

УДК 662.6 (075)

Эксергетический анализ концентрирующей вымораживающей установки

Д-р техн. наук С. Т. АНТИПОВ¹, канд. техн. наук В. Ю. ОВСЯННИКОВ²,
Я. И. КОНДРАТЬЕВА, А. А. КОРЧИНСКИЙ

¹ast@vsuet.ru, ²ows2003@mail.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий

Представлена методика эксергетического анализа энерготехнологической системы концентрирования жидких пищевых и биотехнологических сред методом циклического вымораживания влаги. Показаны функциональные зависимости, позволяющие осуществить учет качества энергетического потенциала, обладающего способностью превратиться в полезную работу. Руководствуясь рабочими режимными параметрами функционирования вымораживающей установки, встроенного холодильного агрегата и сторонних потоков энергии произведен термодинамический анализ указанной энерготехнологической системы. Произведенный расчет и наглядная интерпретация эксергетического баланса в виде диаграммы Грассмана — Шаргута потоков и потерь эксергии, позволила качественно оценить весь комплекс потерь эксергии в элементах концентрирующей вымораживающей установки циклического действия, в результате протекающих в ней как обратимых, так и необратимых процессов тепло- и массообмена. Установлено, что процесс концентрирования достаточно эффективно реализуется при эксергетическом КПД установки равном 23,4%, а наибольшие потери эксергии выявились в терморегулирующем вентиле и конденсаторе холодильной установки за счет внутренних эксергетических потерь, возникающих за счет фазовых превращений холодильного агента.

Ключевые слова: концентрирование вымораживанием, эксергетический анализ.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.12.2016, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-78-83

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Антипов С. Т., Овсянников В. Ю., Кондратьева Я. И., Корчинский А. А. Эксергетический анализ концентрирующей вымораживающей установки // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 78–83.

Exergy analysis of freeze concentration unit

D. Sc. S. T. ANTIPOV¹, Ph. D. V. Yu. OVSYANNIKOV²,
Ja. I. KONDRATEVA, A. A. KORCHINSKIJ

¹ast@vsuet.ru, ²ows2003@mail.ru

Voronezh State University of Engineering Technologies

The technique of energy-exergy analysis of the technological system for concentration of liquid food and biotechnology environments by cyclic freezing of moisture is presented. Functional dependencies allowing controlling the quality of energy potential that could be transformed into useful work are shown. On the basis of working regime parameters for freeze unit, built-in refrigeration unit, and external flows of energy the thermodynamic analysis of this energy-technological system is performed. The calculations and visual interpretation of the exergy balance in the form of Grassmann — Shargut charts' flow and exergy loss are shown to allow qualitative evaluating the full range of exergy losses in the elements of freeze concentration unit of cycle operation due to both reversible and irreversible processes of heat- and mass transfer. It was found that the process of concentration is implemented effectively when exergetic performance coefficient of the unit equals to 23.4%, and the greatest losses of exergy are observed in the expansion valve and the condenser of the refrigeration unit due to internal exergy losses caused by phase transformations of the refrigerant.

Keywords: freeze concentration, exergy analysis.

Article info:

Received 12/12/2016, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-78-83

Article in Russian

For citation:

Antipov S. T., Ovsyannikov V. Yu., Kondrateva Ja. I., Korchinskij A. A. Exergy analysis of freeze concentration unit. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 78–83.

Исследование энерготехнологических систем (ЭТС) зачастую производится на основании первого и второго закона термодинамики [1]. При этом энергетический анализ, базирующийся на первом законе, позволяет определить энергию с количественной стороны и совершенно не учитывает качество энергии, потребляемое и отдаваемое системой, т.е. способность этой энергии быть превращенной в полезную работу. Эксергетический метод позволяет судить о степени рационального использования различных затрачиваемых видов энергии в технологических процессах, руководствуясь параметрами исходных сред, осуществленной над системой работой и привлеченной извне энергии различных видов, а также более качественно провести термодинамический анализ ЭТС, найти наиболее эффективные пути снижения затрат энергетических ресурсов при одновременном улучшении технологических показателей [2].

