

УДК 621.56

**Описание расчетной модели установки
для получения «бинарного льда»
методом вакуумно-выпарной кристаллизации**

Канд. техн. наук **Круглов А.А.** al-x-kru@yandex.ru

Тазитдинов Р.Р. t.r_92@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассмотрен вариант установки для получения бинарного льда методом вакуумно-выпарной кристаллизации. Выделены основные процессы в баке-кристаллизаторе, существенно влияющие на работу установки. Расчетная модель включает следующие этапы: составление тепловых и массовых балансов установки; расчёт системы откачки водяного пара и описание процесса распыления; расчёт процесса кристаллизации капель; расчёт геометрических параметров бака-кристаллизатора. Составлена расчетная модель, позволяющая выполнять расчёты процессов, анализировать влияние технологических характеристик и определять геометрические параметры установки. Выполнен расчёт технических характеристик установки для производства бинарного льда холодопроизводительностью 12 кВт.

Ключевые слова: бинарный лёд, вакуумно-выпарная кристаллизация, тепловой баланс, массовый баланс, схема установки, бак-кристаллизатор.

DOI:10.17586/2310-1148-2016-9-3-26-35

**Description of analysis model of the plant for producing
«ice slurry» method of vacuum-evaporating crystallization**

Ph.D. **Kruglov A.A.** al-x-kru@yandex.ru

Tazitdinov R.R. t.r_92@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The variant of plant for producing ice slurry of method of vacuum-evaporation crystallization. The main processes highlighted in the tank-crystallizer, which significantly affect the performance of the plant. The analytic model includes the following stages: generation of heatbalance and material balance of the system, calculation of the vacuum system water vapor and the description of the atomization process; a calculating process of crystallization drops; the calculation of the geometric parameters of the tank- crystallizer. Compiled computational model to calculations process, to analyze the impact of technological characteristics and to calculations the geometric parameters of the plant. The calculation of the technical characteristics of installations for the production of ice slurry cooling capacity of 12 kW.

Keywords: ice slurry, vacuum-evaporation crystallization, heat balance, mass balance, plant layout, tank-crystallizer.

Введение

Подписание Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой Земли, и Киотского протокола о стабилизации выбросов парниковых газов в атмосферу оказали влияние на развитие холодильной техники в сторону применения природных хладагентов и снижения запорочной ёмкости систем с синтетическими хладагентами.

В 1972 году российский ученый В.А. Чижиков предложил использовать двухфазный хладоноситель «бинарный лёд». Бинарный лёд состоит из мелких кристаллов льда, размер которых не превышает 500 мкм, в смеси с водой или водным раствором [1]. Доля льда в смеси может варьироваться от 10 до 50 % [2].

Применение бинарного льда в качестве хладоносителя со стабильной температурой, меняющего своё агрегатное состояние в процессе охлаждения, наиболее экономично в случаях неравномерных тепловых нагрузок при околонулевых температурах. Бинарный лёд обладает высокой охлаждающей способностью, создаваемой многочисленными кристаллами, которые обволакивают продукт со всех сторон при контактном охлаждении, тем самым предотвращают его контакт с воздухом, обеспечивая при этом быстрое охлаждение и увеличивая срок

хранения охлаждаемой продукции [3]. Бинарная смесь с массовой долей льда 30 % потенциально может улучшить эффективность системы за счёт уменьшения объёма циркулирующей воды более чем на 80 %, или же увеличить охлаждающую способность в 6 раз при тех же тепловых нагрузках и мощностях на перекачивание хладоносителя. Опубликованные результаты исследований [4], свидетельствуют об увеличении коэффициента теплопередачи на 20 % для пластинчатых теплообменников и на 50 % для трубчато-ребристых теплообменников при использовании бинарного льда, что позволяет сократить расходы на теплообменное оборудование, трубопроводы, насосы и арматуру. Область применения и популярность использования бинарного льда с каждым годом растёт в странах Европы, в Америке и Японии [5, 6]. Это объясняется его теплофизическими и экологическими свойствами.

При производстве бинарного льда наиболее важным процессом является получение ледяных кристаллов с определёнными размерами, формой и шероховатостью, которые влияют на свойства бинарной смеси в целом.

Процесс генерации ледяных кристаллов состоит из трёх основных этапов: переохлаждения жидкости; образования ядра и роста кристаллов. Этап переохлаждения жидкости представляет собой охлаждение ниже температуры кристаллизации без изменения фазового состояния. Затем, после переохлаждения жидкости, происходит гетерогенное образование ядер, которому способствуют чужеродные частицы и шероховатость поверхностей теплообменника. После образования ядра происходит рост кристаллов [7].

