

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИНЕЕВЫПАДЕНИЯ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Королев И.А., Маринюк Б.Т., д-р техн. наук, проф.*

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,  
Российская Федерация, г. Москва

**Аннотация.** В представленном исследовании авторами рассматриваются различные пути повышения эффективности воздухоохладителей, работающих в условиях инеевыпадения. На основе численного моделирования показан значительный потенциал оптимизации геометрической компоновки воздухоохладителя и напорно-расходных характеристик вентиляторов под технологические условия его работы.

**Ключевые слова.** Иней, теплопередача, воздухоохладитель, покрытия, оттаивание.

## PROSPECTS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF AIRCOOLERS, WORKING UNDER THE CONDITIONS OF FROST DEPOSITION ON THE HEAT EXCHANGE SURFACE

*Korolev I.A., Marinyuk B.T., Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

FSFEI HE «Moscow Polytechnic University», Russian Federation, Moscow

**Abstract.** In the presented study, the author considers various ways to improve the efficiency of aircoolers operating in conditions of frost deposition. On the basis of numerical modeling, a significant potential of the optimization of the aircooler geometric layout and the pressure-flow characteristics of the fans for the current technological conditions of its operation is shown.

**Keywords.** Frost, heat transfer, air cooler, coatings, defrost.

Обеспечение установленных технологами и стандартами температурно-влажностных режимов при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов зависит от многих факторов. Применительно к холодильной технике на эффективность работы ХМ значительное влияние оказывает подбор теплообменной аппаратуры, в том числе камерных приборов охлаждения. Они, как и многие другие элементы оборудования низкотемпературной техники, подвержены инеевыпадению.

Снижение эффективности теплообмена при инееобразовании в испарителе вызывает необходимость его периодического оттаивания, на что затрачивается 10-25 % от всей электроэнергии, потребляемой холодильными установками. Колебания температуры связанные с необходимостью оттаивания приборов охлаждения и неточное поддержание температуры в холодильных камерах способствуют усиленной усушке продуктов и потере их качества [1].

Желание снизить интенсивность выпадения инея привело исследователей к поиску факторов, влияющих на рост инея. Исследователями [2, 3] было изу-

чено влияние электрических полей на рост инея. Ионизация воздуха коронным разрядом приводит к увеличению скорости роста толщины инея в 4-8 раз и снижает прочность связи инея с основанием ребер. Дендриты инея под действием силы электрического поля отрываются и падают в поддон для сбора инея. Применение электрического поля позволяет увеличить непрерывность работы аппарата и повысить плотность теплового потока на 5-20 %. Однако существующие нормы безопасности не допускают практического внедрения данной технологии, (применение высокого напряжения в помещениях с высокой влажностью).

Ультразвуковое воздействие позволяет почти на 70 % сократить высоту слоя инея, что значительно повышает время работы воздухоохладителей до оттаивания [4], но высокое звуковое давление и значительный рост потребляемой мощности для аппаратов с большой площадью может негативно сказываться на здоровье человека. Исследователями [5] не было обнаружено влияния низкочастотных вибраций на рост инея.

Немаловажным фактором при проектировании и разработке воздухоохладителей являются покрытия, изменяющие поверхностную энергию и угол смачивания, тем самым влияющие как на процесс роста инея, так и на оттаивание воздухоохладителей. На основе анализа энергии Гиббса и проведенных экспериментов в работе [6] показано, что хотя гидрофобные покрытия требуют большего перенасыщения для начала процесса нуклеации, увеличение угла смачивания больше  $140^\circ$  не оказывает влияния на минимально необходимую разницу температур стенки и влажного воздуха ( $5^\circ\text{C}$ ) для начала процесса нуклеации в виде капель. Таким образом, с понижением температуры воздуха, ростом влажности и температурного напора влияние покрытий на рост инея значительно снижается.

Полимерные покрытия позволяют отсрочить появления инея, но уже после трех циклов оттаивания эффект исчезает [7] и появляется вновь лишь после полного высушивания поверхности. В змеевиково-ребристых теплообменниках гидрофобные покрытия способствуют меньшему удержанию воды при оттаивании, в то время как на гидрофильные способствуют растеканию и удерживанию влаги [8]. В компактных пластинчато-ребристых теплообменниках приоритет наоборот имеет применение гидрофильных покрытий [9] ввиду значительного выраженного действия капиллярных сил, что позволяет обеспечить лучший дренаж при их оттаивании.

