

Modeling of Frost Formation on Fin-and-Tube Surface of Air Cooler

Lagutin A. E., Kozachenko I. S., Zheliba U. A.

Educational and Scientific Institute of Refrigeration Cryotechnologies Ecology and Energetic
of the Odessa National Academy of Food Technologies
Odessa, Ukraine

Abstract. The aim of this paper is to present a new method of modeling of frost predicting process on the surface of the fine-and-tube air cooler. The advantage in comparison with existing similar models is a significant reduction in the number of operations performed to determine the optimal geometrical parameters of the heat exchange surface. In this paper presented structural scheme of mathematical model, described benefits and usage area. The study present the results of numerical modeling for ammonia air cooler with staggered tube bank and injection molding round fins. The model tested on range of values: coolant temperature ($t_0 = -20, -27^\circ\text{C}$), temperature difference between coolant and ambient air ($\theta = 7, 10^\circ\text{C}$), relative humidity ($\varphi = 90 \dots 98\%$), air velocity ($w = 3, 5, 7 \text{ m/s}$). Fin spacing permitted $\delta = 10\text{mm}$. The result of study shows the effect of the above parameters on the frost formation dynamic and frost distribution on tube rows along air flow. Presented program application allows providing improving of fin-and tube air cooler due to fin spacing optimization. Consequently heat exchange surface redistribute and increase on the area of maximum efficiency.

Keywords: mathematical model, frost formation, prediction, air cooler, optimization.

Modelarea formării brumei pe suprafața cu nervuri a dispozitivului de răcire a aerului

Lagutin A. E., Kozachenko I. S., Zheliba U. A.

Institutul de Educație și Cercetări a frigului, și cryotechnologii și ecoenergetică
Academiei Naționale de Tehnologii Alimentare din Odesa
Odesa, Ucraina

Rezumat. Scopul este de a introduce o nouă abordare a modelării procesului de soluționare a depunrii brumei pe suprafețele cu nervuri de răcire a aerului. Avantajul noii abordări în raport cu modele similare existente, este reducerea semnificativă a numărului de operații efectuate pentru a determina parametrii geometrici optimi ai suprafeței de schimb de căldură. În articol se prezintă schema algoritmului modelului matematic, se descriu particularitățile modelului, avantajele și domeniul de utilizare. Sunt prezentate rezultatele calculului pentru modelul răcitorului realizat cu fasciculul de țevi amplasate în formă de șah cu nervuri circulare realizate prin turnarea sub presiune. Ca agent de răcire s-a folosit amoniacul. Modelarea numerică a fost realizat pentru punctul de fierbere a amoniacului ($t_0 = -20, -27^\circ\text{C}$), diferența de temperatură ($\theta = 7, 10^\circ\text{C}$), umiditatea relativă ($\varphi = 90 \dots 98\%$), viteza în aerului în secțiunea fasciculului ($w = 3, 5, 7 \text{ m/s}$), pasul de amplasare a nervurilor $\delta = 10\text{mm}$. Rezultatele indică gradul de influență a acestor parametri asupra vitezei de formare a stratului de brumă și distribuția lui pe țevile fasciculului în direcția de mișcare a fluxului de aer. Utilizarea modelului propus va permite să se realizeze îmbunătățirea răcitorului de aer prin determinarea valorilor variabile a pașilor de amplasare a țevilor în fascicul, dezvoltând astfel o suprafață de schimb de căldură în locuri de eficiență maximă.

Cuvinte-cheie: modelul matematic, formarea brumei, prognoză, răcitor de aer, optimizare.

Моделирование формирования инея на оребренной поверхности воздухоохладителя

Лагутин А. Е., Козаченко И. С., Желиба Ю.А.

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесской национальной академии пищевых технологий
Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является представление нового подхода к моделированию процесса оседания инея на оребренной поверхности воздухоохладителя. Преимуществом по отношению к существующим подобным моделям, является значительное снижение количества выполняемых операций для определения оптимальных геометрических параметров теплообменной поверхности. В статье представлена схема алгоритма математической модели, описаны его особенности, преимущества и область применения. Представлены результаты расчета модели воздухоохладителя с шахматной компоновкой пучка труб и круглыми ребрами, выполненными методом литья под давлением. В качестве хладоносителя принимался аммиак. Численное моделирование проводилось для температур кипения аммиака ($t_0 = -20, -27^\circ\text{C}$), температурного напора ($\theta = 7, 10^\circ\text{C}$), относительной влажности ($\varphi = 90 \dots 98\%$), скорости в живом сечении ($w = 3, 5, 7 \text{ м/с}$), шаг оребрения составил $\delta = 10\text{мм}$. Результаты расчета показывают степень влияния перечисленных параметров на скорость формирования слоя инея и его распределение по рядам труб пучка вдоль потока воздуха. Применение предлагаемой модели позволит произвести усовершенствование воздухоохладителя путем определения переменных шагов ребер по

глубине пучка труб, тем самым развивая теплообменную поверхность в местах максимальной эффективности.