После этих трёх основных этапов ледяные кристаллы могут подвергнуться другим процессам, таким как истощение, агломерация и созревание [8]. Эти процессы влияют на форму и размеры кристаллов льда, а соответственно, и на свойства бинарной смеси в целом. При смешивании бинарного льда происходит истощение ледяных кристаллов за счёт напряжения, возникающего при столкновении кристаллов с твердыми поверхностями. Агломерация – это процесс слипания кристаллов друг с другом, с образованием при этом ледяных кристаллов с большим размером. Процесс агломерации может наблюдаться как при получении, так и при хранении (без перемешивания). При длительном хранении бинарного льда возникает процесс созревания, то есть мелкие кристаллы распадаются, и тогда основу бинарной смеси составляют большие частицы льда.

Как правило, мелкие кристаллы сферической формы легко перекачиваются по трубам и теплообменникам, поэтому процессы измельчения и сглаживания углов кристаллов занимают важную позицию в получении бинарной смеси. Исследования Kasza и Hayashi [9] показали, что полученные из пресной воды кристаллы имеют дендритную форму, то есть имеют неровную, шероховатую поверхность, это приводит к плохой текучести и быстрой агломерации бинарной смеси. Также им удалось обнаружить, что введение депрессантов в воду позволяет сглаживать поверхность кристаллов химическим путём.

Получение искусственного льда методом капельной кристаллизации является одним из высокопроизводительных способов. Высокая производительность данного способа достигается за счёт увеличения поверхности контакта воды при её распылении.

Применяемые в настоящее время парокомпрессионные генераторы бинарного льда стоят дороже водоохлаждающих холодильных машин. Новые способы получения бинарного льда должны составить конкуренцию существующим. Производство бинарного льда с помощью вакуумно-выпарных установок имеет ряд преимуществ: в качестве хладагента в вакуумных установках применяется вода; система находится под давлением ниже атмосферного; коэффициент эффективности вакуумно-выпарных установок выше, чем у традиционных способов получения. Таким образом, разработка новых установок, применение и исследование процессов в вакуумных установках для получения бинарного льда является актуальной темой [10].

Описание установки для получения бинарного льда

В качестве объекта рассматривается холодильная установка для получения бинарного льда методом вакуумно-выпарной кристаллизации.

Установка состоит из следующих основных элементов (см. рис. 1): вакуумного бака-кристаллизатора – 1, вакуумного насоса – 2, форвакуумного насоса – 3, конденсатора – 4, рециркуляционного насоса – 5, циркуляционного насоса – 6 и теплообменного аппарата – 7.

Процесс получения бинарного льда в вакуумно-кристаллизационной установке осуществляется в следующей последовательности. С помощью вспомогательного вакуумного насоса создаётся предварительное разрежение с остаточным давлением около 1100–2000 Па. После чего включается основной вакуумный насос, который создаёт рабочее давление в баке-кристаллизаторе на уровне 200–400 Па (абс.). Разрежение вспомогательным насосом необходимо для запуска основного вакуумного насоса, работа которого от атмосферного давления невозможна.

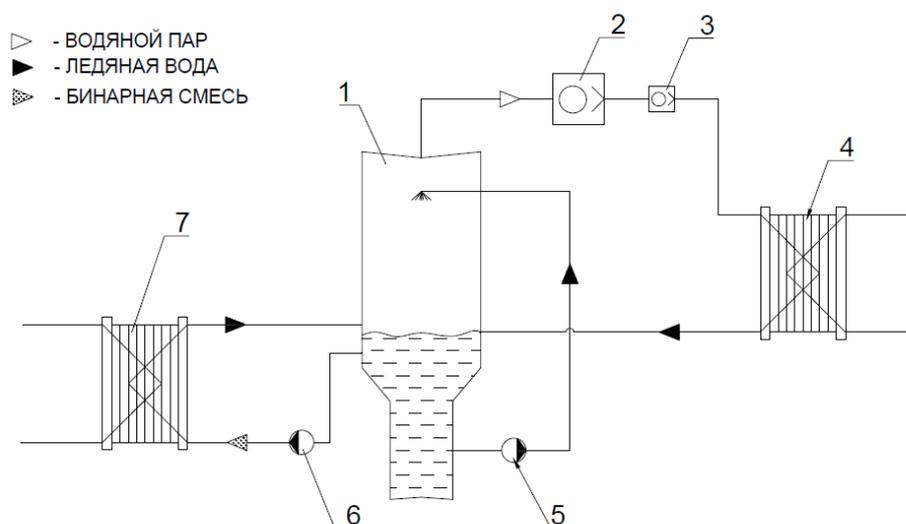


Рис. 1. Принципиальная схема вакуумно-выпарной установки для получения бинарного льда

Внутренний объем вакуумного бака-кристаллизатора для упрощения расчётов условно можно разделить на три основные зоны:

- зона распыления;
- зона кристаллизации;
- зона бинарной смеси.

