

УДК 664.7

К расчету интенсивности процесса инееобразования в электроконвективной воздушной среде на поверхности охлаждающего прибора

Д-р техн. наук **Е. В. СЕМЕНОВ**¹

¹sem-post@mail.ru

Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
109004, г. Москва, ул. Земляной вал, 73

Д-р техн. наук **Б. С. БАБАКИН**², канд. техн. наук **М. И. ВОРОНИН**,

канд. техн. наук **С. Б. БАБАКИН**, **О. В. КОРОСТЫЛЕВ**³

²aspirantpp@mail.ru, ³kvn-57@list.ru

Московский государственный университет пищевых производств
109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33

Канд. техн. наук **С. В. БЕЛУКОВ**

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, 38.

В статье рассматриваются особенности процесса конденсации частиц водяного пара на поверхности прибора охлаждения в электроконвективной воздушной среде, позволяющие снизить интенсивность инееобразования и возрастания аэродинамических характеристик, в процессе его эксплуатации, за счет направленного роста нитевидного инея и последующего отрыва с поверхности прибора охлаждения. На базе диффузионной модели процесса массопереноса тонкодисперсных частиц водяного пара и кристаллов льда проводится количественная оценка кинетики формирования и роста нитевидного инея в электроконвективной воздушной среде на ребренной поверхности приборов охлаждения. На основе результатов исследований, получены расчетные траектории частиц в зависимости от их крупности, напряженности электрического поля и скорости воздушной среды.

Ключевые слова: инееобразование, водяной пар, процесс массопереноса, охлаждающий элемент.

Estimation of frost formation rate on the surface of cooling element in electrical convection air medium

D. Sc. **E. V. SEMENOV**¹

¹sem-post@mail.ru

Moscow State University of Technologies and Management
named after K. G. Razumovskiy

109004, Russia, Moscow, Zemlyanoy Val, 73

D. Sc. **B. S. BABAKIN**², Ph. D. **M. I. VORONIN**,

Ph. D. **S. B. BABAKIN**, **O. V. KOROSTYLEV**³

²aspirantpp@mail.ru, ³kvn-57@list.ru

Moscow National University of Food Production
125080, Russia, Moscow, Volokolamskoye shosse, 11

Ph. D. **S. V. BELUKOV**

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)

107023, Russia, Moscow, B. Semenovskaya str., 38

The article deals with vapor condensation on the surface of cooling element in electrical convection air medium. The characteristics which allow reducing frost formation and increasing aerodynamic properties due to threadlike frost directed growth following its breaking off the cooling element surface are analyzed. Kinetics of threadlike frost formation on cooling element finned surface in electrical convection air medium is estimated on the basis of mass transfer diffuse model for finely dispersed particles of vapor and ice. Estimated trajectories of particles depending on their size, electrical field intensity and air medium velocity are given.

Keywords: frost formation, vapor, mass transfer, cooling element.

Постановка и решение задачи

Особенностью процесса конденсации частиц водяного пара на поверхности прибора охлаждения в электроконвективной воздушной среде является образование перемычек с соседними заряженными каплями, их слиянием, поверхностным замерзанием с одновременным деформированием, вызванным появлением в жидком ядре капли под ледяной оболочкой пузырьков воздуха в воде и во льду, с последующим «взрывом», разрушающим каплю, и образованием на выпуклостях нитевидного инея [1–6].

Направление нитевидного инея соответствует направлению электрических сил, а длина их увеличивается по мере роста напряженности поля. В электроконвективной воздушной среде повышается температура инеобразования. Процесс нитевидного инеобразования на оребренной поверхности охлаждающего элемента и поверхности элемента генерирующего электрода представлен на (рис. 1).

Как видно из рис. 1, за счет действия холодной неравновесной плазмы коронного разряда, на генерирующем электроде осуществляется нитевидное инеобразование т. е. процесс осуществляется без существенного тепловыделения.

