

Расчет формирования осадка в пористом теплообменнике и оценка влияния осадка на тепловой поток

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

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: Путем численного моделирования исследовано осаждение частиц в пористом теплообменнике, изучен механизм формирования осадка и проведена оценка влияния осадка на тепловой поток. Исследовано влияние длины пористого теплообменника, размера частиц пыли и скорости воздушного потока на эффективность осаждения частиц, проскок частиц и на значение теплового потока. Результаты исследований показали, что с увеличением длины теплообменника эффективность осаждения частиц пыли увеличивается, что приводит к формированию осадка. В свою очередь, осадок снижает значение теплового потока от пористого теплообменника. В зависимости от длины теплообменника и скорости воздуха снижение теплового потока составляет 3,43-7,27%.

Ключевые слова: пористая среда, теплообменник, осаждение частиц, проскок частиц, осадок, тепловой поток, численное моделирование

Введение

Металлические пены представляют собой класс высокопористых материалов, которые обладают уникальными теплофизическими свойствами, такими как высокая удельная площадь поверхности, низкая плотность, высокая теплопроводность и легкий вес [1]. Благодаря пористой структуре и извилистым каналам, металлическая пена способна усиливать перемешивание теплоносителя, что, в свою очередь, приводит к повышению теплопередачи. В связи с этим металлические пены нашли применение в качестве теплообменников во многих отраслях промышленности. В последние годы активно исследуется применение металлических пен для охлаждения микросхем и устройств электроники [2].

Специалистами в данной области проведены многочисленные исследования по оценке влияния различных факторов на теплообмен и гидродинамику. Так, известно об исследованиях влияния пористости [3], размера ячейки [4], формы ячейки [5] и материала [6] металлической пены на теплогидравлические характеристики. Известно также об исследованиях толщины и расположения металлической пены на теплообмен и

гидродинамику [7]. Однако в литературе практически отсутствуют работы, посвященные исследованию влияния осадка на теплопередачу в пористом теплообменнике. Между тем, в процессе эксплуатации на поверхности теплообменника нередко образуется осадок из частиц пыли [8-10]. В данной работе нами исследовано осаждения частиц пыли в пористом теплообменнике, а также проведена оценка влияния сформировавшегося осадка на тепловой поток.

Постановка задачи и метод решения

Решается задача обтекания пористого теплообменника потоком воздуха, содержащим частицы пыли. Исследуется образование осадка на пористом теплообменнике и влияние осадка на тепловой поток. Построены 3D-модели пористого теплообменника (Рисунок 1) со следующими структурными параметрами: диаметр ячейки $d_c=3,5$ мм; диаметр стоек $d_s=0,3$ мм; пористость $\varepsilon=0,97$; ширина $S=10$ мм; высота $H=10$ мм; длина $L=5; 10; 20$ и 30 мм.

Посредством вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS (v.19.2) проведены параметрические расчеты эффективности осаждения частиц пыли на поверхности пористого теплообменника. На концах стоек задавалась температура 343 К, и за счет наличия внутренней сетки (расчет теплопроводности в зоне пористой среды) обеспечивался нагрев теплообменника. На входе в расчетную область задавались температура 298 К и скорость воздуха: $0,1; 1; 5$ м/с. Диаметр частиц пыли d_p изменялся от 10^{-7} до 10^{-3} м.

Кроме того, исследован механизм формирования осадка на поверхности в зависимости от длины пористого теплообменника и скорости воздушного потока. Проведена оценка величины проскока частиц. Наконец, исследовано влияние образовавшегося осадка на величину теплового потока.

Эффективность осаждения рассчитывали по следующей формуле (1):

$$E = n_{осев} / n_{нач}, \quad (1)$$

где $n_{нач}$ – начальное количество частиц пыли в воздушном потоке, $n_{осев}$ – количество частиц пыли, осевших в пористом теплообменнике.

Величину проскока частиц определяли по формуле (2):

