

## Литература

1. Толысбаев Б.С., Абильмажинов Е.Т. Влияние температурно-влажностных режимов на качество мясных продуктов // Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. – 2008. – № 9 (47). – С. 56–58.
2. Лысаков А.А. Современные инновационные способы снижения потерь картофеля при длительном хранении // Вестн. гос. аграр. ун-та Северного Зауралья. – 2015. – № 3 (29). – С. 105–112.
3. Родькина Н.А., Корпачева С.М. Изучение потребительских предпочтений при покупке мягких сыров в г. Новосибирске // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 10. – С. 3–6.
4. Остроумов Л.А., Ермолаев В.А. Микроструктура зрелого сыра «Покровский» до сушки и после сублимационной и вакуумной сушки // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 4. – С. 145–149.
5. Власова Ж.А., Цугкиев Б.Г. Пищевая ценность сыра «Аланский» // Сыроделие и маслоделие. – 2010. – № 1. – С. 26–27.

## Literatura

1. Tolysbaev B.S., Abil'mazhinov E.T. Vlijanie temperaturno-vlazhnostnyh rezhimov na kachestvo mjasnyh produktov // Vestn. Alt. gos. agrar. un-ta. – 2008. – № 9 (47). – S. 56–58.
2. Lysakov A.A. Sovremennye innovacionnye sposoby snizhenija poter' kartofelja pri dlitel'nom hranenii // Vestn. gos. agrar. un-ta Severnogo Zaural'ja. – 2015. – № 3 (29). – S. 105–112.
3. Rod'kina N.A., Korpacheva S.M. Izuchenie potrebitel'skih predpochtenij pri pokupke mjagkih syrov v g. Novosibirske // Vestnik KrasGAU. – 2010. – № 10. – S. 3–6.
4. Ostroumov L.A., Ermolaev V.A. Mikrostruktura zrelogo syra «Pokrovskij» do sushki i posle sublimacionnoj i vakuumnoj sushki // Vestnik KrasGAU. – 2011. – № 4. – S. 145–149.
5. Vlasova Zh.A., Cugkiev B.G. Pishhevaja cenost' syra «Alanskij» // Syrodellie i maslodellie. – 2010. – № 1. – S. 26–27.



УДК 628.161:66.065.512

А.В. Учайкин

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ВЫМОРАЖИВАНИЕМ

А.В. Учайкин

### THE STUDY OF PROCESSES OF WORK OF INDUSTRIAL CRYSTALLIZER FOR WATER PURIFICATION BY FREEZING

**Учайкин А.В.** – асп. каф. теплохладотехники Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета), г. Кемерово. E-mail: uchaikin\_aleksei@mail.ru

**Uchaikin A.V.** – Post-Graduate Student, Chair of Heating Ventilation and Air Conditioning, Kemerovo Institute of Technology of Food Industry (University), Kemerovo. E-mail: uchaikin\_aleksei@mail.ru

*Работа посвящена исследованию процессов разделительного вымораживания для очистки воды. Были проведены экспериментальные исследования по разделительному вымораживанию воды в кристаллизаторе емкостного типа. Температуру теплообменной поверхности устанавливали в следующих значениях: -2,*

*-5, -7 и -10 °С. В качестве исходной воды использовали воду из водопроводной сети города Кемерово. Установлено влияние температуры и продолжительности процесса на толщину слоя льда и количество кристаллизованной влаги в процессе разделительного вымораживания. Рассчитана скорость изменения тол-*

щины слоя льда от времени кристаллизации. Обнаружено, что на протяжении всего процесса вымораживания скорость льдообразования имеет нелинейный характер. Наибольшие значения данного параметра наблюдаются в течение первых 15 мин процесса кристаллизации и составляют от 5 до 20 мм в час. За указанное время формируется ледяной массив с толщиной стенки от 1 до 5 мм в зависимости от температуры хладоносителя. Через 180 мин процесса скорость льдообразования снижается до 2–5 мм/ч. Исходя из требуемых характеристик процесса, был произведен расчет холодопроизводительности, которая составила 61,35 кВт. Определены параметры вымораживания для обеспечения производительности вымораживающей установки 0,5 т/час – температура теплообменной поверхности  $-10^{\circ}\text{C}$ , продолжительность кристаллизации – 1 час.

