6. Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N. The wet air. Composition and properties of the St. Petersburg state Academy of refrigeration and food technologies. – 1998. – p. 145.

УДК 621.56

Гаджиев А.М., Юсуфов Ш.А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОПРЕСНИТЕЛЯ

Gajiyev A.M., Yusufov Sh.A.

MATHEMATICAL MODEL OF ICE FORMATION ON TEPLOOBMENNOGO SIDE OF THE THERMOELECTRIC DESALINATION PLANT

Аннотация. Обоснована необходимость применения технологий и аналитически обобщены методы опреснения морских и соленых вод. Поставлена задача исследовать процессы, протекающие в опреснителях с непрерывным процессом намораживания льда на теплообменной поверхности с плёночным режимом движения жидкости.

Для решения поставленной задачи в статье рассматривается математическая модель образования льда на теплообменной поверхности термоэлектрического опреснителя. Модель позволяет оценить время нарастания и толщину льда при заданных температурных условиях и расходе воды.

Показано, что использование термоэлектрических преобразователей позволяет гибко регулировать режим образования льда. Решена задача определения предельной толщины льда, при которой еще возможно замерзание пленки воды, протекающей по ней при заданной температуре охлаждающей пластины и холодопроизводительности термоэлектрической батареи.

Установлено, что производительность термоэлектрической опреснительной системы возрастает за счет увеличения количества охлаждаемых поверхностей, а использование теплоты с горячих спаев преобразователей для плавления льда повышает энергоэффективность системы в целом.

Ключевые слова: математическая модель, термоэлектрический преобразователь, опреснение морской воды.

Abstract. The necessity of the use of technology and analytically summarizes the methods of desalination of seawater and brackish waters. Tasked to investigate the processes occurring in the desalination plant with the continuous process of freezing of ice on heat transfer surface with a film mode of fluid motion.

To solve this problem the article deals with mathematical cal model of ice formation on heat transfer surfaces and thermo-electric distiller. The model allows us to estimate the rise time and the thickness of the ice under specified conditions of temperature and flow of water.

It is shown that the use of thermoelectric converters allows the flexibility to adjust the mode of ice formation. Solved the problem of determining the maximum thickness of the ice at which freezing is possible film of water flowing through it at a predetermined temperature of the cooling plate and the cooling capacity of the thermoelectric battery.

It is established that the performance of thermoelectric opreznitive of the system increases due to the increase in the number of cooled surfaces, and the use of the heat from the hot junction of the converters for melting of ice increases the energy efficiency of the system as a whole.

Key words: *mathematical model, thermoelectric converted Vatel, desalination of sea water.*

Введение. Решение проблемы водоснабжения возможно за счет исследования и создания экономически конкурентоспособных технологий по опреснению морских и соленых вод. В настоящее время накоплена достаточная теоретическая и экспериментальная база знаний, сформированная отечественными и зарубежными учеными, позволяющая приблизиться к решению данной проблемы.

По характеру процесса в технологии опреснения морских и солоноватых вод можно выделить следующие методы, связанные с изменением агрегатного состояния: термическое (дистилляция, гелиоопреснение) и с использованием холода (естественное и искусственное вымораживание). Регенерация больших теплот фазового перехода при дистилляции приводит к большим абсолютным потерям работы и снижению степени термодинамического совершенства [1, 9].

На сегодняшний день проведено достаточно большое количество исследований, результаты которых позволяют описать теплофизические процессы в опреснителях вымораживающего типа [2-7].

В тоже время, неполно исследованы процессы, протекающие в опреснителях с непрерывным процессом намораживания льда на теплообменной поверхности с плёночным режимом движения жидкости.

Постановка задачи. В этом случае предполагается, что в процессе движения пленка воды охлаждается и в конечном итоге замерзает, причем концентрация примесей меняется по ходу течения жидкости и соответственно в замёрзшей на поверхности воде. При этом способе получения пресной воды из морской, интерес представляет время замерзания пленки воды в зависимости от расхода жидкости и созданных температурных условий.