В принятом условии, по крупности частиц можно считать, что они, вследствие величины поверхностного натяжения, по своей форме приближаются к шару (рис. 2).

В качестве исходных параметров, для решения поставленной задачи, выбраны: температура воздуха -20°C ; плотность воды $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность инея $\rho_{\text{ин}} = 300 \text{ кг/м}^3$; коэффициент диффузии водяных паров $D = 19,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; массовая концентрация атмосферного тумана $m_0 = 1 \text{ г/кг}$ (плотность водяного пара $\rho_{\text{т}} = 10^{-3} \text{ кг/м}^3$) [7].

Расстояние между системой генерирующего электрода и оребренной поверхностью охлаждающего прибора принималось равным $h = 0,05 \text{ м}$. Рассматривались частицы крупностью 10^{-7} м и 10^{-6} м , при напряженности E электрического поля равной $5 \cdot 10^{-5} \text{ В/м}$ и $1 \cdot 10^{-6} \text{ В/м}$, при скорости воздушного потока равной $0,5 \text{ м/с}$ и 1 м/с .

Поскольку для частиц малой крупности время релаксации достаточно мало, то режим осаждения частиц следует считать, квазистационарным. Согласно принципу Даламбера, приближенно полагая, что на частицу в атмосферной среде в основном действуют сила Кулона $F_{\text{к}}$, сила тяжести $F_{\text{т}}$ и сила сопротивления $F_{\text{с}}$, величина которой, с учетом крупности частиц, подчиняется закону Стокса (рис. 2).

В результате получаем уравнение [1]

$$F_{\text{т}} + F_{\text{к}} + F_{\text{с}} = 0, \quad (1)$$

где $F_{\text{т}} = \{0, -mg\}$ — вектор силы тяжести, здесь m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$F_{\text{к}} = Eq$ — вектор силы Кулона, здесь E — напряженность электрического поля, В/м ; q — заряд частицы, Кл;

$F_{\text{с}} = -3\pi\mu\delta(V-U)$ — вектор силы сопротивления воздуха, Н, здесь μ — динамическая вязкость воздуха, $\text{Па}\cdot\text{с}$; δ — диаметр частицы, м; $V = \{V_x, V_y\}$ — скорость частицы, $U = \{U, 0\}$, U — скорость потока воздуха, $U > 0$, м/с .

Имея в виду зависимость величины заряда q частицы от напряженности E электрического поля [8] и силы Кулона $F_{\text{к}} = Eq$:

$$q = 3\pi\epsilon_0\delta^2E,$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н}\cdot\text{м}^2)$, $\delta = 10^{-6} \text{ м}$, $E = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$, а также значение плотности жидкости $\rho_{\text{т}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$ [7]. При сравнительной оценке силы тяжести и силы Кулона получаем выражение:

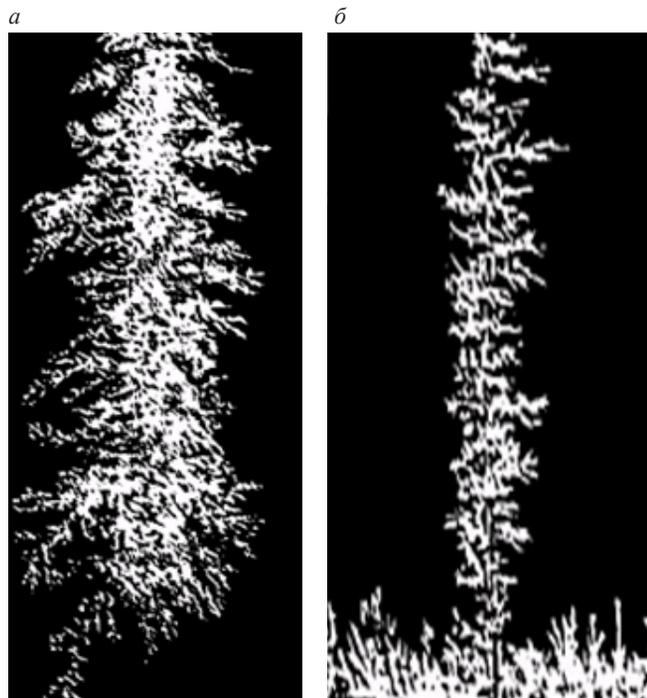


Рис. 1. Инеобразование на оребренной поверхности (а) и генерирующем электроде (б)