$$P = 1 - E, \quad (2)$$

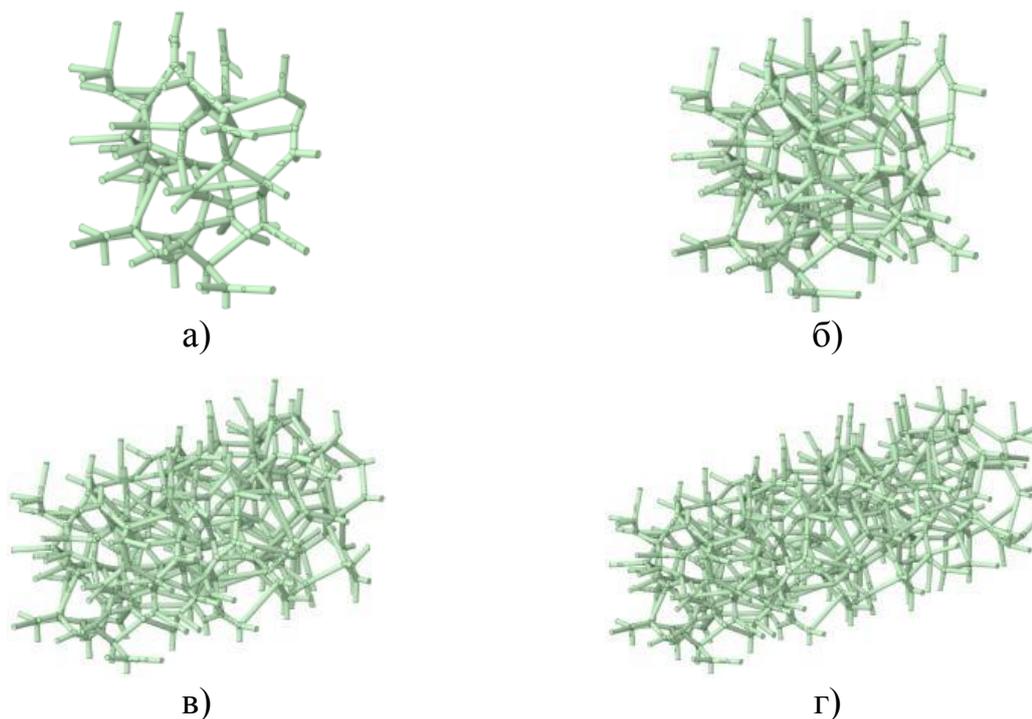


Рис. 1. – Изображения 3D-моделей пористых теплообменников длиной L : а) 5 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм.

Результаты и обсуждение

Проведены расчеты эффективности осаждения частиц в зависимости от диаметра частиц, длины пористого теплообменника и скорости воздушного потока. На рисунке 2 представлены графики изменения эффективности осаждения частиц в зависимости от их диаметра.