Ключевые слова: математическая модель, формирование инея, прогнозирование, воздухоохладитель, оптимизация.

Условные обозначения			
t	температура, °С	Q	холодопроизводительность, кВт
φ	относительная влажность, %	Fo	число Фурье
P	давление насыщенных паров, кПа	W	скорость оседания инея, кг/ч
h	высота, мм	M	масса, кг
δ	толщина, мм	V	объём, м ³
D	диаметр, мм	w	скорость, м/с
d	влажносодержание, г/кг _{с.в.}	$(w \cdot \rho)$	массовая скорость, кг/м ² ·с
G	объёмный расход, м ³ /ч	Ψ	степень оребрения
n	количество, штук	Re	число Рейнольдса
L	длина аппарата, м	Nu	число Нуссельдта
K	коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·К	α	коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К
E	коэффициент эффективности ребра	q	плотность теплового потока, Вт/м ² ·К
i	энтальпия, кДж/кг	u	шаг, мм
θ	температурный напор, °С	ξ	коэффициент влаговываждения
λ	коэффициент теплопроводности, Вт/м ² ·К	β	коэффициент оребрения
S	шаг труб, мм	F, f	площадь, м ²
c_p	теплоемкость, кДж/кг·К	B	высота аппарата, м
Δ	погрешность, %	ρ	плотность, кг/м ³
τ	время, час	Pr	число Прандтля
Y	Характерный размер	Fo	число Фурье
Индексы			
a	воздух	qs	последующий
0	параметры холодильного агента	rd	приведенный
1	параметры воздуха на входе в ряд труб	nm	условный
2	параметры воздуха на выходе из ряда труб	w	параметры воздуха над поверхностью инея
sp	осушенный	av	средний
fr	иней	e	эквивалентный
f	ребро	in	внутренний
tb	труба	ex	наружный
b	основание	ft	фронтальный
tp	вершина	tl	общий
fs	межреберный	c	конвективный
cs	живое сечение	dr	сухой
vr	вертикальный	wt	влажный
hr	горизонтальный	hm	насыщение
pr	предыдущий	cm	сравнительный

ВВЕДЕНИЕ

Наращение инея является прямым следствием протекающих процессов тепло- и массообмена между влажным воздухом и холодной поверхностью воздухоохладителя.

Для условий образования инея, необходимо совпадение двух следующих факторов: температура поверхности воздухоохладителя должна быть ниже температуры точки росы для параметров

охлаждаемого воздуха и температуры кристаллизации воды.

Наличие влаги в закрытом помещении, обуславливается её изначальным содержанием в объёме влажного воздуха камеры, а также выделением из хранимого груза при условии, что он не в вакуумной упаковке. Исследования, проведенные в работах [1,2,3,5,6] показывают, что в начальной стадии формирования инея, происходит рост холодопроизводительности аппарата. В работе Ивановой [3] отмечалось, что одним из факторов, способствующим интенсификации теплообмена, являлось образование ледяной прослойки, снижающей контактное сопротивление между трубой и ребром воздухоохладителя. Приведенные Тао [11] и Хаяси [12] хронологические классификации этапов роста инея, выделяют начальный период «остроконечного роста» кристалла, влияющий на увеличение поверхности теплообмена и как следствие прирост холодопроизводительности.

При последующем нарастании инея, в исследованиях [1-10] отмечалось постепенное снижение холодопроизводительности, вследствие снижения расхода воздуха, при росте аэродинамического сопротивления. Согласно исследованиям [11,12] по достижению «переходного времени», кристаллы инея от стадии остроконечного роста переходят к стадии «трехмерного роста». Происходит срастание отдельных кристаллов в кристаллическую пористую структуру, содержащую ячейки воздуха. Такая структура инея приводит к эффекту тепловой изоляции и снижает эффективность теплообмена. Таким образом, процесс образования инея имеет явно негативные последствия для работы воздухоохладителя.

I. СРАВНЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

Обилие режимов работы воздухоохладителей, а также их конфигураций, не позволяют создать единую модель описывающую рост инея на его поверхности. На протяжении последних 20 лет, множество попыток было предпринято для достижения точного описания процесса образования инея [1,5-9,13-20] для конкретного аппарата в узкоспециализированной области. Так в работах [8,9,13] область применения моделей ограничивалась воздухоохладителями торговых витрин, в работе [5] — предприятий

молочной промышленности, а основная масса работ вовсе не имела под собой технологической подосновы, а расчет проводился на исходных данных исходя из личного видения авторов. Данные факты никоим образом не указывают на недостаток таких моделей, а лишь обращают внимание на существующие различия в подходах к решению данной задачи.