В зоне распыления в верхней части бака-кристаллизатора происходит непрерывное распыление воды через форсунки. Распылительные устройства дают так называемый факел распыления, который представляет собой множество взаимодействующих между собой капель различного размера. Наиболее вероятный размер капель зависит от конструктивных особенностей форсунок и параметров процесса распыления.

Распыляемая жидкость обладает большой поверхностью испарения, вследствие чего, в процессе испарения при пониженном давлении часть жидкости в распыляемом факеле превращается в водяной пар. Самая мелкая часть капель в распыляемом факеле взвешивается потоками водяного пара, образуя при этом туман. Более крупные капли под действием силы тяжести выпадают из факела. Таким образом, в зоне распыления находятся водяной пар, туман и падающие капли.

Падающие из факела капли попадают в зону кристаллизации. В этой зоне капля попадает в псевдооживленную среду, где на неё действует сила выталкивания, создаваемая потоками откачиваемого вакуумным насосом водяного пара, и сила тяжести. Эти две силы влияют на время нахождения капли в зоне кристаллизации и геометрические размеры бака-кристаллизатора. Во время нахождения капель в зоне кристаллизации, часть их переходит в паровую фазу, а часть кристаллизуется, образуя при этом падающие ледяные кристаллы льда.

Полученные кристаллы льда оседают в зоне бинарной смеси. В ней собираются неиспарившаяся жидкость и мелкодисперсные кристаллы льда. За счёт разности плотностей воды и льда, в верхней части этой зоны образуется смесь воды с высокой концентрацией кристаллов – бинарный лёд, откуда он забирается и подаётся циркуляционным насосом в пластинчатый теплообменник для охлаждения продукта. В нижней части скапливается вода с околонулевой температурой, которая непрерывно с помощью рециркуляционного насоса, обеспечивающего таким образом перемешивание смеси в объёме, что не даёт слипаться кристаллам, подаётся в форсунки (в верхнюю часть бака-кристаллизатора).

Откачиваемый вакуумным насосом водяной пар поступает в пластинчатый конденсатор 5, где он конденсируется. Конденсат возвращается в бак-кристаллизатор.

Таким образом, при описании расчётной модели вакуумно-выпарной установки можно выделить следующие этапы:

- составление тепловых и массовых балансов установки;
- расчёт системы откачки водяного пара и описание процесса распыления;
- расчёт процесса кристаллизации капель;
- расчет геометрических параметров бака-кристаллизатора.

Тепловые и массовые балансы

Уравнения тепловых и массовых балансов, являются важнейшими для описания математической модели холодильной установки. Они позволяют вести технологический расчёт и анализировать теплообменные процессы, влияющие на установку.

На рис. 2 изображена схема для составления тепловых и массовых балансов вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда.

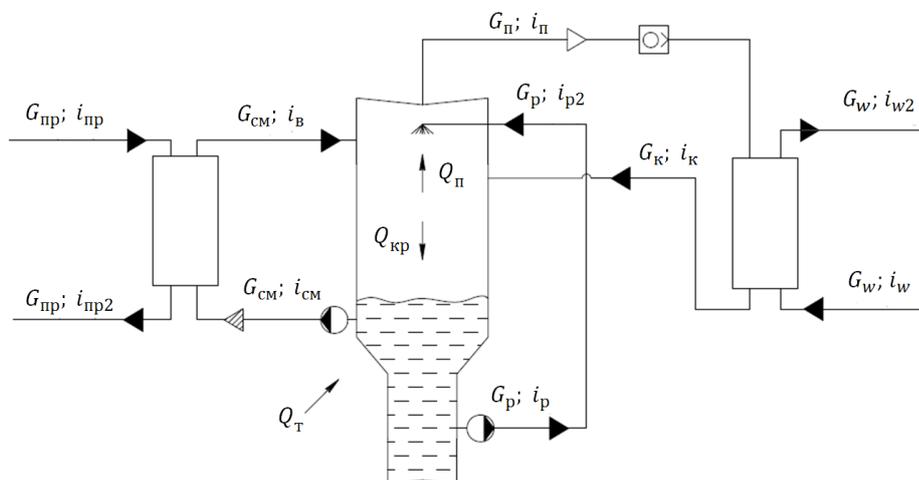


Рис. 2. Схема расчёта балансов вакуумно-выпарной установки для получения бинарного льда

Для составления систем уравнений тепловых и массовых балансов, в схеме, изображённой на рис. 2, можно выделить четыре основных группы:

- балансы в баке-кристаллизаторе;
- балансы процесса кристаллизации капель;
- балансы в теплообменнике;
- балансы в конденсаторе.