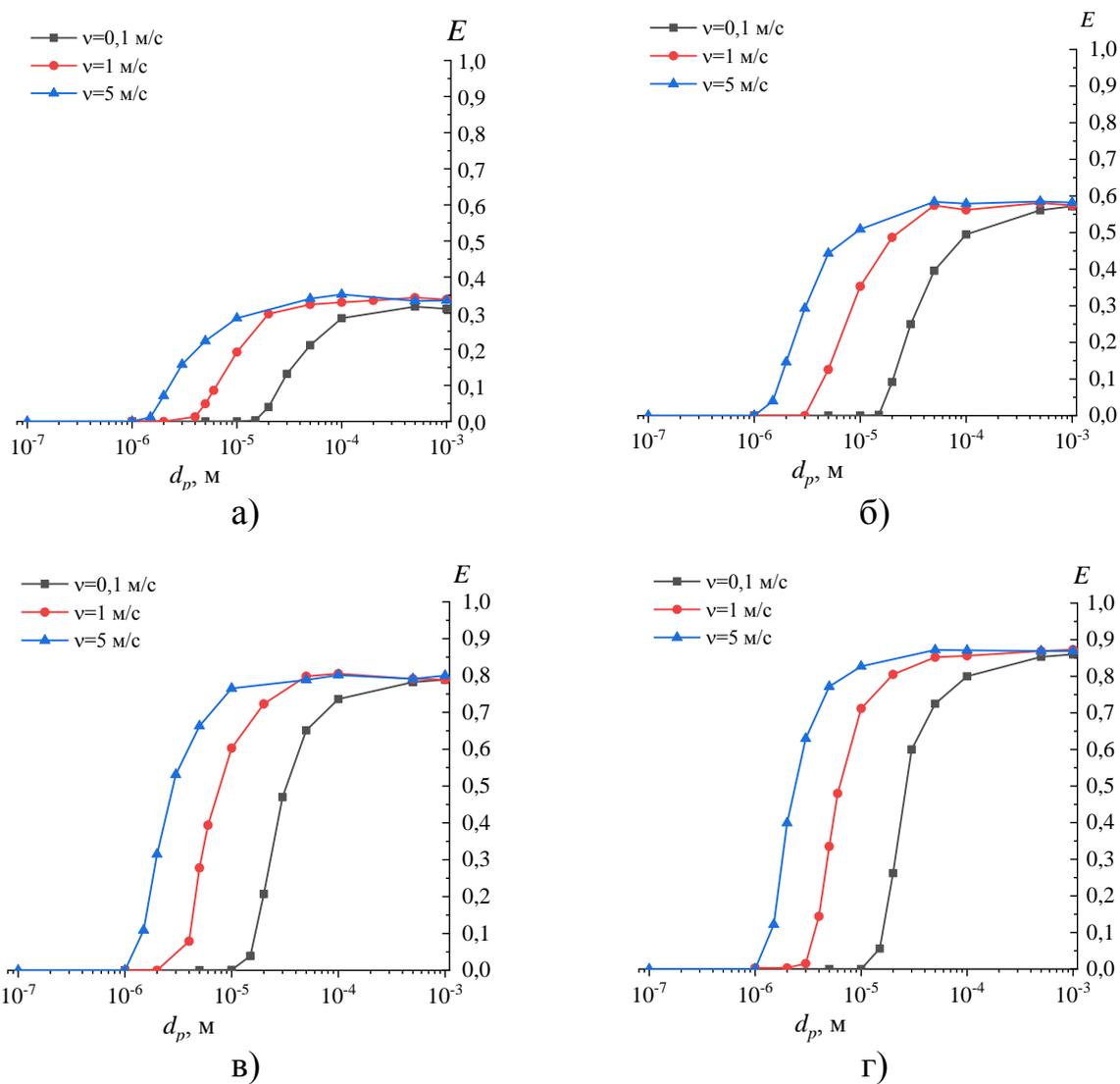


Рис. 2. – Графики изменения эффективности осаждения частиц пыли в зависимости от диаметра частиц на пористых теплообменниках длиной L : а) 5 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм.

Согласно результатам расчетов, увеличение размера частицы способствует повышению эффективности осаждения. Наибольшую эффективность осаждения имеют частицы размером 10^{-3} м. Также мы видим, что с увеличением скорости воздушного потока происходит увеличение эффективности осаждения частиц меньшего размера. Так, для теплообменника длиной 10 мм эффективность осаждения частиц размером

10^{-5} м при скорости 0,1 м/с близка к нулю, а при скоростях потока 1 и 5 м/с эффективность осаждения составляет 0,6 и 0,76, соответственно. Таким образом, эффективность осаждения частиц имеет прямую зависимость от размера частиц и скорости воздушного потока.

Для оценки влияния длины теплообменника на эффективность осаждения построены графики, представленные на рисунке 3. Как мы можем заметить, с увеличением длины пористого теплообменника эффективность осаждения частиц повышается. Так, при скорости воздуха 1 м/с, эффективность осаждения частиц диаметром 10^{-3} м составляет: $E=0,192$ при $L=5$ мм, $E=0,353$ при $L=10$ мм, $E=0,603$ при $L=20$ мм и $E=0,712$ при $L=300$ мм. Таким образом, увеличение длины пористого теплообменника с 5 до 30 мм привело к повышению эффективности осаждения частиц диаметром 10^{-3} м в 3,7 раз. Высокие значения эффективности осаждения означают, что на поверхности теплообменника оседает большое количество частиц пыли, что негативно влияет на его тепловые характеристики.

Графики на рисунке 4 показывают зависимость величины проскока частиц, рассчитанной по формуле 2, от длины теплообменника. Как мы видим из графиков, ввиду высокой пористости теплообменника ($\varepsilon=0,97$) величина проскока частиц диаметром 10^{-6} м и менее равна единице для всех исследованных скоростей воздушного потока. Это означает, что частицы указанных размеров не оседают на поверхности теплообменника. С увеличением диаметра частицы, скорости воздуха и длины теплообменника величина проскока снижается. Так, при фиксированных скорости воздуха 1 м/с и длине теплообменника 20 мм, частицы диаметром 10^{-5} м имеют величину проскока, равную $P=0,921$, в то время как для частиц диаметром 10^{-4} м величина проскока составляет $P=0,202$. Это означает, что в этом случае основная доля частиц диаметром 10^{-4} м оседает на поверхности

теплообменника, в то время как частицы диаметром 10^{-5} в основном проскакивают через теплообменник, не оседая на его поверхности.

