

УДК 621.56

## Применение расчетной модели установки для получения «бинарного льда». Анализ результатов

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

Аспирант **Тазитдинов Р.Р.** t.r\_92@mail.ru

Университет ИТМО

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

*Составлен алгоритм расчета вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда методом распыления воды. Алгоритм расчета включает 5 блоков: исходные данные; тепловые и массовые балансы; система откачки водяного пара и описание процесса распыления; процесс кристаллизации капель; определение геометрических параметров бака-кристаллизатора. Выполнен ряд расчётов на основании разработанного алгоритма, результаты представлены в форме графиков. Проанализированы следующие параметры: влияние диаметра капель на время полного их замораживания; влияние диаметра капли на высоту зоны кристаллизации и радиус бака-кристаллизатора; влияние порозности псевдооживленного слоя на скорость осаждения капель при различном диаметре; влияние массовой доли льда в бинарной смеси на скорость откачки водяного пара при различных тепловых нагрузках.*

**Ключевые слова:** бинарный лёд, вакуумно-испарительная кристаллизация, кристаллизация капель, алгоритм расчета, бак-кристаллизатор, псевдооживленный слой.

DOI:10.17586/2310-1148-2017-10-1-1-7

---

## Application of analysis model of the plant for producing «Ice slurry». Analysis of the results

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

*An algorithm of calculation of vacuum-evaporating installations for the production of iceslurry by spraying water. The calculation algorithm consists of 5 blocks: source data, heat and material balance, water vapor vacuum system and the description of the atomization process; process of drops crystallization; determination of the geometric parameters of the tank-crystallizer. The calculations are made according to the developed algorithm; the results are presented in form of graphs. Analyze the following parameters: influence of drop diameter on time complete freeze; influence of drop diameter on the height of the crystallization zone and the radius of the tank- crystallizer; influence of the fluidized bed porosity at a deposition rate of droplets in different diameter; influence of the mass fraction of ice in ice slurry on pumping speed of water vapor at different thermal capacity.*

**Keywords:** ice slurry, vacuum-evaporation crystallization, drops crystallization, computation algorithm, tank-crystallizer, fluidized bed.

---

### Введение

Смесь со льдом, называемая бинарным льдом, двухфазным хладоносителем или жидким льдом состоит из мелких кристаллов льда и основной жидкости, которая может быть в виде чистой воды или раствора с добавками. Кристаллы льда позволяют аккумулировать холодильную энергию и поддерживать постоянную температуру хладоносителя (0 °С или в зависимости от добавок в водном растворе) [1, 2]. Бинарный лёд может легко перекачиваться по трубам, а также теплообменным аппаратам без агломерации и засорения, если массовая доля льда находится в приемлемом диапазоне (до 30 %) [3], размер, форма и шероховатость кристаллов льда хорошо контролируется [4]. Благодаря своим эксплуатационным и энергетическим характеристикам, бинарный лед применяется в таких областях как кондиционирование воздуха, пищевая промышленность, медицина и пр.[5].

Из-за экологических требований, предъявляемых к холодильной технике, практически исключается применение хладонов СFC, HCFC и HFC. Заметен рост публикаций по холодильным машинам, работающим на воде. Коэффициент эффективности вакуумно-испарительных холодильных машин на воде выше, чем

у традиционных парокомпрессионных фреоновых машин [6]. В связи с этим исследование процессов получения бинарного льда методом вакуумно-испарительной кристаллизации является актуальной задачей.

При производстве бинарного льда самым важным и энергозатратным процессом является генерация кристаллов льда. Это объясняется тем, что размер, форма и шероховатость ледяных кристаллов определяют теплофизические свойства бинарного льда в целом. Поэтому целесообразно рассмотреть генерацию ледяных кристаллов, как одну из важнейших проблем производства бинарного льда.

### Исследования в области капельной кристаллизации

Производство ледяных кристаллов методом капельной кристаллизации является одним из высокопроизводительных способов. Высокая производительность данного способа достигается за счёт увеличения поверхности контакта воды при её распылении.