Для эксергии потока энергии основное уравнение эксергетического баланса технологических процессов записывается в общем виде соотношением

$$\sum_{i=1}^n E_{1,i} = \sum_{i=1}^n E_{2,i} + \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n E_{1,i}$ — сумма эксергии начальных материальных потоков перед контрольной поверхностью, кДж; $\sum_{i=1}^n E_{2,i}$ — сумма эксергии конечных материальных потоков после контрольной поверхности, кДж; $\sum_{i=1}^n L_i$ — сумма работ, совершаемых в ЭТС, кДж; $\sum_{i=1}^n D_i$ — величина суммарных эксергетических потерь ЭТС, кДж.

Критерием совершенства ЭТС и ее отдельных элементов является эксергетический КПД

$$\eta_э = \frac{\sum_{i=1}^n E_{2,i} + \sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n E_{1,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{1,i} - \sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^n E_{1,i}} \quad (2)$$

Перед составлением баланса вымораживающей установки систему, подлежащую исследованию, условно изолировали от других объектов контрольной поверхностью. В эксергетический баланс включили эксергию всех потоков вещества и энергии, проходящих через эту поверхность.

Технологическая схема концентрирующей вымораживающей установки показана на рис. 1 [3, 4].

Анализ вымораживающей установки осуществляется на основании эксергетического баланса:

$$\sum e_{вх} = \sum e_{вых} + \sum d, \quad (3)$$

где $\sum e_{вх}$, $\sum e_{вых}$ — сумма удельных эксергий на входе и выходе установки, кДж/кг;

$\sum d$ — суммарные потери эксергии в элементах установки, кДж / кг.

$$e_m + e_{км} + e_n = e_{m'} + e_{вл} + \sum d, \quad (4)$$

где $e_{m'}$, $e_{m'}$ — эксергия продукта на входе и выходе установки, кДж/кг; $e_{км}$ — поток эксергии в компрессоре одноступенчатой холодильной машины, кДж/кг; e_n — поток эксергии в насосе, кДж/кг; $e_{вл}$ — эксергия влаги, выморозенная из продукта, кДж/кг.

Поясним особенности описания составляющих уравнения (4).

Исходный продукт поступает в установку при температуре окружающей среды, поэтому его эксергия равна нулю ($e_m = 0$), а эксергия продукта на выходе из установки соответствует ее приращению в процессе концентрирования методом вымораживания влаги, т.е. $e_{m'} = \Delta e_{m'}$.

При этом принимаем, что изменения химической и физической структуры концентрируемой среды не происходит:

$$e_{m'} = \Delta e_{m'} = c_m (T' - T - T_0 \lg (T'/T_0)), \quad (5)$$

где c_m — теплоемкость среды после концентрирования вымораживанием влаги, кДж/(кгК); T , T' — температура жидкой среды на входе и выходе вымораживающей установки, К; T_0 — температура окружающей среды, К.

Эксергия, подводимая к компрессору холодильной машины и насосу, равна мощности их электроприводов:

$$E_{км} = N_{км}; \quad E_n = N_n; \quad (6)$$

$$e_{км} = N_{км}/G_m; \quad e_n = N_n/G_m, \quad (7)$$

где $N_{км}$ — мощность компрессора холодильной машины, кВт; N_n — мощность электропривода насоса, кВт; G_m — массовый расход исходной жидкой среды, кг/с.

Эксергия льда, выморозенного из концентрируемой среды равна:

$$e_{вл} = \Delta e_{вл.охл.} + \Delta e_{вл.кр.} + \Delta e_{вл.пер.}, \quad (8)$$

где $\Delta e_{вл.охл.}$, $\Delta e_{вл.кр.}$, $\Delta e_{вл.пер.}$ — приращение удельной эксергии при охлаждении влаги в жидкой среде, ее кристаллизации и переохлаждении, кДж/кг.