В связи с продвижением фундаментальных исследований в области определения свойств инея [11,12,23-25,32-34], а также накопления экспериментальных данных в ходе исследований воздухоохладителей [4,6,26,27], происходит переход от теоретических моделей синтеза обобщенных представлений отдельных слагающих процессов и явлений [23,24,25], к эмпирическим моделям [1,5,6,31], построенным на основании опытных данных. Проведенный обзор показал, что основная доля исследований лежит на стыке двух описанных выше подходов, в области построения полуэмпирических моделей [7,8,9,13-20]. Основным приёмом описания моделей являются метод сосредоточенных параметров или конечных элементов. Основная суть, которой состоит в построении реальной физической системы с распределенными параметрами, заменяемыми её моделью в виде совокупности дискретных элементов [8,9,11], либо применением моделей квазистабильного состояния системы [12,13,17].

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Основным преимуществом предложенной модели является задание критической толщины слоя инея и таким образом шага ребер на первом ряду трубного пучка, а время, полученное в результате вычислений, будет являться постоянным для всего пучка труб, по истечении которого необходимо проводить оттаивание аппарата.

Для каждого последующего ряда труб начальное значение толщины слоя инея будет приниматься по его толщине в предыдущем ряду, но в связи с изменением параметров, охлажденного воздуха на предыдущем ряду, время оседания будет отличаться от времени первого ряда. При помощи итерационных циклов, путем корреляции исходной толщины слоя инея в сторону увеличения или уменьшения, алгоритм расчета времени будет

повторяться до достижения расчетной разницы во времени оседания с принятой погрешностью 2%. После чего цикл перейдет к расчету следующего ряда. Таким образом, для принятой толщины инея на первом ряду труб и времени его оседания, будет определена толщина инея на каждом последующем ряду. Обладая информацией об экстремумах выпадения инея, благодаря программной возможности модели выбирать индивидуальный шаг ребер на каждом последующем ряду труб, тем самым подбирая условия, обеспечивающие компактность аппарата при наилучших тепловых показателях.

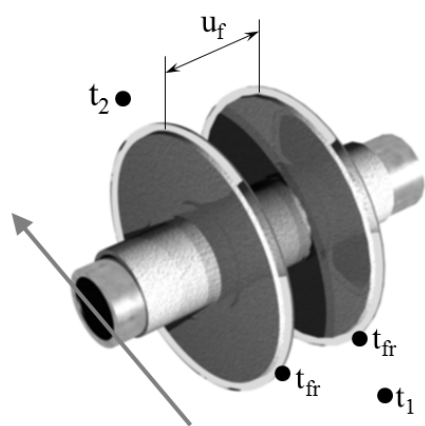


Рис. 1. Расположение точек параметров воздуха на теплообменном элементе.

Визуальное расположение контрольных точек температур воздуха и поверхности аппарата представлено на рис. 1. Полный алгоритм программы представлен на рис. 2. В основе алгоритма лежит внешний и внутренние итерационные циклы. Где внешний цикл определяет температуру поверхности инея (t_{fr}), а внутренний определяет температуру воздуха на выходе из ряда труб (t_2). В дополнении к указанным циклам, при переходе расчета со второго ряда, в модели происходит подключение дополнительного внутреннего цикла по значению времени оседания инея. Данный цикл позволяет привести время оседания инея на всех рядах труб к единому значению при помощи изменения толщины слоя инея на расчетном ряду.

В модели приняты следующие допущения:

1. Расход воздуха через воздухоохладитель осуществляется вентилятором с круто падающей характеристикой, а, следовательно, влиянием сопротивления

на снижение расхода воздуха можно пренебречь;

2. Подача холодильного агента (аммиака) в воздухоохладитель осуществляется по насосно-циркуляционной схеме, что позволяет утверждать о равномерности теплообмена на стороне агента по всей длине всех труб аппарата;
3. Воздух равномерно распределяется по всему фронтальному сечению аппарата;
4. В пределах поперечного ряда труб структура инея гомогенна, а его расчетная толщина равномерна на всей теплообменной поверхности;
5. Точкой начального отсчета времени принято время 1 час.

Теплофизические свойства инея, являются важным элементом в моделировании процесса теплообмена. Для определения теплопроводности инея (1) использовалось уравнение Шмидта [5]. Плотность инея определялась по зависимости (2), предложенной В. Н. Ломакиным [29].

$$\lambda_{fr} = 2,73 \cdot 10^{-7} \times \rho_{fr}^2 \quad (1)$$

$$\rho_{fr} = 1562,5 \cdot (w_a \cdot \rho_a)^{0,15} \cdot \delta_{fr}^{0,25} \cdot \left(\frac{t_1}{t_{fr}} \right) \quad (2)$$

Определение конвективного теплообмена выполнялось по формуле, выведенной А. Е. Лагутиным [28] для поперечного обтекания шахматного трубного пучка с дисковым оребрением выполненного методом литья под давлением.

$$Nu = (1-z) \cdot C_z \cdot C_s^m \cdot \psi_{fr}^{-0,5} \cdot Re^n \quad (3)$$

где C_z - коэффициент учитывающий число рядов труб вдоль потока воздуха;

C_s – коэффициент формы пучка;

$$z = 0,61 \cdot \psi^{0,08}; \quad (4)$$

$$m = S_{ib,hr} + \psi^{-0,48}; \quad (5)$$

В качестве определяющего размера в критериях подобия Re и Nu принимался наружный диаметр трубы (D_{ib}). Границы применимости уравнения (3) по параметрам

составляли: $6000 < Re < 200000$; $6,6 < \Psi < 26$; $0,082 < S_{tb.vr} < 0,11$ м; $0,06 < S_{tb.hr} < 0,1$.