Экспериментальные результаты, полученные Сосновским А.В. [7] показали, что величина интенсивности льдообразования при распылении, зависит от геометрии факела, температуры и влажности воздуха.

В ходе исследования замерзания капель пресной воды диаметром 0,5 – 1 мм, Гликиным Н.В. и Громовым Т.Н. было замечено, что при температуре минус 5°C кристаллизация начинается в одной точке на поверхности капли, от которой фронт кристаллизации распространился внутрь капли.

Н.Т. Shina, Y.P. Leea, J. Jung была сконструирована экспериментальная установка по получению бинарного льда путем непрерывного диспергирования воды в вакуумной среде [8]. Проведена оценка влияния глубины вакуума на распределение температуры в капле, согласно модели (см. формулу 1):

$$\delta T_k = - \frac{12}{\rho_k c_{pk} \cdot D_k^2} \left[ \frac{L \cdot D_v \cdot M}{R} \left( \frac{P_a}{T_a} - \frac{P_s}{T_s} \right) - k_g (T_\infty - T_a) \right] \cdot \delta \tau, \quad (1)$$

где  $\delta T_k$  – изменение температуры в капле, К;  $\rho_k$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{pk}$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $D_k$  – диаметр капли, м;  $L$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $D_v$  – коэффициент диффузии пара, м<sup>2</sup>/с;  $M$  – молекулярная масса, кг/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $k_g$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $\delta \tau$  – время пребывания капли в баке-кристаллизаторе, с;  $P_a$  – давление на границе лёд – вода, кПа;  $P_\infty$  – давление на границе лёд – пар, кПа.

Установлено, что при разбрызгивании чистой воды в вакууме при температуре ниже тройной точки наблюдалось обмерзание форсунки. В связи с этим был предложен 7% раствор этиленгликоля в качестве распыляемой среды. Авторам удалось получить частицы льда сферической формы с диаметром менее 300 мкм и подтвердить верность теоретических исследований о возможности получения бинарного льда распылением в вакууме. Также они выяснили, что на производительность системы в основном влияет степень распыления, а положение сопел влияет незначительно.

Isao Satoh, Yu Hashimoto в своей работе [9] исследовали явление охлаждения и замерзания капли воды в вакуумной среде. Был построен график, описывающий изменение температуры капли воды в процессе испарительного замораживания при давлении 70 Па (рисунок 1)

Сравнивая хронологию изменения температуры капли воды и расчётную формулу (см. формулу 2), обнаружили, что скорость охлаждения воды перед замораживанием хорошо соотносится с теоретическим решением задачи нестационарной теплопроводности внутри сферы. Это означает, что охлаждение, то есть испарение воды с поверхности капель, взвешенных в вакууме, происходит в основном за счёт теплопроводности воды.

$$t_c(\tau) = (t_s - t_0) \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left( - \frac{an^2 \pi^2 \tau}{r_0^2} \right) \right\} + t_0, \quad (2)$$

где  $t_c$  – изменение температуры в центре капли от времени, °С;  $t_s$  – температура поверхности капли воды, °С;  $t_0$  – начальная температура капли воды, °С;  $a$  – температуропроводность воды, м<sup>2</sup>/с;  $r_0$  – первоначальный радиус капли, м.