**Ключевые слова:** разделительное вымораживание, кристаллизатор емкостного типа, очистка воды.

*The work deals with the separation process of freezing water purification. Experimental research on the freezing water separation in the mold of the capacitive type has been carried out. The temperature of the heat transfer surface was installed in the following values:  $-2$ ,  $-5$ ,  $-7$  and  $-10^{\circ}\text{C}$ . using the water from the water supply system of the city of Kemerovo as a source of water. The effect of temperature and the duration of the process, the thickness of the ice layer and the amount of crystallized water in the process of separating freezing were established. The rate of change of the ice thickness on the crystallization time was calculated. It was found out that throughout the freezing process ice formation speed was nonlinear. The greatest value of this parameter was observed during the first 15 minutes and crystallization was from 5 to 20 mm per hour. During the specified time the ice massif with the wall thickness of 1 mm to 5 mm depending on the coolant temperature was formed. After 180 minutes of ice formation process the speed dropped to 2–5 mm / h. Based on the required characteristics of the process the cooling capacity, amounting to 61.35 kW has been calculated. The parameters of freezing for the chiller plant capacity of 0.5 t / h – the temperature of the heat transfer*

*surface of  $-10^{\circ}\text{C}$ , the duration of the crystallization was 1 hour.*

**Keywords:** separation freezing, mold of capacitive type, water purification.

**Введение.** Вода является одним из самых распространенных веществ нашей планеты и покрывает большую ее часть. Используется в огромных количествах в различных областях промышленности. Так как она является прекрасным растворителем, круговорот ее в природе обеспечивает перенос органических и неорганических веществ по земле. Перед использованием воду подвергают множеству стадий очистки в зависимости от требований, предъявляемых на производстве. К основным показателям воды относятся: прозрачность, pH, жесткость, окисляемость, сухой остаток и содержание различных газов [1, 2].

В пищевых производствах перспективным методом очистки воды является очистка методом разделительного вымораживания [3–5]. Данный метод основан на следующем принципе: при замерзании растворов кристаллизуется чистый растворитель – вода, а раствор насыщается остатком растворенных веществ. Удаление насыщенного примесями раствора и процесс плавления льда завершает процесс водоподготовки.

Настоящая работа направлена на исследование процесса разделительного вымораживания воды в промышленном кристаллизаторе.

**Цель работы.** Исследование характеристик процесса разделительного вымораживания в промышленных кристаллизаторах, предназначенных для очистки воды.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения экспериментальных исследований был использован ёмкостный кристаллизатор промышленного назначения. Кристаллизатор (рис. 1) состоит из пластиковой емкости в стальной раме. Внутри кристаллизатора помещены 4 пластиковые трубки  $d=25$  мм, выходящие из коллектора  $d=50$  мм, расположенные по спирали, всего 14 витков на каждую трубку. Выход этих трубок из кристаллизаторов также оборудован в коллектор  $d=50$  мм.

Система очистки воды вымораживанием крайне проста и эффективна. Прежде всего через трубопроводы в данные емкости поступает

водопроводная вода с температурой  $+8^{\circ}\text{C}$  и наполняет их определенным объемом. Нагнетаемый хладоноситель (фризиум) проходит по трубкам в кристаллизаторы и охлаждает воду до  $0^{\circ}\text{C}$ , затем вода структурируется и намораживается на трубках кристаллизатора определенным слоем льда. Заметим, что оба процесса

происходят за определенное время, а именно за один час. После этого воду сливают, а наморозившийся лед растапливается. Образованная таким образом чистая вода может направляться на дальнейшее использование в различных отраслях промышленности.

