

Математическое моделирование процесса осаждения частиц пыли на поверхности пористых теплообменников

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

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: Путем численного моделирования проведены исследования влияния длины пористого теплообменника на осаждение частиц пыли. Исследования проведены для моделей теплообменников с длинами: 5, 10, 20 и 30 мм. На границах расчетной области задавали скорость воздушного потока: 0,1; 1; 5 м/с и диаметр частиц пыли от 10^{-7} до 10^{-4} м. Результаты исследований показали, что с увеличением длины пористого теплообменника повышается эффективность осаждения частиц пыли, что может привести к снижению тепловых и гидравлических характеристик теплообменника.

Ключевые слова: пористая среда, теплообменник, численное моделирование, расчет, осаждение частиц пыли, длина теплообменника, скорость воздушного потока, диаметр частиц, воздушное охлаждение, микроэлектроника.

Введение

Охлаждение электронных устройств является актуальной задачей, особенно, с учетом роста использования миниатюрного оборудования [1]. Воздушное охлаждение является традиционным, но эффективным способом отвода тепла от горячей поверхности устройства, и широко применяется в современной микроэлектронной промышленности [2]. При воздушном охлаждении тепло от устройства передается к теплообменнику посредством теплопроводности, а затем в окружающую среду посредством конвекции. Теплообменник позволяет увеличить площадь теплообмена, а вентилятор создает принудительный поток воздуха для эффективного рассеивания тепла.

Традиционно применяют теплообменники пластинчатой [3] или игольчатой формы [4,5]. Такие теплообменники просты в производстве и обеспечивают относительно быстрый отвод тепла от электронного устройства. Тем не менее, пластинчатые и игольчатые теплообменники имеют небольшую удельную площадь поверхности, а данный параметр значительно влияет на теплообмен. Как следствие, в случае высокой тепловой нагрузки специалистам приходится увеличивать размеры

пластинчатых теплообменников, что ведет к увеличению их массы и металлоемкости. В связи с этим в приложениях, где необходимо быстро отводить большое количество тепла, применять пластинчатые и игольчатые теплообменники нецелесообразно. В этом случае рекомендуется применять теплообменники с пористой структурой, так как они имеют высокую удельную площадь поверхности [6,7]. Согласно результатам некоторых исследований [8,9], пористые теплообменники в виде медной или алюминиевой пены обеспечивают лучшее охлаждение электроники, чем традиционные пластинчатые и игольчатые.

Одной из проблем, с которой сталкиваются специалисты в области систем охлаждения микроэлектроники, является осаждение пыли на поверхности теплообменника, что приводит к уменьшению рабочей площади [10,11]. Как следствие, теплообменник хуже отводит тепло от устройства, и возникает опасность повышения температуры поверхности устройства выше критических значений. Перегрев может привести к сбоям в работе устройства, к снижению его производительности и даже к выходу из строя. Помимо снижения тепловых характеристик теплообменника, скопление частиц пыли приводит к повышению гидравлического сопротивления. Из-за этого, для прокачки воздуха через теплообменник вентилятору требуется больше мощности [12]. Специалисты в данной области активно исследуют процессы осаждения частиц пыли с целью разработки наиболее оптимальной конструкции теплообменника, в котором осаждение частиц будет минимальным. Известно [13], что пористость и структурные параметры теплообменника, а также скорость потока воздуха являются параметрами, которые оказывают существенное влияние на осаждение частиц в пористом теплообменнике. Однако остается неясным, как осаждение пыли меняется в зависимости от длины теплообменника. Целью данной работы является

численное исследование осаждения частиц пыли в пористых теплообменниках различной длины.

Постановка задачи и метод решения

Решается задача обтекания пористого теплообменника потоком запыленного воздуха. Исследуется влияние длины теплообменника на эффективность осаждения частиц пыли. Для решения поставленной задачи построены 3D-модели пористых теплообменников с длинами L : 5, 10, 20 и 30 мм (Рисунок 1).

