

УДК 621.56

## Методика расчета параметров вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда методом капельной кристаллизации

Канд. техн. наук А. А. КРУГЛОВ<sup>1</sup>, Р. Р. ТАЗИТДИНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>aakruglov@itmo.ru, <sup>2</sup>rtazitdinov@itmo.ru

Университет ИТМО

*Описан принцип работы вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда методом капельной кристаллизации и представлена методика ее расчета. Рассмотрены уравнения для оценки дисперсности капель в факеле распыла и площади поверхности распыления. Представлена модель льдообразования воды в факеле распыла при давлении ниже тройной точки, которая учитывает тепломассоперенос в процессе испарения капли. Уравнение массопереноса включает коэффициент диффузии водяного пара. Рассмотрена математическая модель расчета времени замерзания капли на основе законов Фика и сохранения энергии. Предложенная расчетная модель позволит анализировать влияние технологических характеристик и оптимизировать работу вакуумно-испарительной установки, учитывать процессы кристаллизации капель в факеле распыла при давлении ниже тройной точки воды.*

**Ключевые слова:** бинарный лед, вакуумно-испарительная установка, замерзание капли, методика расчета.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 15.05.2020, принята к печати 09.07.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-39-43

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Круглов А. А., Тазитдинов Р. Р. Методика расчета параметров вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда методом капельной кристаллизации // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 39-43.

## A method for the calculation of parameters for vacuum evaporation unit to make binary ice by means of drop crystallization

Ph. D. A. A. KRUGLOV<sup>1</sup>, R. R. TAZITDINOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>aakruglov@itmo.ru, <sup>2</sup>rtazitdinov@itmo.ru

ITMO University

*The article describes an operation principle for a vacuum-evaporation unit for binary ice making by means of drop crystallization. A method of calculation for the unit is presented. The equations for drop dispersion evaluation in spray cone and for spray surface area are considered. A model of water ice formation in spray cone under the pressure below triple point, which takes into account heat and mass transfer during drop evaporation, is presented. Mass transfer equation includes the diffusion coefficient for vapor. A mathematical model for the calculation drop freezing time based on the Frick and energy conservation laws is considered. The calculation model proposed allows analyzing the influence of technological parameters and optimizing the operation of vacuum-evaporation unit as well as taking into account the process of drop crystallization in spray cone under the pressure below triple point of water.*

**Keywords:** binary ice, vacuum-evaporation unit, drop freezing, method of calculation.

### Article info:

Received 15/05/2020, accepted 09/07/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-39-43

Article in Russian

### For citation:

Kruglov A. A., Tazitdinov R. R. A method for the calculation of parameters for vacuum evaporation unit to make binary ice by means of drop crystallization. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 3. p. 39-43.

## Введение

Холодильная индустрия является одной из отраслей промышленности, которые оказывают значительный вклад в парниковый эффект Земли. Прежде всего, это вызвано применением синтетических хладагентов с высоким коэффициентом глобального потепления по сравнению с диоксидом углерода [1]. Это поспособствовало принятию Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу, которая направлена на поэтапное сокращение использования гидрофторуглеродов для многих стран, включая Россию [2, 3]. На сегодняшний день важной задачей холодильной техники является поиск эффективных решений с использованием природных хладагентов. Одним из таких решений является широкое применение качественного двухфазного хладоносителя, называемого «бинарным льдом» [4, 5], и разработка вакуумно-испарительной установки для его получения.

Бинарный лед — это смесь воды и ледяных частиц, диаметром менее 0,5 мм. Бинарная смесь с долей льда до 30% ведет себя как ньютоновская жидкость и может перекачиваться при помощи обычных центробежных насосов. Благодаря скрытой теплоте плавления ледяных частиц, бинарная смесь обладает высокой охлаждающей способностью, по сравнению с однофазными хладоносителями, что позволяет снизить капитальные затраты на оборудование [6]. Из-за способности бинарного льда поддерживать постоянную температуру близкую к 0 °С, его эффективно применять в системах аккумуляции холода на объектах с пиковыми нагрузками. Данные особенности бинарного льда и его экологичность, способствовали тому, что количество холодильных систем с использованием бинарного льда за последние двадцать лет в Японии, Европе и США значительно выросло [7].