Тепловые и массовые балансы в баке-кристаллизаторе (см. рис. 3) можно представить следующей системой уравнений.

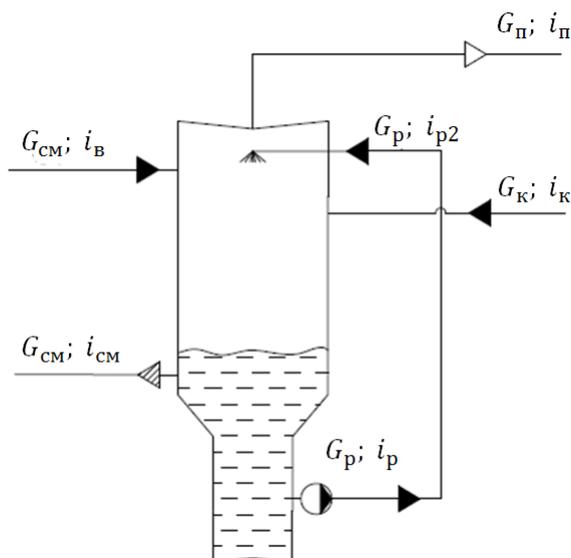


Рис. 3. Схема расчёта тепловых и массовых балансов бака-кристаллизатора

$$\begin{aligned}
 G_{см} \cdot i_{см} - G_{см} \cdot i_{в} + G_n \cdot i_n - G_k \cdot i_k + G_p \cdot i_p - G_p \cdot i_{p2} &= 0; \\
 G_p \cdot i_p - G_p \cdot i_{p2} + N_p &= 0; \\
 G_{см} &= (G_l + G_в); \\
 G_p &= (G_l + G_n).
 \end{aligned}$$

Принимаем:

$$G_n = G_k,$$

где $G_{см}$ – расход бинарной смеси, кг/с; $i_{см}$ – энтальпия на входе в теплообменник, кДж/кг; $i_в$ – энтальпия бинарной смеси на выходе из теплообменника, кДж/кг; G_n – расход водяного пара, кг/с; i_n – энтальпия водяного пара, кДж/кг; G_k – расход воды после конденсатора, кг/с; i_k – энтальпия воды после конденсатора, кДж/кг; G_p – расход воды перед рециркуляционным насосом, кг/с; i_p – энтальпия воды перед рециркуляционным насосом, кДж/кг; i_{p2} – энтальпия воды после рециркуляционного насоса, кДж/кг; G_l – расход льда в бинарной смеси, кг/с; $G_в$ – расход воды в бинарной смеси, кг/с; N_p – мощность рециркуляционного насоса, кВт.

Тепловые и массовые балансы процесса кристаллизации капель (см. рис. 4) можно представить следующей системой уравнений.

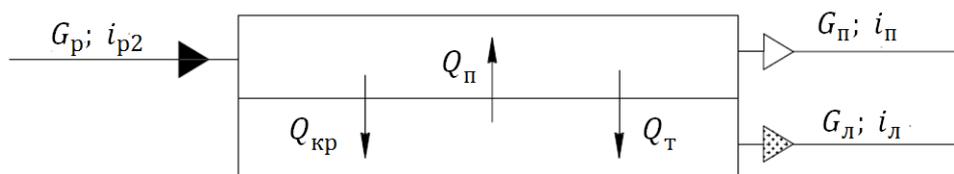


Рис. 4. Схема расчёта тепловых и массовых балансов процесса кристаллизации капель

$$\begin{aligned} G_p \cdot i_{p2} - G_l \cdot i_l - G_n \cdot i_n + Q_n - Q_{кр} - Q_m &= 0; \\ Q_{кр} &= (G_n + G_l) \cdot i_{p2} + (G_n + G_l) \cdot i_{в0} + (G_n + G_l) \cdot i_l; \\ Q_n &= G_n \cdot r_n, \end{aligned}$$

где i_l – энтальпия переохлажденного льда, кДж/кг; $i_{в0}$ – энтальпия воды при температуре фазового перехода, кДж/кг; r_n – теплота парообразования, кДж/кг; Q_n – тепловая нагрузка при испарении воды, кВт; $Q_{кр}$ – тепловая нагрузка при кристаллизации воды, кВт; Q_m – теплопритоки через стенки бака-кристаллизатора, кВт.