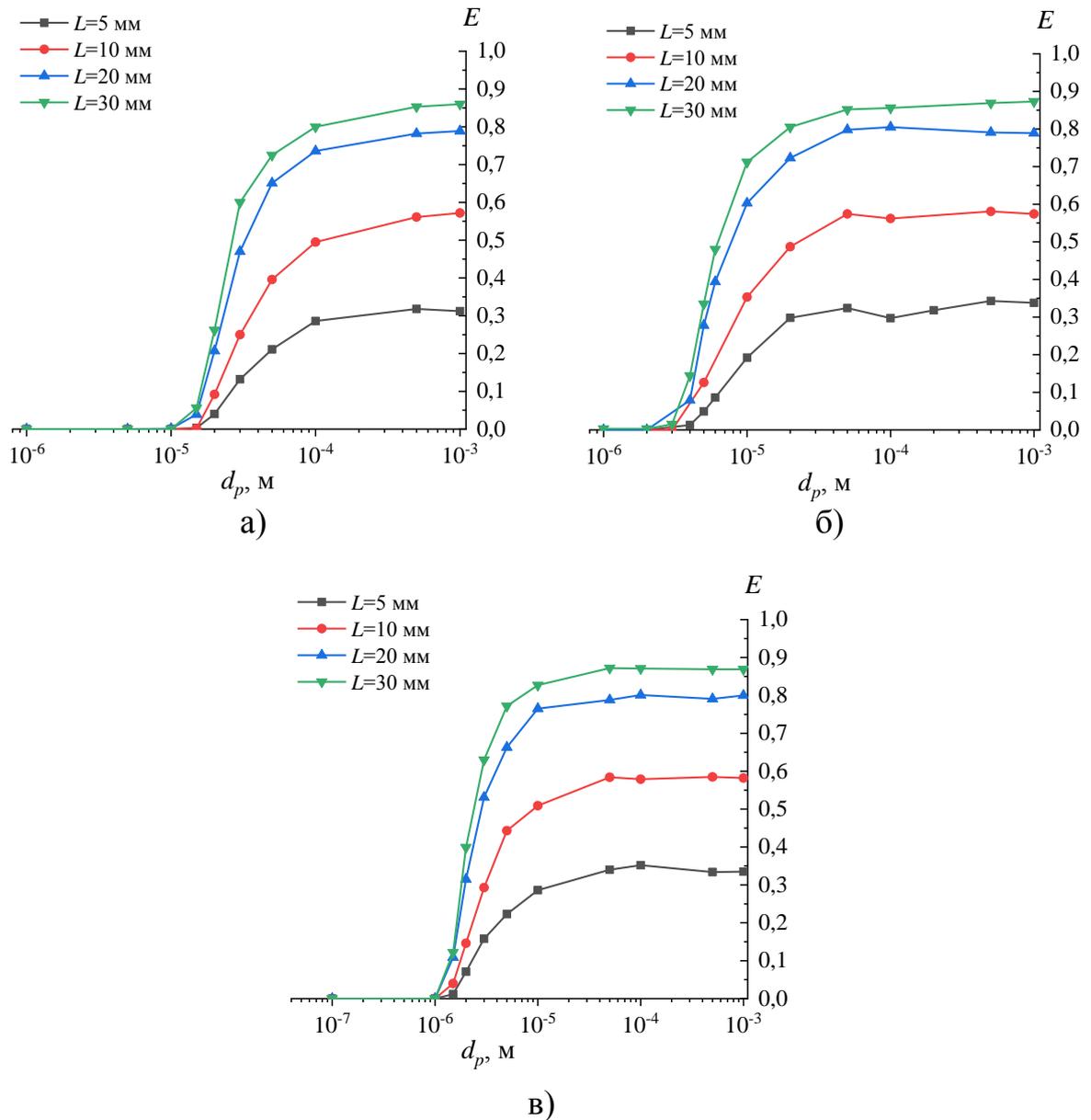


Рис. 3. – Графики изменения эффективности осаждения частиц пыли в зависимости от длины пористого теплообменника при скорости воздуха: а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