Полезной затратой эксергии в выражении (8) является только удельная эксергия $\Delta e_{вл.кр.} = \Delta e_{пол.}$ используемая на кристаллизацию влаги из концентрируемой среды. Величины $\Delta e_{вл.охл.}$ и $\Delta e_{вл.пер.}$ характеризуют потери эксергии $d_{вл.}$

$$\Delta e_{вл.охл.} = c_{вл} (T_{кр.} - T_0) - T_0 c_{вл} \lg (T_{кр.}/T_0), \quad (9)$$

где $c_{вл}$ — удельная теплоемкость воды, кДж/(кгК); $T_{кр.}$ — криоскопическая температура, К; T_0 — температура окружающей среды, К.

Эксергия влаги, закристаллизовавшейся в продукте, кДж/кг [5]:

$$\Delta e_{вл.кр.} = h_l - h_{вл} - T_0 (S_l - S_{вл}) + l_{отр}, \quad (10)$$

где h_l , S_l — энтальпия и энтропия льда при температуре кристаллизации, кДж/кг; $l_{отр}$ — работа отрыва молекул воды от «скелета» сухого вещества жидкой среды, зависящая от количества оставшейся в продукте влаги и эксергии связи влаги с материалом, кДж/кг.

$$\Delta e_{вл.пер.} = c_l (T - T_{кр.}) - T_0 c_{вл} \lg (T/T_{кр.}), \quad (11)$$

где c_l — теплоемкость льда, кДж/(кгК); $T_{кр.}$ — температура кристаллизации выморозенной влаги, К; T — температура кристаллизации жидкой среды, К.