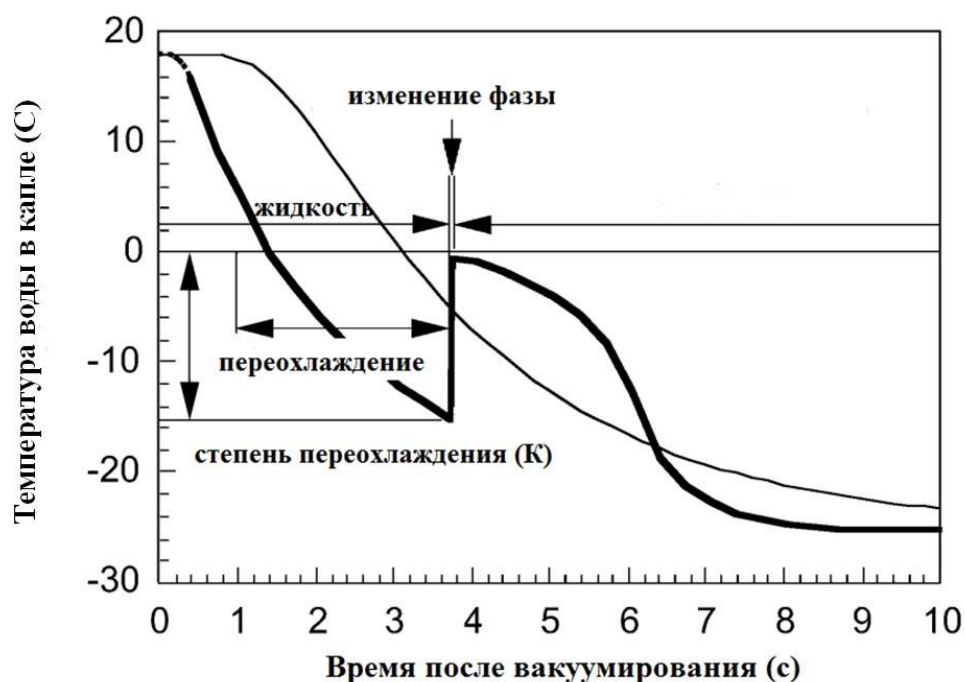


Рис. 1. Изменение температуры капли воды в процессе испарительного замораживания при давлении 70 Па

В результате исследований замораживания капли воды в вакуумной среде, Маринюком Б.Т. было получено уравнение 3, решение которого позволяет определить изменение времени замораживания  $\tau$  капли радиусом  $R$  в вакууме [10]:

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

где  $\mu$  – молекулярная масса воды, г/моль;  $R_c$  – универсальная газовая постоянная;  $\lambda_l$  – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·К);  $S^*$  – удельная скорость откачки (эффективная скорость откачки на единицу площади сечения вакуумной полости), м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>);  $L^*$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $\rho''$  – упругость насыщенных паров воды, Па;  $L$  – теплота фазового перехода воды в лёд, Дж/кг;  $\rho_l$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $T_\phi$  – температура фазового перехода воды, К;  $T_n$  – начальная температура капли, К.

Приведенные выше результаты исследований, подтверждают возможность получения бинарного льда методом распыления воды в вакууме.

### Алгоритм расчета вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда

По расчетной модели установки для получения бинарного льда методом вакуумно-испарительной кристаллизации, приведенной в статье [11], был составлен и реализован алгоритм с помощью программы MS Excel®. В алгоритме описан порядок действий при расчёте вакуумно-испарительной установки.

#### Исходные данные.

Для расчёта вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда задаёмся тепловой нагрузкой  $Q$ , которую необходимо отвести, процентным содержанием льда в бинарной смеси (до 40 %), температурой возврата бинарной смеси после теплообменника  $t_e$  и температурой возврата воды после конденсатора  $t_k$ .

Для расчёта системы откачки водяного пара задаёмся длиной  $l_{cm}$  и диаметром  $d_{cm}$  вакуумной магистрали – трубы, соединяющей бак-кристаллизатор и вакуумный насос; давлением в баке-кристаллизаторе  $p_1$  и давлением перед вакуумным насосом  $p_2$ .

Для расчёта времени замораживания капли задаёмся её радиусом  $r_k$ .

Для расчёта геометрических параметров бака-кристаллизатора задаём порозность псевдооживленного слоя (от 0,7 до 0,9).

**Тепловые и массовые балансы.**

Составляем тепловые и массовые балансы для элементов установки. Для решения системы уравнений зададимся начальными приближениями: наружного теплопритока для бака-кристаллизатора  $Q_{\bar{o}}$ , мощности циркуляционного насоса  $N_{осн}$  и мощности рециркуляционного насоса  $N_p$ . Из полученной системы уравнений определяем расход бинарной смеси  $G_{см}$ , расход льда  $G_l$  и расход водяного пара  $G_n$ .