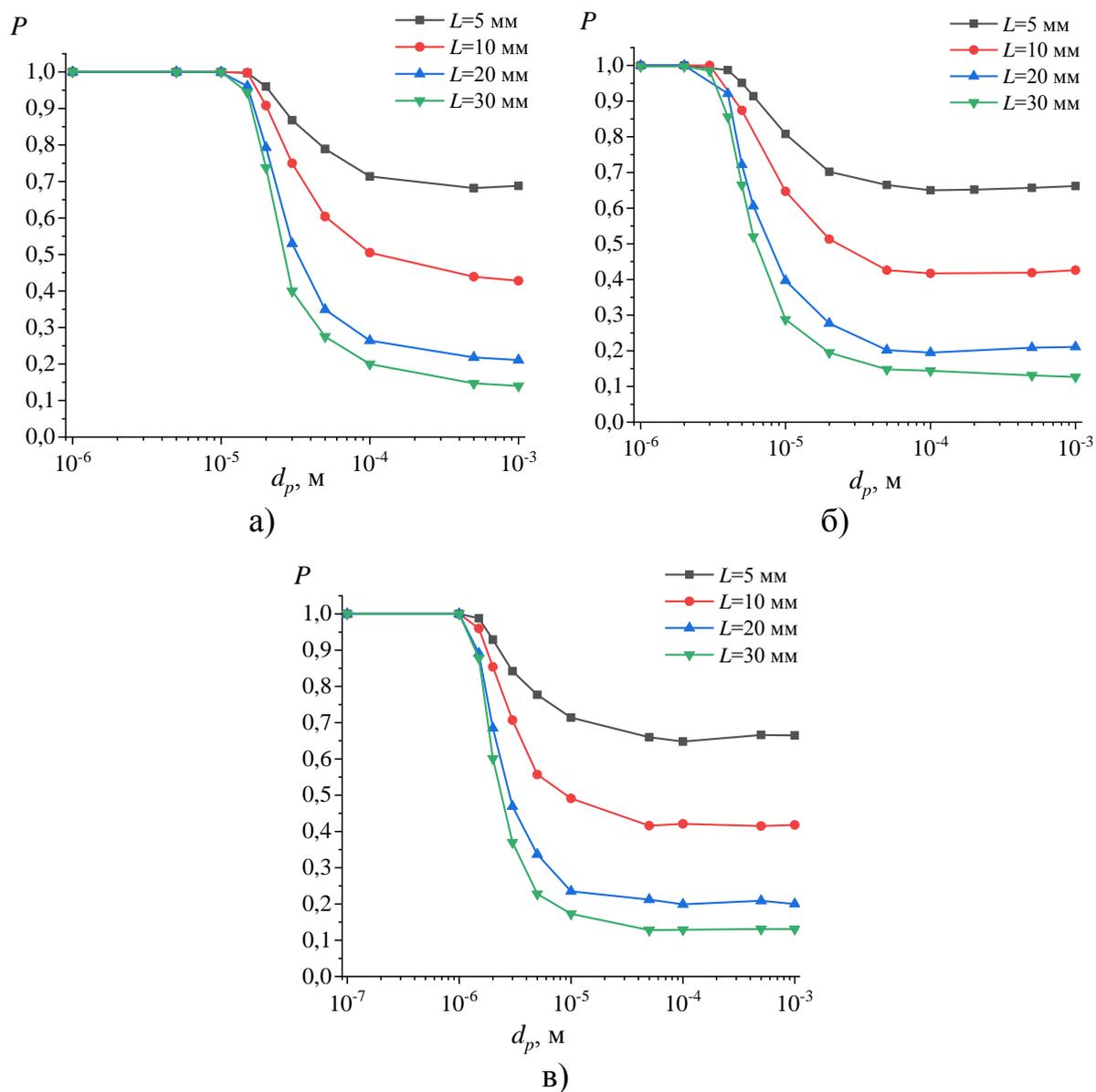


Рис. 4. – Графики изменения величины проскока частиц в зависимости от длины пористого теплообменника при скорости воздуха: а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

Увеличение длины теплообменника приводит к заметному снижению проскока частицы. Так, при фиксированном диаметре частицы 10^{-4} м и фиксированной скорости воздуха 1 м/с, величина проскока частицы составляет: $P=0,665$ при $L=5$ мм, $P=0,417$ при $L=10$ мм, $P=0,195$ при $L=20$ мм,

$P=0,144$ при $L=30$ мм. Таким образом, на теплообменнике большей длины осядет большее количество частиц.

На рисунках 5-8 представлены изображения пористых теплообменников с осадком частиц в зависимости от скорости воздуха. Высота осадка равна диаметру частиц и составляет 0,1 мм.

Мы можем заметить, что осадок формируется преимущественно в передней части теплообменника, т.е. выше по потоку теплоносителя, что особенно хорошо видно на моделях длиной 20 и 30 мм (Рисунки 7 и 8).

В исследованных моделях пористых теплообменников формируется небольшой осадок частиц, что связано с их высокой пористостью. Сформировавшийся осадок имеет меньшую теплопроводность, чем пористый теплообменник. Как следствие, происходит уменьшение рабочей площади радиатора и снижение теплового потока.

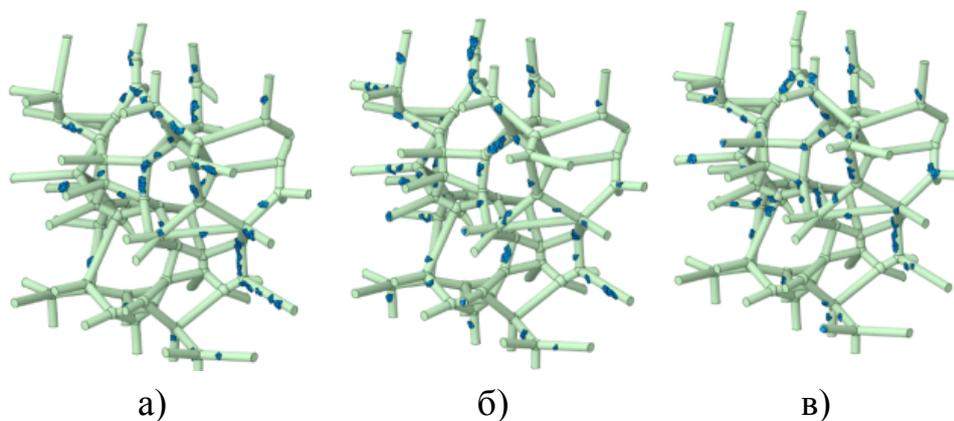


Рис. 5. – Формирование осадка в точках осаждения частиц диаметром 0,1 мм на пористом теплообменнике длиной $L=5$ мм при скорости воздуха:

а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

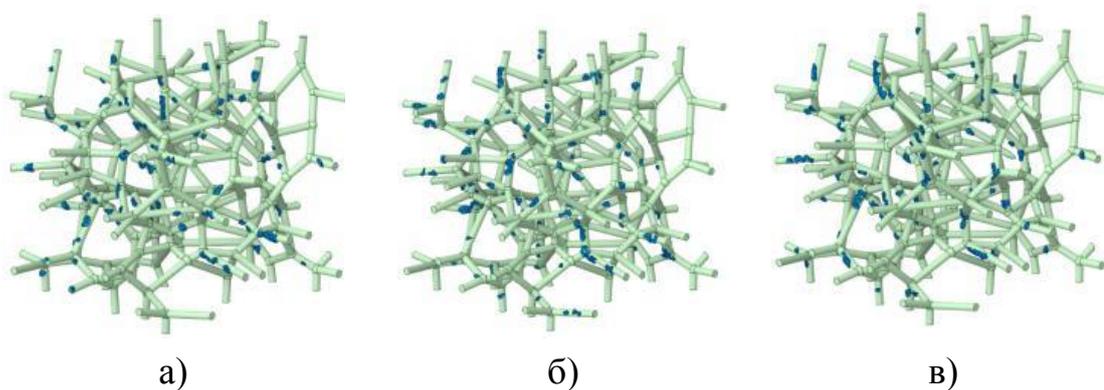


Рис. 6. – Формирование осадка в точках осаждения частиц диаметром 0,1 мм на пористом теплообменнике длиной $L=10$ мм при скорости воздуха:

а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

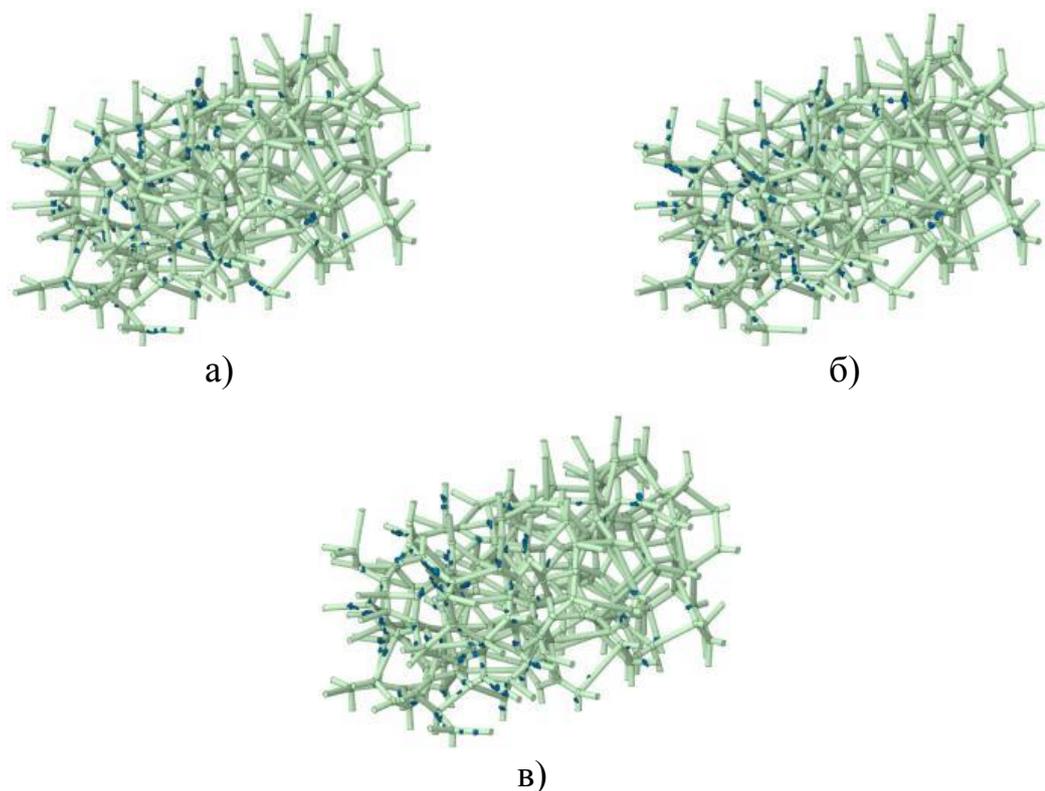


Рис. 7. – Формирование осадка в точках осаждения частиц диаметром 0,1 мм на пористом теплообменнике длиной $L=20$ мм при скорости воздуха:

а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

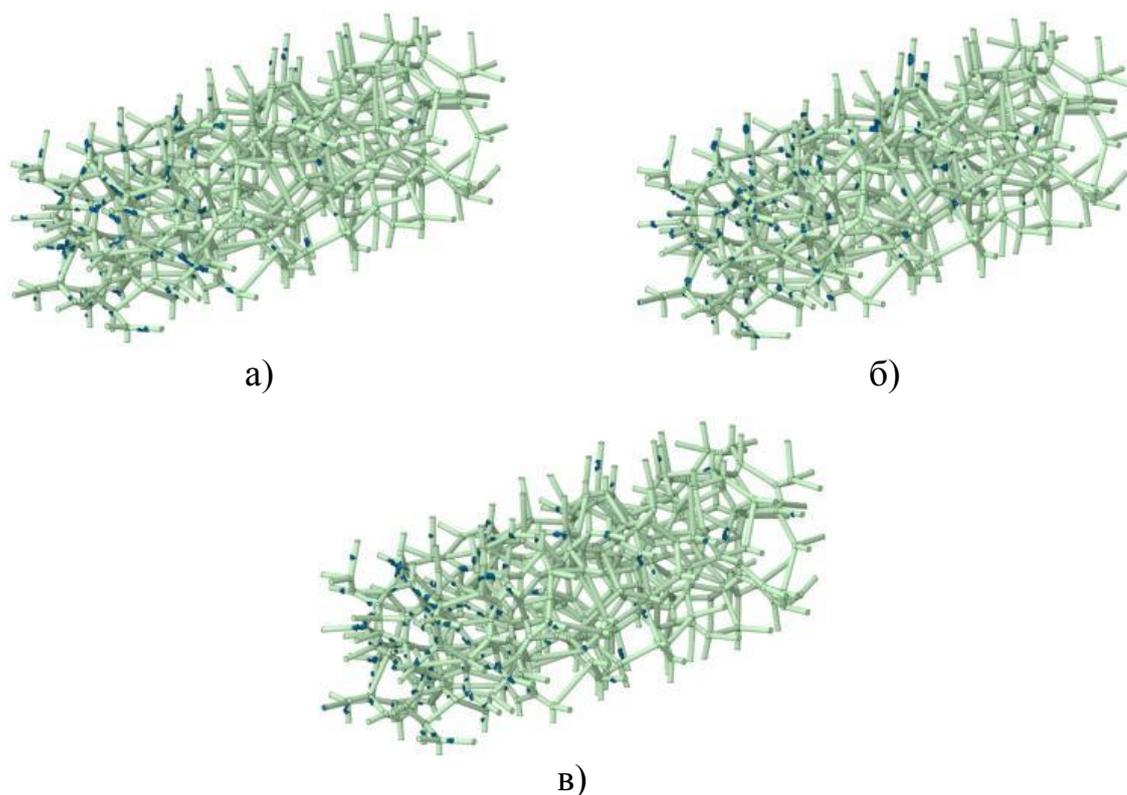


Рис. 8. – Формирование осадка в точках осаждения частиц диаметром 0,1 мм на пористом теплообменнике длиной $L=30$ мм при скорости воздуха:

а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с.

Для оценки влияния осадка на тепловой поток проведены параметрические расчеты, результаты которых представлены на рисунке 9. На графиках сплошными линиями приведены результаты для пористых теплообменников с осадком частиц диаметром 0,1 мм, пунктирными линиями – для пористых теплообменников без осадка. Как мы можем заметить, осаждение частиц приводит к снижению теплового потока. Так, в зависимости от длины теплообменника и скорости воздуха, формирование осадка приводит к снижению теплового потока на 5,23-7,27% (при $L=5$ мм), на 5,49-6,94% (при $L=10$ мм), на 4,30-4,64% (при $L=20$ мм), на 3,43-5,91% (при $L=30$ мм).