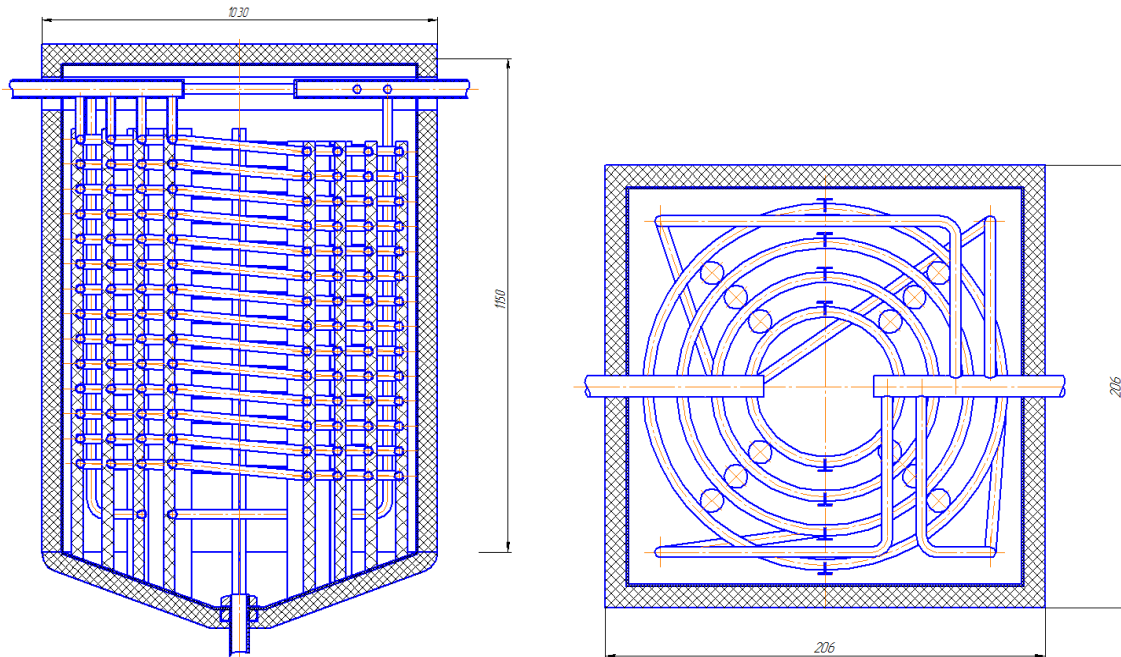


Рис. 1. Схема емкостного кристаллизатора

Эксперименты проводились в трехкратной повторности. Вымораживание осуществлялось в течение 180 мин при температурах хладоносителя  $-2$ ,  $-5$ ,  $-7$  и  $-10^{\circ}\text{C}$ . В качестве исходной воды использовали воду из водопроводной сети города Кемерово.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 2 приведены графики изменения толщины слоя льда и массы вымороженной воды от времени кристаллизации.

По зависимости толщины слоя льда от времени (рис. 2, а) можно рассчитать скорость образования ледяного массива на теплообменной поверхности трубок по следующей формуле [6]:

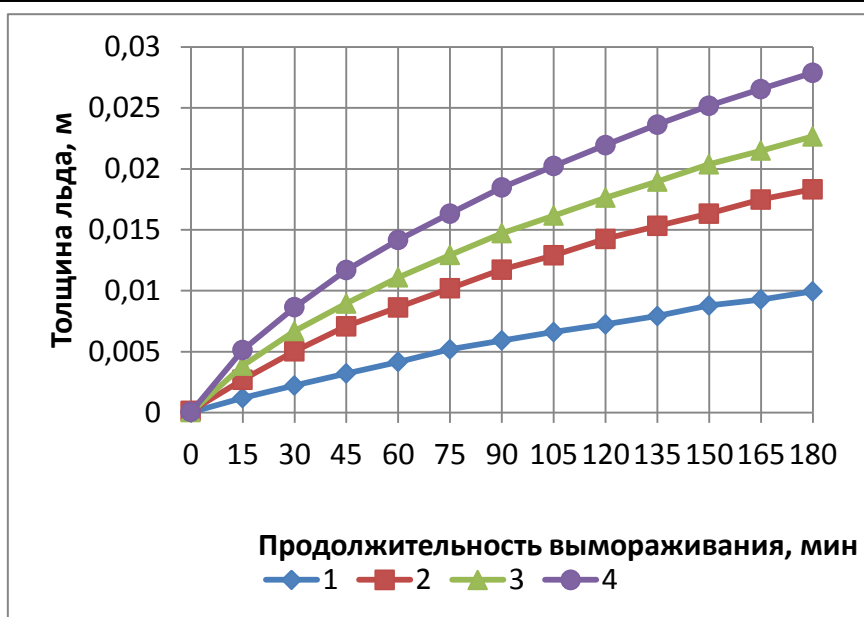
$$v = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{\tau}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость изменения толщины слоя льда, м/ч;  $\delta_i$  – толщина слоя в заданный момент вре-