Тепловые и массовые балансы в теплообменном аппарате (см. рис. 5) можно представить следующей системой уравнений.

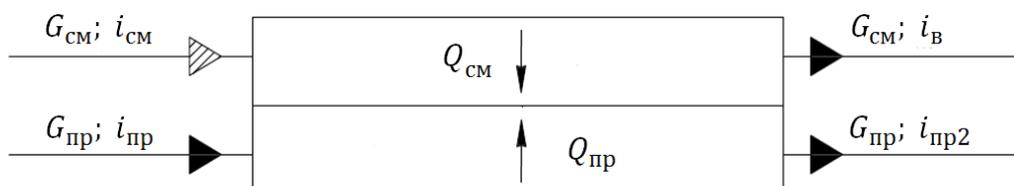


Рис. 5. Схема расчёта тепловых и массовых балансов в теплообменнике

$$\begin{aligned} G_{пр} \cdot i_{пр} - G_{пр} \cdot i_{пр2} + N_{осн} + Q_{см} &= 0; \\ G_{см} \cdot i_{см} - G_{см} \cdot i_в + N_{осн} + Q_{пр} &= 0; \\ Q_{см} &= G_l \cdot i_l - G_l \cdot i_{в0} + G_l \cdot r_n + G_{см} \cdot i_{в0} - G_{см} \cdot i_в; \\ Q_{пр} &= G_{пр} \cdot i_{пр} - G_{пр} \cdot i_{пр2}; \\ Q_{см} &= Q_{пр}, \end{aligned}$$

где $G_{пр}$ – расход охлаждаемого продукта, кг/с; $i_{пр}$ – энтальпия продукта на входе, кДж/кг; $i_{пр2}$ – энтальпия продукта на выходе, кДж/кг; $Q_{см}$ – тепловая нагрузка бинарной смеси, кВт; $Q_{пр}$ – тепловая нагрузка от продукта, кВт.

Тепловые и массовые балансы в конденсаторе (см. рис. 6) можно представить следующей системой уравнений.

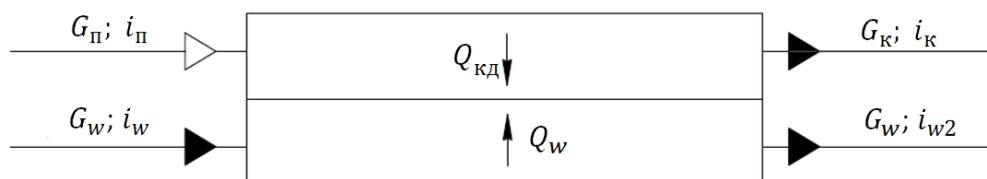


Рис. 6 Схема расчёта тепловых и массовых балансов в конденсаторе

$$\begin{aligned} G_w \cdot i_w - G_w \cdot i_{w2} + N_{вн} + Q_{кд} &= 0; \\ G_n \cdot i_n - G_k \cdot i_k + N_{вн} + Q_w &= 0; \\ Q_w &= G_w \cdot i_w - G_w \cdot i_{w2}; \\ Q_{кд} &= G_n \cdot r_n; \\ Q_w &= Q_{кд}, \end{aligned}$$

где G_w – расход охлаждающей воды в конденсаторе, кг/с; i_w – энтальпия охлаждающей воды на входе в конденсатор, кДж/кг; i_{w2} – энтальпия охлаждающей воды на выходе из конденсатора, кДж/кг; $Q_{кд}$ – тепловая нагрузка от конденсации водяного пара, кВт; Q_w – тепловая нагрузка, отводимая охлаждающей водой, кВт; $N_{вн}$ – мощность вакуумного насоса, кВт.

Расчет системы откачки водяного пара

Испарившийся в баке-кристаллизаторе пар по вакуумной магистрали длиной l и диаметром d откачивается вакуумным насосом.

Эффективная скорость откачки установки определяется из следующего уравнения [11]:

$$S_{эф} = \frac{S \cdot U}{S + U},$$

где S – номинальная скорость откачки вакуумного насоса, м³/с; U – пропускная способность вакуумной коммуникации, м³/с;

Пропускная способность для трубопровода круглого сечения при вязкостном режиме течения находится по формуле [12]:

$$U = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot (P_1 + P_2)}{128 \cdot \eta \cdot l \cdot 2},$$

где d – диаметр трубопровода, м; P_1 и P_2 – давление в начале и в конце трубопровода, Па; η – динамическая вязкость откачиваемой среды, Н·с/м²; l – длина трубопровода, м.