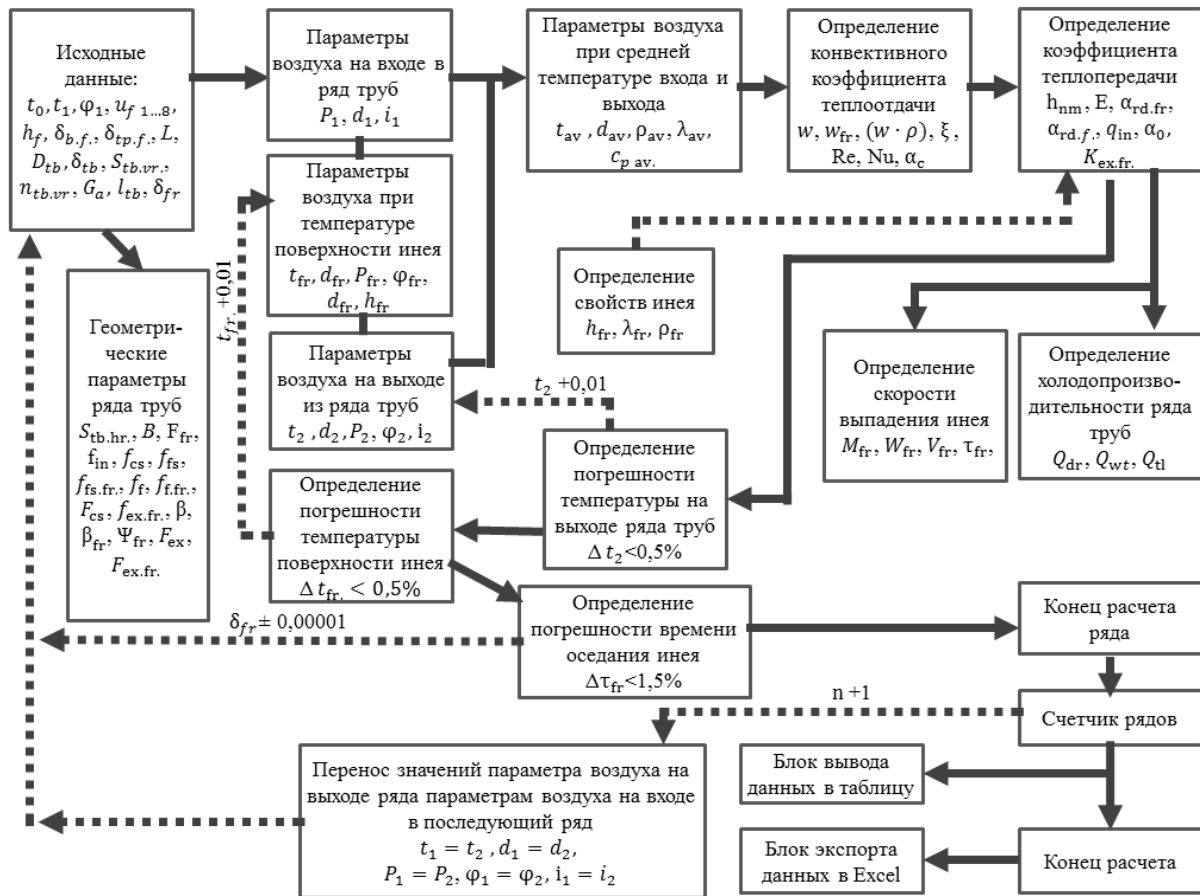


Рис. 2. Алгоритм программы прогнозирования оседания инея.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты вариантных расчетов приведены на графиках (рис. 5-7). На рис. 5 представлены результаты расчета толщины инея по рядам труб пучка при различных значениях относительной влажности воздуха $\varphi_1 = (98, 95, 90) \%$, температурных напоров $\theta = (7, 10) ^\circ\text{C}$ и температур кипения аммиака $t_0 = (-27, -20) ^\circ\text{C}$. Для рассмотренных режимов геометрические параметры труб и пучков приведены в таблице 1.

На рис. 5а приведены графические зависимости при разности температур кипения аммиака $t_0 = -20^\circ\text{C}$ и воздуха на входе в аппарат $t_1 = -10^\circ\text{C}$, равной $\theta = 10^\circ\text{C}$ и при фиксированном объемном расходе воздуха $V_a=9000$ м³/ч. На рисунке 5б представлены зависимости для другого набора исходных значений.

Таблица 1.

Геометрические параметры труб и пучков.

