

**Оценка энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии**

**В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, А.В. Чернявский, М.А. Угольников**

Московский политехнический университет,  
107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка методики оценки энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания объемного принципа действия на основе анализа производства энтропии. На основании разработанной методики дать оценку целесообразности применения ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта в криоконцентраторах объемного принципа действия. **Метод.** Исследование основано на методе энтропийного анализа термодинамических циклов холодильных установок. Произведен теоретический расчет по разработанной методике для криоконцентраторов, оснащенных ступенью предварительного охлаждения исходного жидкого продукта и без нее. **Результат.** Показано, что наличие ступени предварительного охлаждения, которая основывается на безмашинном охлаждении исходного жидкого продукта за счет холода массы льда, получаемой в аппарате, является целесообразным и позволяет существенно сократить энергопотребление криоконцентратора. Представлены результаты расчета удельного показателя энергопотребления криоконцентратора, характеризующего затраты электроэнергии на производство одного литра концентрата в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта для хладагентов R404A, R410A, R507. **Вывод.** Разработанная методика оценки энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии может быть полезна не только для проектирования устройств криоконцентрирования, но и другого оборудования объемного принципа действия, работающего в условиях ледообразования, например, ледогенераторов и холодоаккумуляторов.

**Ключевые слова:** энтропийный метод анализа, криоконцентратор, энергопотребление, вымораживание, термодинамический цикл, концентрат

**Для цитирования:** В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, А.В. Чернявский, М.А. Угольников. Оценка энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-6-15.

**Assessment of the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis**

**V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova**

Moscow Polytechnic University,  
38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russia

**Abstract. Objective.** The objective of the study is to develop a methodology for assessing the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis. Based on the developed methodology, assess the feasibility of using a preliminary cooling stage for the initial liquid product in cryoconcentrators based on the volumetric principle of operation. **Method.** The study is based on the method of entropy analysis of thermodynamic cycles of refrigeration units. A theoretical calculation was performed using the developed methodology for cryoconcentrators equipped with and without a preliminary cooling stage for the

initial liquid product. **Result.** It was shown that the presence of a pre-cooling stage, which is based on machine-free cooling of the initial liquid product using the cold of the ice mass obtained in the apparatus, is expedient and allows for a significant reduction in the energy consumption of the cryoconcentrator. The results of calculating the specific energy consumption of the cryoconcentrator, which characterizes the energy consumption for the production of one liter of concentrate, depending on the presence of a preliminary cooling stage of the initial liquid product for refrigerants R404A, R410A, and R507, are presented. **Conclusion.** The developed method for assessing the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-out method based on entropy production analysis can be useful not only for designing cryoconcentration devices, but also for other volumetric equipment operating under ice formation conditions, such as ice generators and cold accumulators.

**Keywords:** entropy analysis method, cryoconcentrator, energy consumption, freezing, thermodynamic cycle, concentrate

**For citation:** V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova. Assessment of the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):6-15. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-6-15

**Введение.** Одной из перспективных технологий в современной холодильной технике является разделение жидких сред методом вымораживания. Данный способ разделения жидких сред применяется в пищевой, фармакологической, биотехнологической, химической отраслях промышленности [1-5]. При проектировании установок разделения жидких сред методом вымораживания одной из основных задач является повышение их энергоэффективности. Для решения данной задачи необходимы методики, позволяющие оценить влияние новых технических решений на энергетическую эффективность данных устройств.

**Постановка задачи.** Многие авторитетные специалисты в области техники низких температур отмечают [6-11], что наиболее совершенные методики оценки энергетической эффективности холодильного оборудования базируются на анализе производства энтропии. В связи с этим актуальной является разработка методики оценки энергетической эффективности устройств разделения жидких сред методом вымораживания на основе энтропийного метода анализа.

**Методы исследования.** В работе предложена методика и произведен оценочный расчет энергетической эффективности криоконцентратора объемного принципа действия, оборудованного ступенью предварительного охлаждения и без неё. Криоконцентратор объемного принципа действия, оснащенный ступенью предварительного охлаждения представлен на рис. 1 [12].