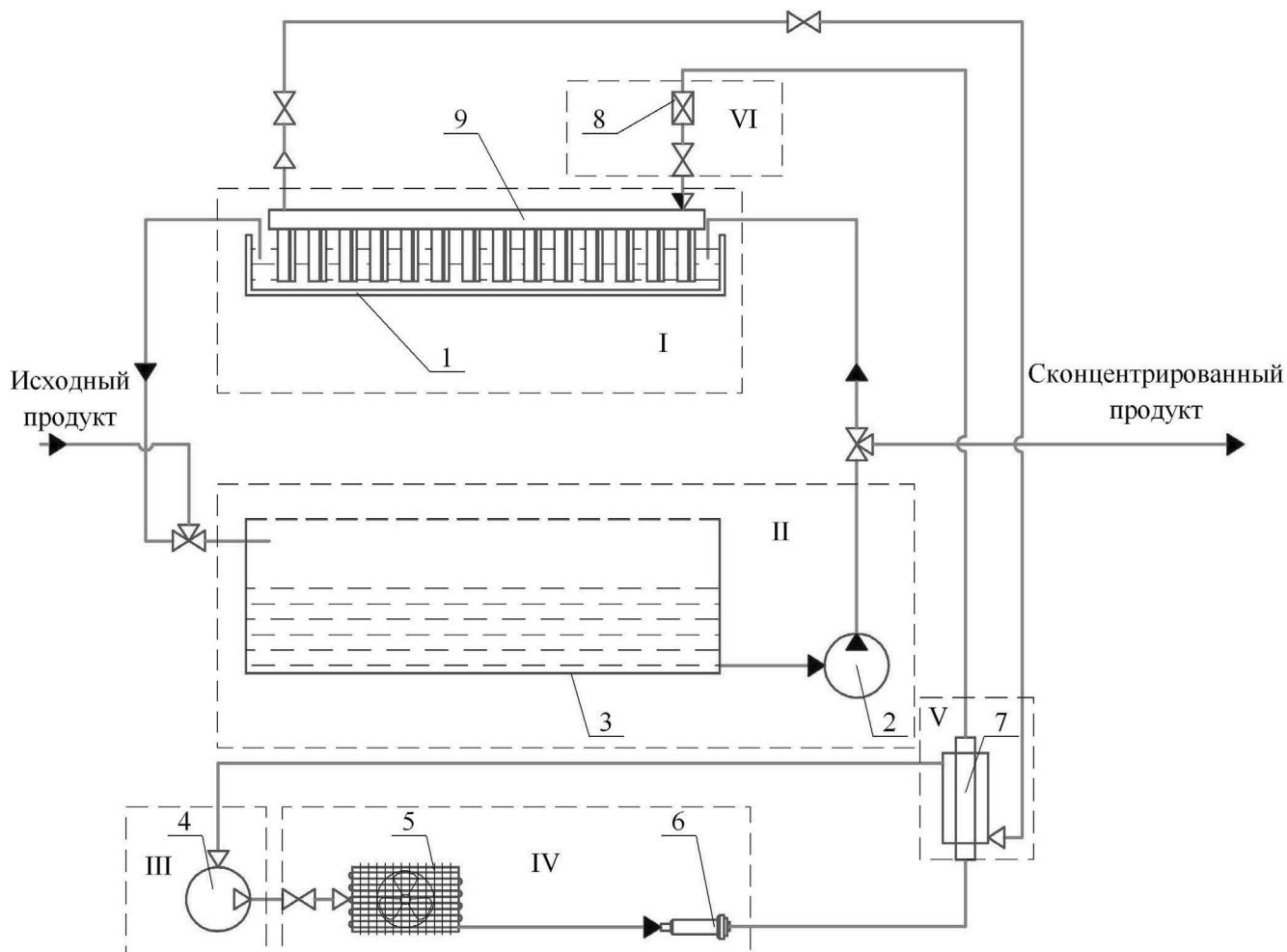


Рис. 1. Схема вымораживающей установки циклического действия:

1 — ванна для продукта; 2 — насос для продукта; 3 — бак-накопитель; 4 — компрессор холодильной машины; 5 — конденсатор; 6 — фильтр-осушитель; 7 — регенеративный теплообменник; 8 — терморегулирующий вентиль; 9 — испаритель; контрольные поверхности: I — испаритель; II — транспорт продукта; III — компрессор для хладагента; IV — конденсатор; V — переохладитель; VI — терморегулирующий вентиль

Эксергия льда, выделившегося из вымораживаемого продукта

$$d_{\text{вл}} = \Delta e_{\text{вл.охл.}} + \Delta e_{\text{кр.}} + \Delta e_{\text{пер.}} \quad (12)$$

Суммарные потери эксергии $\sum d$ в вымораживающей установке состоят из-за необратимости процессов в испарителе и в холодильной машине.

Потери эксергии, связанные с необратимостью процессов в зоне концентрирования

$$\sum d = d_{\text{вл}} + d_0, \quad (13)$$

где d_0 — потери в окружающую среду, кДж.

$$d_0 = Q_0 (1 - T/T_0), \quad (14)$$

здесь Q_0 — теплопритоки из окружающей среды, кВт; $d_{\text{вл.}}$ — потери эксергии, связанные с необратимостью процессов теплообмена между вымораживаемым льдом и испарителем, кДж/кг

$$d_{\text{вл.}} = q_{\text{кр.}} (\tau_{\text{кр.и}}) = q_{\text{кр.}} (1 - T_0/T_{\text{кр.}}). \quad (15)$$

Потери эксергии в холодильной установке [6]:

$$\sum d_{\text{х.у.}} = d_{\text{км}} + d_{\text{к}} + d_{\text{по}} + d_{\text{рв}} + d_{\text{и}}, \quad (16)$$