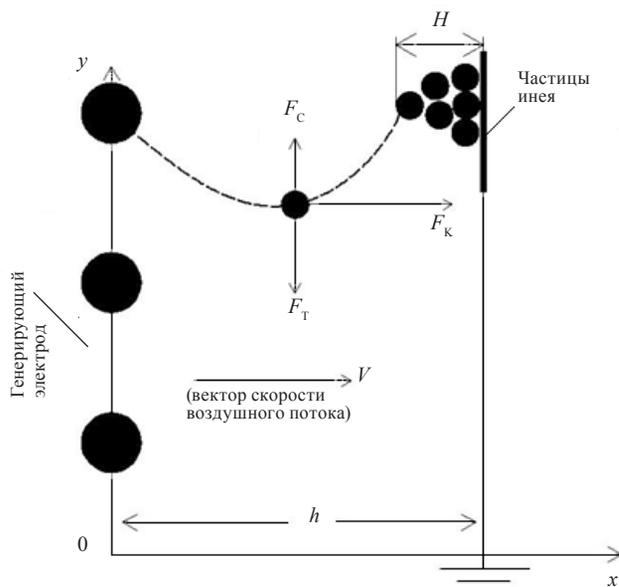


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу ($F_{\text{к}}$ — сила Кулона, $F_{\text{т}}$ — сила тяжести, $F_{\text{с}}$ — сила сопротивления)

$$\frac{mg}{F_k} = \frac{\pi \delta^3 \rho_m g / 6}{3\pi \epsilon_0 \delta^2 E^2} = \frac{\delta \rho_m g}{18 \epsilon_0 E^2} = \frac{10^{-6} \cdot 1000 \cdot 9,8}{18 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 25 \cdot 10^{10}} = 2,46 \cdot 10^{-4},$$

что, очевидно, представляет собой небольшую величину.

Отсюда заключаем, что в условиях индуцированного системой электродов квазиоднородного электрического поля, влиянием силы тяжести на движение частицы пренебрегаем, полагая $V = V_x, V_y = 0$.

В результате чего уравнение (1) в проекциях на ось x , приближенно, принимает форму

$$F_{kx} + F_{cx} = 0$$

или в явном виде, с использованием закона Стокса

$$F_{kx} - 3\pi \mu \delta (V - U) = 0,$$

откуда получаем расчетное значение скорости частицы

$$V = U + v_{kx}, \tag{2}$$

где $v_{kx} = F_{kx} / (3\pi \mu \delta)$.

Формулу (2) используем в дальнейшем при количественном анализе кинетики процесса инеобразования.

В принятом допущении о квазистационарном характере исследуемого процесса, величину потока концентрации данных частиц на оребренной поверхности охлаждающего элемента рассчитываем на базе первого закона Фика

$$j = -D \frac{dn}{dx} + Vn, \tag{3}$$

где D — коэффициент диффузии, m^2/c , n — счетная концентрация частиц, $1/m^3$, V рассчитываем по формуле (2).

На основе второго закона Фика, с учетом принятого характера процесса седиментации частиц и выражения (3), имеем уравнение [9]

$$\frac{d}{dx} (D \frac{dn}{dx} - Vn) = 0. \tag{4}$$

Решение дифференциального уравнения (4) согласуется с граничными условиями:

$$n = n_0, \text{ при } x = 0; \tag{5}$$

$$n = 0, \text{ при } x = h. \tag{6}$$

Интегрируя (4), получаем

$$D \frac{dn}{dx} - Vn = D\Phi \tag{7}$$

где Φ — произвольная постоянная, подлежащая определению.