Наиболее значимым фактором при проектировании воздухоохладителей остается их геометрическая компоновка и напорно-расходные характеристики вентиляторов. На основании разработанной ранее автором численной модели воздухоохладителя [10] представляет интерес выполнить сравнение параметров работы воздухоохладителей с одинаковой площадью теплообменной поверхности, но различной компоновки в условиях характерных для хранения замороженных продуктов (температура воздуха  $-18^\circ\text{C}$ , относительная влажность 95 %, температурный напор на входе в воздухоохладитель  $10^\circ\text{C}$ ), параметры которых представлены в таблице.

Технические параметры моделируемых воздухоохладителей

Параметры	BO1	BO2	BO3	BO4
Шаг ребер, мм	10	10	10	5
Число рядов по высоте	14	14	14	14
Число рядов по глубине	8	8	4	4
Объемная производительность, м <sup>3</sup> /ч	4000	4000	4000	4000
Напорная характеристика, м <sup>3</sup> /Па	25	15	25	25
Ширина, м	0,7	0,7	1,4	0,75
Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	39,75	39,75	39,75	39,75

Воздухоохладитель 2 оснащен иным вентилятором с более «крутой» расходно-напорной характеристикой. Воздухоохладитель 3 имеет в два раза увеличенную фронтальную площадь, при вдвое меньшем числе рядов трубок по глубине аппарата. Воздухоохладитель 4 по сравнению с воздухоохладителем 1 имеет вдвое меньшее число рядов трубок по глубине, при увеличенной в два раза плотности оребрения теплообменной поверхности.

Результаты расчетов холодопроизводительности и массы инея, образуемого на поверхности аппаратов, представлены на рисунке 1.

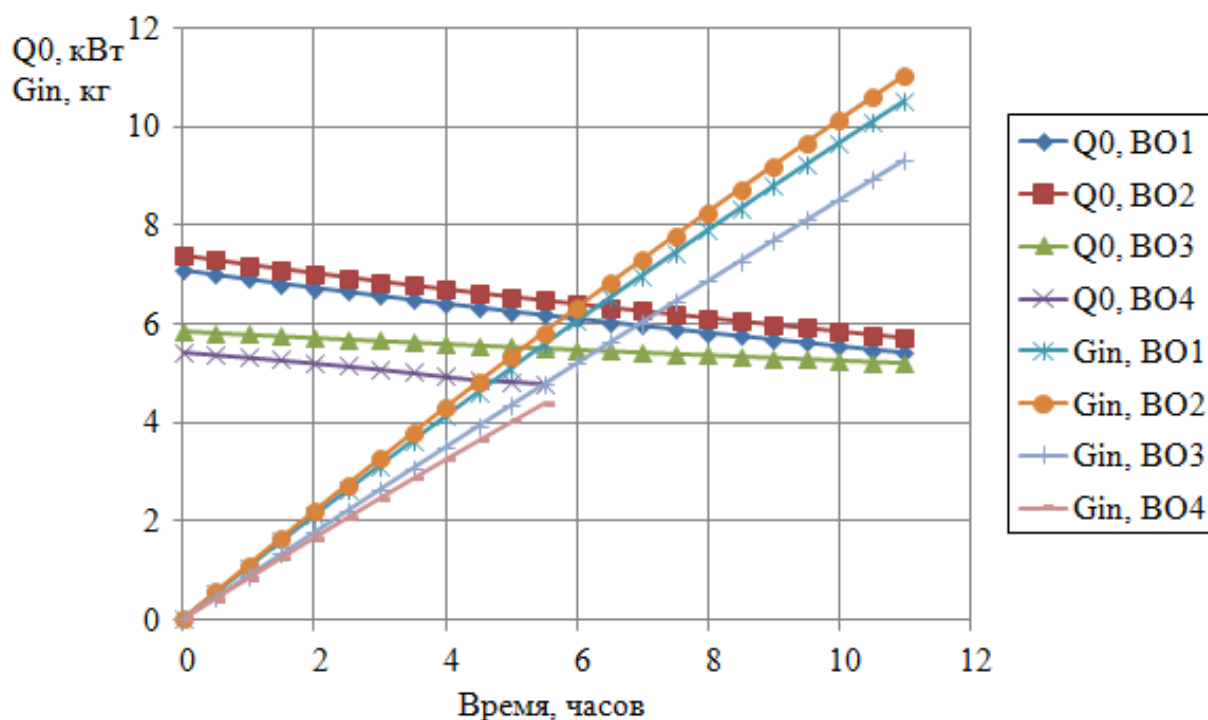


Рисунок 1. Холодопроизводительность и масса инея на поверхности воздухоохладителей различных конфигураций

В представленных тепло-влажностных условиях рост массы инея на воздухоохладителе прямо пропорционален реализуемой им холодопроизводительности. За счет высокой относительной влажности воздуха на входе в аппарат распределение инея носит равномерный характер по глубине. Воздухоохладитель 2 за счет более «крутой» расходно-напорной характеристики вентилятора

имеет более высокий массовый расход воздуха через теплообменное ядро аппарата, что увеличивает его холодопроизводительность, но не оказывает значительного влияния на динамику ее снижения.