Методы исследования. Для построения математической модели процесса замерзания в многослойной системе, представленной на рисунке 1, необходимо рассмотреть механизм движения воды по пластине, тепловые потоки в системе, определение скорости замерзания воды и коэффициента образования льда из части пленки воды.

Рисунок 1. – Многослойная система замерзания воды

При рассмотрении математической модели примем упрощение, что движение пленки воды равномерное, и она равномерно распределена по площади пластины на некоторой области Π [10]. При этом сила трения $F_{тр}$ уравнивается весом элементарного объема Mg .

Как известно, сила трения:

$$F_{тр} = \mu \cdot \frac{v}{\delta} \cdot S \quad (1)$$

где v – скорость пленки воды, δ – толщина пленки воды, μ – динамическая вязкость воды, S – площадь элементарного объема пленки воды, соприкасающейся с поверхностью теплоотводящей пластины.

Примем также допущение, что поперечная скорость пленки воды меняется линейно, и в этом случае:

$$Mg = \mu \cdot \frac{v}{\delta} \cdot S \text{ или } \rho \delta g = \mu \cdot \frac{v}{\delta} \cdot S, \quad (2)$$

Исходя из этого, выражение для толщины пленки воды будет выглядеть следующим образом:

$$\delta^2 = S \cdot \frac{v\mu}{g\rho} \quad (3)$$

Расход воды по пластине будет определяться:

$$M = v\rho\delta\Pi \quad (4)$$

Исходя из (3) и (4)

$$\delta^3 = \frac{2 \cdot \mu \cdot M}{g \cdot \rho^2 \cdot s} \quad (5)$$

Для составления уравнения теплового баланса, а также для определения времени охлаждения пленки используем соотношения для движущейся жидкости в вертикальной трубе постоянного сечения [8].

Для определения средней разницы температуры пленки и охлаждающей пластины имеем:

$$\Theta = (t - t_{\text{п}})_0 e^{-Ax} \quad (6)$$

$$A = S\alpha / MC_p,$$

где t – средняя температура пленки воды, $t_{\text{п}}$ – температура поверхности пластины, которую считаем постоянной, $(t - t_{\text{п}})_0$ – начальный температурный напор между пленкой воды и охлаждающей пластиной, α – коэффициент теплоотдачи жидкости (принимая ее постоянной по длине), C_p – теплоемкость воды, x – координата, совпадающая по направлению со скоростью движения пленки воды.

Очевидно, что время и путь до охлаждения и замерзания воды тем больше, чем больше расход воды. В дальнейших рассуждениях будем предполагать, что остывшая до температуры замерзания пленка воды становится неподвижной.

При рассмотрении процесса замерзания пленки используем модель пластины толщиной 2δ , противоположные поверхности которой охлаждаются, а температура определяется температурой пластины $T_{\text{п}}$, меньшей температуры замерзания T_z .

Время полного замерзания будет определяться:

$$\tau = \frac{\delta^2(r\rho_{\text{в}} + 0,5(C_p\rho_{\text{лед}}))}{2\lambda_{\text{лед}}(T_z - T_{\text{п}})} \quad (7)$$

Оценочное время для полного замерзания пленки толщиной 1 мм на пластине с температурой -15°C составляет 3,4 с.

Уменьшением толщины пленки, или понижением температуры охлаждающей пластины можно достичь времени, до десятых долей секунды, при котором будет происходить полное замораживание пленки воды, так при температуре -25°C и толщине пленки 0,4 мм охлаждение до нулевой температуры происходит всего за 0,8 с.

В тоже время, необходимо учесть тепловое сопротивление слоя льда, образуемого на поверхности при полном замерзании протекающей пленки воды. Предельную толщину льда и время его образования на поверхности можно использовать как условие квазистационарного теплообмена [8].