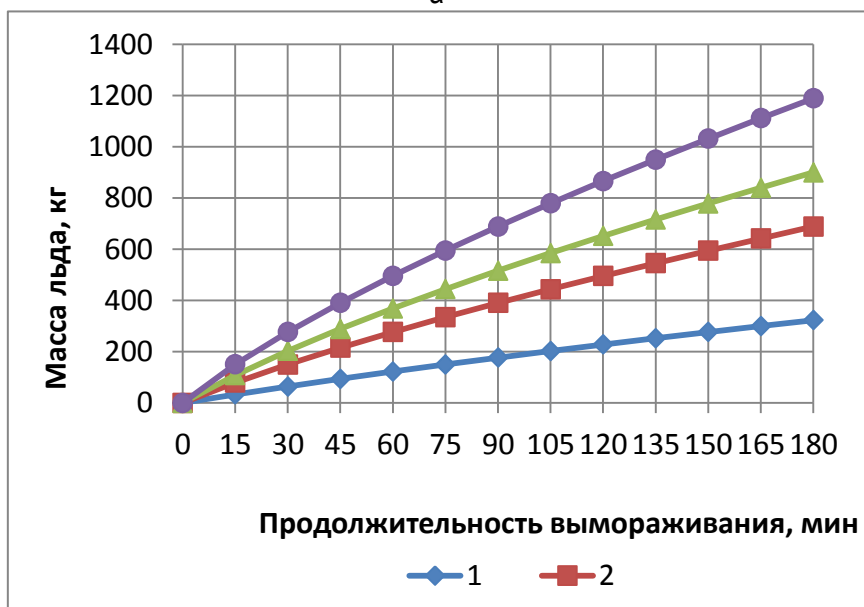
мени, м;  $\tau$  – время, за которое произошло изменение толщины слоя льда от  $\delta_{i-1}$  до  $\delta_i$ , ч.

Результаты расчета приведены на рисунке 3.

Из представленных данных следует, что зависимость толщины слоя льда от времени кристаллизации имеет нелинейный характер. Наибольшая скорость льдообразования наблюдается в течение первых 15 мин процесса кристаллизации и составляет от 5 до 20 мм в час. За указанное время был сформирован ледяной массив с толщиной стенки от 1 до 5 мм в зависимости от температуры хладоносителя. Со временем скорость образования льда снижается, что обусловлено повышением термического сопротивления между теплообменными поверхностями трубок кристаллизаторов и внешней поверхностью ледяного массива. Через 180 мин процесса скорость льдообразования снизилась до 2–5 мм/ч.



а



б

Рис. 2. Графики зависимости толщины слоя льда (а) и массы льда (б) от времени кристаллизации воды при температуре хладоносителя: 1 – минус 10 °С; 2 – минус 7 °С; 3 – минус 5 °С; 4 – минус 2 °С

По графикам, приведенным на рисунке 2,а, были разработаны уравнения регрессии, позволяющие рассчитать толщину слоя льда от времени кристаллизации:

$$\begin{aligned}
 \delta_{-2} &= -3 \cdot 10^{-9} \tau^2 + 1 \cdot 10^{-5} \tau; R^2 = 999; \\
 \delta_{-5} &= -8 \cdot 10^{-9} \tau^2 + 2 \cdot 10^{-5} \tau; R^2 = 998; \\
 \delta_{-7} &= -1 \cdot 10^{-8} \tau^2 + 3 \cdot 10^{-5} \tau + 0,001; R^2 = 998; \\
 \delta_{-10} &= -1 \cdot 10^{-8} \tau^2 + 4 \cdot 10^{-5} \tau + 0,001; R^2 = 997.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $\delta$  – толщина слоя льда, м;  $\tau$  – продолжительность процесса кристаллизации, мин.

Приведем расчет необходимой холодопроизводительности для осуществления процесса разделительного вымораживания.

Для того чтобы получить нужное количество льда, требуется сначала охладить водопроводную воду с +8°С до 0°С, а потом её заморозить. Все это происходит за 2 часа.