При производстве бинарной смеси, сложным и энергозатратным является процесс получения кристаллов льда. Сложность заключается в генерации ледяных кристаллов сферической формы и однородного размера, так как эти параметры оказывают значительное влияние на свойства бинарного льда и процесс слипания кристаллов при аккумуляции холода [8, 9, 10]. Востребованность получения бинарной смеси с заданными параметрами с каждым годом растет. Подобные установки перспективно применять, например, в молочной и пивоваренной промышленности, для отведения пиковых нагрузок в процессе интенсивного охлаждения продукта.

Капельная кристаллизация воды при давлении ниже 611,65 Па, позволяет контролировать размер, сферическую форму и количество получаемых кристаллов льда. Высокая эффективность данного метода достигается за счет увеличения поверхности контакта воды при ее распылении.

Целью исследования является повышение энергоэффективности вакуумно-испарительной установки и качества получаемого методом капельной кристаллизации бинарного льда. На сегодняшний день отсутствует комплексная методика расчета, которая позволяет оценивать эффективность вакуумно-испарительной установки для получения бинарной смеси на стадии ее проектирования и в процессе эксплуатации с учетом влияния таких технологических параметров, как диаметр капель, давление в баке-кристаллизаторе, времени замерзания капли и других характеристик [13].

## Методика расчета

На рис. 1 изображена схема вакуумно-испарительной установки, включающая схему расчета балансов.

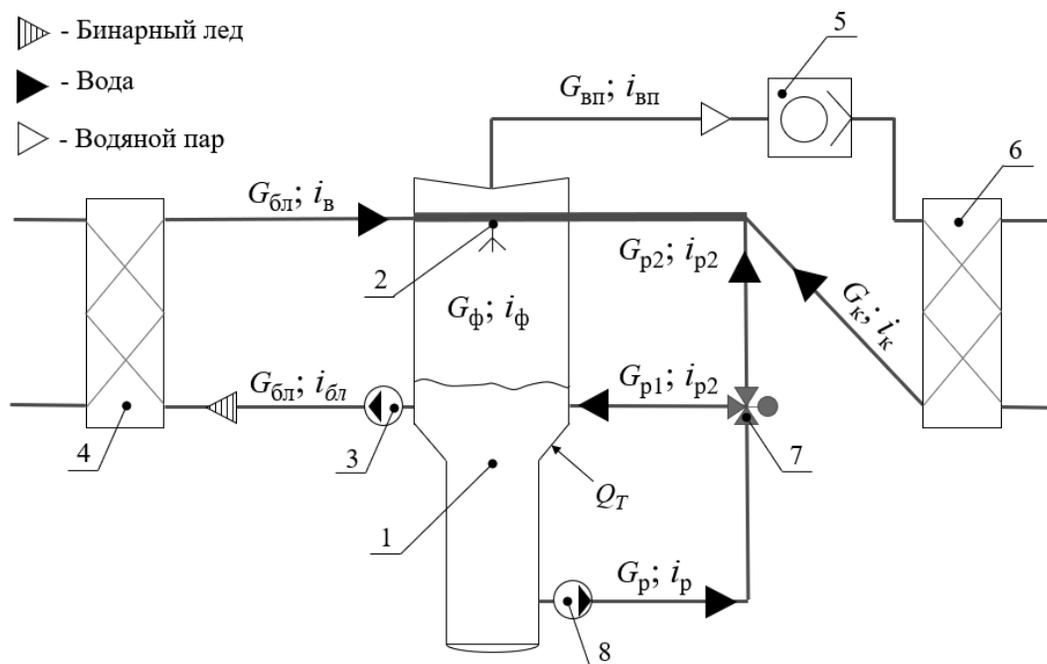


Рис. 1. Расчетная схема вакуумно-испарительной установки: 1 — бак-кристаллизатор; 2 — блок форсунок; 3 — циркуляционный насос; 4 — потребитель холода; 5 — вакуумный насос; 6 — конденсатор; 7 — трехходовой клапан; 8 — рециркуляционный насос

Fig. 1. Design model of the vacuum-evaporation unit: 1 — crystallizer tank; 2 — nozzle group; 3 — circulation pump; 4 — user of refrigeration; 5 — vacuum pump; 6 — compensator; 7 — three way valve; 8 — recirculating pump