**Система откачки водяного пара и описание процесса распыления.**

Подбираем основной вакуумный насос (по  $G_n$ ) и определяем его эффективную скорость откачки  $S_{эф}$ , исходя из пропускной способности вакуумной магистрали  $U$  и номинальной скорости откачки  $S_n$ . Необходимо, чтобы эффективный массовый расход водяного пара  $G_{эф,n}$  был больше расхода водяного пара  $G_n$ , в противном случае, подбираем вакуумный насос с большей номинальной производительностью или изменяем геометрические параметры вакуумной магистрали (длину и диаметр трубы), до тех пор, пока не будет выполнено условие  $G_{эф,n} \geq G_n$ . По радиусу капли  $r_k$  и расходу воды, распыляемой в форсунках  $G_{ф}$ , определяем: количество капель в факеле  $n_k$ ; расход воды для одной капли  $m_k$ ; площадь поверхности факела  $F_{нф}$ ; удельную скорость откачки  $S^*$ .

**Расчёт процесса кристаллизации капель.**

По формуле 3 определяем время  $\tau$  замерзания капли. Из условия полного промерзания капли  $\eta \approx r_k$ .

**Определение геометрических параметров бака-кристаллизатора.**

Определяем скорость осаждения ледяных кристаллов в псевдооживленном слое  $\omega_c$  и скорость откачиваемого водяного пара  $\omega_n$ , которая зависит от радиуса бака-кристаллизатора  $R_{\bar{o}}$ . Подбираем радиус бака-кристаллизатора по условию ( $\omega_n < \omega_c$ ). Необходимая высота зоны кристаллизации бака  $H_{кр}$  определяется с учётом времени замерзания капли.

Исходя из полученных геометрических параметров бака-кристаллизатора и массовых расходов, определяем действительные значения  $Q_{\bar{o}}$ ,  $N_{осн}$  и  $N_p$  и уточняем расчёт.

**Анализ результатов расчётов процессов в баке-кристаллизаторе**

Для анализа влияния параметров на процессы при получении бинарного льда в установке, выполнен ряд расчётов на основании разработанного алгоритма, результаты представлены в форме графиков.

При постоянной удельной скорости откачки водяного пара  $S^* = 11,028 \text{ (м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))$  и массовом расходе распыляемой воды  $G_{ф} = 120 \text{ (кг/ч)}$  влияние диаметра капель на время полного их замораживания представлено на рисунке 2.

Из рисунка следует, что при увеличении диаметра капли на 20 % (от 1 мм до 1,2 мм), время её замерзания увеличивается на 30 %. При увеличении диаметра капли на 50 % (от 1 мм до 1,5 мм) время её замерзания увеличивается в 2 раза (на 125 %).

Влияние диаметра капли на габариты бака-кристаллизатора (высоту зоны кристаллизации и радиус бака-кристаллизатора), с порозностью псевдооживленного слоя  $= 0,8$  приведены на рис. 3.

Габариты бака-кристаллизатора играют важную роль при проектировании вакуумно-выпарной установки. Они зависят от диаметра капель (в большей степени), порозности псевдооживленного слоя, давления в баке-кристаллизаторе (в меньшей степени), и скорости откачиваемого водяного пара. Изменяя эти параметры, можно определить наиболее оптимальные габариты бака-кристаллизатора, причём значение высоты зоны кристаллизации должно быть сопоставимо с её диаметром.

При диаметре капли 1,8 мм радиус бака-кристаллизатора составляет 0,4 метра. При увеличении радиуса бака-кристаллизатора его размеры увеличиваются не пропорционально за счёт роста высоты зоны кристаллизации, что ведёт к увеличению затрат, а при использовании капель диаметром 2 мм и выше, изготовление бака-кристаллизатора экономически не обосновано.

