

Численное исследование влияния пылевого осадка на теплоотдачу в пористых теплообменниках

О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.З. Шакурова

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: Проведено исследование теплоотдачи в пористых теплообменниках с осадком частиц пыли. Исследовано влияние длины теплообменника и наличия осадка на число Нуссельта. Выявлено, что увеличение длины теплообменника с 5 до 30 мм приводит к повышению числа Нуссельта на 39,72-81,35% в зависимости от числа Рейнольдса. Формирование осадка на поверхности теплообменника приводит к снижению числа Нуссельта на 2,8-6,6%.

Ключевые слова: теплообмен, гидродинамика, расчет, число Нуссельта, число Рейнольдса, математическое моделирование, формирование осадка, микроэлектроника, системы охлаждения, радиатор

Введение

С развитием высокопроизводительных многофункциональных электронных устройств и чипов высокой мощности возникла потребность в разработке эффективных решений по управлению температурным режимом [1]. Одним из таких решений является применение металлических высокопористых материалов в качестве радиаторов в системах охлаждения. Пористые теплообменники имеют большую удельную площадь поверхности, извилистые пути движения газа, небольшой вес и низкую плотность [2,3]. Системы охлаждения, оснащенные пористыми теплообменниками, могут отводить большое количество тепла, занимая при этом минимальное пространство и оставаясь миниатюрными [4,5]. Одной из проблем, с которой сталкиваются проектировщики систем охлаждения, является осаждение пыли на поверхности теплообменника [6]. Загрязнение пылью приводит к уменьшению полезной площади теплообменника и, как следствие, к снижению эффективности охлаждения электронного устройства. На эффективность осаждения частиц пыли в пористых теплообменниках влияют диаметр частиц [7,8], диаметр пор [9], скорость потока воздуха [10]. Влияние осадка частиц пыли на теплоотдачу в пористых теплообменниках не

исследовалось. Целью данной работы является оценка влияния пылевого осадка на теплоотдачу.

Постановка задачи и метод решения

Построены 3D-модели пористых теплообменников со следующими параметрами: длина $L=5, 10, 20$ и 30 мм, высота $H = 10$ мм, ширина $S=10$ мм, пористость $\varepsilon=0,97$, диаметр ячейки $d_c=3,5$ мм, диаметр волокна $d_f=0,3$ мм. На рисунке 1 представлены 3D-модели пористых теплообменников.

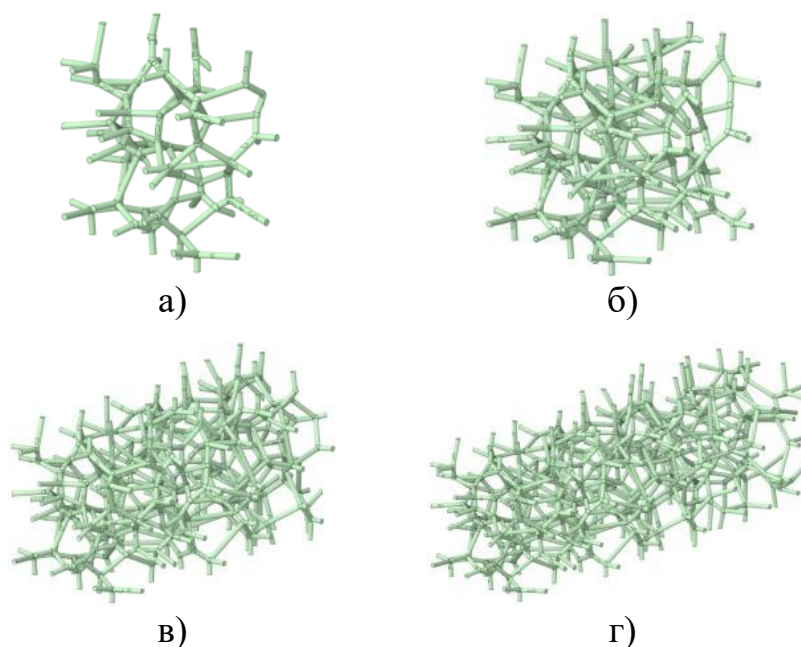


Рис. 1. – Изображения 3D-моделей пористых теплообменников с длиной L :
а) 5 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм.