Процесс получения бинарной смеси осуществляется в следующей последовательности. В баке-кристаллизаторе создается рабочее давление и поддерживается на уровне ниже тройной точки воды 611,65 Па (абс.) с помощью вакуумного насоса. Рециркуляционный насос подает воду из нижней части бака-кристаллизатора в форсунки. Система рециркуляции выполняет две основные функции: позволяет регулировать требуемый расход воды через форсунки и перемешивает бинарную смесь, чтобы предотвратить агломерацию ледяных частиц. При распылении жидкости через форсунку увеличивается поверхность испарения, вследствие чего интенсифицируются теплообменные процессы. После частичной кристаллизации падающих капель, в нижней части зоны кристаллизации бака-кристаллизатора накапливается бинарная смесь, которая при помощи циркуляционного насоса подается к потребителю холода. После отвода теплоты от охлаждаемого продукта поток возвращается для восполнения растаявших частиц льда и подается к форсункам. Образующийся в баке-кристаллизаторе водяной пар откачивается вакуумным насосом, после конденсации возвращается в бак-кристаллизатор.

В методике расчета вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда можно выделить две части: расчет основных эксплуатационных, технологических параметров и геометрических характеристик установки и расчет процесса кристаллизации капель в факеле распыла при давлении ниже тройной точки воды.

### 1. Расчет технологических параметров установки

Разработанная математическая модель позволяет анализировать теплообменные процессы в вакуумно-испарительной установке при проектировании, а также обеспечивать регулирование параметров в ходе ее эксплуатации.

Баланс бака-кристаллизатора, без учета теплопритоков от насосов:

$$G_{\text{бл}}i_{\text{в}} - G_{\text{бл}}i_{\text{бл}} - G_{\text{вп}}i_{\text{вп}} + G_{\text{к}}i_{\text{к}} - G_{\text{р}}i_{\text{р}} + G_{\text{р1}}i_{\text{р2}} + G_{\text{р2}}i_{\text{р2}} + Q_{\text{т}} = 0, \quad (1)$$

где  $G_{\text{бл}}$  — расход бинарного льда;  $i_{\text{в}}$  — энтальпия воды после потребителя;  $i_{\text{бл}}$  — энтальпия бинарного льда;  $G_{\text{вп}}$  — расход водяного пара;  $i_{\text{вп}}$  — энтальпия водяного пара;  $G_{\text{к}}$  — расход возвращаемого конденсата;  $i_{\text{к}}$  — энтальпия конденсата;  $G_{\text{р}}$  — расход через рециркуляционный насос;  $i_{\text{р}}$  — энтальпия перед рециркуляционным насосом;  $G_{\text{р1}}$  — расход, обеспечивающий перемешивание смеси;  $G_{\text{р2}}$  — расход, обеспечивающий работу форсунок;  $i_{\text{р2}}$  — энтальпия воды после рециркуляционного насоса;  $Q_{\text{т}}$  — теплопритоки через стенки бака-кристаллизатора.

Балансы теплообменного оборудования:

$$\begin{aligned} G_{\text{бл}}i_{\text{бл}} + N_{\text{цпр}} + Q_{\text{пр}} - G_{\text{бл}}i_{\text{в}} &= 0; \\ G_{\text{вп}}i_{\text{вп}} + N_{\text{вн}} - Q_{\text{к}} - G_{\text{к}}i_{\text{к}} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_{\text{цпр}}$  — мощность циркуляционного насоса;  $Q_{\text{пр}}$  — тепловая нагрузка, отводимая в теплообменнике-потребителе;  $N_{\text{вн}}$  — мощность вакуумного насоса;  $Q_{\text{к}}$  — тепловая нагрузка, отводимая при конденсации водяного пара.