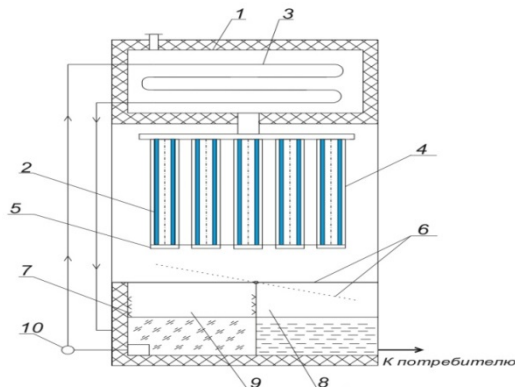


Рис. 1 – Криоконцентратор объемного принципа действия, оснащенный ступенью предварительного охлаждения

Fig. 1 – A volumetric cryoconcentrators equipped with a pre-cooling stage

В представленном криоконцентраторе разделительное вымораживание исходного жидкого продукта происходит внутри теплообменных труб 2, оснащенных охлаждающей рубашкой 4, внутри которой циркулирует охлаждающая среда. По достижению слоем льда заданной толщины намораживание завершается, поворотный стол 6 занимает соответствующее положение, открываются крышки 5 и полученный концентрат сливается в бак 8.

Затем поворотный стол занимает противоположное положение и начинается процесс оттайки льда, который заключается в подплавлении слоя льда, граничащего с теплообменной трубой, после чего лед благодаря собственному весу отделяется от труб и попадает в бак сборник льда 9.

Отличительной особенностью представленного аппарата является ступень предварительного охлаждения, состоящая из теплоизолированного бака 1, теплообменного аппарата 3, насоса 10 и форсунок 7. За счет циркуляции воды в ступени предварительного охлаждения происходит безмашинное охлаждение исходного жидкого продукта при помощи холодоаккумулирующей массы льда, получаемого в аппарате.

Исходя из геометрических размеров аппарата и рекомендованных режимов концентрирования для различных жидких продуктов [13-17], можно определить следующие параметры аппарата за цикл его работы: объем подаваемого в теплообменные трубы исходного жидкого продукта  $V_{ижп}$ , объем получаемого концентрата  $V_{конц}$  и массу образующегося льда  $m_{л}$ .

Общее время цикла концентрирования  $\tau_{ц}$  включает в себя время охлаждения  $\tau_{охл}$  [18] исходного жидкого продукта в теплообменной трубе от начальной температуры  $T_{н.ижп}$  до температуры кристаллизации воды  $T_{ф}$  и время образования слоя льда  $\tau_{зам}$  [19] заданной толщины  $\delta_{л}$ .

При расчете количества тепла, которое необходимо отвести от исходного жидкого продукта, нужно учитывать три составляющие:

– теплота, отводимая при охлаждении исходного жидкого продукта  $E_{охл}$  от начальной температуры до температуры кристаллизации воды:

$$E_{охл} = V_{ижп} \rho_{ижп} \cdot C_{р\ ижп} (T_{н\ ижп} - T_{ф}), \text{ Дж} \quad (1)$$

где:  $\rho_{ижп}$  – плотность исходного жидкого продукта;  $C_{р\ ижп}$  – теплоемкость исходного жидкого продукта;

– теплота, отводимая при фазовом превращении воды в лед  $E_{зам}$ :

$$E_{зам} = m_{л} \cdot L, \text{ Дж} \quad (2)$$

где  $L$  – скрытая теплота фазового перехода воды в лед.

– теплота, отводимая при охлаждении льда  $E_{пер.л}$  ниже температуры замерзания:

$$E_{пер.л} = m_{л} C_{р\ л} (T_{ф} - T_{л.ср}), \text{ Дж} \quad (3)$$

где  $C_{р\ л}$  – теплоемкость льда, намороженного за цикл работы аппарата, Дж/кгК;

$T_{л.ср}$  – средняя температура льда:

$$T_{л.ср} = \frac{T_{ф} + T_{ст}}{2}, \text{ К} \quad (4)$$

где  $T_{ст}$  – температура стенки теплообменной трубы.

Необходимую холодопроизводительность установки целесообразно определять отдельно для стадии охлаждения и стадии замораживания:

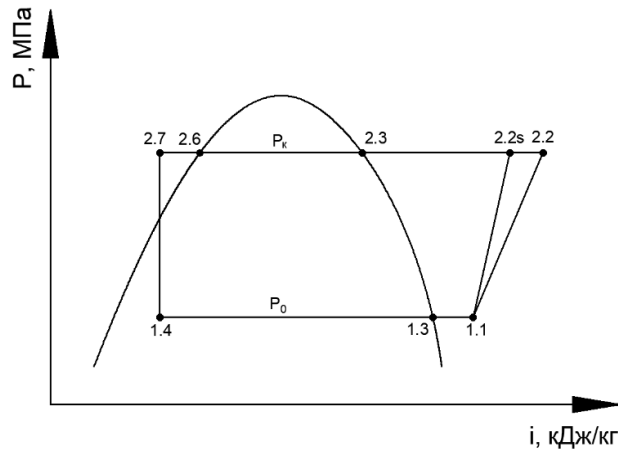
- для стадии охлаждения

$$Q_{0\ охл} = \frac{E_{охл}}{\tau_{охл}}, \text{ Вт} \quad (5)$$

- для стадии замораживания

$$Q_{0\ зам} = \frac{E_{зам} + E_{пер.л}}{\tau_{зам}}, \text{ Вт} \quad (6)$$

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0$  определяется в соответствии с термодинамическим циклом (рис. 2).