где $d_{\text{км}}$ — потери эксергии в компрессоре, кДж/кг;

$$d_{\text{км}} = d_{\text{эм}} + d_{\text{вн}}, \quad (17)$$

здесь $d_{\text{эм}}$, $d_{\text{вн}}$ — электромеханические и внутренние потери, учитываемые КПД компрессора $\eta_{\text{км}}$, определяемые по формуле

$$d_{\text{км}} = e_{\text{км}} (1 - \eta_{\text{км}}), \quad (18)$$

где $d_{\text{к}}$ — потери эксергии в конденсаторе, кДж/кг, определяемые по формуле

$$d_{\text{к}} = d_{\text{кв}} + d_{\text{кт}}, \quad (19)$$

где $d_{\text{кв}}$ — потери эксергии с охлаждающим воздухом, кДж/кг, определяемые по формуле

$$d_{\text{кв}} = q_{\text{к}} (1 - T_0/T_{\text{к}}^{\text{сп}}), \quad (20)$$

где $T_{к\text{cp}}$ — средняя температура охлаждающего воздуха, К, $T_{к\text{cp}} = (T_{в1} + T_{в2})/2$; $d_{кт}$ — потери эксергии вследствие необратимости теплообмена (рис. 2), кДж/кг, определяемые по формуле

$$d_{кт} \tau = e_2 - e_3, \quad (21)$$

где e_2, e_3 — эксергия холодильного агента на входе и выходе конденсатора, кДж/кг.

Потери эксергии в переохладителе, кДж/кг, определяются по формуле

$$d_{по} = e_3 - e_3', \quad (22)$$

где $(e_3 - e_3')$ — эксергия, отданная жидким холодильным агентом при его переохлаждении, кДж/кг.

Потери эксергии в регулирующем вентиле (РВ), кДж/кг, определяются по формуле

$$d_{рв} = e_3' - e_4. \quad (23)$$

Потери эксергии в испарителе вследствие необратимого теплообмена, кДж/кг [7]:

$$d_{и} = (e_4 - e_1) - q_o (1 - T_o/T_{кип.}), \quad (24)$$

где $(e_4 - e_1)$ — эксергия, отданная кипящим холодильным агентом, кДж/кг; $q_o = (1 - T_o/T_{кип.})$ — эксергия, полученная средой в зоне концентрировании вымораживающей установки, кДж/кг; $T_{кип.}$ — температура кипения холодильного агента, К.

Эксергетический КПД установки определяется по формуле [7]:

$$\eta_e = (\sum e_{вх} - \sum d) / \sum e_{вх}. \quad (25)$$

Гидравлические эксергетические потери при подаче продукта в контрольную поверхность

$$d_{г} = g \Delta H T_{кп} / T_{вх}, \quad (26)$$

где $T_{кп}$ — температура в контрольной поверхности, К; $T_{вх}$ — температура продукта на входе в контрольную поверхность, К; ΔH — гидравлические потери продукта на входе в контрольную поверхность, определяемые в соответствии с формулой Дарси — Вейсбаха

$$\Delta H = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (27)$$

здесь ζ — коэффициент гидравлических сопротивлений; v — скорость среды, м/с; g — ускорение силы тяжести, м/с².

Потери эксергии в окружающую среду, обусловленные несовершенством теплоизоляции определяются по формуле [8]

$$d^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (28)$$

где $Q_{из}$ — суммарные потери теплоты в окружающее пространство через контрольную поверхность, обусловленные несовершенством тепловой изоляции, кДж; τ_e — фактор Карно.

Эксергетический баланс установки приведен в табл. 1.

Для наглядной интерпретации эксергетического баланса применяется диаграмма Грассмана — Шаргута потоков и потерь эксергии. На ней каждый поток эксергии изображается полосой, ширина которой пропорциональна ее величине.