Общим решением дифференциального уравнения (4) является уравнение [10]

$$n(x) = \exp\left(\frac{1}{D} \int V(x) dx\right) \times [C + \Phi \int \exp\left(-\frac{1}{D} \int V(x) dx\right) dx] \tag{8}$$

где C — произвольная постоянная.

Входящие в уравнение (8) постоянные C и Φ определяем, согласуя (8) с граничными условиями (5), (6). В результате получаем

$$C = n_0, \quad \Phi = -\frac{n_0}{\int_0^h \exp\left[\frac{-1}{D} \int_0^x V(x) dx\right] dx}. \tag{9}$$

С целью определения значения потока концентрации частиц на заряжаемой поверхности $x = h$, на основании (3), (7), (9) используем формулу

$$j(h) = -D \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=h} = \frac{n_0}{\int_0^h \exp\left[\frac{-1}{D} \int_0^x V(x) dx\right] dx} \tag{10}$$

Очевидно, исходя из принятого допущения о стационарном характере протекания процесса инеобразования, в рамках выбранных допущений, может быть найдено количество J оседающих частиц за период времени τ :

$$J(\tau) = j(h)\tau, \tag{11}$$

где $j(h)$ определяем по формуле (10).

В свою очередь, согласно физическому смыслу, значение $J(\tau)$ является скорректированной на величину $\sigma = \rho_{ж} / \rho_{ин}$ (где $\rho_{ж}, \rho_{ин}$ — плотность частиц водяного пара и инея, соответственно) высотой $H(\tau)$ слоя инея на рассматриваемой поверхности охлаждения.

Далее, с использованием процедур среды MATHCAD [11], на базе зависимостей (8), (10), (11), количественно исследуются варианты случаев процесса инеобразования по крупности σ частиц, напряженности E электрического поля и скорости воздушного потока.

Анализ кинетики массопереноса частиц при инеобразовании

По данным работы [8], скорость v_{kx} движения сферической частицы в электрическом поле связана с напряженностью поля E . При этом, например, для частиц крупностью порядка 10^{-7} м, по результатам экспериментов, обработанным по зависимости скорости частицы от напряженности согласно регрессионному анализу, приходим к линейной статистической зависимости:

$$v_{kx}(E) = -0,011 + 1,99 \cdot 10^{-7} E.$$

В результате чего формула (2) преобразуется к виду

$$V = U + (-0,011 + 1,99 \cdot 10^{-7} E). \tag{12}$$

Графиками на рис. 3, на базе (11), (12), для различных значений параметров исследуемого процесса (напряженности электрического поля, скорости воздушного потока, массовой концентрации и крупности частиц водяного пара), представлены расчетные зависимости высоты H слоя инея от продолжительности процесса инеобразования на оребренной поверхности охлаждающего элемента.

Визуальный анализ графиков рис. 3 выявляет, соответствующую физическому смыслу, кинетику исследуемого процесса. Характер прямых показывает, что вместе с ростом напряженности электрического поля, а также скорости воздушного потока интенсивность роста инея повышается. В частности, при напряженности электрического поля $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, за период времени, равный 3 ч, при скорости воздушного потока $U = 0,5$ м/с высота слоя инея составляет $H = 2,12 \cdot 10^{-3}$ м, а при скорости $U = 1$ м/с — $H = 10^{-2}$ м (рис. 3, графики 1, 2), т. е., согласно расчету,