Тепломассовые балансы узла форсунок:

$$G_{\text{р}}i_{\text{р}} + N_{\text{рец}} - G_{\text{р1}}i_{\text{р2}} - G_{\text{р2}}i_{\text{р2}} = 0; \quad (3)$$

$$G_{\text{ф}}i_{\text{ф}} = G_{\text{бл}}i_{\text{в}} + G_{\text{к}}i_{\text{к}} + G_{\text{р2}}i_{\text{р2}}; \quad (4)$$

$$xG'_{\text{ф}} = G_{\text{пф}} + G_{\text{лф}} + G_{\text{вф}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{рец}}$  — мощность рециркуляционного насоса;  $G_{\text{ф}}$  — расход воды через форсунку;  $i_{\text{ф}}$  — энтальпия воды на выходе из форсунки;  $G'_{\text{ф}}$  — требуемый расход воды через форсунку;  $G_{\text{пф}}$  — расход водяного пара, образующегося в процессе кристаллизации капель в факеле распыла;  $G_{\text{лф}}$  — расход ледяных кристаллов, образующихся в факеле распыла;  $G_{\text{вф}}$  — расход охлажденной (не замершей) воды в факеле распыла;  $x$  — поправочный коэффициент, учитывающий соотношение расходов через форсунки.

Таким образом, приведенная система уравнений позволяет определить требуемый расход откачиваемого водяного пара с учетом внешних и внутренних теплопритоков и служит основой для расчета геометрических характеристик основных элементов установки.

### 2. Расчет кристаллизации капель в факеле распыла

При диспергировании воды через форсунку формируются факел распыла, состоящий из капель различного диаметра. Дисперсность факела распыла зависит от конструкции форсунки, давления на входе в форсунку, свойств жидкости, и параметров среды, в которую производится распыление. Уравнение Розина–Раммлера [11] позволяет оценить распределение капель по диаметрам.

При расчете кристаллизации воды в факеле распыла необходимо знать поверхность капель. Для упрощения расчета можно обратиться к «Заутеровскому диаметру» — это средне-поверхностный диаметр, получающийся при условии сохранения общей поверхности и объема всех капель и замене на капли одного размера. Если дисперсность распыления подчиняется уравнению Розина–Раммлера, то объемно-поверхностный диаметр ( $d_{32}$ ) определяется [12]:

$$d_{32} = \frac{a_m}{\Gamma\left(\frac{n-1}{n}\right)}. \quad (6)$$

В факеле распыла капли с диаметром равным или меньшим по сравнению с заутеровским замерзнут, небольшая часть испарится полностью (очень мелкие капли), а капли с диаметром больше заутеровского останутся частично в жидком виде и охладятся. Определить количество получаемого льда в факеле можно по формуле:

$$G_{\text{лф}} = m_{\text{л2}} n_{\text{к}} (x_{d32} - x_{\text{дисп}}), \quad (7)$$

где  $m_{\text{л2}}$  — масса замерзшей капли, кг;  $n_{\text{к}}$  — количество капель в факеле, шт./с;  $x_{d32}$  — доля в факеле капель с «Заутеровским диаметром»;  $x_{\text{дисп}}$  — доля полностью испарившихся капель в факеле.

Таким образом, значение заутеровского диаметра позволяет оценивать изменение потери массы капли при замерзании, долю получаемого льда и долю охлажденной воды и контролировать концентрацию бинарного льда.

Необходимое количество откачиваемого водяного пара в процессе замораживания, можно определить по формуле:

$$G_{\text{пф}} = n_{\text{к}} (m_{\text{жк}} - m_{\text{лк2}}), \quad (8)$$

где  $m_{\text{жк}}$  — начальная масса капли, кг.

Время замерзания и диаметр замершей капли определяются по методике расчета процесса кристаллизации капли [13]. Методика учитывает тепломассоперенос в испаряющейся капле при давлении ниже тройной точки воды с использованием уравнения диффузии водяного пара, изменение фазового состояния и теплофизических свойств, зависящих от температуры. В методике приняты следующие допущения: сферическая капля равномерно промерзает внутрь; процесс испарения и сублимации происходит с внешней поверхности капли; градиент температуры внутри капли отсутствует; изменения внутри капли не влияют на ледяную оболочку; температура и давление вокруг капли постоянны; водяной пар рассматривается как идеальный газ.

Из-за разницы давлений, молекулы воды от границы раздела движутся в окружающий объем. Скорость столкновений частиц на единицу площади за единицу времени, можно выразить через первый закон диффузии Фика. Этот закон хорошо работает в газах с низкой плотностью [14]. Включение в модель коэффициента диффузии позволяет более точно оценивать изменение массы капли при охлаждении.