Диаграмма Грассмана — Шаргута экспериментальной вымораживающей установки (рис. 2.) показывает все

Таблица 1

Эксергетический баланс экспериментальной установки

Контрольная поверхность	Подвод эксергии			Отвод и потери эксергии			
	Наименование	кДж/кг	% суммарной эксергии	Наименование	Обозначение	кДж/кг	% суммарной эксергии
I	Испаритель	—	—	Внутренние потери	d_1^i	63,3	15,03
II	Привод насоса	20,0	4,75	Электромеханические (внешние) потери	d_{II}^e	1,0	0,24
				Внутренние потери	d_{II}^i	2,2	0,52
				Сконцентрированный продукт	$e_{II}^{тн}$	102,28	24,3
III	Привод компрессора	400,0	95,01	Электромеханические (внешние) потери	d_{III}^e	40,0	9,5
				Внутренние потери	d_{III}^i	25,3	6,01
IV	Конденсатор	—	—	Внутренние потери	d_{IV}^i	56,12	13,6
V	Переохладитель	1,0	0,24	Внутренние потери	d_V^i	41,0	9,74
VI	ТРВ	—	—	Внутренние потери	d_{VI}^i	89,8	21,33
Итого:		421,0	100	Итого		421,0	100
Эксергетический КПД				$\eta = e_{II}^{тн} / \sum_{i=1}^9 e_i = 24,3\%$			