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Диаметр и толщина стенки трубы ($D_{tb} \times \delta_{tb}$), мм	25x2,5
2	Диаметр ребра (D_f), мм	78
3	Диаметр основания ребра ($D_{b.f}$), мм	28
4	Высота ребра (h_f), мм	25
5	Толщина основан. ребра ($\delta_{b.f}$), мм	1,2
6	Толщина вершины ребра ($\delta_{tp.f}$), мм	0,6
7	Поперечный шаг труб ($S_{tb.vr}$), мм	90
8	Продольный шаг труб ($S_{tb.hr}$), мм	100
9	Количество труб пучка по ширине пучка (n_{vr}), шт.	8
10	Количество труб пучка по глубине	8

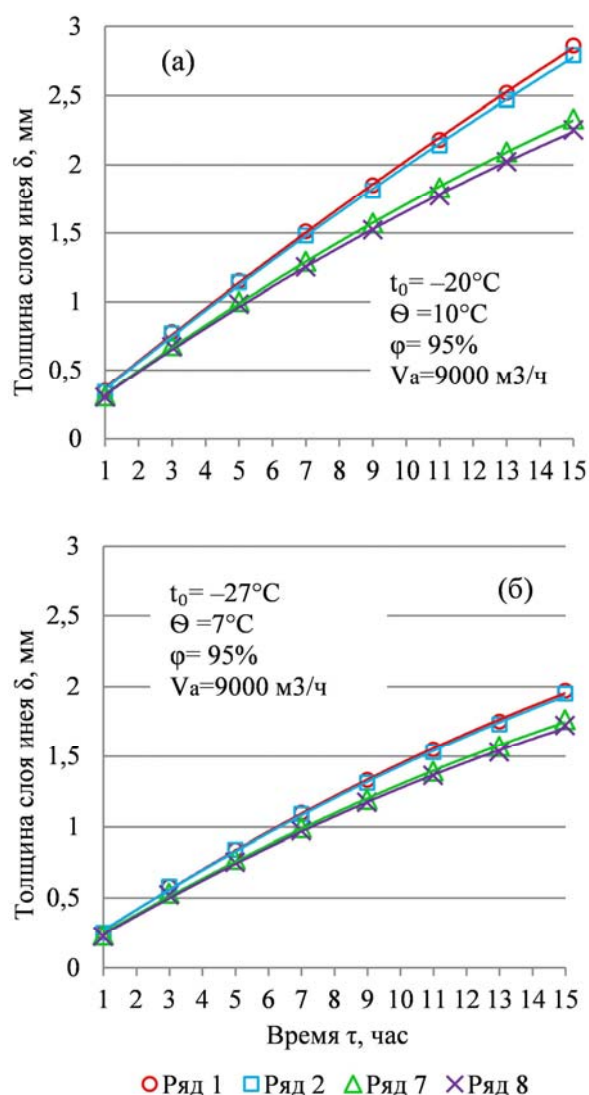
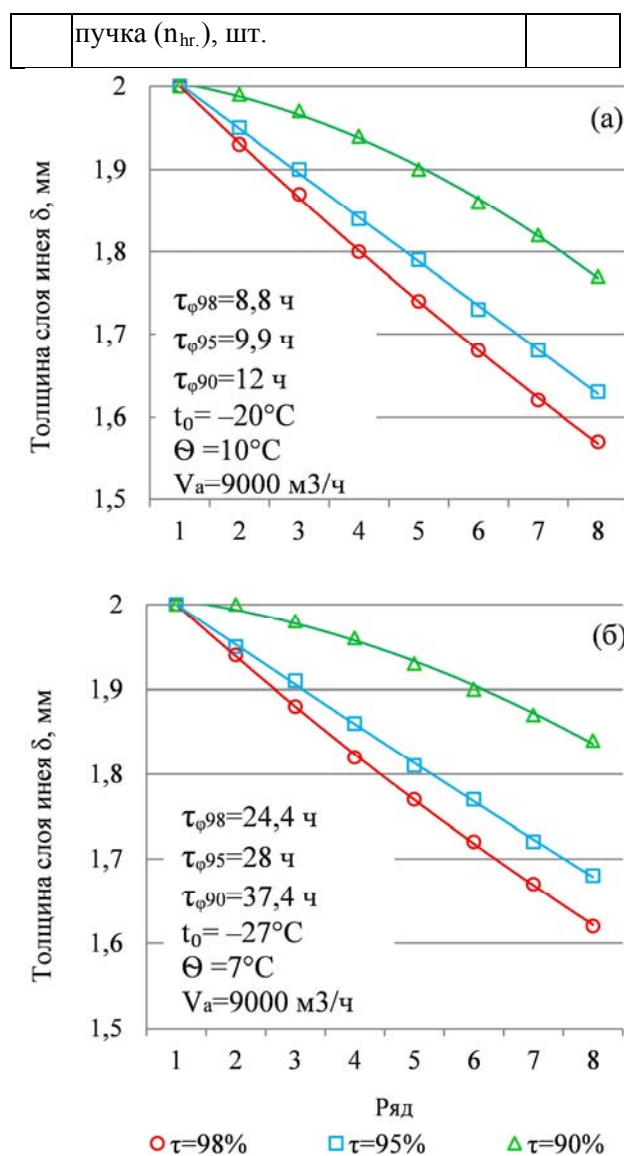


Рис. 5. Зависимость толщины слоя инея по рядам пучка при различных значениях относительной влажности.