**Рис. 2 – Одноступенчатый термодинамический цикл в P-I диаграмме для парокомпрессионной холодильной машины**  
**Fig. 2 – A single-stage thermodynamic cycle in a P-I diagram for a vapor-compression refrigeration system**

Отсюда следует, что массовый расход холодильного агента  $G_{ха}$  для разных стадий работы криоконцентратора будет отличаться [20]:

- для стадии охлаждения

$$G_{ха\ охл} = \frac{Q_{0\ охл}}{q_0}, \text{ кг/с} \quad (7)$$

- для стадии замораживания

$$G_{ха\ зам} = \frac{Q_{0\ зам}}{q_0}, \text{ кг/с} \quad (8)$$

Стоит отметить, что для криоконцентраторов, работающих в условия непосредственного кипения хладагента в аппарате и с применением вторичного контура по хладоносителю будут отличаться минимальная работа сжатия компрессора и необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе.

*Для устройств с непосредственным кипением:*

- удельная работа на стадии охлаждения:

$$l_{км, \min\ охл} = q_0 \cdot \frac{T_{ижп.ср} - T_{\phi}}{T_{\phi}}, \text{ Дж/кг} \quad (9)$$

где  $T_{ижп.ср}$  – среднелогарифмическая температура исходного жидкого продукта:

$$T_{ижп.ср} = \frac{T_{н.ижп.н} - T_{\phi}}{\ln \frac{T_{н.ижп.н}}{T_{\phi}}}, \text{ К} \quad (10)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе для стадии охлаждения:

$$\Delta l_{и\ охл} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{ижп.ср} \cdot \left( \frac{T_{\phi} - T_0}{T_{\phi} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (11)$$

- удельная работа на стадии замораживания:

$$l_{км, \min\ зам} = q_0 \cdot \frac{T_{\phi} - T_{л.ср}}{T_{л.ср}}, \text{ Дж/кг} \quad (12)$$

где  $T_{л.ср}$  – среднелогарифмическая температура льда:

$$T_{л.ср} = \frac{T_{\phi} - T_0}{\ln \frac{T_{\phi}}{T_0}}, \text{ К} \quad (13)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе на стадии замораживания:

$$\Delta l_{и\ зам} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\phi} \cdot \left( \frac{T_{л.ср} - T_0}{T_{л.ср} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (14)$$

*Для устройств с вторичным контуром по хладоносителю:*

- удельная работа на стадии охлаждения:

$$l_{км, \min\ охл} = q_0 \cdot \frac{T_{хс\ вход1} - T_{хс\ выход}}{T_{хс\ выход}}, \text{ Дж/кг} \quad (15)$$

где  $T_{\text{хс.вход1}}$  – температура хладоносителя на входе в испаритель (принимается на 3-5 К ниже средней температуры исходного жидкого продукта  $T_{\text{ижп.ср}}$ ), К;

$T_{\text{хс.выход}}$  – температура хладоносителя на выходе из испарителя (принимается на 2-3 К ниже, чем рекомендованная температура  $T_{\text{ст}}$  [13-17]), К.

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе для стадии охлаждения:

$$\Delta l_{\text{и охл}} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\text{хс.вход1}} \cdot \left( \frac{T_{\text{хс.выход}} - T_0}{T_{\text{хс.выход}} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (16)$$

- удельная работа на стадии замораживания:

$$l_{\text{км, min зам}} = q_0 \cdot \frac{T_{\text{хс.вход2}} - T_{\text{хс.выход}}}{T_{\text{хс.выход}}}, \text{ Дж/кг} \quad (17)$$