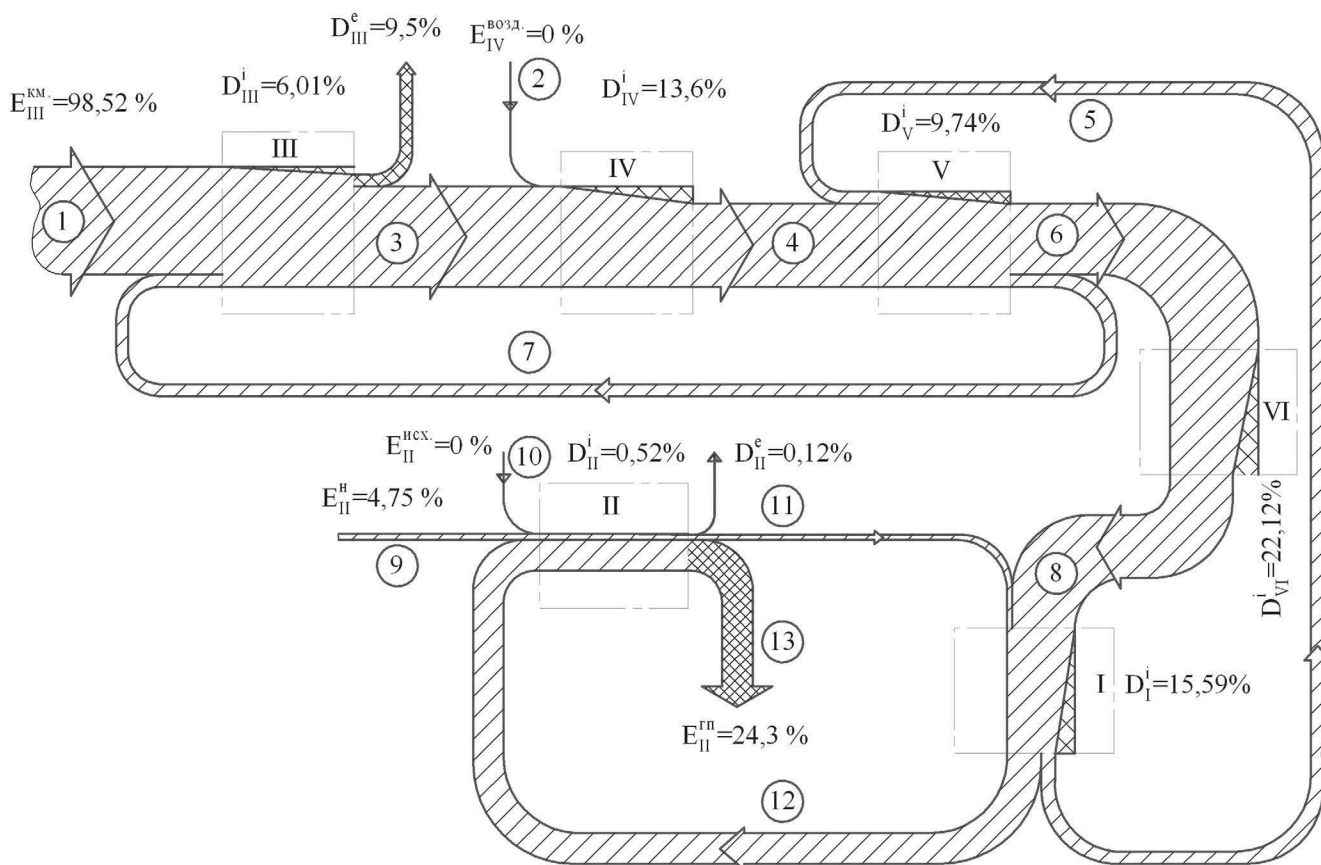


Рис. 2. Диаграмма Грассмана — Шаргута для системы концентрирования вымораживанием:

1 — привод компрессора; 2 — исходный продукт; 3 — хладагент в конденсатор; 4 — хладагент из конденсатора; 5 — хладагент из испарителя; 6 — хладагент в терморегулирующий вентиль; 7 — хладагент из переохладителя; 8 — хладагент из терморегулирующего вентиля; 9 — привод насоса; 10 — исходный продукт; 11 — продукт на концентрирование; 12 — продукт из испарителя; 13 — сконцентрированный продукт

потери эксергии в элементах установки, в результате протекающих в них необратимых процессов.

Величина потери эксергии в каждом элементе установки соответствует уменьшению ширины полосы эксергии и условно изображается заштрихованным треугольником, d_i^e (эксергетические потери в i -м элементе установки).

На основании проведенных расчетов и диаграммы Грассмана — Шаргута можно сделать вывод, что наи-

большие потери эксергии происходят в терморегулирующем вентиле и конденсаторе холодильной установки за счет внутренних эксергетических потерь.

Для повышения эффективности работы указанных элементов системы следует подбирать оптимальные режимы работы указанных элементов, использовать схемы рекуперации полезной теплоты конденсации для плавления вымороженного льда, применять более эффективную теплоизоляцию [9, 10].

Литература

1. Антипов С. Т., Овсянников В. Ю., Кондратьева Я. И., Бостынец Н. И. Термодинамические особенности процесса концентрирования жидких сред вымораживанием // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5–1. С. 159.
2. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический анализ и его приложения. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
3. Антипов С. Т., Овсянников В. Ю., Кондратьева Я. И. Кинетика процесса концентрирования вымораживанием вишневого сока // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 4. С. 44–48.
4. Овсянников В. Ю., Кондратьева Я. И., Бостынец Н. И., Денежная А. Н. Исследование процесса циклического кон-

References

1. Antipov S. T., Ovsyannikov V. Yu., Kondratyeva Ya. I., Bostynets N. I. Thermodynamic special features of the process of the concentration of liquid media by freezing. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014. No 5–1. 159 p. (in Russian)
2. Brodyansky V. M., Fratsher V., Michalek K. Exergic analysis and its applications. Moscow, Energoatomisdat, 1988. 288 p. (in Russian)
3. Antipov S. T., Ovsyannikov V. Yu., Kondratyev YA.I. Kinetics of the process of concentration by freezing the cherry juice. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tehnologij*. 2014. No 4. p. 44–48. (in Russian)
4. Ovsyannikov V. Yu., Kondratyeva Ya. I., Bostynets N. I., Denezhnaya A. N. Investigation of cyclic freeze concentration