Решена задача обтекания потоком воздуха пористого теплообменника. В воздухе содержались частицы пыли с диаметром $0,1$ мм. На входе в расчетную область задавались скорость и температура воздуха: $v=0,1; 1; 5$ м/с, $T=298$ К. На концах стоек задавалась температура 343 К, и за счет наличия внутренней сетки (расчет теплопроводности в зоне пористой среды)

обеспечивался нагрев теплообменника. Построены графики изменения числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

Число Рейнольдса рассчитывали по следующей формуле (1):

$$Re_{df} = \rho_r \cdot v_{cp,p} \cdot d_f / \mu, \quad (1)$$

где $\rho_r = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность газа; $d_f = 0,3 \text{ мм}$ – диаметр волокна пористого теплообменника; $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ – динамический коэффициент вязкости; $v_{cp,p}$ – среднерасходная скорость воздуха, которая рассчитывалась по формуле (2):

$$v_{cp,p} = v / \varepsilon, \quad (2)$$

где v – скорость воздуха на входе в расчетную область, м/с; ε – пористость теплообменника.

Результаты и обсуждение

По результатам параметрических расчетов построены графики изменения числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса и длины теплообменника при наличии и отсутствии осадка. На рисунке 2 представлены графики изменения числа Нуссельта в зависимости от длины теплообменника для случая отсутствия осадка пыли. Анализ результатов исследования показал, что увеличение длины теплообменника приводит к повышению числа Нуссельта. Так, при фиксированном числе Рейнольдса $Re_{df} = 21,05$, число Нуссельта составляет: $Nu = 0,825$ при $L = 5 \text{ мм}$, $Nu = 1,560$ при $L = 10 \text{ мм}$, $Nu = 2,505$ при $L = 20 \text{ мм}$ и $Nu = 3,022$ при $L = 30 \text{ мм}$. С увеличением числа Рейнольдса различия в значениях числа Нуссельта для теплообменников различных длин L увеличивается. Так, при числе Рейнольдса $Re_{df} = 2,105$, число Нуссельта теплообменника с длиной $L = 30 \text{ мм}$ превышает значение числа Нуссельта теплообменника с длиной $L = 20 \text{ мм}$ на 3,147%. При числе Рейнольдса $Re_{df} = 105,241$ различие в значениях чисел Нуссельта составляет уже 27,55%.

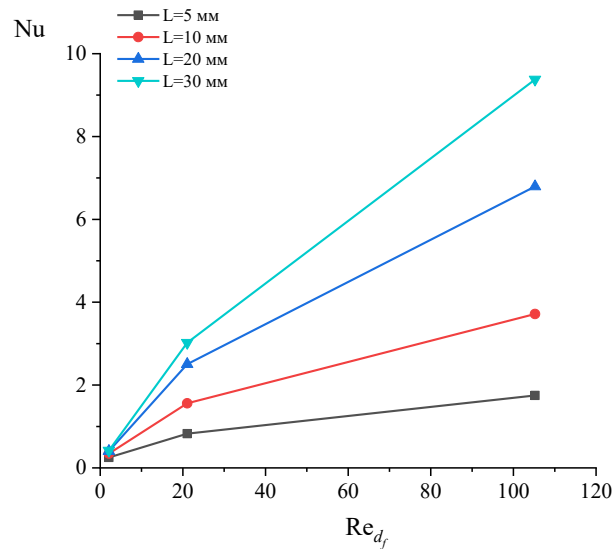


Рис. 2. – Графики изменения числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса и длины теплообменника.

На рисунке 3 приведены графики изменения числа Нуссельта от числа Рейнольдса для теплообменников различной длины с осадком и без него.

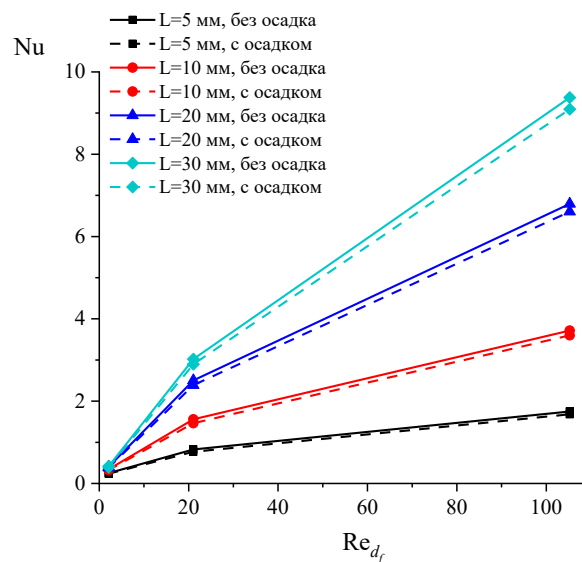


Рис. 3. – Графики изменения числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса для теплообменников с осадком и без него.