Увеличившаяся ширина воздухоохладителя 3 при уменьшении числа рядов трубок по глубине аппарата привела к значительному падению исходного коэффициента теплопередачи и холодопроизводительности ввиду значительного снижения скорости воздуха в теплообменном ядре аппарата. Это также привело к значительному снижению аэродинамического сопротивления аппарата (рисунок 2). За счет вдвое меньшей глубины воздухоохладителя рост инея оказывает меньшее влияние на рост аэродинамического сопротивления аппарата, соответствующее снижение объемного расхода воздуха и холодопроизводительности.

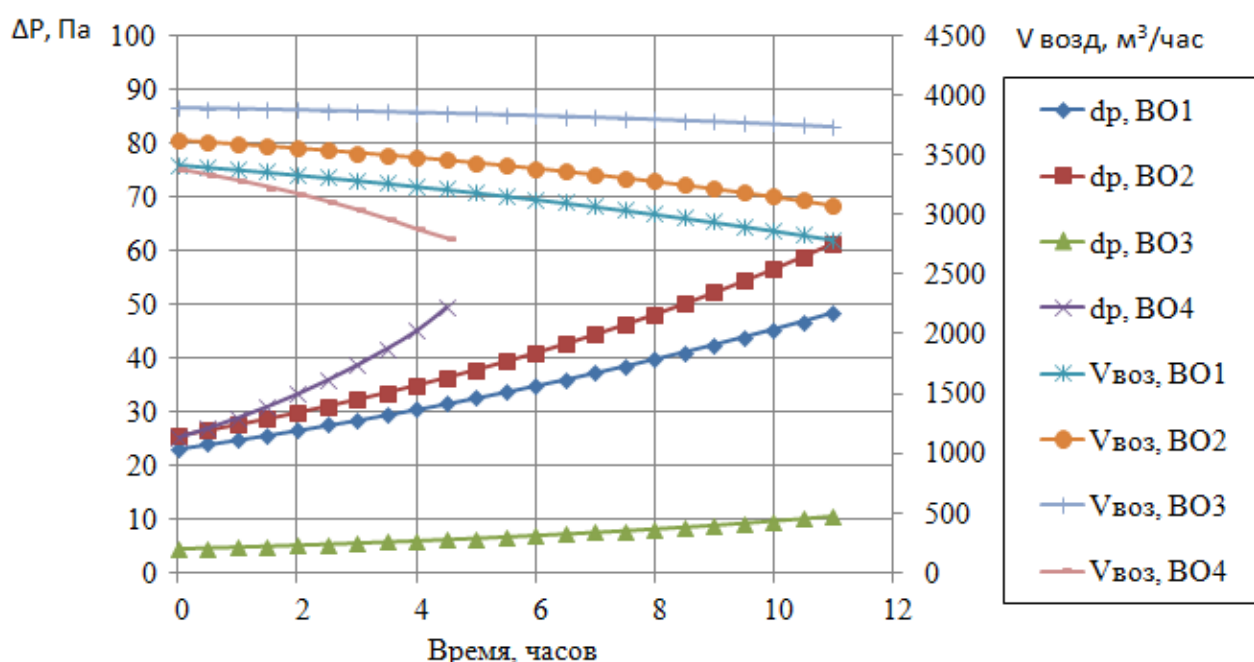


Рисунок 2. Объемный расход воздуха и аэродинамическое сопротивление аппарата в условиях инеевыпадения

Воздухоохладитель 4, демонстрирует самую низкую холодопроизводительность из исследованных по причине чрезмерно высокого коэффициента оребрения поверхности со стороны воздуха. При этом коэффициент теплоотдачи со стороны холодильного агента выступает более значимым термическим сопротивлением, способствуя низким значениям коэффициента теплопередачи. Вдвое меньший шаг оребрения способствует быстрому росту аэродинамического сопротивления аппарата и снижению объемного расхода воздуха.

Динамика роста инея на теплообменных поверхностях моделируемых конфигураций воздухоохладителей представлена на рисунке 3. Скорость роста инея в воздухоохладителе 3 приблизительно на 10 % ниже по сравнению с другими аппаратами за счет низкого коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха и соответствующего перераспределения температурного напора в теплопередающей поверхности.