где  $T_{\text{хс.вход2}}$  – температура хладоносителя на входе в испаритель (принимается на 2-3 К ниже среднелогарифмической температуры льда  $T_{\text{л ср.2}}$ ), К:

$$T_{\text{л ср.2}} = \frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{ст}}}{\ln \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{ст}}}}, \text{ К} \quad (18)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе на стадии замораживания:

$$\Delta l_{\text{и зам}} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\text{хс.вход2}} \cdot \left( \frac{T_{\text{хс.выход}} - T_0}{T_{\text{хс.выход}} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (19)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия в компрессоре при перегреве  $\Delta l_{\text{пер}}$ , дросселировании  $\Delta l_{\text{др}}$  и конденсации  $\Delta l_{\text{кд}}$  хладагента для криоконцентраторов, работающих в условиях непосредственного кипения хладагента в аппарате и с применением вторичного контура по хладоносителю будут рассчитываться по следующим выражениям [21]:

$$\Delta l_{\text{пер}} = T_{\text{ос}} \cdot (s_{1.1} - s_{1.3}) - (i_{1.1} - i_{1.3}), \text{ Дж/кг} \quad (20)$$

$$\Delta l_{\text{др}} = T_{\text{ос}} \cdot (s_{1.4} - s_{2.7}), \text{ Дж/кг} \quad (21)$$

$$\Delta l_{\text{кд}} = \Delta l_{\text{пк}} + \Delta l_{\text{кк}}, \text{ Дж/кг} \quad (22)$$

где  $\Delta l_{\text{пк}}$  – необходимые удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при охлаждении паров хладагента до температуры насыщения:

$$\Delta l_{\text{пк}} = (i_{2.2} - i_{2.3}) - T_{\text{ос}} \cdot (s_{2.2} - s_{2.3}), \text{ Дж/кг} \quad (23)$$

$\Delta l_{\text{кк}}$  – необходимые удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при конденсации паров хладагента в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{кк}} = T_{\text{ос}} \cdot (i_{2.3} - i_{2.7}) \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{ос}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}} \right), \text{ Дж/кг} \quad (24)$$

Величину работы сжатия находим отдельно для каждой стадии работы криоконцентратора

- для стадии охлаждения

$$l_{\text{км охл}} = l_{\text{км, min охл}} + \Delta l_{\text{и охл}} + \Delta l_{\text{пер}} + \Delta l_{\text{др}} + \Delta l_{\text{кд}}, \text{ Дж/кг} \quad (25)$$

- для стадии замораживания

$$l_{\text{км зам}} = l_{\text{км, min зам}} + \Delta l_{\text{и зам}} + \Delta l_{\text{пер}} + \Delta l_{\text{др}} + \Delta l_{\text{кд}}, \text{ Дж/кг} \quad (26)$$

Энергопотребление холодильной установки за цикл работы можно выразить как:

$$W_{\text{км}} = (l_{\text{км}} \cdot G_{\text{ха}} \cdot \tau)_{\text{охл}} + (l_{\text{км}} \cdot G_{\text{ха}} \cdot \tau)_{\text{зам}}, \text{ Дж} \quad (27)$$

Для криоконцентраторов, оснащенных ступенью предварительного охлаждения исходного жидкого продукта необходимо принимать во внимание энергопотребление циркуляционного насоса за цикл работы установки:

$$W_{\text{нас}} = P_{\text{нас}} \cdot \tau_{\text{ц}}, \text{ Дж} \quad (28)$$

где  $P_{\text{нас}}$  – мощность циркуляционного насоса, Дж/с.

Оценку энергетической эффективности криоконцентратора будем проводить по удельному показателю энергопотребления, характеризующему количество затраченной энергии на производство 1 литра концентрата:

$$w_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{км}} + W_{\text{нас}}}{V_{\text{конц}}}, \frac{\text{Дж}}{\text{л}} \quad (29)$$

Отметим, что в случае отсутствия ступени предварительного охлаждения слагаемое  $W_{\text{нас}}$  в уравнении (29) также отсутствует.

**Обсуждение результатов.** По разработанной методике авторами была выполнена сравнительная оценка энергоэффективности криоконцентратора с вторичным контуром по хладоносителю, оснащенного ступенью предварительного охлаждения и без нее. Расчет произведен по следующим исходным данным. Исходный жидкий продукт – вишневый сок с температурой  $T_{\text{ижп}} = 293$  К. Доля вымораживаемой влаги  $\varphi = 0,55$ , температура стенки кристаллизатора  $T_{\text{ст}} = 268$  К [15]. Необходимая производительность аппарата  $\Pi = 50$  л/ч. Теплообменная труба кристаллизатора: диаметр - 85x2,5, длина -  $H_{\text{тр}} = 1$  м, материал - нержавеющая пищевая сталь 08X18H10T, диаметр корпуса аппарата кристаллизатора - 114x3. Хладоноситель – пропиленгликоль. Холодильный агент - R404A. Температура исходного жидкого продукта, поступающего в теплообменные трубы, составляет  $T_{\text{н.ижп}} = 278$  К и  $T_{\text{н.ижп}} = 293$  К в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения. В соответствии с рекомендациями по концентрированию вишневого сока и принятыми геометрическими размерами теплообменной трубы расчетная толщина слоя льда для указанных выше случаев:  $\delta_{\text{л}} = 0,0132$  м. Время необходимое для цикла концентрирования представлено в табл. 1.