Рис. 6. Зависимость толщины слоя инея от времени на двух первых и двух последних рядах пучка.

Для графиков рис. 5а и 5б, при значениях относительной влажности воздуха на входе в аппарат $\phi_1=98\%$ и $\phi_1=95\%$ наблюдается плавное снижение толщины слоя инея по глубине восьмьюрядных пучков труб. На рис. 6 представлены результаты расчета по определению толщины инея как функции времени для двух первых и двух последних рядов пучка воздухоохладителя. Проводя сравнение для значений $\theta=7^\circ\text{C}$ и $\theta=10^\circ\text{C}$ можно прийти к выводу, что при прочих равных условиях с увеличением температурного напора и при более низкой температуре воздуха на входе t_1 , выпадение

инея происходит примерно на 30% интенсивнее для первых рядов. Режимы работы при меньшем температурном напоре – более приемлемы с точки зрения равномерного распределения инея по рядам аппарата.

Результаты расчета, определяющие зависимость толщины слоя на двух первых и двух последних рядах пучка от массовой скорости воздуха в живом сечении аппарата представлены на рис. 7. Расчет проводился для трех значений массовой скорости воздуха, что соответствовало фактической скорости в живом сечении 3, 5 и 7 м/с,

Обеспечение принятых скоростей осуществлялось путем изменения расчетного расхода воздуха. Заданная толщина слоя инея на первом ряду для всех сравниваемых режимов принималась равной 2 мм. Расчетное время осаждения инея заданной толщины на первом ряду для принятых скоростей воздуха в живом сечении приведено на рис.7. Как видно из графиков (рис. 7), изменение массовой скорости в живом сечении, как для значений $\theta=10^{\circ}\text{C}$ (рис. 7а), так и $\theta=7^{\circ}\text{C}$ (рис. 7б) не оказывает критического влияния на время осаждения инея заданной толщины и колеблется в районе 10%. Однако, увеличение массовой скорости оказывает влияние на распределение инея по рядам пучка труб. Таким образом, благодаря методу приведения времени выпадения инея к толщине первого ряда, становится возможным полагать, что при проектировании воздухоохладителя с допустимой толщиной инея для всех рядов пучка труб позволит избежать завышенного шага ребер для всех рядов, тем самым увеличив площадь теплообменной поверхности при неизменных габаритах воздухоохладителя.

IV. ВЫВОДЫ

Математическая модель была разработана для обоснования выбора геометрических размеров ребристых труб, работающих в условиях образования инея при различных параметрах воздуха в охлаждаемом объеме.

Выполненные расчеты с позиции изначально заданной критической толщины слоя инея на первом ряду пучка позволяют реализовать условия рационального подбора шагов ребер по глубине пучка при порядном расчете воздухоохладителя.

В отличие от известных алгоритмов математических моделей [1,2,8,9,5,30], где динамика образования инея по глубине пучка труб представлена временной зависимостью $\delta_{\text{кр}}=f(\tau)$, предложенная модель позволяет выполнять выбор оптимального шага ребер в ходе расчета для каждого ряда труб по ходу воздуха.

Множество параметров, таких как, температура воздуха на входе в аппарат, относительная влажность в охлаждаемом объеме, разность температур кипения агента и воздуха в камере, скорость воздуха в живом сечении аппарата оказывают в разной

степени влияние на динамику образования инея по глубине пакета труб теплообменного аппарата. Так как процесс анализа всех перечисленных параметров ввиду своей трудоемкости не является определяющим, то следует провести их выборку по основным режимам применимым в технологии холодильного хранения пищевых продуктов.