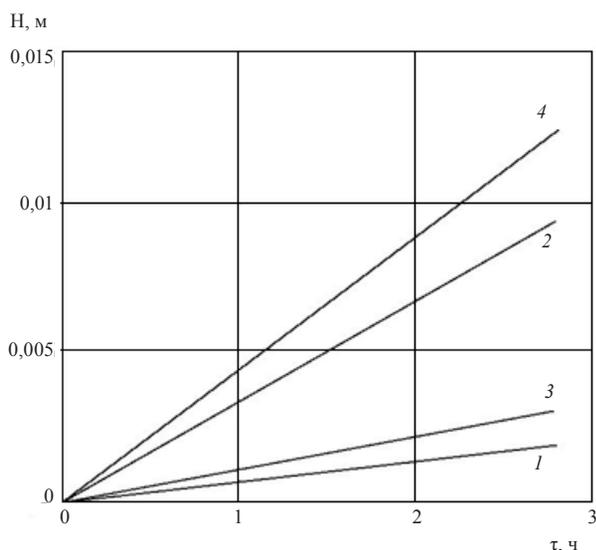


Рис. 3. Зависимости высоты H (м) слоя инея от продолжительности $\tau = t/3600$ (ч) процесса инеобразования на оребренной поверхности охлаждающего элемента для частиц крупностью 10^{-7} м: 1 — $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 0,5$ м/с; 2 — $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 1$ м/с; 3 — $E = 1 \cdot 10^6$ В/м, $U = 0,5$ м/с; 4 — $E = 1 \cdot 10^6$ В/м, $U = 1$ м/с

с возрастанием скорости потока вдвое имеет место увеличение слоя инея примерно в пять раз.

Аналогично, если скорость воздушного потока составляет $U = 1$ м/с, то, в соответствии с расчетом, повышение напряженности электрического поля с $E = 5 \cdot 10^5$ до $E = 1 \cdot 10^6$ В/м, приводит к увеличению высоты слоя инея с $H = 10^{-2}$ м до $H = 1,3 \cdot 10^{-2}$ м, т. е., имеет место возрастание слоя.

Массоперенос частиц крупностью 10^{-6} м. Данный случай исследуется так же, как и предыдущий, принимая во внимание, что согласно [8] и аналогично (12), обработанные по частицам крупностью 10^{-6} м зависимости их скорости от напряженности согласно регрессионному анализу представляются в форме

$$v_{\text{кв}}(E) = -0,046 + 4,73 \cdot 10^{-7} E,$$

поэтому выражение (2) преобразуется к виду

$$V = U + (-0,046 + 4,73 \cdot 10^{-7} E) \quad (13)$$

Габитус графиков рис. 4, рассчитанных по частицам диаметром 10^{-6} м свидетельствует о тех же особенностях процесса инеобразования, что и по частицам размером 10^{-7} м. А именно, имеет место повышение интенсивности роста инея вместе с повышением напряженности электрического поля и скорости воздушного потока [12–14]. В то же время, например, для частиц диаметром 10^{-6} м, в одинаковых условиях, отмечается увеличение интенсивности высоты слоя инея по сравнению с частицами размером 10^{-7} м. Так, согласно расчету в конце периода инеобразования $\tau = 3$ ч, на рис. 3 (график 2), имеем: при $\sigma = 10^{-7}$ м, $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 1$ м/с, $H = 1$ см; на рис. 4 (график 2) — при $\sigma = 10^{-6}$ м, $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 1$ м/с, $H = 1,4$ см. Что, по-видимому, объясняется большим значением скорости осаждения на охлаждаемой поверхности крупных частиц по сравнению с мелкими [8]. По той же причине