**Таблица 1. Время цикла концентрирования**  
**Table 1. Concentration cycle time**

$T_{\text{н.ижп}}, \text{К}$	Время охлаждения, $\tau_{\text{охл}}, \text{с}$	Время замораживания, $\tau_{\text{зам}}, \text{с}$	Общее время цикла $\tau_{\text{ц}}, \text{с}$
278	351	5060	5411
293	814	5060	5874

Для обеспечения заданной производительности криоконцентратора понадобится 34 и 37 теплообменных труб в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения. Результаты расчета необходимой холодопроизводительности представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Необходимая холодопроизводительность**  
**Table 2. Required cooling capacity**

$T_{\text{н.ижп}}, \text{К}$	$Q_{0 \text{ охл}}, \text{кВт}$	$Q_{0 \text{ зам}}, \text{кВт}$
278	9,9	5,1
293	18,3	6,3

С целью проведения дальнейшего анализа был произведен расчет параметров узловых точек термодинамического цикла. Расчет произведен в соответствии со следующими данными: холодильный агент R404A, температура кипения  $-12^{\circ}\text{C}$ , температура конденсации  $+45^{\circ}\text{C}$ , перегрев 10 К, переохлаждение 5 К. Результаты расчета представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Параметры холодильного агента R404A в узловых точках цикла**  
**Table 3. Parameters of refrigerant R404A at key points in the cycle**

Точка	Давление $P, \text{МПа}$	Температура $T, \text{К}$	Энтальпия $i, \text{кДж/кг}$	Энтропия $s, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$
1.4	0,4	263	259	1,23
1.3	0,4	263	360	1,614
1.1	0,4	271	369	1,648
2.2	2,04	341	412	1,674
2.2s	2,04	334	403	1,648
2.3	2,04	318	381	1,579
2.6	2,04	318	268	1,226
2.7	2,04	313	259	1,199

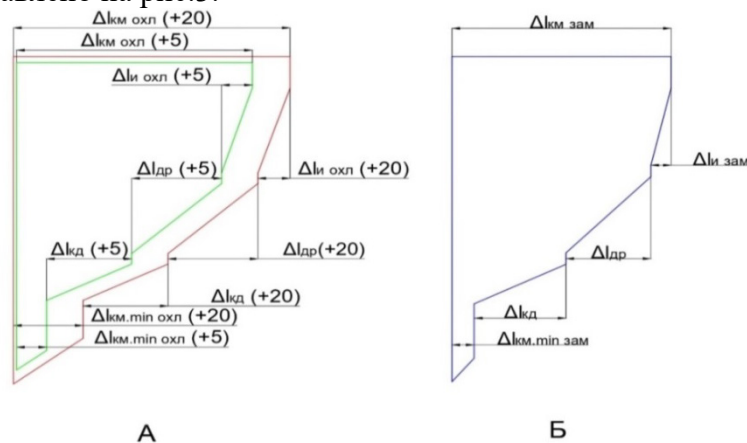
Значения удельных затрат работы на компенсацию производства энтропии в элементах холодильной установки представлены в табл.4.

**Таблица 4. Удельные затраты работы на компенсацию производства энтропии в элементах холодильной установки**

**Table 4. Specific energy consumption for entropy compensation in refrigeration system components**

R404A	278 К	293 К
Удельная работа для производства холода при охлаждении исходного жидкого продукта $\Delta l_{\text{км.мин охл}}$ , кДж/кг/ specific work for the production of cold during cooling of the initial liquid product	1,707	4,512
Удельная работа для производства холода при ледообразовании и переохлаждении льда $\Delta l_{\text{км.мин зам}}$ , кДж/кг / specific work for the production of cold during ice formation and supercooling of ice	0,567	0,567
Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{\text{кд}}$ /specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the condenser	10,36	10,36
Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{\text{др}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for entropy production during throttling	9,238	9,238
Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при охлаждении исходного жидкого продукта $\Delta l_{\text{и охл}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the evaporator when cooling the initial liquid product	1,968	2,021
Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при ледообразовании $\Delta l_{\text{и зам}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the evaporator during ice formation	1,946	1,946
Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при перегреве хладагента $\Delta l_{\text{пер}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy during superheating of the refrigerant	1,132	1,132
Суммарная работа на стадии охлаждения $\Delta l_{\text{км охл}}$ , кДж/кг/ Total work at the cooling stage	24,41	27,27
Суммарная работа на стадии заморозания $\Delta l_{\text{км зам}}$ , кДж/кг/ Total work at the freezing stage	23,25	23,25