Наилучшее соотношение размеров бака-кристаллизатора достигается при диаметре капель 1,5 мм. При радиусе бака 0,4 метра работа установки невозможна, так как скорость водяного пара превышает скорость осаждения капель, и они будут уноситься в вакуумную магистраль.

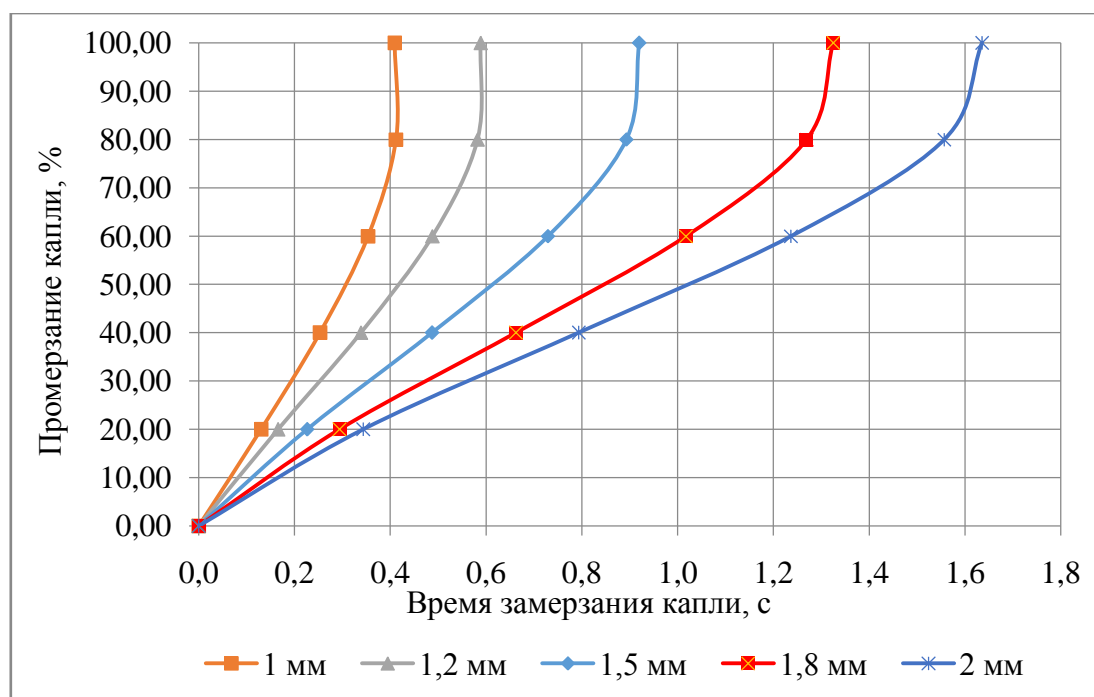


Рис. 2. Влияние диаметра капли на время промерзания

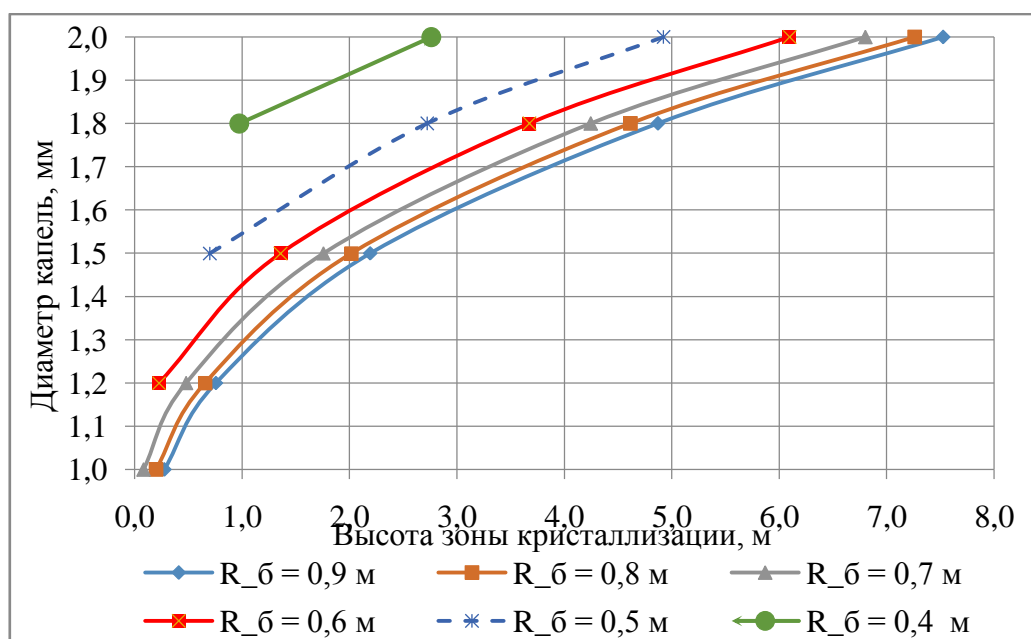


Рис. 3. Влияние диаметра капли на габариты бака-кристаллизатора (при  $\varepsilon = 0,8$ ,  $S^* = 11,028 \text{ (м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}))$ ,  $G_{\phi} = 120 \text{ (кг/ч)}$ ):  
 $R_{\text{б}}$  – радиус бака-кристаллизатора

При диаметре капли 1 мм и 1,2 мм из-за низкой скорости их осаждения и высокой скорости заморозания требуется существенное увеличение радиуса бака-кристаллизатора для обеспечения процесса. Это приводит к увеличению потребления электроэнергии, затрат на изготовление