

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КРИООСАДКА НА ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Королев И.А.

Научный руководитель: Маринюк Б.Т., д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

Аннотация. Автором представлена математическая модель, описывающая динамику роста инеевого криоосадка и удельный тепловой поток в условиях наиболее характерных для хранения охлажденных и замороженных продуктов. Получены эмпирические соотношения для расчета плотности и теплопроводности инеевого слоя.

В настоящее время холодильная обработка продуктов является одним из наиболее распространенных способов консервирования. Доля электроэнергии затрачиваемой на выработку холода в ряде отраслей пищевой промышленности достигает 50%.

Обеспечение установленных технологами и стандартами температурно-влажностных режимов при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов зависит от многих факторов. Применительно к холодильной технике наибольшее влияние оказывает правильность подбора воздухоохладителей. Производимые по стандарту EN:328 испытания воздухоохладителей в «сухих» условиях не позволяют оценить эффективность их работы в условиях влаги и инеевыпадения, как и необходимую периодичность работы до оттайки.

Инеевыпадение негативно сказывается на эффективности работы холодильных установок за счет создания в камерных приборах охлаждения инеем дополнительного термического и аэродинамического сопротивления и должно учитываться конструкторами в расчетах площади теплопередающей поверхности и шага оребрения при их подборе[1]. При этом наибольший практический интерес представляет расчет динамики роста толщины слоя инея и удельного теплового потока во времени при условиях характерных для хранения и холодильной обработки пищевых продуктов.

Рост инея является вероятностным процессом и зависит от множества факторов: температуры, влажности и скорости воздуха, температуры и иных характеристик теплообменной поверхности. Вопросами динамики роста инея продолжает заниматься большое число ученых [4,6], однако лишь небольшая часть из исследований описывают рост инея в условиях, характерных для холодильной техники [3,7]. Остается весьма актуальной разработка универсальной модели и зависимостей, описывающей динамику роста и свойства инеевого криоосадка.

В основе модели расчета динамики роста инея использовано уравнение нестационарного теплового потока через оребренную поверхность:

$$q_p(\tau) = \alpha_g \cdot \left[1 + \frac{L \cdot (d_g - d(T_{ин}^{нов}))}{Cp \cdot (T_g - T_{ин}^{нов})} \right] \cdot (T_g - T_{ин}^{нов}) = \frac{\lambda_{ин}}{\delta_{ин}} \cdot (T_{ин}^{нов} - \bar{T}_p), \quad (1)$$

где: α_b – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности инея, Вт/(м²·К); L – теплота сублимации водяных паров в лед, Дж/кг. Cp – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); d_в – влагосодержание воздуха, [кг/кг]; T_в, T_{ин}, T_p – соответственно температура воздуха, поверхности инея и ребренной поверхности, К; $\delta_{ин}$ толщина инея, м; $\lambda_{ин}$ – теплопроводность инея, Вт/(м·К).

Масса образующегося инея может быть рассчитана по известному соотношению Льюиса:

$$G_{ин} = \rho_{ин} \cdot \delta_{ин} = \frac{\alpha_g \cdot (d_g - d(T_{ин}^{нов})) \cdot \tau}{Cp_g}, \quad (2)$$

Наибольшую сложность в описании роста инея является расчет распределения соотношения долей массы идущих на рост плотности и толщины слоя инея. Решение данной задачи может быть выполнено на основе расчета диффузии в слое инея и на его поверхности, что значительно усложняет вычисления, но не приводит к улучшению точности расчетов [6]. Также возможным является использование эмпирических соотношений описывающих плотность или толщину инея, однако подавляющая часть из представленных в литературе получены для нехарактерных в холодильной технике условий [5].