Графически распределение работ на компенсацию энтропии в элементах холодильной установки представлено на рис.3.



**Рис. 3 – Расчетное распределение работ на компенсацию энтропии в элементах холодильной установки: А- охлаждение (зеленая линия+5; красная линия +20), Б – заморозание**

**Fig. 3 – Calculated distribution of work for entropy compensation in the refrigeration system components A - cooling (green line +5; red line +20), Б – freezing**

Принимая во внимание изменение необходимой холодопроизводительности установки на стадии охлаждения и стадии замораживания, произведем расчет расхода хладагента и энергопотребления холодильной установки за цикл работы (табл. 5).

Для реализации циркуляции воды в ступени предварительного охлаждения выбран циркуляционный насос с мощностью 35 Дж/с. Энергопотребление выбранного циркуляционного насоса за один цикл концентрирования составит  $W_{\text{нас.р}} = 189385$  Дж

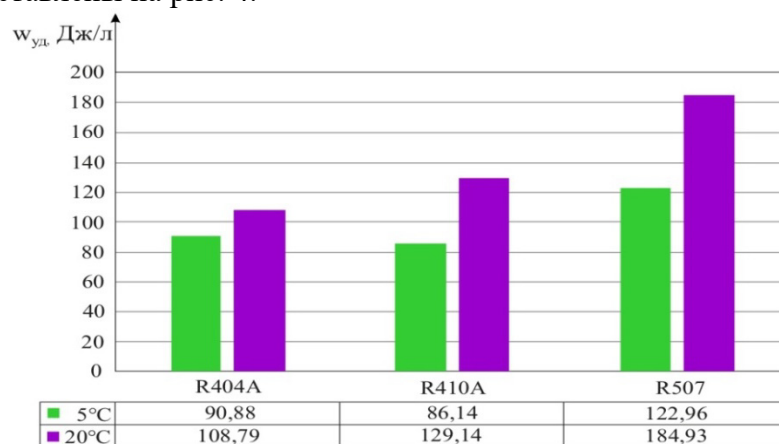
**Таблица 5. Массовый расход холодильного агента и энергопотребление холодильной установки**

**Table 5. Refrigerant mass flow rate and energy consumption of the refrigeration system**

$T_{н.ижп}, K$	$G_{ха\ охл}, кг/с$	$G_{ха\ зам}, кг/с$	$W_{км}, кДж$
278	0,098	0,05	6779
293	0,181	0,062	9072

Таким образом, удельный показатель энергопотребления криоконцентратора составит  
 - для установки оснащенной предварительной ступенью охлаждения  
 $T_{н.ижп} = 278 K: w_{уд} = 90,88 \text{ Дж/л};$   
 - для установки без ступени предварительного охлаждения  
 $T_{н.ижп} = 293 K: w_{уд} = 108,79 \text{ Дж/л}.$

Аналогичным образом для выбранных условий теплообмена произведен расчет удельного показателя энергопотребления для установок, работающих на холодильных агентах R410A и R507. Графически результаты сравнения удельных показателей энергопотребления представлены на рис. 4.



**Рис. 4 – Диаграмма удельного показателя энергопотребления криоконцентратора в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения для хладагентов R404A, R410A и R507**

**Fig. 4 – Diagram of the specific energy consumption of a cryoconcentrators depending on the presence of a pre-cooling stage for refrigerants R404A, R410A and R507**

Представленные результаты позволяют говорить о целесообразности применения ступени без машинного предварительного охлаждения исходного жидкого продукта. Стоит отметить, что тенденция снижения удельного показателя энергопотребления сохраняется при рассмотрении установки, работающей на разных холодильных агентах, что также говорит в пользу применения ступени предварительного охлаждения.

**Вывод.** Разработана методика сравнительной оценки энергетической эффективности холодильной установки на основе анализа производства энтропии в процессе работы установки. Отличие разработанной методики от известных заключается в возможности ее применения для устройств, работающих в условиях ледообразования, в том числе оснащенных ступенью предварительного охлаждения.