Как мы видим из графиков, формирование осадка на поверхности пористого теплообменника приводит к снижению числа Нуссельта. Так, для теплообменника длиной $L=10$ мм при $Re_{df}=2,105$ число Нуссельта составляет $Nu=0,346$ при отсутствии осадка и $Nu=0,327$ при наличии осадка, то есть число Nu снизилось на 5,49%. Максимальное снижение числа Нуссельта наблюдается при $Re_{df}=2,105$ и уменьшается с увеличением Re_{df} . Для теплообменников всего диапазона длин снижение числа Нуссельта составляет от 2,8% до 6,6% и изменяется в зависимости от числа Рейнольдса и также длины теплообменника.

Выводы

Проведено численное исследование теплоотдачи в пористых теплообменниках. Исследовано влияние длины теплообменника и наличия осадка на его поверхности на число Нуссельта. По результатам параметрических расчетов построены графики изменения числа Нуссельта от числа Рейнольдса. Результаты исследования показали, что увеличение длины теплообменника от 5 до 30 мм приводит к повышению числа Нуссельта на 39,72-81,35%. Таким образом, увеличение длины пористого теплообменника целесообразно, так как способствует повышению теплоотдачи. Выявлено также, что формирование осадка на поверхности теплообменника приводит к снижению числа Нуссельта на 2,8-6,6%.

Литература

1. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. A review of thermo-hydraulic performance of metal foam and its application as heat sinks for electronics cooling // Journal of Electronic Packaging. 2021. V. 143. №3. P. 030801.
2. Qi C., Chen T., Tu J., Yan Y. Effects of metal foam on exergy and entropy of nanofluids in a heat sink applied for thermal management of electronic

components // International Journal of Energy Research. 2020. V. 44. №13. P. 10628-10651.

3. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. Thermal performance of metal foam heat sink with pin fins for nonuniform heat flux electronics cooling // Journal of Electronic Packaging. 2021. V. 143. №1. P. 011006.

4. Bianco N., Iasiello M., Mauro G. M., Pagano L. Multi-objective optimization of finned metal foam heat sinks: Tradeoff between heat transfer and pressure drop // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 182. P. 116058.

5. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. Hydraulic and thermal performances of metal foam and pin fin hybrid heat sink // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 166. P. 114665.

6. Kuruneru S. T. W., Vafai K., Sauret E., Gu Y. Application of porous metal foam heat exchangers and the implications of particulate fouling for energy-intensive industries // Chemical Engineering Science. 2020. V. 228. P. 115968.

7. 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/.

8. 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.

9. Anuar F. S., Hooman K., Malayeri M. R., Abdi I. A. Experimental study of particulate fouling in partially filled channel with open-cell metal foam // Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 110. P. 109941.

10. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Расчет формирования осадка в пористом теплообменнике и оценка влияния осадка на тепловой поток // Инженерный вестник Дона, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9232/.

References

1. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. Journal of Electronic Packaging. 2021. V. 143. №3. p. 030801.
2. Qi C., Chen T., Tu J., Yan Y. International Journal of Energy Research. 2020. V. 44. №13. p. 10628-10651.
3. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. Journal of Electronic Packaging. 2021. V. 143. №1. p. 011006.
4. Bianco N., Iasiello M., Mauro G. M., Pagano L. Applied Thermal Engineering. 2021. V. 182. p. 116058.
5. Li Y., Gong L., Xu M., Joshi Y. Applied Thermal Engineering. 2020. V. 166. p. 114665.
6. Kuruneru S. T. W., Vafai K., Sauret E., Gu Y. Chemical Engineering Science. 2020. V. 228. p. 115968.
7. 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/.
8. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, p. 08006.
9. Anuar F. S., Hooman K., Malayeri M. R., Abdi I. A. Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 110. p. 109941.
10. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Shakurova R.Z., Golubev Ya.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9232/.

Дата поступления: 5.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025