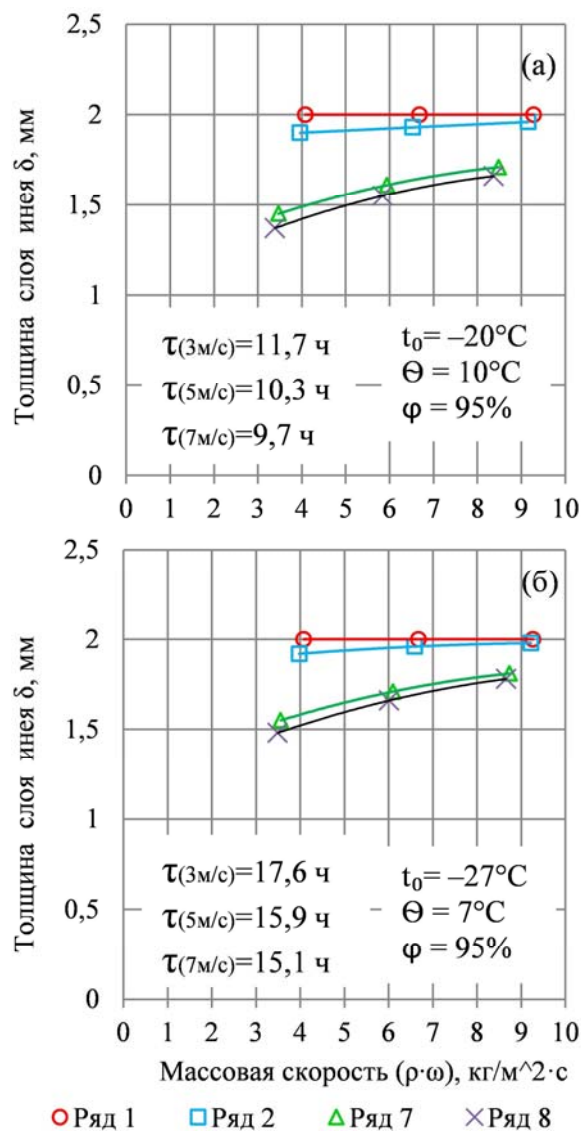


Рис. 7. Зависимость толщины слоя инея от массовой скорости воздуха на двух первых и последних рядах пучка.

Литература (References)

- [1] D.-K. Yang, K.-S. Lee, S. Song. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2006. no. 49. pp. 1472-1479.
- [2] D.-K. Yang, K.-S. Lee, S. Song. Fin spacing optimization of a fin-tube heat exchanger under

- frosting conditions. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2006. no. 49. pp. 2619-2625.
- [3] Ivanova V.S. *Isledovaie teplo- i masoobmena v orebrenih vozduhoohladiatelyah*. Diss. kand. fiz. Nauk [Investigation of heat- and mass transfer for fin-and-tube air coolers. PhD. phys. sci. diss.]. Odessa, 1975. 138 p. (in Russian).
- [4] Ivanova V.S. Narastanie ineya v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii vozduhoohladiately [Frost growth, depending on the operating conditions of air coolers]. *Holodilnaya tehnika*, 1978, no. 9, pp.55-59. (in Russian).
- [5] Bakulin O.S. *Dynamika formuvanya ineyu v povitrooholodzuвачah kamer zberiganya molochnoy produkcii*. Diss. kand. eng. Nauk [Dynamics of frost formation in air coolers of milk storage chambers. PhD. eng. sci. diss.]. Odessa, 2000. 253 p. (in Russian).
- [6] Lomakin V.N., Chepurnoy M.N. Narastanie ineya na orebrenih poverhnostyah [Frost growth on finned surfaces] *Holodilnaya tehnika*, 1990, no. 9, pp. 6-9. (in Russian).
- [7] J. Cui, W.Z. Li, Y. Liu, Z.Y. Jiang. A new time- and space-dependent model for predicting frost formation. *Applied Thermal Engineering*. 2011. no.31. pp. 447 - 457.
- [8] P. Verma, P.S. Hrnjak, C.W. Bullard. [Design strategies for reducing performance degradation due to frosting of display case heat exchangers.] «IIF – IIR. Commission D1/B1» Urbana, 2002. pp. 227-237.
- [9] P. Verma, P.S. Hrnjak, C.W. Bullard, Y. Wu, D.M. Carlson. [Experimentally validated model for frosting of pain-fin-round-tube heat exchangers.] «IIF – IIR. Commission D1/B1» Urbana, 2002. pp. 158- 168.
- [10] Hmaladze O.S. *Teplomasoobmen I aerodinamika bimetalicheskikh poverhnostey v vozduhoohladiatelyah kamer zamorazivaniya myasa*. Diss. kand. eng. Nauk [Heat and mass transfer and aerodynamics of bimetallic surfaces of air coolers for meat freezing chambers PhD. eng. sci. diss.]. Odessa, 1984. 215 p. (in Russian).
- [11] J. Iragorry, Y. Tao, S. Jia. A critical Review of properties and models for frost formation analysis *HVAC&R Research*. 2004. no.10 (4). pp. 393–420.
- [12] Hayashi Y, Aoki A, Adaehi A, Hori K. Study of frost properties correlating with frost formation types. *Journal Heat Transfer*. 1977; no.99. pp 239-245.
- [13] H.M. Getu, P.K. Bansal. Modeling and performance analyses of evaporators in frozen-food supermarket display cabinets at low temperatures. *International Journal of Refrigeration*. 2007. no.30. pp. 1227–1243.
- [14] D. Seker, H. Karatas, N. Egrican. Frost formation on Fin-and-tube heat exchangers. Part 1 - Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers *International Journal of Refrigeration*. 2004. no.27. pp. 367–374.
- [15] Y.T. Ge, S.A. Tassou. Mathematical modelling of supermarket refrigeration systems for design, energy prediction and control *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2000. no.2. pp. 101–114.
- [16] Da Silva L.D. [Frost Formation on Fan-Supplied Tube-Fin Evaporators: A Visual and Numerical Analysis] «International Refrigeration and Air Conditioning Conference». Purdue. 2012. Paper 1164.
- [17] D.L. Da Silva, C. Hermes, C. Melo. First-principles modeling of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators *Applied Thermal Engineering*. 2011. no.31. pp. 2616–2621.
- [18] L. Shao, L. Yang, C. Zhang. Comparison of heat pump performance using fin-and-tube and microchannel heat exchangers under frost conditions *Applied Energy*. 2009. no.87. pp. 1187–1197.
- [19] Prölss K., Schmitz G. [Modeling of Frost Growth on Heat Exchanger Surfaces] . «The 5th International Modelica Conference». Vienna. 2006. pp 509-516.
- [20] S. Kondepudi, D. O'Neal. Performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions: I. Simulation model. *International Journal of Refrigeration*. 1993. no.3. pp. 175–180.
- [21] D.Ozen, K. Altinisik, K. Dincer, A. Ates. Experimental investigation and numerical modeling of thermal performance of fin-tube evaporator under frosting conditions. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2014. vol.34 (2). pp. 49–60.
- [22] H.Shokouhmand, E. Esmaili, A. Veshkini, Y. Sarabi. Modeling for predicting frost behavior of a fin-tube heat exchanger with thermal contact resistance *ASHRAE Transactions*. 2009. vol. 115, pt. 1. pp. 538–551.
- [23] Kamal A.R. Ismail, Fatima A., Morais Lino, Carlos T. Salinas. Numerical and Experimental Investigation of frost Formation on Cold Cylinders *IOSR Journal of Engineering*. 2015. no.5. pp. 43–58.
- [24] D.-R. Yang, K.-S. Lee. Dimensionless correlation of frost properties on a cold plate. *International journal Refrigeration*. no. 27 .2004. pp. 89-96.