Таким образом, разработанная методика позволяет делать выводы об энергетической эффективности различных конструктивных решений для криоконцентраторов, ледогенераторов и холодоаккумуляторов объемного принципа действия. Произведен оценочный расчет, показавший снижение удельного показателя энергопотребления примерно на 16% за счет использования ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта.

#### Библиографический список:

1. Си Д. Применение технологии криоконцентрирования в процессах очистки воды // Оригинальные исследования. – 2024. – № 4 т. 14. – С. 65-69.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Мордынский В.П., Сиротюк И.В., Фатеева Я.А. Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта "термического парадокса" // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 1(53). – С. 42-58.

3. Булгаков, С.В., Садыкова А.В. Деминерализация засоленной оборотной воды нефтепереработки вымораживанием // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 6. – С. 36-40.
4. Plotnikov I.B., Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Plotnikova L.V. Modernization of the mechatronic water treatment module for processing plants of the agro-industrial complex // *Eurasian Physical Technical Journal*. –2023. – Vol. 20. – P. 99-110.
5. Патент № 2776583 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/06, B01D 9/04, C02F 1/22. Способ концентрирования неорганических жидких радиоактивных отходов: № 2021132237: заявл. 04.11.2021: опубл. 22.07.2022 / А.М. Скоробогатов.
6. Архаров, А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. 512 с.
7. Zdobnov M.I., Lavrov N.A., Shishov V.V. Entropy Analysis of Energy Losses in Heat-Exchanger and Mixing Sections of a Central Air Conditioner. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023;58:943-952.
8. Талызин М.С. Методы анализа энергоэффективности холодильных установок // *Холодильная техника*. – 2021. – № 1. – С. 23-30.
9. Архаров А.М., Шишов В.В. Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию необратимости рабочих процессов систем кондиционирования // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*. – 2013. – № 2(91). – С. 84-97.
10. Осипенко В.В., Лавров Н.А. Анализ потерь в фанкойлах с помощью энтропийно-статистического метода // *Холодильная техника*. – 2022. – № 1. – С. 5-12.
11. Кудров Ю.В. Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 16-25.
12. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57 (7–8). – P. 561–566.
13. Патент № 2805851 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04, A23C17/00. Способ криоконцентрирования молочной сыворотки: № 2023105985: заявл. 15.03.2023: оп. 24.10.23/В.А.Ермолаев, Д.Е.Федоров.
14. Патент № 2805848 С1 Российская Федерация, МПК A23L2/02. Способ криоконцентрирования грейпфрутового сока: № 2023105966: заявл. 15.03.2023: опубл. 24.10.2023/В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
15. Патент № 2818334 С1 Российская Федерация, МПК A23L 2/02, A23L 2/08. Способ криоконцентрирования вишневого сока: №2023132221: заявл.07.12.2023: опубл.02.05.2024/В.А.Ермолаев, Д.Е.Федоров.
16. Патент № 2803875 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Способ криоконцентрирования плазмы крови убойных животных: № 2023105972: заявл. 15.03.2023: опубл. 21.09.2023/В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
17. Патент № 2805850 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04, A23C 17/00. Способ криоконцентрирования пашты: № 2023105970: заявл. 15.03.2023: опубл. 24.10.2023 / В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
18. Ястребов А.Л. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах. –Л.: Стройиздат, 1972 г. 175 с.
19. Угольников М.А. Моделирование процессов теплообмена при наморживании водного льда на неизолированных элементах низкотемпературного оборудования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2017. – 140 с.
20. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Термодинамические циклы холодильных машин и тепловых насосов: расчет, оценка эффективности: учебное пособие. – М.: МГУИЭ, 2006. 91 с.
21. Талызин, М.С. Разработка методики определения потерь в холодильных установках энтропийно-статистическим методом и ее применение для предприятий пищевой промышленности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2018. – 141 с.