- центрирования вишневого сока вымораживанием. // Вестник Международной академии холода. 2015. № 1. С. 4–8.
5. *Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В.* Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. — М.: Агропромиздат, 1985. 208 с.
 6. Патент 2569021 (Российская Федерация), МПК F 25 C 1/08 Устройство для концентрирования жидких сред вымораживанием и получения льда. / С. Т. Антипов, В. Ю. Овсянников, Я. И. Кондратьева, Н. И. Бостынец. — Заявл. — 07.08.2014, № 2014132681/13, опубл. в Б. И., 2015, № 32.
 7. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. Пер. с польск. — М.: Энергия, 1968. 280 с.
 8. *Овсянников В. Ю., Бостынец Н. И., Денежная А. Н., Кондратьева Я. И.* Управление процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 2. С. 10–13.
 9. *Ovsyannikov V. Yu., Kondratyeva Ya. I., Bostynets N. I.* Design parameters of the concentration of liquids freeze // *Nauka i studia*. 2015. V. 10. p. 79–82.
 10. *Антипов, С. Т., Добромиров, В. Е., Овсянников, В. Ю.* Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием. — Воронеж: ВГТА, 2004. 208 с.
- of cherry juice. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda*. 2015. No 1. p. 4–8. (in Russian)
5. Bogdanov S. N. Ivanov O. P. Kupriyanova A. V. Refrigeration equipment. The properties of substances: Spravochnik. Moscow, Agropromizdat, 1985. 208 p. (in Russian)
 6. Patent 2569021 (Russian Federation) MPK F 25 C 1/08 *Device for concentrating liquids and ice making freeze* / S. T. Antipov, V. Yu. Ovsyannikov, Kondratyeva Ya. I., Bostynets N. I. Zayavl. 07.08.2014, No 2014132681/13, publ. v B. I., 2015, No 32.
 7. Shargut J., Petela P. Ekhsergiya. Exergy. Trans. with Pol. Moscow, Energy, 1968. 280 p. (in Russian)
 8. Ovsyannikov V. Yu., Bostynets N. I., Denezhnaya A. N., Kondratyeva Ya. I. Managing the process of concentration of low-temperature freeze liquids. *Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii*. 2016. No 2. p. 10–13. (in Russian)
 9. Ovsyannikov V. Yu., Kondratyeva Ya. I., Bostynets N. I. Design parameters of the concentration of liquids freeze *Nauka i studia*. 2015. vol. 10. p. 79–82.
 10. Antipov S. T., Dobromirov V. E., Ovsyannikov V. Yu. Heat- and mass exchange with the concentration of liquid media by freezing. Voronezh, 2004. 208 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Антипов Сергей Тихонович

д. т. н., профессор кафедры Машин и аппаратов пищевых производств Воронежского государственного университета инженерных технологий, 394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19, ast@vsuet.ru

Овсянников Виталий Юрьевич

к. т. н., доцент кафедры Машин и аппаратов пищевых производств Воронежского государственного университета инженерных технологий, 394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19, ows2003@mail.ru

Кондратьева Яна Игоревна

аспирант кафедры Машин и аппаратов пищевых производств Воронежского государственного университета инженерных технологий, 394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19, yanchyk_@mail.ru

Корчинский Александр Андреевич

аспирант кафедры Машин и аппаратов пищевых производств Воронежского государственного университета инженерных технологий, 394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19, 7919249-22-67@ya.ru

Information about authors

Antipov Sergei Tihonovich

D. Sc., professor of department of Cars and devices of food productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036 Voronezh, Russia, ast@vsuet.ru

Ovsyannikov Vitalij Yur'evich

Ph.D., associate professor of department of Cars and devices of food productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036 Voronezh, Russia, ows2003@mail.ru

Kondrat'eva Jana Igorevna

graduate student of department of Cars and devices of food productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036 Voronezh, Russia, yanchyk_@mail.ru

Korchinskij Aleksandr Andreevich

graduate student of department of Cars and devices of food productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036 Voronezh, Russia, 7919249-22-67@ya.ru