и значительному росту массо-габаритных показателей установки (для установки с параметрами:  $\varepsilon = 0,8$ ;  $S^* = 11,028 \text{ (м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}))$ ;  $G_{\phi} = 120 \text{ (кг/ч)}$ ).

Порозность псевдооживленного слоя является важной характеристикой для определения габаритов бака-кристаллизатора. Рекомендуемый диапазон порозности от 0,7 до 0,95. Из рис. 4 видно, что скорость осаждения капель увеличивается с увеличением их диаметра и порозности псевдооживленного слоя. Увеличение порозности на 7 % (в диапазоне от 0,7 до 0,95) приводит к увеличению скорости осаждения на 25 %.

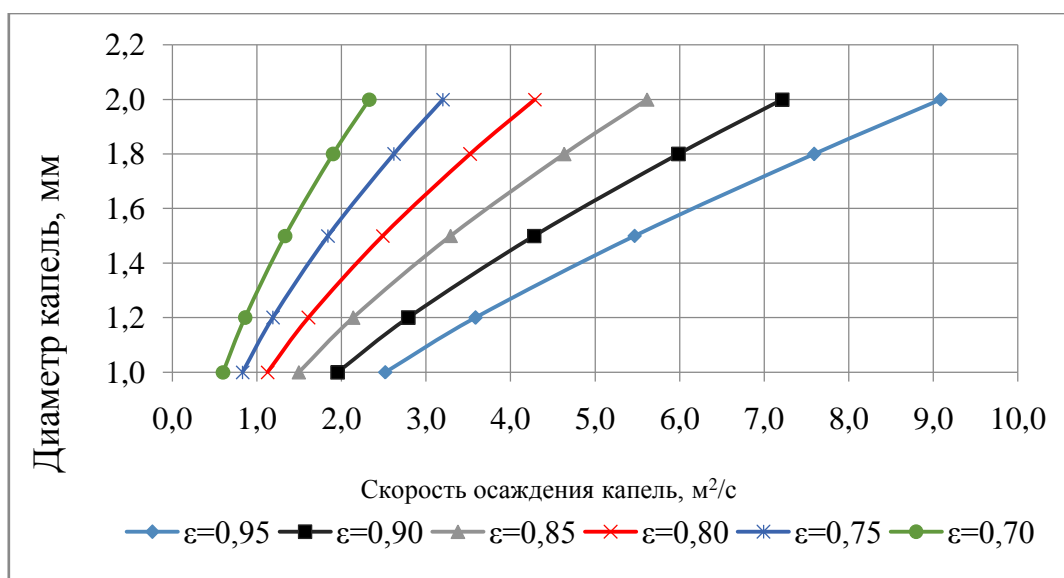


Рис. 4. Влияние порозности псевдооживленного слоя на скорость осаждения капель при различном их диаметре ( $S^* = 11,028 \text{ (м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}))$ ,  $G_{\phi} = 120 \text{ (кг/ч)}$ );  $\varepsilon$  – порозность