- [25] J.-S. Kim, D.-R. Yang, K.-S. Lee. Dimensionless correlation of frost properties on a cold cylinder surface *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 51, 2008, pp.3946-3952.
- [26] D.M. Carlson, P.S. Hrnjak, C.W. Bullard. *Deposition, Distribution, and Effects of Frost on a Multi-Row Heat Exchanger Performance*. Urbana-Champaign. 2001. 187 p.
- [27] C.P. Tso, Y.C. Cheng, A.C.K. Laib. Dynamic behavior of a direct expansion evaporator under frosting condition. Part I. Distributed model. *International Journal of Refrigeration*. 2006. no.29. pp. 611–623.
- [28] Lagutin A. E. Udoskonalenyа aparativ povitryanogo oholozhenyа z trubchastorebnyemy poverhnyamy (teoriya i praktyka) Diss. dokt. eng. Nauk [Improvement of air-cooling apparatus with tubular-finned surfaces (Theory and practice). Dr. eng. sci. diss.]. Odessa, 1998. 319 p. (in Russian).
- [29] Lomakin V.N., Chepurnoy M.N. Isledovanie teplofizicheskikh svoystv namorazivaemogo ineya [Study of the thermophysical properties of frost] *Holodilnaya tehnika*, 1989, no. 11, pp. 32-35. (in Russian).
- [30] Belchenko V.M. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta vozduhoohladiteley s uchetom dinamiki inee obrazovaniya*. Diss. kand. eng. Nauk [Improving of method of air cooler design taking into account the dynamics of frost formation PhD. eng. sci. diss.]. Odessa, 1990. 192 p. (in Russian).
- [31] C. T. Sanders. Frost formation. The influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers. *Delft University of Technology*, 1974. 185 p. uuid:b99381a0-893c-4382-8b14-b1d9bdb370dd
- [32] K.A.R. Ismail, C.S. Salinas. Modelling of frost formation over a flat plate. *Transactions on Engineering Sciences*, 1996, vol 12. p.483-493.
- [33] F.R. de Loyola, C. J. L. Hermes. Modeling of frost buildup in laminar channel flows. *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, 2013. p. 2640-2647.
- [34] C. J. L. Hermes, V. S. do Nascimento F. R. de Loyola. *A dimensionless correlation for the frost density*. *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, 2013. p. 2649-2654.

Сведения об авторах.



Лагутин Анатолий Ефимович, докт. техн. наук, профессор кафедры холодильных установок и кондиционирования воздуха Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, аудит охлаждающих систем в агропромышленном комплексе и химической промышленности.

E-mail: ae_lagutin@meta.ua



Козаченко Илья Сергеевич, аспирант кафедры холодильных установок и кондиционирования воздуха Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, аудит охлаждающих систем в агропромышленном комплексе и химической промышленности, промышленные холодильные системы и установки.

E-mail: ilya.s.kozachenko@gmail.com



Желиба Юрий Александрович канд. техн. наук, доцент кафедры холодильных установок и кондиционирования воздуха Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: промышленные холодильные системы и установки, системы аккумуляции искусственного холода, тепломассообменные процессы в холодильных системах и технологиях, оценка естественных потерь от усушки.

E-mail: yuriy@nio-holod.com.ua