p.

**Дата поступления: 11.03.2024**

**Дата публикации: 25.04.2024**