С увеличением скорости осаждения капель увеличивается высота зоны кристаллизации (при постоянной скорости откачки и радиусе бака-кристаллизатора). Основным параметром, влияющим на энергетическую эффективность вакуумно-выпарной установки (потребление электроэнергии), является скорость откачки водяного пара. Скорость откачки водяного пара при производстве бинарного льда зависит от массовой доли льда в бинарной смеси и холодопроизводительности установки (количество теплоты, которую можно отвести от охлаждаемого объекта).

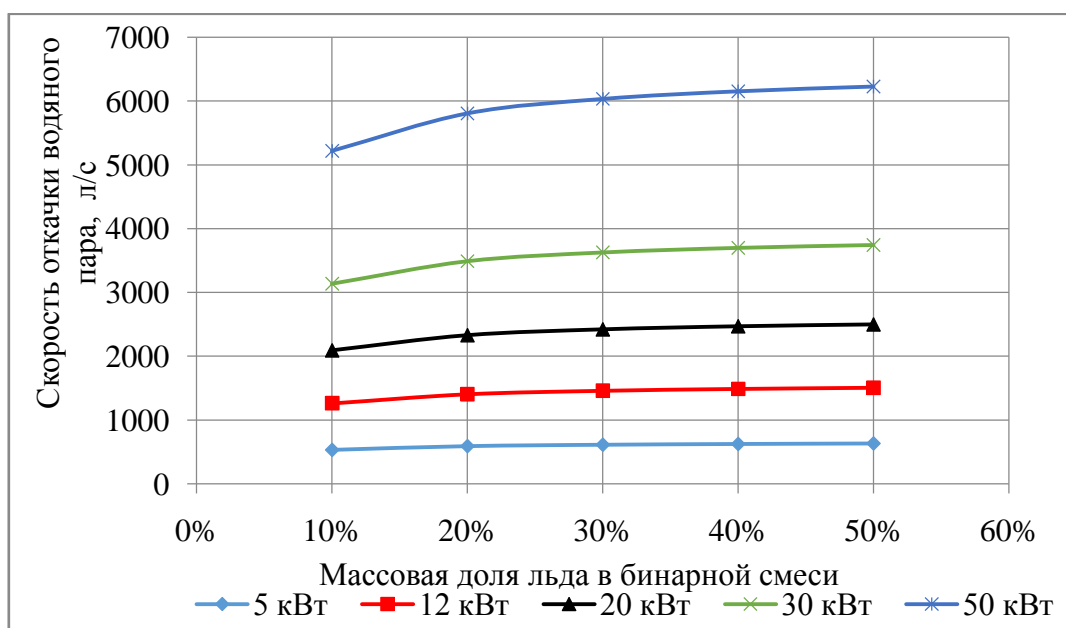


Рис. 5. Влияние массовой доли льда в бинарной смеси на скорость откачки водяного пара при различных тепловых нагрузках

Из рис. 5 видно, что скорость откачки водяного пара возрастает при увеличении тепловой нагрузки и массовой доли льда в бинарной смеси (при температуре возврата бинарной смеси и сконденсировавшегося водяного пара в бак-кристаллизатор не выше 2 °С). Можно отметить, что увеличение массовой доли льда (от 10 % до 50 %), при малых тепловых нагрузках (до 5 кВт) оказывает незначительное влияние на скорость откачки водяного пара. При нагрузках от 12 кВт до 50 кВт виден заметный рост требуемой скорости откачки водяного пара при увеличении массовой доли льда с 10 % до 20 %. Для сравнения, при увеличении массовой доли льда: с 10 % до 20 % рост составляет 10 %; с 20 % до 30 % скорость откачки возрастает на 4 %; с 30 %

до 40 % скорость откачки возрастает на 2 %; с 40 % до 50 % увеличение меньше 2 % (при всех значениях тепловых нагрузок, кроме 5кВт).