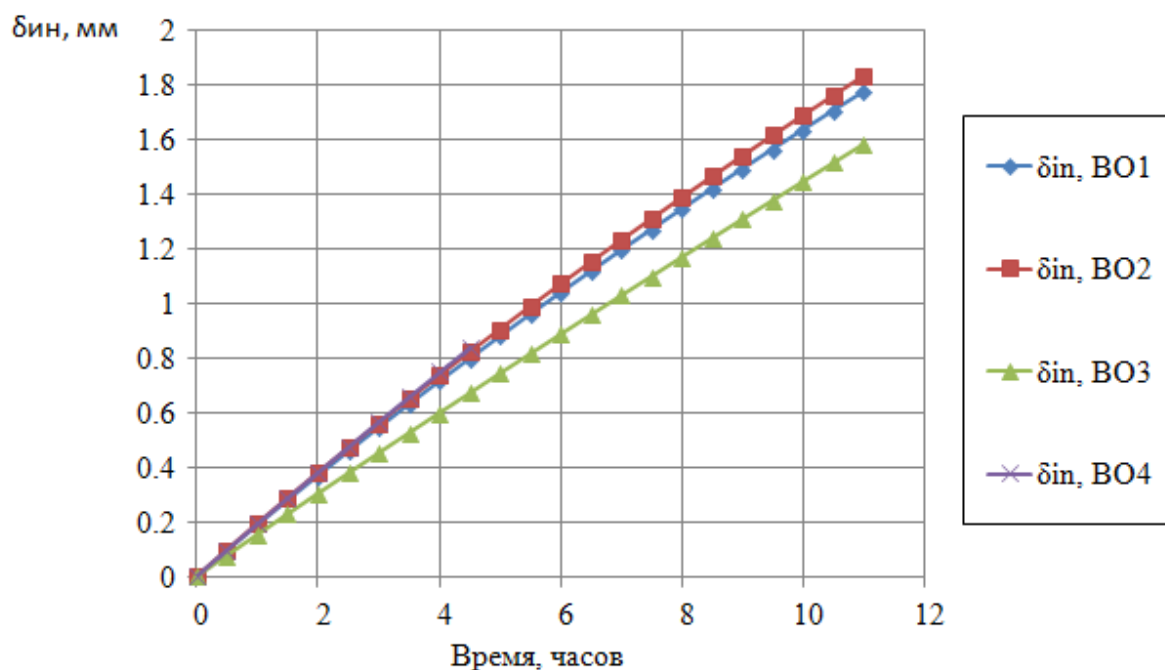


Рисунок 3. Динамика роста инеевого криоосадка в ядре воздухоохладителя

Таким образом, разработка камерных приборов охлаждения представляет собой задачу комплексной оптимизации теплопередачи в теплообменном ядре аппарата и расходно-напорных характеристик применяемых вентиляторов. При этом становится возможным увеличить коэффициент теплопередачи на 10-15 %, достичь требуемой периодичности оттаивания воздухоохладителя или массово-габаритных характеристик.

### Литература

1. Urquiola A., Alvarez G., Flick D. Frost formation modeling during the storage of frozen vegetables exposed to temperature fluctuations // *Journal of Food Engineering*. 2017. Т. 214. P. 16-28.
2. Бабакин Б. С. Образование инея на поверхности приборов охлаждения в электрическом поле // *Холодильная техника*. 1985. № 2. С. 33-37.
3. Joppolo C. M. [et al.] Experimental analysis of frost formation with the presence of an electric field on fin and tube evaporator // *International Journal of Refrigeration*. 2012. № 35. P. 468-474.
4. Li D., Chen Z., Shi M. Effect of ultrasound on frost formation on a cold flat surface in atmospheric air flow // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. № 34. P. 1247-1252.
5. Cheng C.H., Shiu C. Oscillation effects on frost formation and liquid droplet solidification on a cold plate in atmospheric air flow // *International Journal of Refrigeration*. 2003. № 26. P. 69-78.
6. Piucco R.O. et al. A study of frost nucleation on flat surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008. Т. 32. №. 8. P. 1710-1715.

7. Östin R., Johannesson G. A polymeric approach to counteract frosting in air-to-air heat exchangers // Heat Recovery Systems and CHP. 1991. Т. 11. №. 5. P. 415-421.
8. Wang F. et al. Effects of surface characteristics on liquid behaviors on fin surfaces during frosting and defrosting processes // Experimental thermal and fluid science. 2015. Т. 61. P. 113-120.
9. Moallem E. et al. Effects of surface coating and water retention on frost formation in microchannel evaporators (ASHRAE RP-1589) // Hvac&R Research. 2013. Т. 19. №. 4. P. 347-362.
10. Королев И. А., Маринюк Б. Т. Моделирование режимов работы поверхностного воздухоохладителя // Пищевые системы: теория, методология, практика. 2017. С. 162-162.