В этом случае основной задачей становится определение предельной толщины льда, при которой еще возможно замерзание пленки воды, протекающей по ней при заданной температуре охлаждающей пластины, и холодопроизводительности термоэлектрической батареи.

Тепловой поток при этом будет определяться:

$$q = \frac{T_3 - T_{II}}{\left(\frac{\delta_{\text{лед}}}{\lambda_{\text{лед}}} + \frac{\delta_{\text{АМГ}}}{\lambda_{\text{АМГ}}} + \frac{1}{\alpha_{02}} \right)} \quad (8)$$

Количество теплоты при замерзании пленки воды с заданной толщиной в единицу времени:

$$q = \frac{Q}{\tau F} = \frac{Mr}{F} = \frac{\delta x \Pi \rho r}{\tau \Pi x} = \frac{\delta \rho r}{\tau} \quad (9)$$

где r – теплота замерзания, $\lambda_{\text{л}}$ и $\lambda_{\text{АМГ}}$ – теплопроводность льда и пластины, T_3 и T_{II} – температура замерзания воды и охлаждающей пластины, $\delta_{\text{лед}}$ – предельная толщина льда, при которой режим полного замерзания воды сменяется ее частичным замерзанием, характеризуемым коэффициентом K_i .

При квазистационарных условиях получим:

$$q = \frac{\delta_{\text{в}} \rho r}{\tau} = \frac{T_3 - T_{II}}{\left(\frac{\delta_{\text{лед}}}{\lambda_{\text{лед}}} + \frac{\delta_{\text{АМГ}}}{\lambda_{\text{АМГ}}} + \frac{1}{\alpha_{02}} \right)} \quad (10)$$

Из формулы (10) имеем:

$$\delta_{\text{лед}} = \lambda \left(\frac{T_3 - T_{II}}{q_{\text{в}}} - \frac{\delta_{\text{АМГ}}}{\lambda_{\text{АМГ}}} - \frac{1}{\alpha_{02}} \right) \quad (11)$$

Очевидно, что при превышении предельной толщины льда, образованной на поверхности охлаждающей пластины, в лед превращается только часть воды. Данный процесс характеризуется коэффициентом:

$$K_i = \frac{\delta_{\text{лед}}}{\delta} \quad (12)$$

Это связано с тем, что с увеличением толщины льда возрастает тепловое сопротивление, что приводит к уменьшению теплового потока от охлаждающей системы. Если рассматривать квазистационарный процесс теплопередачи, то возможно оценить значение коэффициента частичного замерзания пленки воды при изменении толщины льда.

Обсуждение результатов. Как следует из (12), значение коэффициента определяется как отношение толщины льда в текущий момент к отношению толщины льда в начальный момент процесса, что однозначно можно трактовать как отношение теплового потока, определяемого тепловым сопротивлением системы «пленка воды – лед – охлаждающая пластина» к тепловому потоку системы «пленка воды – охлаждающая пластина».

Отсюда следует вывод, что при некоторой толщине льда из-за увеличения теплового сопротивления слоя льда замерзнет часть пленки толщиной δ , и в этом случае:

$$K_i = \frac{\frac{\delta_{\text{лед}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{АМГ}}}{\lambda_{\text{АМГ}}}}{\frac{\delta_i}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{АМГ}}}{\lambda_{\text{АМГ}}}} \quad (13)$$

и соответственно:

$$K_i = f(\delta_i)$$

С учетом предельной толщины намерзания льда и использования коэффициента K_i , время нарастания льда будет определяться выражением:

$$\Delta\tau = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{\delta_{0,5}(K_i - K_{i-1})} \quad (14)$$

Приведенные соотношения позволяют определить временные параметры процесса образования льда на теплообменной поверхности термоэлектрического опреснителя.