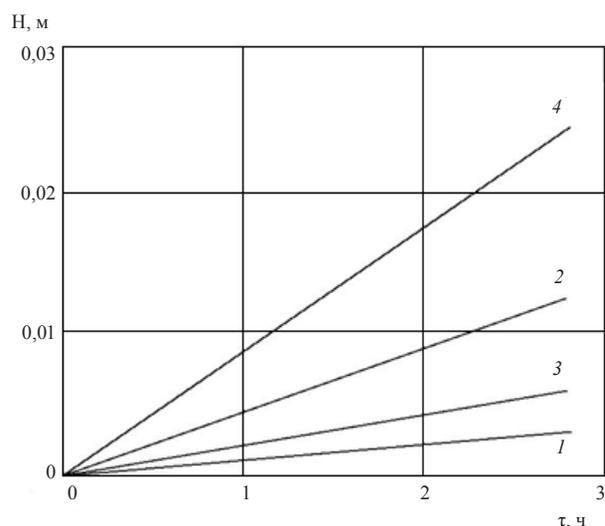


Рис. 4. Зависимости высоты H (м) слоя инея от продолжительности $\tau = t/3600$ (ч) процесса инеобразования на оребренной поверхности охлаждающего элемента для частиц крупностью 10^{-6} м: 1 — $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 0,5$ м/с; 2 — $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $U = 1$ м/с; 3 — $E = 1 \cdot 10^6$ В/м, $U = 0,5$ м/с; 4 — $E = 1 \cdot 10^6$ В/м, $U = 1$ м/с

за период инеобразования 3 ч. отмечается, значительный рост слоя инея: для частиц диаметром 10^{-7} м имеем $H = 1,3$ см, для частиц диаметром 10^{-6} м (рис. 3, график 4) — $H = 2,5$ см (рис. 4, график 4).

Заключение

На базе диффузионной модели процесса массопереноса тонкодисперсных частиц водяного пара и кристаллов льда проведена количественная оценка кинетики формирования и роста нитевидного инея в электроконвективной воздушной среде на оребренной поверхности приборов охлаждения.

На основе результатов исследований, получены расчетные траектории частиц в зависимости от их крупности, напряженности электрического поля и скорости воздушной среды.

С ростом напряженности электрического поля и скорости воздушного потока интенсивность роста инея повышается.

Скорость осаждения частиц крупностью 10^{-6} м на охлаждаемой поверхности выше по сравнению с частицами крупностью 10^{-7} м и соответственно выше высота образующегося нитевидного инея.

Полученные в работе результаты базируются на значительных упрощающих допущениях, положенных в основу исходной физико-математической модели задачи. В частности, при постановке задачи игнорируются: кинетика зарядки частиц, изменение расстояния между системой генерирующего электрода и оребренной поверхностью охлаждающего элемента и др.

Список литературы

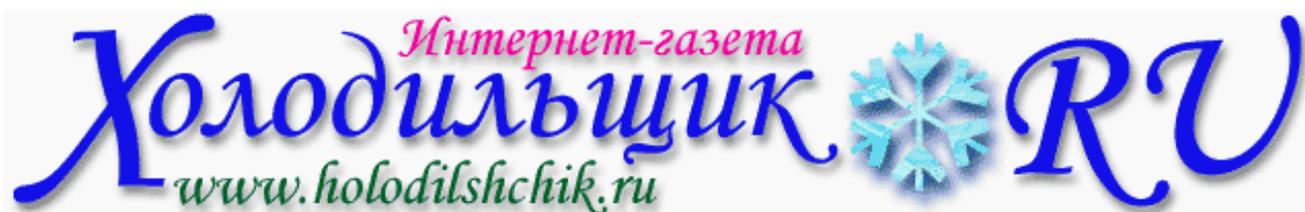
1. Рогов И. А., Бабакин Б. С., Выгодин В. А. Электрофизические методы в холодильной технике и технологии. — М.: КОЛОС, 1996. 336 с.