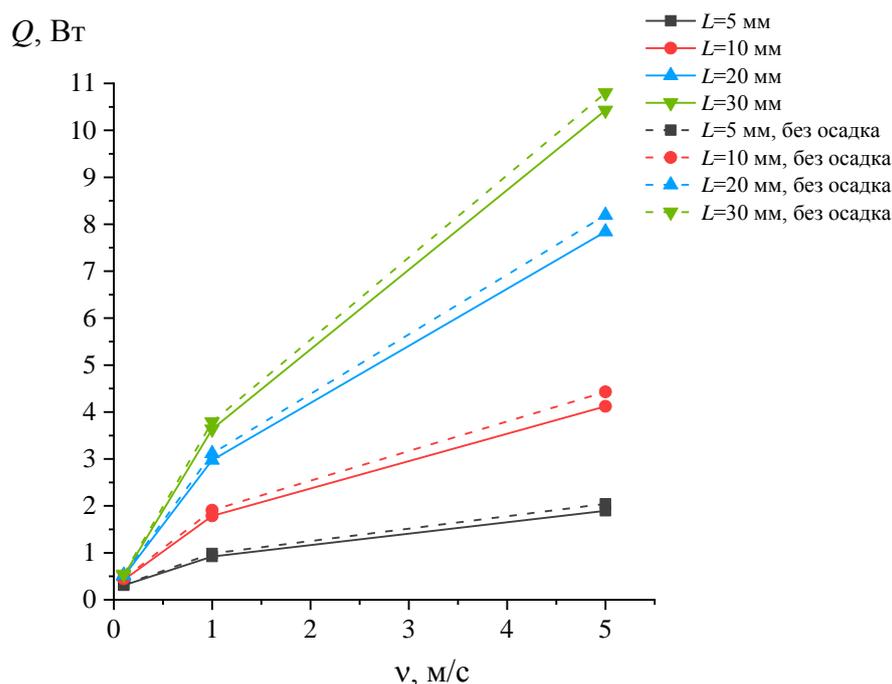


Рис. 9. – Графики изменения теплового потока от скорости воздуха для пористых теплообменников различной длины с осадком (сплошные линии) и без него (пунктирные линии).

Выводы

Численно исследовано осаждение частиц в пористых теплообменниках. Проведена оценка эффективности осаждения частиц пыли, проскока частиц, а также теплового потока. Исследован механизм формирования осадка. Результаты исследований показали, что эффективность осаждения частиц повышается при увеличении длины теплообменника, диаметра частиц и скорости воздуха. Оседающие частицы формируют осадок на поверхности теплообменника. Выявлено, что формирование осадка негативно влияет на теплообмен. Так, по сравнению с чистым теплообменником, тепловой поток от теплообменника с осадком ниже на 5,23-7,27% (при $L=5$ мм), на 5,49-6,94% (при $L=10$ мм), на 4,30-4,64% (при $L=20$ мм), на 3,43-5,91% (при $L=30$ мм).

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

Литература

1. Buonomo B., di Pasqua A., Manca O., Nardini S. Evaluation of thermal and fluid dynamic performance parameters in aluminum foam compact heat exchangers // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 176. P. 115456.
2. Liaw K.L., Ahmadihosseini A., Rosle A.F.H.B., Kurnia J.C., Sasmito, A.P. Enhanced performance of pinned metal foam heat sinks with dielectric coolant—A pore-scale numerical study // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023. V. 149. P. 107111.
3. Wang N., Kaur I., Singh P., Li L. Prediction of effective thermal conductivity of porous lattice structures and validation with additively manufactured metal foams // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 187. P. 116558.
4. Iasiello M., Bianco N., Chiu W.K., Naso V. The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams // International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 160. P. 106696.
5. Zhou Y., Shen S., Liu T., Li P., Duan F. Effective heat conduction evaluation of lattice structures from selective laser melting printing // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 218. P. 124790.
6. Athith T.S., Trilok G., Jadhav P.H., Gnanasekaran N. Heat transfer optimization using genetic algorithm and artificial neural network in a heat exchanger with partially filled different high porosity metal foam // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 51. P. 1642-1648.
7. Chen C.C., Huang P.C., Hwang H.Y. Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 58. №. 1-2. P. 356-373.

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. 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.

10. 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/.

References

1. Buonomo B., di Pasqua A., Manca O., Nardini S. Applied Thermal Engineering. 2020. V. 176. pp. 115456.

2. Liaw K.L., Ahmadihosseini A., Rosle A.F.H.B., Kurnia J.C., Sasmito A.P. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023. V. 149. pp. 107111.

3. Wang N., Kaur I., Singh P., Li L. Applied Thermal Engineering. 2021. V. 187. pp. 116558.

4. Iasiello M., Bianco N., Chiu W.K., Naso V. International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 160. pp. 106696.

5. Zhou Y., Shen S., Liu T., Li P., Duan F. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 218. pp. 124790.

6. Athith T.S., Trilok G., Jadhav P.H., Gnanasekaran N. Materials Today: Proceedings. 2022. V. 51. pp. 1642-1648.



7. Chen C.C., Huang P.C., Hwang H.Y. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 58. №. 1-2. pp. 356-373.

8. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, pp. 08006.

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

10. 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/.

Дата поступления: 2.04.2024

Дата публикации: 12.05.2024