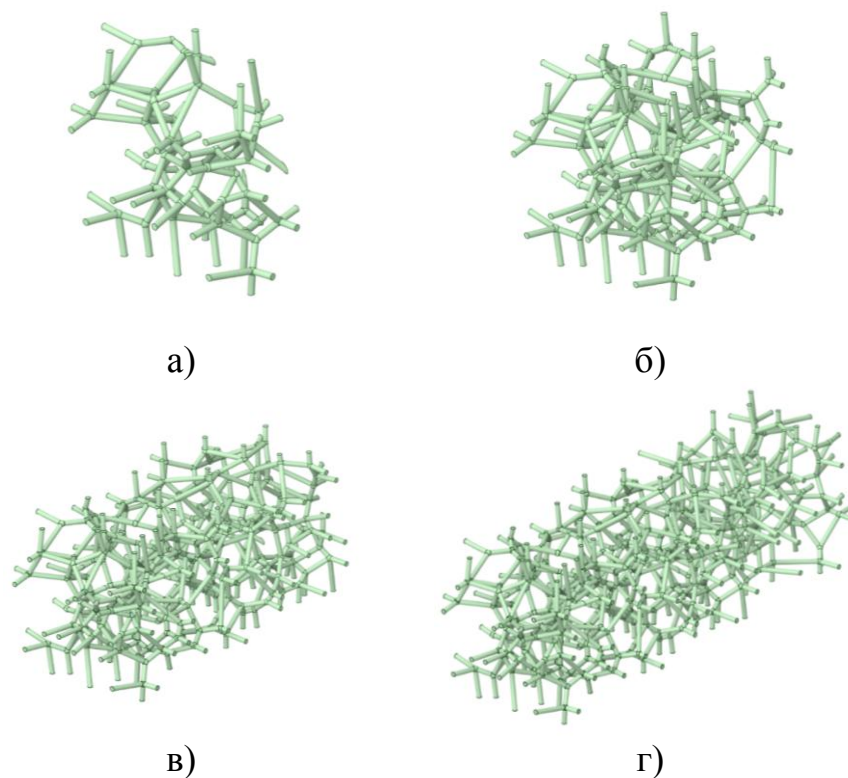


Рис. 1. – Изображения 3D-моделей пористых теплообменников с длинами L :
а) 5 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм

В программном комплексе ANSYS (v.19.2) проведены параметрические расчеты эффективности осаждения частиц пыли на поверхности пористых теплообменников. На входе в расчетную область задавали скорость потока

воздуха v : 0,1; 1; 5 м/с и диаметр частиц пыли d_p : от 10^{-7} до 10^{-4} м. По результатам расчетов построены графики изменения эффективности осаждения частиц пыли в зависимости от длины пористого теплообменника. Эффективность осаждения рассчитывали по следующей формуле (1):

$$E = n_{\text{осев}}/n_{\text{нач}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{нач}}$ – начальное количество частиц пыли в воздушном потоке, $n_{\text{осев}}$ – количество частиц пыли, осевших на поверхности теплообменника.

Результаты и обсуждение

Кривые эффективности осаждения частиц пыли на поверхности исследуемых моделей теплообменников представлены на рисунке 2. С увеличением скорости потока воздуха и размеров частиц пыли эффективность осаждения повышается. Так, при скорости воздушного потока 0,1 м/с, на поверхности всех исследованных моделей теплообменника осаждаются частицы с диаметром более 10^{-5} м, частицы меньших размеров не оседают. При повышении скорости воздушного потока до 5 м/с начинают оседать частицы с диаметром 10^{-6} м и более.

Проведем сравнительный анализ эффективности осаждения частиц в зависимости от скорости потока воздуха на примере частиц с диаметром 10^{-4} м. Увеличение скорости потока с 0,1 до 1 м/с приводит к повышению эффективности осаждения частиц на 17,13% (при $L=5$ мм), на 13,54% (при $L=10$ мм), на 10,05% (при $L=20$ мм) и на 7% (при $L=30$ мм). При дальнейшем повышении скорости потока воздуха до 5 м/с эффективность осаждения частиц пыли повышается дополнительно на 5,07% (при $L=5$ мм), на 3,02% (при $L=10$ мм), на 1,23% (при $L=20$ мм) и на 1,75% (при $L=30$ мм).

Изменение эффективности осаждения частиц пыли в зависимости от длины пористого теплообменника представлено на рисунке 3. При скорости потока воздуха 0,1 м/с, эффективность осаждения частиц пыли с диаметром 10^{-4} м составляет $E=0,286$ для $L=5$ мм, $E=0,495$ для $L=10$ мм, $E=0,736$ для

$L=20$ мм и $E=0,8$ для $L=30$ мм. Увеличение длины теплообменника с 5 до 30 мм привело к повышению эффективности осаждения частиц на 179,72% (при $v=0,1$ м/с). С повышением скорости потока воздуха до 5 м/с эффективность осаждения частиц пыли с диаметром 10^{-4} м на поверхности теплообменника с длиной $L=30$ мм на 147,44% превышает эффективность осаждения частиц на поверхности теплообменника длиной $L=5$ мм.