Вывод. В связи с тем, что температурное поле охлаждающей пластины, а соответственно, и тепловые потоки в системе, можно гибко регулировать за счет регулирования тока питания термоэлектрических преобразователей, работающих в режиме охлаждения, то очевидно, что упрощается и возможность управления процессом нарастания пресного льда в опреснителе.

Кроме того, производительность термоэлектрической опреснительной системы, использующей способ вымораживания из потока жидкости, можно увеличить за счет увеличения количества охлаждаемых поверхностей, а использование теплоты с горячих спаев преобразователей для плавления льда позволяет повысить энергоэффективность системы в целом.

Библиографический список:

1. Слесаренко В.Н. Опреснительные установки. Владивосток, ДВГМА, 1999.
2. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980.
3. Бондарев Э.А., Васильев В.И. Задача Стефана с неизвестной температурой фазового перехода // Материалы 7 Всероссийской конференции по тепло-массообмену. Т.7. – Минск, 1984.-с. 34-39.
4. Шаталина И.Н. Теплообмен в процессах намораживания и таяния льда. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.- 120 с.
5. Петрова А.Г. Термодиффузионная задача с малой начальной концентрацией примеси// Динамика сплошной среды. Сб. научных трудов, Новосибирск, 1983.
6. Овчарова А.С. Численное решение стационарной задачи Стефана в области со свободной границей// Вычислительные технологии.- 1999.-Т.4, т.-С.88-99.
7. Гранкина Т.Б. Математическое моделирование процесса формирования ледового покрова водоемов различной минерализации – диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Новосибирск, 2006.
8. Луканин В.Н. Теплотехника. -М.: Высшая школа, 2006.
9. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – М.:Энергоатомиздат, 1984.
10. Бирюк В.В., Шепелев А.И. Процесс образования льда на поверхности криогенных баков //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. -№3. – С. 15-20.

References:

1. Slesarenko V. N. The desalination plant. Vladivostok, dvigma, 1999.
2. Avdonin, N.. The mathematical description of crystallization processes. Riga: Zinatne, 1980.
3. Bondarev E. A., Vasiliev V. I., the Stefan Problem with an unknown temperature phase transition. Proceedings of the 7 Russian conference on heat and mass transfer. Vol. 7. – Minsk, 1984 pp. 34-39.
4. Shatalina I. N. Heat transfer in the processes of freezing and melting of ice. HP: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990.- 120p.
5. Petrov A. G. the thermal diffusion problem with small initial impurity concentration. Dynamics of continuous medium. SB. scientific papers, Novosibirsk, 1983.
6. Ovcharova A. S. Numerical solution of stationary Stephan problem in a region with a free boundary. Computational technologies.- 1999.-Т. 4, Т. - pp. 88-99.
7. Grankina T. B. Mathematical modeling of the process of ice cover formation waters of different salinity – the dissertation on competition of a scientific degree of PhD of medical Science, Novosibirsk, 2006.
8. V. N. Lukanin Engineering. -M.: Higher school, 2006
9. S. L. Rivkin, A. A. Aleksandrov, Thermodynamic properties of in-water and water vapor. Reference. – M.:Energoatomizdat, 1984.
10. V. V. Biryuk, A. I. Shepelev, the formation of ice on the surface of cryogenic tanks. Vestnik of Samara state aerospace University. – 2008. - No. 3. – pp. 15-20.

УДК 621.362

Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Магомедова П.А., Челушкин Д.А.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА СПИРАЛЬНОГО ТИПА

Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A.

DEVELOPMENT OF THE ENERGY EFFICIENT THERMOELECTRIC HEAT PUMP OF SPIRAL TYPE

Аннотация. Обоснована необходимость интенсифицировать процесс теплопередачи в тепловом насосе. Показана возможность использования тепловых насосов для охлаждения жидкости в трубе двигателя.

Предложена новая конструкция теплового насоса спирального типа со светодиодными кольцевыми полупроводниковыми структурами, питание которой осуществляется за счет индукции магнитного поля. Выявлена эффек-