Удельная скорость откачки (эффективная скорость откачки на единицу площади сечения вакуумной полости), м³/(с·м²);

$$S^* = \frac{S_{эф}}{F_{нф}},$$

где $F_{нф}$ – площадь поверхности факела распыляемой воды, м²;

$$F_{нф} = 4\pi r^2 n$$

где n – количество капель в распыляемом факеле.

Количество капель в распыляемом факеле находится по формуле:

$$n_k = \frac{G_6}{m_k},$$

где m_k – расход воды в одной капле, кг/с.

Расчет процесса кристаллизации капель в вакууме

Маринюком Б.Т. был изучен теплофизический процесс замерзания капли воды в вакуумной среде [13]. При описании процессов принимались следующие допущения:

- начальная температура капли воды равна нулю;
- теплофизические свойства воды и водного льда постоянны;
- температура фронта кристаллизации равна температуре стабильного равновесия между жидкой и твердой фазами воды;
- фронт кристаллизации представляет собой сферу с переменным радиусом;
- распределение температуры в капле подчиняется закону стационарного распределения;
- удельная скорость откачки вакуумного насоса S^* постоянна;

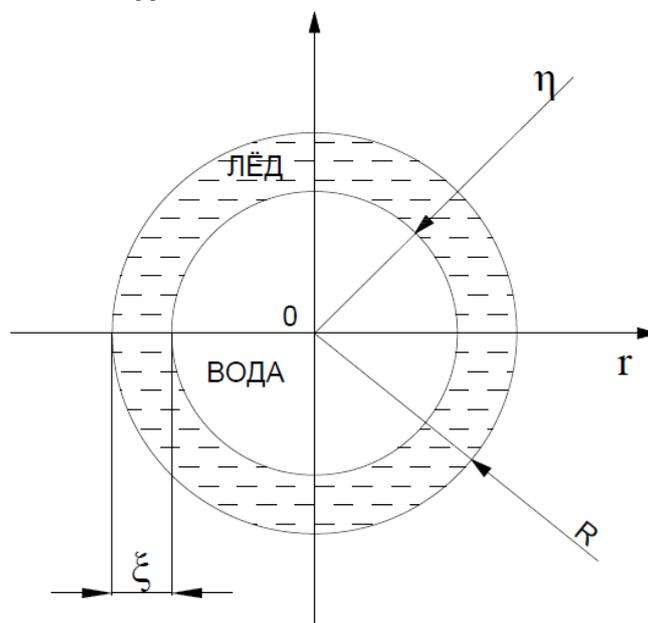


Рис. 7 Модель промерзания капли в вакууме

Фронт промерзания капли в сферической системе координат (см. рис. 7) распространяется от поверхности к центру капли по координате r . Радиус границы фазового превращения обозначен символом η ; R – радиус капли. Соответственно, толщина слоя льда в капле ξ меняется со временем τ .

Граничные условия «лёд-пар» можно записать в виде:

$$-\lambda_l \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = S^* \cdot L^* \cdot \rho''$$

где λ_l – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·К); S^* – удельная скорость откачки (эффективная скорость откачки на единицу площади сечения вакуумной полости), м³/(с·м²); L^* – теплота парообразования, Дж/кг; ρ'' – упругость насыщенных паров воды, Па.

На границе фазового превращения «лёд-вода» условия теплового взаимодействия можно записать в виде:

$$\lambda_l \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\eta} = L \cdot \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \cdot \rho_l$$

где L – теплота фазового перехода воды в лёд, Дж/кг; ρ_l – плотность льда, кг/м³.

Согласно рекомендациям Л.С. Лейбензона, распределение температуры в сферическом слое твёрдой фазы примем как стационарное:

$$T(r, \tau) = \frac{T_\phi - T_n}{R - \eta} \cdot R \cdot \left(\frac{\eta}{r} - 1 \right) + T_\phi$$

где T_ϕ – температура фазового перехода воды, К; T_n – начальная температура капли, К.

В результате преобразования перечисленных выражений Маринюком Б.Т. было получено уравнение [13], решение которого позволяет определить изменение времени замерзания τ капли радиусом R в вакууме:

$$\frac{L\rho_l}{R\tau(R-\eta)}\left(\frac{\eta^4}{3R} + \frac{R^2\eta}{6} - \frac{\eta^3}{2}\right) = \frac{S^*L^*\mu}{R_z}\left(35 - \frac{8940}{T_\phi - \frac{L\rho_l}{\lambda_l R\tau}\left(\frac{\eta^3}{3} + \frac{R^3}{6} - \frac{R\eta^2}{2}\right)}\right),$$

где μ – молекулярная масса воды, г/моль; R_z – универсальная газовая постоянная.