Требуемая холодопроизводительность для намораживания одной тонны льда  $Q_{общ1}$ , кВт, определяется по формуле [7]

$$Q_{общ1} = Q_1 + Q_2 + Q_{np}, \quad (3)$$

где  $Q_1$  – требуемая холодопроизводительность для охлаждения воды, кВт;  $Q_2$  – требуемая хо-

лодопроизводительность для заморозки воды, кВт;  $Q_{np}$  – нагрузка от потерь, кВт.

В соответствии с графиками на рисунке 2 и исходя из конструктивных параметров кристаллизатора, слой льда, намораживаемый на трубках теплообменника, достигает толщины 25 мм за 2,5 часа при температуре хладоносителя  $-10^\circ\text{C}$ , что эквивалентно 1 тонне образованного льда.

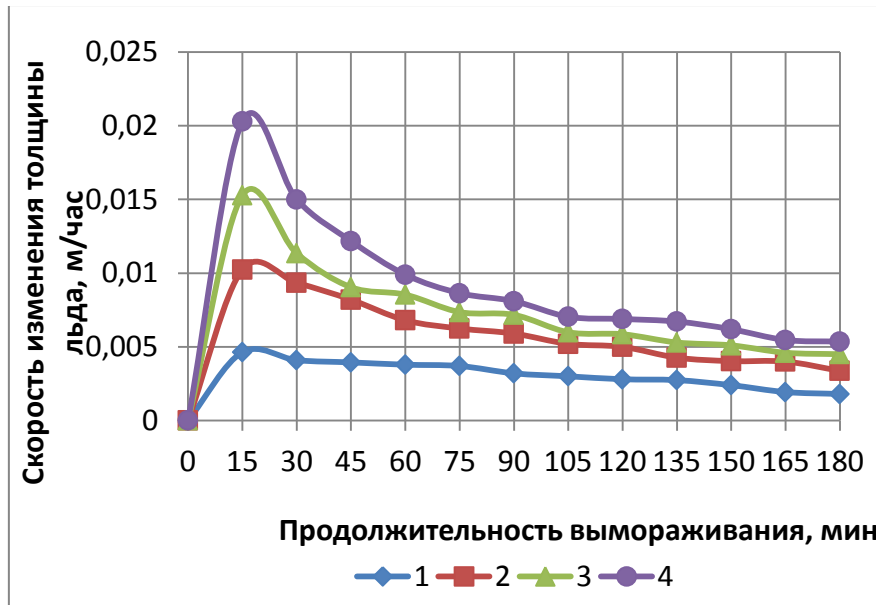


Рис. 3. Скорость изменения толщины слоя льда от времени кристаллизации воды при температуре хладоносителя: 1 – минус  $10^\circ\text{C}$ ; 2 – минус  $7^\circ\text{C}$ ; 3 – минус  $5^\circ\text{C}$ ; 4 – минус  $2^\circ\text{C}$

При необходимой производительности 0,5 тонны льда в час количество воды, подаваемой на обработку, должно составлять  $m_e = 1000$  кг/час, тогда массовый расход воды  $G_e$ , кг/с, составит [7]

$$G_e = \frac{m_e}{\tau}, \quad (4)$$

где  $m_e$  – масса воды, кг;  $\tau$  – время, с.

$$G_e = \frac{1000}{3600} = 0,278 \text{ кг/с.}$$

Расход льда  $G_l$ , кг/с, определяется по формуле [7]

$$G_l = \frac{m_l}{\tau}, \quad (5)$$

где  $m_l$  – масса воды, кг;  $\tau$  – время, с.

$$G_l = \frac{500}{3600} = 0,139 \text{ кг/с.}$$

Требуемая холодопроизводительность для охлаждения воды  $Q_1$ , кВт, определяется по формуле [7]

$$Q_1 = G_e \cdot c_e \cdot (t_e - t_0), \quad (6)$$

где  $G_e$  – расход воды, кг/с;  $c_e$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $t_e$  – температура воды, К;  $t_0$  – нулевая температура, К.

$$Q_1 = 0,278 \cdot 4,2 \cdot (281 - 273) = 9,34 \text{ кВт.}$$

Требуемая холодопроизводительность для заморозки воды  $Q_2$ , кВт, определяется по формуле [7]

$$Q_2 = G_l \cdot r_l, \quad (7)$$

где  $G_l$  – расход льда;  $r_l$  – теплоемкость ( $r_l = 334$  кДж/кг).