На основе анализа большого числа надежных эмпирических данных [3-8] авторами было получено соотношение, описывающее плотность образующегося инея:

$$\rho_{ин} = \frac{40,9 \cdot \tau^{0,37} \cdot d_g^{0,36} \cdot \alpha_g^{0,25}}{(273,15 - \bar{T}_p)^{0,29}}; R^2 = 0,776, \quad (3)$$

На рис. 1 показано сравнение результатов расчетов по соотношению (3) с экспериментальными данными при различной температуре стенки для продолжительности роста инея 1 и 6 часов.

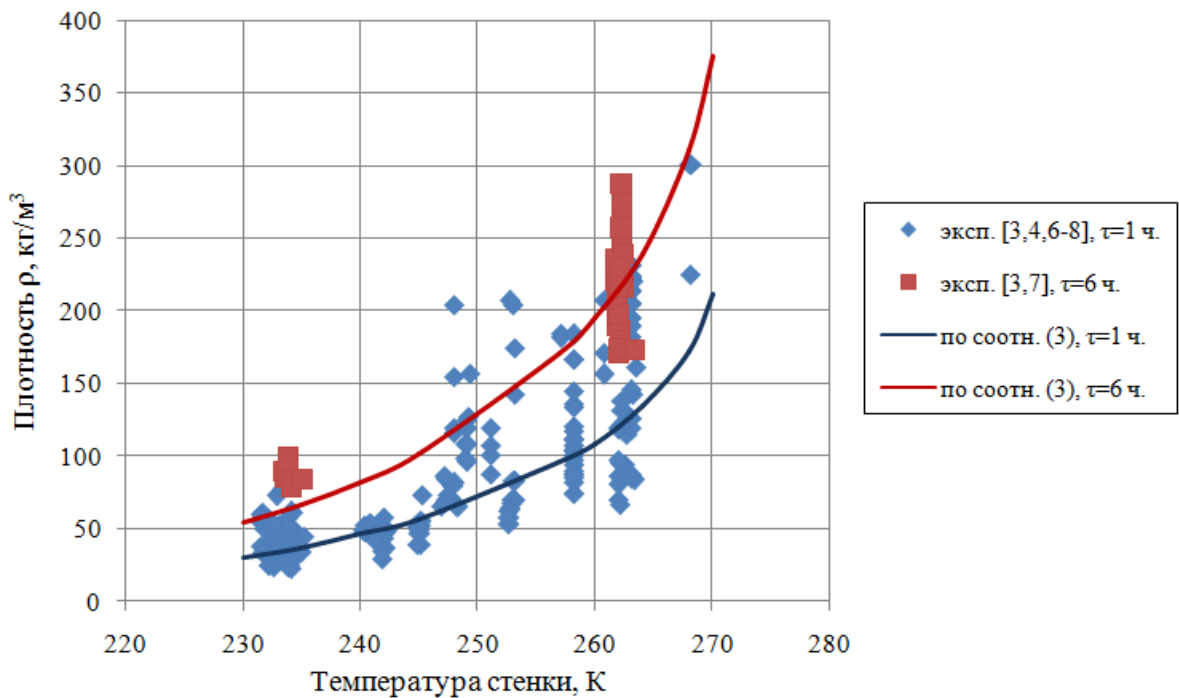


Рисунок 1. Влияние температуры стенки и времени на плотность образующегося инея

Для описания теплопроводности инея на основе анализа большого числа экспериментальных данных для случая вынужденной конвекции авторами ранее было получено соответствующее эмпирическое соотношение [2]:

$$\lambda_{ин} = 0,00285 \cdot \exp(0,0196 \cdot T_{ин} - 2,41) \cdot [1 + 0,0134 \cdot \rho_{ин}]; R^2 = 0,785 \quad (4)$$

Решая систему представленных линейных уравнений на каждый момент времени могут быть определены толщина инея и удельный тепловой поток через оребренную поверхность. На рис. 2 и 3 представлено сравнение результатов расчетов по представленной модели с эмпирическими данными, представленными в исследованиях [3,7]. Расчетные данные по толщине инея и плотности теплового потока хорошо согласуются с экспериментальными данными во всем диапазоне температур, характерных для хранения охлажденных и замороженных пищевых продуктов. Отклонения в расчетах не превышают 15%, что является достаточной для инженерных расчетов точностью.