Расчет геометрических параметров бака-кристаллизатора

Для изготовления бака-кристаллизатора требуется определить его размеры, которые зависят от процессов, происходящих в баке. Основные размеры бака определяются его диаметром и высотой зоны кристаллизации, представляющей из себя псевдооживленный слой.

Уравнение скорости осаждения кристаллов в псевдооживленном слое [14]:

$$\omega_c = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75} \cdot \vartheta_n}{(18 + 0,59 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}) \cdot d_k},$$

где Ar – критерий Архимеда; ε – порозность; ϑ_n – кинематическая вязкость водяного пара, м²/с; d_k – диаметр капли, м.

Критерий Архимеда можно вычислить по формуле:

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_m - \rho_{cp})}{\vartheta_n^2 \cdot \rho_{cp}};$$

Уравнение скорости восходящих потоков водяного пара:

$$\omega_n = \frac{G_n}{\pi \cdot R_0^2 \cdot \rho_n},$$

где G_n – расход водяного пара, кг/с; R – радиус сечения бака-кристаллизатора в зоне кристаллизации, м²; ρ_n – плотность водяных паров, кг/м³;

Зависимость высоты зоны кристаллизации от скорости осаждения ледяных кристаллов можно описать с помощью уравнения для высоты псевдооживленного слоя, м [15]:

$$H = \int_{\tau_0}^{\tau_r} \frac{\omega_c - \omega_n}{\varepsilon} \cdot d\tau.$$

Применение расчетной модели

Расчетная модель позволяет определить основные характеристики вакуумно-выпарной установки для получения бинарного льда. Результаты расчетов на примере установки с холодопроизводительностью 12 кВт приведены в таблице 1.

Установка оснащена вакуумным насосом 2ДВН-1500 с номинальной скоростью откачки 1500 л/с, в качестве форвакуумного насоса первой ступени применяется насос R13B3-180. С учётом пропускной способности вакуумной магистрали длиной 5 метров, диаметром 250 миллиметров и средним давлением 50 Па эффективная скорость вакуумного насоса составляет 1474 л/с.

Установка производит бинарный лёд с массовой долей льда 30%, и общим расходом смеси 401 кг/ч. За один час работы установка производит 120 килограмм чистого льда, с размером ледяных частиц 1,5 мм.

Таблица 1

Расчётные характеристики установки для производства бинарного льда

Характеристики вакуумно-испарительной установки		
Холодопроизводительность	12	кВт
Производительность (по льду)	2,8	т/сут
Содержание кристаллов льда	30	%
Диаметр ледяных кристаллов	1,5	мм
Потребляемая мощность	9,5	кВт
Бак-кристаллизатор		
Толщина стали	15	мм
Толщина теплоизоляции (пенополиуретан)	50	мм
Высота	2,57	м
Диаметр (основной)	1	м
Общая площадь поверхности	8,05	м ²

Вывод

Рассмотрена модель установки для получения бинарного льда методом вакуумно-выпарной кристаллизации, позволяющая выполнять расчёты процессов, анализировать влияние технологических характеристик и определять геометрические параметры установки.