Из этого можно сделать вывод, что с энергетической точки зрения более выгодно производить бинарную смесь с массовой долей льда более 20 %.

### Литература

1. Z. Ure, M. Mashrae, Slurry ice based cooling systems, Proceedings of IIR 20th international conference, vol. 5, 1999 [Paper no. 3].
2. A. Saito, Recent advances in research on cold thermal energy storage, Int J Refrigeration 25 (2002) 177–189.
3. Ayel, V., Lottin, O., Peerhossaini, H., 2003. Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries: a review of the state of the art. Int. J. Refrigeration 26, 95–107.
4. 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.
5. Зимин А.В. Особенности проектирования генераторов бинарного льда шнекового типа // Холодильная техника и технологии. 2015. № 2 (144). С. 10–12.
6. Маринюк Б.Т., Крысанов К.С., Ермолаев А.Е. Вакуумные холодильные установки и холодоаккумуляторы водного льда [Текст] // МГУИЭ. М: – 2006. – (Тр. каф. Холодильная и криогенная техника).
7. Сосновский А.В. Льдообразование в факеле искусственного дождя как метод использования водных и климатических ресурсов / Автореф. канд. дисс, М., 1983, 21с.
8. H.T. Shina, Y.P. Leea, J. Jurng. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber // Applied Thermal Engineering 20 (2000) 439 p.
9. Isao Satoh, Yu Hashimoto «Freezing of a water droplet due to evaporation heat transfer dominating the evaporation-freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics» / International Journal of Refrigeration. 25 (2002) 226 – 234.
10. Маринюк Б.Т. Расчет теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. М.: Машиностроение, 2015. –272 с.
11. Круглов А.А., Тазитдинов Р.Р. Описание расчетной модели установки для получения «бинарного льда» методом вакуумно-выпарной кристаллизации // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 3 (23). С. 26–35

### References

1. Z. Ure, M. Mashrae, Slurry ice based cooling systems, Proceedings of IIR 20th international conference, vol. 5, 1999 [Paper no. 3].
2. A. Saito, Recent advances in research on cold thermal energy storage, Int J Refrigeration 25 (2002) 177–189.
3. Ayel, V., Lottin, O., Peerhossaini, H., 2003. Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries: a review of the state of the art. Int. J. Refrigeration 26, 95–107.
4. 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.
5. Zimin A.V. Design features of the binary ice generator screw-type // *Refrigeration equipment and technology*. 2015. №2 (144). S. 10–12.
6. Marinyuk B.T., Krysanov K.S., Ermolaev A.E. Vacuum refrigeration systems and water ice holodoakkumulyatory [Text] // MSUEE. M: – 2006 – (Tr Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering).
7. Sosnovsky A.V..Ice formation in the flame artificial rain as a method of use of water resources and climate / Author. cand. diss, M., 1983, 21с.
8. H.T. Shina, Y.P. Leea, J. Jurng. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber // Applied Thermal Engineering 20 (2000) 439 p.
9. Isao Satoh, Yu Hashimoto «Freezing of a water droplet due to evaporation heat transfer dominating the evaporation-freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics» / International Journal of Refrigeration. 25 (2002) 226 – 234.
10. Marinyuk B.T. Calculation of heat transfer in devices and systems of the low-temperature technology. –M.: Engineering, 2015. –272 p.
11. Kruglov A.A., Tazitdinov R.R. Description of the computational model installation for "ice slurry" by vacuum evaporation crystallization // *Scientific Journal ITMO. Series: Refrigeration and Air Conditioning*. 2016. № 3 (23). P. 26–35.