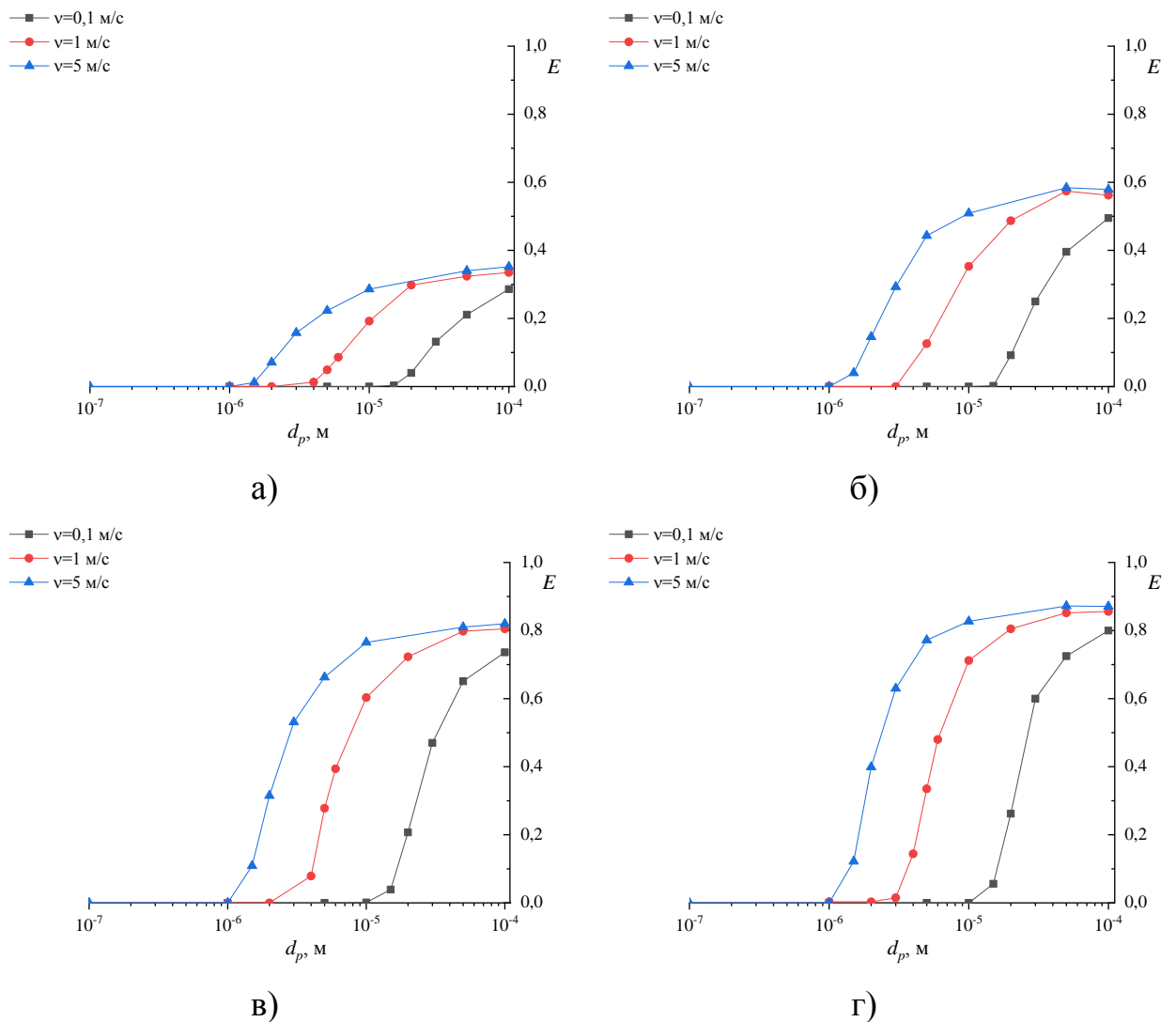


Рис. 2. – Эффективность осаждения частиц пыли на поверхности теплообменников с длинами L : а) 5 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм

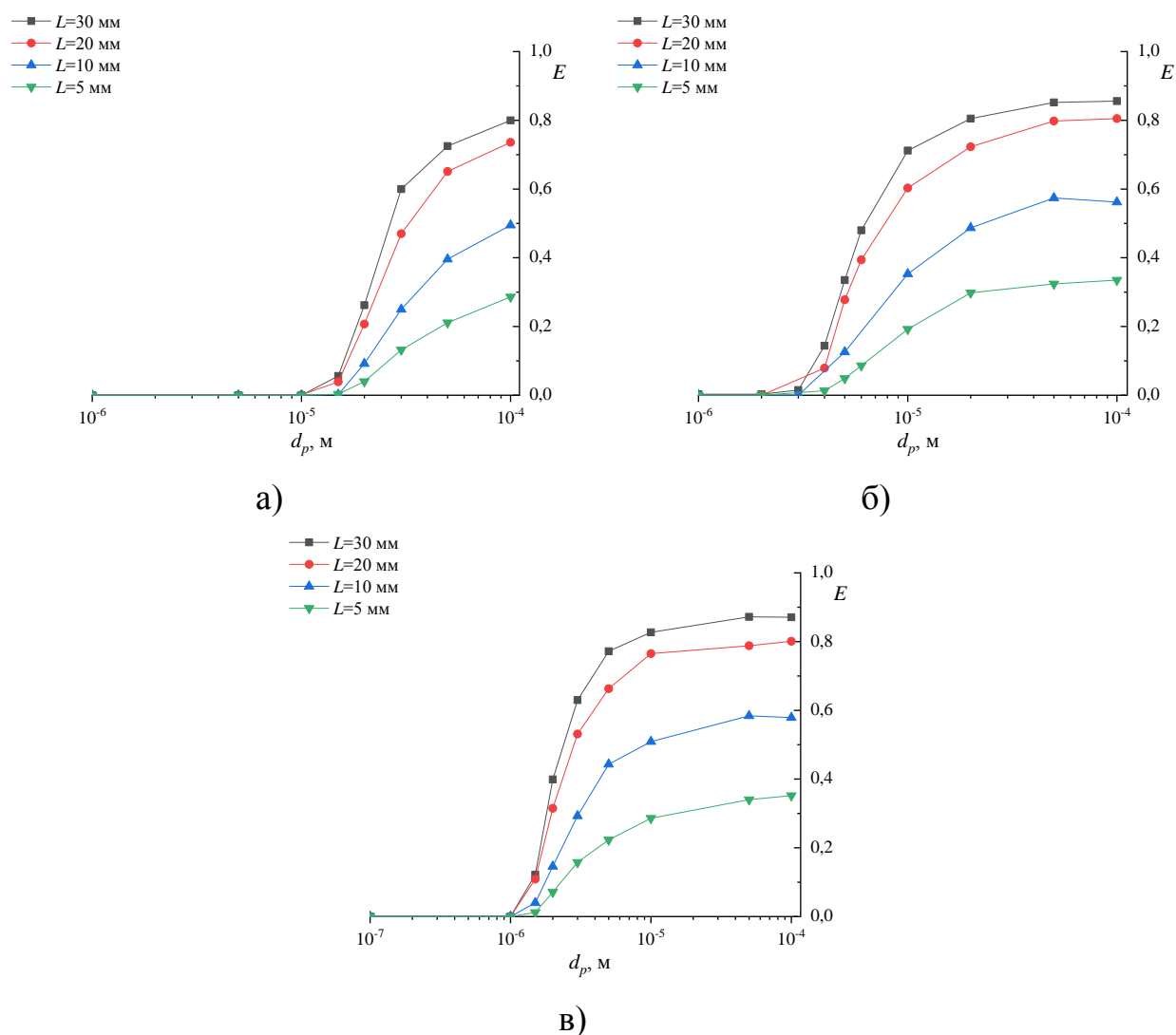


Рис. 3. – Эффективность осаждения частиц пыли на поверхности теплообменников при скоростях потока воздуха v : а) 0,1 м/с; б) 1 м/с; в) 5 м/с

Выводы

Проведено численное исследование осаждения частиц пыли на поверхности пористого теплообменника. Проведена оценка влияния длины теплообменника на эффективность осаждения частиц пыли. Анализ результатов исследования позволяет сделать следующий вывод: увеличение длины теплообменника способствует повышению эффективности осаждения. Наименьшие значения эффективности осаждения частиц, от 0,286 до 0,352, показал теплообменник с длиной 5 мм. Наибольшие значения эффективности

осаждения, от 0,8 до 0,871, во всех исследованных диапазонах скорости потока воздуха и диаметра частиц показал теплообменник с длиной 30 мм. Высокие значения эффективности осаждения означают, что на поверхности теплообменника оседает большое количество пыли, что негативно влияет на его тепловые и гидравлические характеристики. Поскольку теплообменник с длиной 30 мм наиболее подвержен осаждению пыли, характеристики данного теплообменника по мере осаждения будут значительно изменяться.