2. Семенов Е. В., Бабакин Б. С., Воронин И. Л., Коростылев О. В. Моделирование процесса генерации льда и инея на поверхности воздухоохладителей. // Вестник Международной академии холода. 2009. № 4.
3. B. Na, R. L. Webb // Int. J. Heat Mass Transf., GB, 2004.02; vol. 47, N 5, p. 899–911.
4. G. Tanda, M. Fossa // Int. J. Heat Mass Transf., GB, 2006.06; vol. 49, N 11–12, p. 1946–1957.
5. United States Patent 3,681,896.
6. Effect Electric on Phenommon, MUNAKATA Tetsuo, YABE Akira.
7. Напалков Г. Н. Тепломассоперенос в условиях образования инея. — М.: Машиностроение, 1983. 190 с.
8. Верецагин И. П., Левитов В. И., Мирзабекян Г. З., Пашин М. М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. — М.: Энергия, 1974. 480 с.
9. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1986. 544 с.
11. Кудрявцев Е. М. MATHCAD 2000. — М.: 2001. 572 с.
12. Семенов Е. В., Бабакин Б. С., Воронин М. И., Морехон Л. Моделирование процесса инееобразования на поверхности воздушного прибора охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 1. С. 36–39.
13. Лобанов И. Е., Бабакин Б. С., Айтикеев Р. Б., Воронин М. И., Бабакин С. Б. Математическая модель процесса намораживания льда на сферической поверхности применительно для аккумуляторов холода // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 12–15.
14. Маринюк Ю. Т. Вакуумно-испарительные холодильные установки, теплообменники и газификаторы техники низких температур. — М.: Энергоатомиздат, 2003. 208 с.

References

1. Rogov I. A., Babakin B. S., Vygodin V. A. Electrophysical methods in refrigerating technique and technology. Moscow. 1996. 336 p. (in Russian)
2. Semenov E. V., Babakin B. S., Voronin I. L., Korostylev O. V. P rocess modeling of generation of ice and hoarfrost on a surface of air coolers. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2009. No 4. (in Russian)
3. B. Na, R. L. Webb. *Int. J. Heat Mass Transf.*, GB, 2004.02; vol. 47, N 5, p. 899–911.
4. G. Tanda, M. Fossa. *Int. J. Heat Mass Transf.*, GB, 2006.06; vol. 49, N 11–12, p. 1946–1957.
5. United States Patent 3,681,896.
6. Effect Electric on Phenommon, MUNAKATA Tetsuo, YABE Akira.
7. Napalkov G. N. Heatmass transfer in the conditions of formation of hoarfrost. Moscow. Mashinostroenie, 1983. 190 p. (in Russian)
9. Fuks N. A. Mechanics of aerosols. Moscow. 1955. 352 p. (in Russian)
10. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. The reference manual on mathematics. Moscow. Nauka, 1986. 544 p. (in Russian)
11. Kudryavtsev E. M. MATHCAD 2000. Moscow. 2001. 572 p. (in Russian)
12. Semenov E. V., Babakin B. S., Voronin M. I., Morekhon L. Simulation of ice and frost generation on air cooler surface. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2010. No 1. p. 36–39. (in Russian)
13. Lobanov I. E., Babakin B. S., Aitikeev R. B., Voronin M. I., Babakin S. B. Mathematical model of the ice build-up process on a spherical surface for cold accumulators. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No 4. p. 12–15. (in Russian)
14. Marinyuk Yu. T. Vacuum and transpiration refrigeration units, heat exchangers and gasifiers of technique of low temperatures. Moscow. 2003. 208 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 23.12.2014



Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-20452 от 22 марта 2005 года

<http://www.holodilshchik.ru> (<http://холодильщик.рф>)
e-mail: info@holodilshchik.ru

ПЕРВАЯ В РОССИИ ИНТЕРНЕТ-ГАЗЕТА ПО ХОЛОДИЛЬНОЙ И БЛИЗКОЙ ЕЙ ТЕМАТИКЕ

- холодильные новости;
- бытовое, торговое и промышленное холодильное оборудование;
- холодильники;
- охладители жидкости (чиллеры);
- оснащение и строительство супермаркетов;
- холодильный транспорт;
- кондиционирование и вентиляция;
- искусственные и природные хладагенты;
- холодильные масла;
- качество пищевых продуктов;
- сервис холодильных систем;
- литература по холодильной и близкой ей тематике;
- модульная, баннерная, видео- и аудиореклама;
- выставки, конференции, семинары;
- обучающие курсы для холодильщиков и многое другое...