Изменение размера капли сферической формы на основе закона Фика:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{M_{\text{вп}}}{\rho_{\text{жк}}} \cdot \frac{(2 + 0,6 \text{Re}_{\text{к}}^{1/2} \text{Sc}^{1/3}) D_{\text{в}}}{d_{\text{к}}} \left( \frac{P_{\text{нас}}}{RT_{\text{к}}} - X \frac{P_{\infty}}{RT_{\infty}} \right), \quad (9)$$

где  $M_{\text{вп}}$  — молекулярная масса водяного пара, кг/моль;  $\rho_{\text{жк}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $X$  — концентрация паров;  $P_{\text{нас}}$  и  $T_{\text{к}}$  — давление и температура поверхности капли, Па и К, соответственно;  $P_{\infty}$  и  $T_{\infty}$  — давление и температура в объеме, Па и К, соответственно;  $\text{Re}_{\text{к}}$  — число Рейнольдса;  $\text{Sc}$  — число Шмидта;  $D_{\text{в}}$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с [15];  $d_{\text{к}}$  — диаметр капли, м.

$$D_{\text{в}} = \frac{T^{1,75} \cdot 10^{-3} \sqrt{2 / M_{\text{вп}}}}{(P_1 / P_2) \left[ (\sum v_{\text{вп1}})^{1/3} + (\sum v_{\text{вп2}})^{1/3} \right]}, \quad (10)$$

где  $T = T_{\infty}$  — температура среды, К;  $P_1, P_2$  — давление среды, окружающей каплю, Па;  $v_{\text{вп1}}, v_{\text{вп2}}$  — атомный объем водяного пара.

Тепловой баланс капли в процессе охлаждения:

$$\frac{\rho_{\text{жк}} c_{\text{р,жк}} r}{3} \cdot \frac{dT_{\text{к}}}{dt} = h(T_{\infty} - T_{\text{к}}) - \rho_{\text{жк}} h_{\text{скр}} \frac{dr}{dt}, \quad (11)$$

где  $c_{\text{р,жк}}$  — удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $r$  — радиус капли, м;  $h$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $h_{\text{скр}}$  — теплота фазового перехода, кДж/кг.

Тепловой баланс при мгновенном замерзании части жидкости за счет накопленного переохлаждения:

$$m_{\text{вк}} h_{\text{в}}(T_{\text{тр}}) + m_{\text{лк}} h_{\text{л}}(T_{\text{тр}}) = (m_{\text{вк}} + m_{\text{лк}}) h_{\text{в}}(T_{\text{пер}}), \quad (12)$$

где  $m_{\text{вк}}$  и  $m_{\text{лк}}$  — масса воды и льда в капле, кг;  $h_{\text{в}}(T_{\text{тр}})$  и  $h_{\text{л}}(T_{\text{тр}})$  — энтальпия воды и льда при 0°C, кДж/кг;  $h_{\text{в}}(T_{\text{пер}})$  — энтальпия воды при температуре переохлаждения.

Тепловой баланс процесса кристаллизации капли:

$$h_{\text{пл}} \Delta m_{\text{с}} = h_{\text{исп}} \Delta m_{\text{исп.в}} + h'_{\text{суб}} \Delta m_{\text{суб.л}} - h(T_{\infty} - T_{\text{тр}}) \Delta t, \quad (13)$$

где  $h_{\text{пл}}$  — теплота плавления льда, кДж/кг;  $h'_{\text{суб}}$  — теплота сублимации льда, кДж/кг;  $h_{\text{исп}}$  — теплота испарения, кДж/кг;  $\Delta m_{\text{исп.в}}$  — масса испарившейся воды, кг;  $\Delta m_{\text{суб.л}}$  — масса сублимированного льда, кг.

Тепловой баланс процесса охлаждения замершей капли:

$$\frac{\rho_{\text{кл}} c_{\text{р,кл}} r}{3} \cdot \frac{dT_{\text{к}}}{dt} = h(T_{\infty} - T_{\text{к}}) - \rho_{\text{кл}} h'_{\text{суб}} \frac{dr}{dt}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{кл}}$  — плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{р,кл}}$  — удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К).