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

Литература

1. Помыткин В.А., Ворончихин С.Г., Земцов М.А., Флакман А.Л. Численное моделирование и экспериментальное исследование системы охлаждения на основе феррофлюидов // Инженерный вестник Дона, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7253/.
2. Gupta R., Asgari S., Moazamigoodarzi H., Pal S., Puri I.K. Cooling architecture selection for air-cooled Data Centers by minimizing exergy destruction // Energy. 2020. V. 201. P. 117625.
3. 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.
4. Nilpueng K., Mesgarpour M., Asirvatham L.G., Dalkılıç A.S., Ahn H.S., Mahian O., Wongwises S. Effect of pin fin configuration on thermal performance of plate pin fin heat sinks // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 27. P. 101269.
5. Ahmadian-Elmi M., Mashayekhi A., Nourazar S.S., Vafai K. A comprehensive study on parametric optimization of the pin-fin heat sink to

improve its thermal and hydraulic characteristics // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 180. P. 121797.

6. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З., Дудалова Е.А., Зайнуллина Э.Р. Математическое моделирование теплообмена и гидродинамики в моделях керамических сотовых теплообменников // Инженерный вестник Дона, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9055/.

7. Shen H., Ye Q., Meng G. The simplified analytical models for evaluating the heat transfer performance of high-porosity metal foams // International Journal of Thermophysics. 2018. V. 39. P. 1-14.

8. Tahir M.T., Anwar S., Ahmad N., Sattar M., Qazi U.W., Ghafoor U., Bhutta M.R. Thermal management of microelectronic devices using nanofluid with metal foam heat sink // Micromachines. 2023. V. 14. №7. P. 1475.

9. Shen L., Xu S., Bai Z., Wang Y., Xie J. Experimental study on thermal and flow characteristics of metal foam heat pipe radiator // International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 159. P. 106572.

10. 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.

11. 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.

12. Sheikholeslami M., Khalili Z., Scardi P., Ataollahi N. Concentrated solar photovoltaic cell equipped with thermoelectric layer in presence of nanofluid

flow within porous heat sink: impact of dust accumulation // Sustainable Cities and Society. 2023. V. 98. P. 104866.

13. 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.

References

1. Pomy`tkin V.A., Voronchixin S.G., Zemczov M.A., Flaksman A.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7253/.

2. Gupta R., Asgari S., Moazamigoodarzi H., Pal S., Puri I.K. Energy. 2020. V. 201. pp. 117625.

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

4. Nilpueng K., Mesgarpour M., Asirvatham L.G., Dalkılıç A.S., Ahn H.S., Mahian O., Wongwises S. Effect of pin fin configuration on thermal performance of plate pin fin heat sinks. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 27. pp. 101269.

5. Ahmadian-Elmi M., Mashayekhi A., Nourazar S.S., Vafai K. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 180. p. 121797.

6. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Shakurova R.Z., Dudalova E.A., Zajnullina E`R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9055/.

7. Shen H., Ye Q., Meng G. International Journal of Thermophysics. 2018. V. 39. pp. 1-14.

8. Tahir M.T., Anwar S., Ahmad N., Sattar M., Qazi U.W., Ghafoor U., Bhutta M.R. Micromachines. 2023. V. 14. №7. pp. 1475.

9. Shen L., Xu S., Bai Z., Wang Y., Xie J. International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 159. pp. 106572.



10. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, pp. 08006.
11. Soloveva O., Solovev S., Golubev Y., Sabirov N. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, pp. 07014.
12. Sheikholeslami M., Khalili Z., Scardi P., Ataollahi N. Sustainable Cities and Society. 2023. V. 98. pp. 104866.
13. Anuar F.S., Hooman K., Malayeri M.R., Abdi I.A. Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 110. pp. 109941.

Дата поступления: 18.02.2024

Дата публикации: 26.03.2024