$$Q_2 = 0,139 \cdot 334 = 46,43 \text{ кВт.}$$

Холодопроизводительность потерь  $Q_{np}$ , кВт, определяется по формуле [7]

$$Q_{np} = 0,1 \cdot (Q_1 + Q_2). \quad (8)$$

$$Q_{np} = 0,1 \cdot (9,34 + 46,43) = 5,58 \text{ кВт.}$$

$$Q_{общ1} = 9,34 + 46,43 + 5,58 = 61,35 \text{ кВт.}$$

**Выводы.** Таким образом, в ходе проведенных исследований была установлена зависимость количества вымороженной влаги на теплообменной поверхности кристаллизатора от продолжительности процесса, разработаны соответствующие уравнения регрессии. В рассмотренной установке для обеспечения производительности в 0,5 тонны льда в час температура хладоносителя должна составлять  $-10^\circ\text{C}$ , а продолжительность процесса кристаллизации – 1 час. Рассчитана необходимая холодопроизводительность для обеспечения процесса при указанных режимах, которая составила 61,35 кВт.

#### Литература

1. *Рябчиков Б.Е.* Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. – М.: ДеЛипринт, 2004. – 328 с.
2. *Ивлева А.М., Образцов С.В., Орлов А.А.* Современные методы очистки воды. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 78 с.
3. *Короткий И.А., Федоров Д.Е., Тризно Н.А.* Исследование работы емкостного кристаллизатора для разделительного вымораживания жидких пищевых продуктов // *Техника и технология пищевых производств.* – М., 2012. – С. 120–125.
4. *Короткая Е.В., Короткий И.А., Учайкин А.В.* Очистка воды вымораживанием в емкостном кристаллизаторе // *Вестник КрасГАУ.* – 2015. – № 6. – С. 140–145.
5. *Учайкин А.В.* Применение разделительного вымораживания для очистки воды // *Приборное и научно-методическое обеспечение исследований и разработок в области инновационных технологий производства продуктов питания функционального назначения: мат-лы Всерос. молодеж. науч.*

школы. – Кемерово: Изд-во КемТИПП, 2012. – С. 215.

6. *Федоров Д.Е.* Разработка низкотемпературной технологии выделения гемоглобина из крови убойных животных: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04. – Кемерово, 2014. – 133 с.
7. *Короткий И.А.* Исследование и разработка технологий замораживания и низкотемпературного хранения плодово-ягодного сырья Сибирского региона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04. – Кемерово, 2009. – 410 с.

#### Literatura

1. *Rjabchikov B.E.* Sovremennye metody podgotovki vody dlja promyshlennogo i bytovogo ispol'zovanija. – M.: DeLiprint, 2004. – 328 s.
2. *Ivleva A.M., Obrazcov S.V., Orlov A.A.* Sovremennye metody ochistki vody. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2010. – 78 s.
3. *Korotkij I.A., Fedorov D.E., Trizno N.A.* Issledovanie raboty emkostnogo kristallizatora dlja razdelitel'nogo vymorazhivaniya zhidkih pishhevych produktov // *Tehnika i tehnologija pishhevych proizvodstv.* – M., 2012. – S. 120–125.
4. *Korotkaja E.V., Korotkij I.A., Uchajkin A.V.* Ochistka vody vymorazhivaniem v emkostnom kristallizatore // *Vestnik KrasGAU.* – 2015. – № 6. – S. 140–145.
5. *Uchajkin A.V.* Primenenie razdelitel'nogo vymorazhivaniya dlja ochistki vody // *Pribornoe i nauchno-metodicheskoe obespechenie issledovanij i razrobotok v oblasti innovacionnyh tehnologij proizvodstva produktov pitaniya funkcional'nogo naznachenija: mat-ly Vseros. molodezh. nauch. shkoly.* – Kemerovo: Izd-vo KемТИПП, 2012. – S. 215.
6. *Fedorov D.E.* Razrabotka nizkotemperaturnoj tehnologii vydelenija gemoglobina iz krvi ubojnyh zhivotnyh: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.18.04. – Kemerovo, 2014. – 133 s.
7. *Korotkij I.A.* Issledovanie i razrabotka tehnologij zamorazhivaniya i nizkotemperaturnogo hranenija plodovo-jagodnogo syr'ja Sibirskogo regiona: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.18.04. – Kemerovo, 2009. – 410 s.