## Выводы

Представленная методика расчета позволяет интегрировать в математическую модель вакуумно-испарительной установки расчет процессов при кристаллизации капель в факеле распыла. В результате учитываются основные тепломассовые процессы в элементах системы при ее проектировании, что позволяет снизить металлоемкость и оценить влияние параметров на энергоэффективность установки, сформировать данные для управления работой установки в процессе ее эксплуатации. Показана актуальность использования капельной кристаллизации при формировании бинарного льда, позволяющая контролировать размер и форму получаемых кристаллов. Таким образом разработанная методика расчета имеет практическую ценность для дальнейшего исследования.

## Литература

1. Бараненко А. В. Итоги деятельности МАХ в 2018 г. и задачи на 2019 г. // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 3–12.
2. International milestone agreement on the phase-down of HFC production and consumption in Kigali // Editorial. 2017. Vol. 73. P. V–VI.
3. Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Митропов В. В. и др. Кигалийская поправка в контексте глобальных климатических императивов // Холодильная техника. 2019. № 4. С. 24–30.
4. Steffan C., Honke M., Safarik M. Operational experiences with an ice slurry cold thermal storage systems using the R718 direct evaporation ice generation process // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for

## References

1. Baranenko A. V. The results of the activities of the IAR in 2018 and objectives for 2019. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 2. p. 3–12. (in Russian)
2. International milestone agreement on the phase-down of HFC production and consumption in Kigali. *Editorial*. 2017. Vol. 73. P. V–VI.
3. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Mitropov V. V. ets. The Kigali amendment in the context of global climate imperatives. *Holodil'naya tekhnika*. 2019. No 4. C. 24–30. (in Russian)
4. Steffan C., Honke M., Safarik M. Operational experiences with an ice slurry cold thermal storage systems using the R718 direct evaporation ice generation process. *Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for*

- Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe, Germany, IIR. 2016.
5. Safarik M., Honke M., Steffan C., Burandt B. Applications of the direct evaporation vacuum freezing technology // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe, Germany, IIR. 2016
  6. Цветков О. Б., Лантев Ю. А. Айс-сларри и однофазные хладоносители // Холодильная техника. 2004. № 3. С. 2–4.
  7. Дворжак З. Бинарный лед // Холодильный бизнес. 2000. № 3. С. 6–9.
  8. Bdecarrats J. P., David T., Castaing-Lasvignottes J. Ice slurry production using supercooling phenomenon // International Journal of Refrigeration. 2010. Vol. 33. P. 196–204.
  9. Egolf P. W., Kauffeld M. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications // International Journal of Refrigeration. 2005. Vol. 28. P. 4–12.
  10. Bedecarrats J.-P., Strub F. and Peuvrel C. Thermal and hydrodynamic considerations of ice slurry in heat exchangers // International Journal of Refrigeration. 2009. 32 (7):1791–1800.
  11. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
  12. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Распылители жидкостей. М.: Химия, 1979. 216 с.
  13. Kruglov A. A., Tazitdinov R. R. Analytical Model of Freezing Drop of Water to Produce Ice Slurry at a Pressure Below the Triple Point // AIP Conference Proceedings. 2019, Vol. 2141, pp. 020009.
  14. Chao Wang, Ruina Xu, Yu Song, Peixue Jiang. Study on water droplet flash evaporation in vacuum spray cooling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 112. P. 279–288.
  15. Yunyun Wu A, Xiaosong Zhang, Xuelai Zhang, Muthoka Munyalo. Modeling and experimental study of vapor phase-diffusion driven sessile drop evaporation // Appl. Therm. Eng. 2014. Vol. 70. P. 560–564.

### Сведения об авторах

#### Круглов Алексей Александрович

К. т. н., ассистент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, aakruglov@itmo.ru

#### Тазитдинов Рамиль Р.

Аспирант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, rtazitdinov@itmo.ru

### Information about authors

#### Kruglov Alexey A.

Ph. D., Assistant of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, aakruglov@itmo.ru

#### Tazitdinov Ramil R.

Postgraduate Student of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, rtazitdinov@itmo.ru