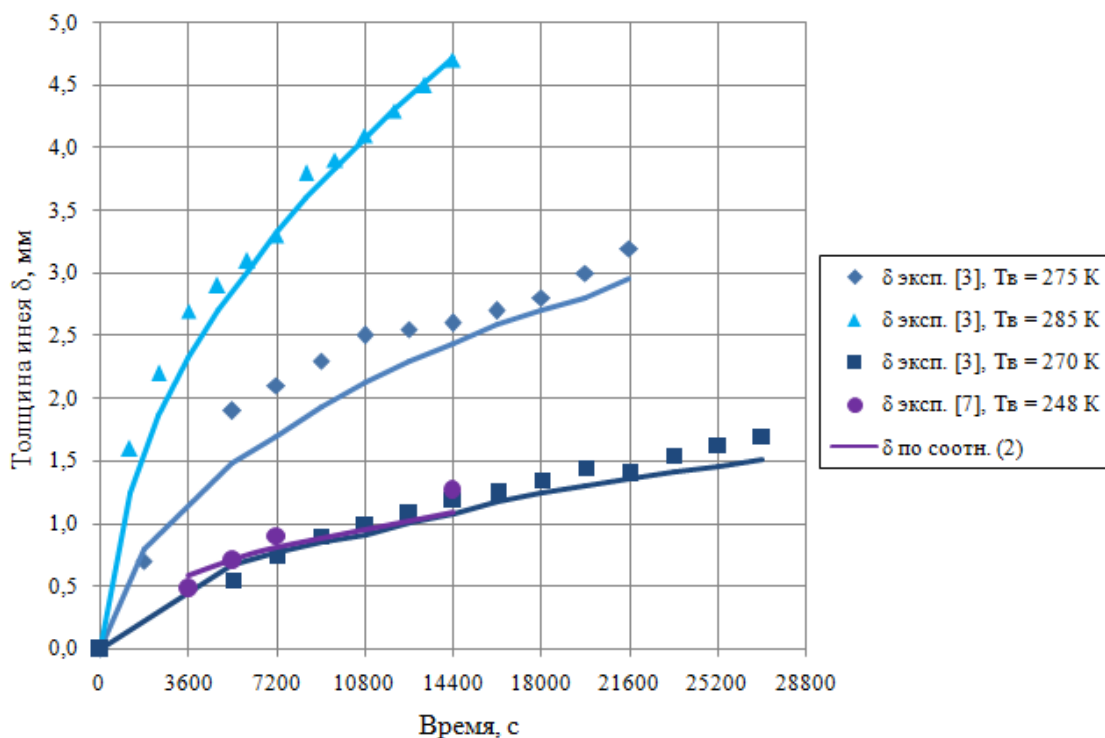


Рисунок 2. Сравнение результатов расчетов толщины инея по соотношению (2) с экспериментальными данными