#### References:

1. Xi D. Application of cryoconcentration technology in water treatment processes. Original research. 2024; 4:65-69. (In Russ)
2. Burdo O.G., Terziev S. G., Mordynskiy V.P., Sirotiyuk I.V., Fateeva Ya.A. Multifunctional Equipment for Low-temperature Separation of Food Solutions Based on The Effect of “Thermal Paradox”. *Problemele energeticii regionale*. 2022; 1:42-58. (In Russ)
3. Bulgakov S.V., Sadykova A.B Demineralization of saline recycled oil refining water by freezing. *Water: chemistry and ecology*. 2023; 6: 36-40. (In Russ)
4. Plotnikov I.B., Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Plotnikova L.V. Modernization of the mechatronic water treatment module for processing plants of the agro-industrial complex. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2023; 20: 99-110.
5. Patent of the Russian Federation No 2776583 C1, IPC G21F 9/06, B01D 9/04, C02F 1/22. Method for concentrating inorganic liquid radioactive waste: No 2021132237: declared. 04.11.2021: publ. 22.07.2022 / A.M. Skorobogatov. (In Russ)
6. Arkharov A.M. Fundamentals of Cryology. Entropy-Statistical Analysis of Low-Temperature Systems. M.: Bauman Moscow State Technical University. 2014; 512. (In Russ)

7. Zdobnov M.I., Lavrov N.A., Shishov V.V. Entropy Analysis of Energy Losses in Heat-Exchanger and Mixing Sections of a Central Air Conditioner. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 58:943-952.
8. Talyzin M.S. Energy-efficiency analysis methods for refrigeration plants. *Refrigeration Technology*. 2021; 1:23-30. (In Russ)
9. Arkharov A.M., Shishov V.V. Entropic and statistical analysis of energy expenditure distribution to compensate for irreversibility of working processes of air conditioning systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost. Spetsvyp.* 2013; 2:84-97. (In Russ)
10. Osipenko V.V, Lavrov N.A. Analysis of losses in fan coil units by using the entropy-statistical method. *Refrigeration Technology*. 2022; 1:5-12. (In Russ)
11. Kudrov Yu.V. Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 4: 16-25. (In Russ)
12. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021; 57:561–566.
13. Patent of the Russian Federation No2805851 C1, IPC B01D 9/04, A23C17/00. Method of cryoconcentration of whey: No 2023105985: declared.15.03.2023: publ.24.10.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
14. Patent of the Russian Federation No2805848 C1 IPC A23L 2/02. Method for cryoconcentration of grapefruit juice: No 2023105966: declared. 15.03.2023: publ. 24.10.2023.V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
15. Patent of the Russian Federation No2818334 C1 IPC A23L 2/02, A23L 2/08. Method of cryoconcentration of cherry juice: No 2023132221: declared. 07.12.2023: publ. 02.05.2024. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov.
16. Patent of the Russian Federation No № 2803875 C1 IPC B01D 9/04. Method for cryoconcentration of blood plasma from slaughtered animals: No 2023105972: declared. 15.03.2023: publ. 21.09.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
17. Patent of the Russian Federation No 2805850 C1 IPC B01D 9/04, A23C 17/00. Method of cryoconcentration of buttermilk: No 2023105970: declared. 15.03.2023: publ. 24.10.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov.
18. Iastrebov A.L. Engineering communications on permafrost soils. L.: Stroizdat. 1972; 175. (In Russ)
19. Ugolnikova M.A. Modeling of heat transfer processes during freezing of water ice on uninsulated elements of low-temperature equipment: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 2017;140. (In Russ)
20. Kalnin' I.M., Fadegov K.N. Thermodynamic cycles of refrigeration machines and heat pumps: calculation, efficiency assessment: a tutorial. M.: MGUIE. 2006; 91. (In Russ)
21. Talyzin M.S. Development of a methodology for determining losses in refrigeration units using the entropy-statistical method and its application to food industry enterprises: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 2018;41. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Чернявская Варвара Васильевна, старший преподаватель кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [v\\_ch20@mail.ru](mailto:v_ch20@mail.ru); ORCID:0009-0005-5986-0165.

Сапожников Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru); ORCID:0009-0002-9252-8437.

Чернявский Александр Васильевич, аспирант кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [a\\_ch14@mail.ru](mailto:a_ch14@mail.ru); ORCID: 0009-0000-6964-4101.

Угольникова Мария Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [set-square@mail.ru](mailto:set-square@mail.ru); ORCID:0009-0009-2629-3001.

#### Information about authors:

Varvara V. Chernyavskaya, Senior lecturer, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [v\\_ch20@mail.ru](mailto:v_ch20@mail.ru); ORCID:0009-0005-5986-0165.

Vladimir B. Sapozhnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru); ORCID:0009-0002-9252-8437.

Alexander V. Chernyavsky, Postgraduate Student, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [a\\_ch14@mail.ru](mailto:a_ch14@mail.ru); ORCID: 0009-0000-6964-4101.

Mariya A. Ugolnikova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [set-square@mail.ru](mailto:set-square@mail.ru); ORCID:0009-0009-2629-3001.

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 08.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 01.11.2025.