Литература

1. Цветков О.Б., Лантев Ю.А. Айс-сларри и однофазные хладоносители // Холодильная техника. 2004. N 3. С. 2–4.
2. Маринюк Б.Т., Сусликов Д.В., Ермолаев А.Е. Экологически чистые методы получения водного льда // Холодильный бизнес. 2008. №2. С. 38–40.
3. Белозеров Г.А., Медникова Н.М., Пытченко В.П., Серова Е.Н. Исследование процесса охлаждения рыбы с использованием бинарного льда // Холодильная техника. 2012. N 6. С. 37–41.
4. Paul J. District cooling with binary ice. Design and execution of district cooling systems with a liquid, pumpable ice slurry «binary ice» Technical University of Denmark.
5. Цой А.П., Круглов А.А., Тазитдинов Р.Р. Основные типы аккумуляторов холода с использованием бинарного льда // VI Международная научно-техническая конференция "Казахстан-Холод 2016" (1–2 марта 2016 г.): сборник докладов конференции. 2016. С. 144–148.
6. Wang MJ; Goldstein V (2003) Ice slurry: advanced fish chilling and preservation technology [Текст]. American Fisheries Society Symposium 38:379–386
7. Доронин Ю.П. Физика океана. – СПб.: изд. РГГМУ. 2000. – 340 с.
8. Миненков В.В., Зимин А.В., Хмельнюк М.Г. Влияние примесей на процессы получения и применения бинарного льда // Холодильная техника и технологии. 2013. № 4 (144). С. 24–30.
9. Hayashi K, Kasza KE. Ice slurry cooling research: micro scale study of ice particles characteristics, role of freezing point depressant, and influence on slurry fluidity. In: Proceedings of the ASHRAE meeting. Atlanta, Georgia; 2001.
10. Тазитдинов Р.Р., Круглов А.А. Анализ существующих методов получения бинарного льда // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2016. Т. 5. С. 67–69
11. Кузнецов В.И. Механические вакуумные насосы. – М.: Под редакцией М.И. Меньшикова, 1959. – 279 с.
12. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. Л.: Машиностроение, 1975. – 302 с.
13. Маринюк Б.Т. Расчет теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. – М.: Машиностроение, 2015. – 272 с.
14. Айништейн М.К., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанан А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Университетская книга; Лотос; Физматкнига, 2006. Кн. 1. – 912 с.:ил.
15. Айништейн М.К., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанан А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Университетская книга; Лотос; Физматкнига, 2006. Кн. 2. – 872 с.:ил.

References

1. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. Ais-slarri i odnofaznye khladonositeli // *Refrigerating engineering*. 2004. N 3. S. 2–4.
2. Marinyuk B.T., Suslikov D.V., Ermolaev A.E. Ekologicheski chistye metody polucheniya vodnogo l'da // *Kholodil'nyi biznes*. 2008. №2. S. 38–40.
3. Belozеров G.A., Mednikova N.M., Pytchenko V.P., Serova E.N. Issledovanie protsessa okhlazhdeniya ryby s ispol'zovaniem binarnogo l'da // *Refrigerating engineering*. 2012. N 6. S. 37–41.
4. Paul J. District cooling with binary ice. Design and execution of district cooling systems with a liquid, pumpable ice slurry «binary ice» Technical University of Denmark.
5. Tsoi A.P., Kruglov A.A., Tazitdinov R.R. Osnovnye tipy akkumulyatorov kholoda s ispol'zovaniem binarnogo l'da // VI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Kazakhstan-Kholod 2016" (1–2 marta 2016 g.): sbornik dokladov konferentsii. 2016. S. 144–148.
6. Wang MJ; Goldstein V (2003) Ice slurry: advanced fish chilling and preservation technology [Tekst]. American Fisheries Society Symposium 38:379–386
7. Doronin Yu.P. Fizika okeana. – SPb.: izd. RGGMU. 2000. – 340 s.
8. Minenkov V.V., Zimin A.V., Khmel'nyuk M.G. Vliyanie primesei na protsessy polucheniya i primeneniya binarnogo l'da // *Refrigerating equipment and technologies*. 2013. № 4 (144). S. 24–30.
9. Hayashi K, Kasza KE. Ice slurry cooling research: micro scale study of ice particles characteristics, role of freezing point depressant, and influence on slurry fluidity. In: Proceedings of the ASHRAE meeting. Atlanta, Georgia; 2001.
10. Tazitdinov R.R., Kruglov A.A. Analiz sushchestvuyushchikh metodov polucheniya binarnogo l'da // *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO*. 2016. T. 5. S. 67–69
11. Kuznetsov V.I. Mekhanicheskie vakuurnye nasosy. – M.: Pod redaktsiei M.I. Men'shikova, 1959. – 279 s.
12. Rozanov L.N. Vakuurnye mashiny i ustanovki. L.: Mashinostroenie, 1975. – 302 s.
13. Marinyuk B.T. Raschet teploobmena v apparatakh i sistemakh nizektemperaturnoi tekhniki. – M.: Mashinostroenie, 2015. – 272 s.
14. Ainshtein M.K., Zakharov M.K., Nosov G.A., Zakharenko V.V., Zinovkina T.V., Taran A.L., Kostanan A.E. Obshchii kurs protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii. – M.: Universitetskaya kniga; Lotos; Fizmatkniga, 2006. Kn. 1. – 912 s.:il.
15. Ainshtein M.K., Zakharov M.K., Nosov G.A., Zakharenko V.V., Zinovkina T.V., Taran A.L., Kostanan A.E. Obshchii kurs protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii. – M.: Universitetskaya kniga; Lotos; Fizmatkniga, 2006. Kn. 2. – 872 s.:il.

Статья поступила в редакцию 29.09.2016 г.