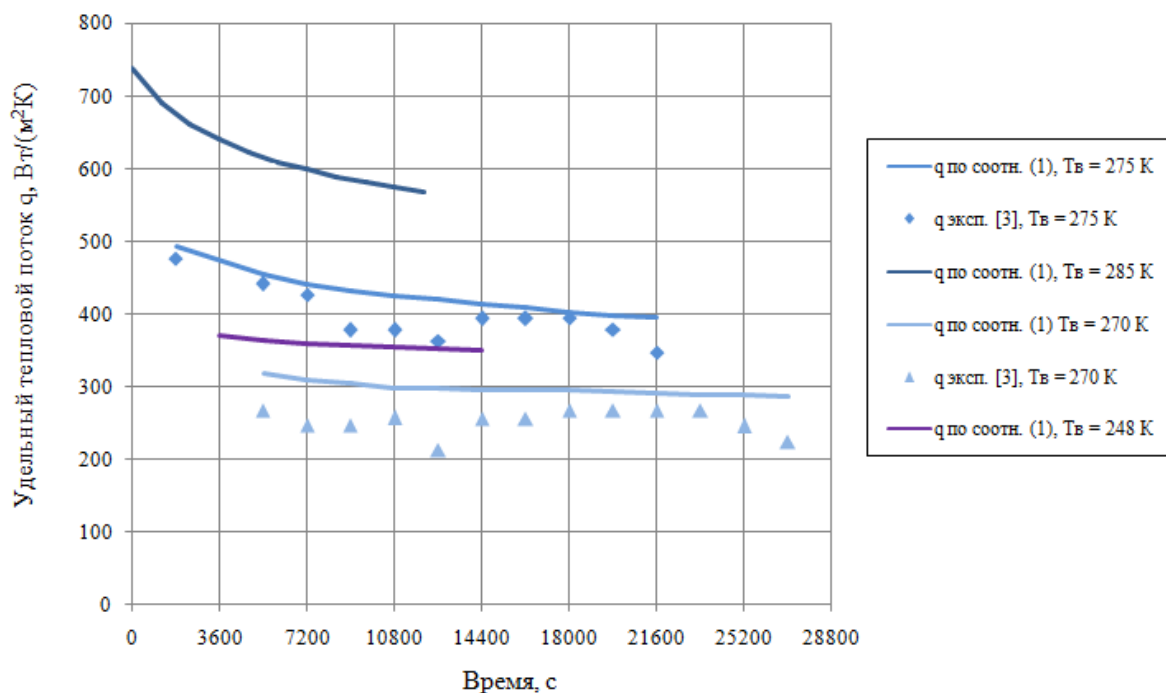


Рисунок 3. Сравнение результатов расчетов удельного теплового потока по соотношению (1) с экспериментальными данными

Выводы

Погрешностей, допущенные при подборе воздухоохладителей, могут приводить к повышенному температурному напору и чрезмерной усушке продуктов, обуславливающих необходимость дополнительного увлажнения воздуха, увеличение частоты оттаивания инея и перерасходу энергии.

Авторами представлена модель динамики роста инеевого криоосадка в основе которой лежит уравнение теплового баланса через оребренную поверхность.

Разработаны базовые эмпирические соотношения, описывающие плотность и теплопроводность инеевого криоосадка, которые позволяют использовать представленную модель в широком диапазоне температур, характерных для работы холодильного оборудования.

Литература

1. Маринюк Б.Т. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. - М.: Машиностроение, 2015. – 272 с.
2. Маринюк Б.Т., Королев И.А. Теплопроводность инеевого криоосадка как фактор, определяющий теплопередачу в камерных приборах охлаждения //Холодильная техника. – 2017. – №. 7. – С. 37-41.
3. Явнель Б.К. Отчет по теме: «Исследование теплообмена в испарителях торговых холодильных установок». – М.: ВНИХИ, 1969 г.
4. Hermes C.J. An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces // International Journal of Heat and Mass Transfer.- 2012. -Vol. 55. - P. 7346–7351.
5. Iragorry J., Tao Y.X., Jia S. Review article: a critical review of properties models for frost formation analysis // HVAC&R. - 2004. - Vol. 10(4). - P. 393–420.
6. Léoni A., Mondot M., Durier F., Revellin R., Haberschill P. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces // International Journal of Refrigeration. - 2016. - Vol. 68. - P. 198–217.
7. Mao Y., Besant R.W., Chen H. Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions: Part I, Experimentation and correlations // ASHRAE Transactions. - 1999. – Vol. 105(2). July.- P. 4295-4314.
8. Wanga W., Guo Q.C., Lu W.P., Feng Y.C., Na W. A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate // International Journal of Refrigeration. - 2012. –Vol. 35. - P. 475-486.