

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.576.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36



Оригинальная статья /Original article

Перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернатива абсорбционной

М.В. Шамаров¹, Е.Г. Степанова¹, А.В. Колинко¹, А.М. Шамаров²

¹Кубанский государственный технологический университет,

¹350072, г. Краснодар, ул.Московская, 2,Россия,

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,

²115054, Москва, Стремянный переулок, 36, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернативы абсорбционной. **Метод.** Исследование проводилось с помощью численного эксперимента и проверки полученных результатов на экспериментальном стенде. **Результат.** Проведен анализ применения традиционной абсорбционной холодильной машины и мембранной холодильной машины с точки зрения энергоэффективности и количества рабочих элементов. Приведены для сравнения методики расчета процесса разделения смеси «абсорбент-холодильный агент» на основе процессов обратного осмоса и водоаммиачной абсорбционной холодильной установки. **Вывод.** Применение для производства холода в смесевых холодильных машинах процессов разделения в мембранных аппаратах, как альтернативы абсорбционным холодильным машинам, позволит обеспечить более стабильный процесс получения холодильного агента из смеси, снизит материальные затраты на производство холодильной установки и повысит энергоэффективность холодильной установки, работающей на смесевых компонентах.

Ключевые слова: холодильная установка, абсорбция, разделительная мембрана, селективность, площадь разделения, абсорбент, холодильный агент

Для цитирования: М.В. Шамаров, Е.Г. Степанова, А.В. Колинко, А.М. Шамаров. Перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернатива абсорбционной. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):26-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36

Prospects for the use of a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption

M.V. Shamarov¹, E.G. Stepanova¹, A.V. Kolinko¹, A.M. Shamarov²

¹Kuban State Technological University,

¹ 2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia,

² G.V. Plekhanov Russian Economic University,

² 36 Stremyanny lane, Moscow 115054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the prospects for using a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption. **Method.** The study was carried out using a numerical experiment and verification of the results obtained on an experimental bench. **Result.** An analysis was made of the use of a traditional absorption refrigeration machine and a membrane refrigeration machine from the point of view of energy efficiency and the number of working elements. Presented for comparison are methods for calculating the separation process of the “absorbent-refrigerant” mixture based on reverse osmosis processes and a water-ammonia absorption refrigeration unit. **Conclusion.** The use of separation processes in membrane apparatuses for the production of cold in mixed refrigeration machines, as an alternative to absorption refrigeration machines, will ensure a more stable process for obtaining

refrigerant from the mixture, reduce material costs for the production of a refrigeration unit and increase the energy efficiency of a refrigeration unit operating on mixed components .

Keywords: refrigeration unit, absorption, separation membrane, selectivity, separation area, absorbent, refrigerating agent

For citation: M.V. Shamarov, E.G. Stepanova, A.V. Kolinko, A.M. Shamarov. Prospects for the use of a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):26-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36

Введение. Процессы тепло- и массообмена в одноступенчатой абсорбционной холодильной машине (рис. 1) осуществляются с помощью ее основных элементов: генератора, конденсатора, дроссельного вентиля для хладагента, испарителя, дроссельного вентиля для раствора абсорбента, абсорбера и насоса раствора хладагент-абсорбент.

Тепловой расчет абсорбционной холодильной машины имеет цель определить полные и удельные тепловые потоки в аппаратах, теплового коэффициента машины и энергии, затрачиваемой в насосе раствора. Машины, работающие на водоаммиачном растворе, позволяют обеспечивать широкий спектр получаемых низких температур.

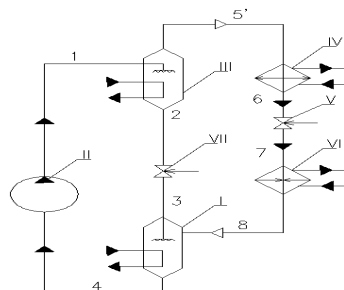


Рис. 1. Абсорбционная холодильная машина без теплообменника и ректификатора: I - абсорбер, II - насос раствора, III - генератор, IV - конденсатор, V - регулирующий вентиль хладагента, VI - испаритель, VII - регулирующий вентиль раствора

Fig. 1. Absorption refrigeration machine without heat exchanger and rectifier: I - absorber, II - solution pump, III - generator, IV - condenser, V - refrigerant control valve, VI - evaporator, VII - solution control valve

Постановка задачи. На рис. 2 приведены процессы, которые описывают цикл работы абсорбционной холодильной машины [7, 9, 14, 16, 22]. Температурный режим работы машины определяется тремя независимыми параметрами внешних источников теплоты: высшей температурой греющего источника T_{h1} , низшей температурой охлаждающей воды T_{w1} , являющейся температурой окружающей среды, определяющей процесс конденсации и низшей температурой охлаждаемого вещества T_{p2} – источника низкой температуры.

По известным или заданным температурным параметрам внешних источников определяются параметры жидкой и паровой фаз раствора в узловых точках циклов и изображаются процессы в термодинамической диаграмме (рис.2).

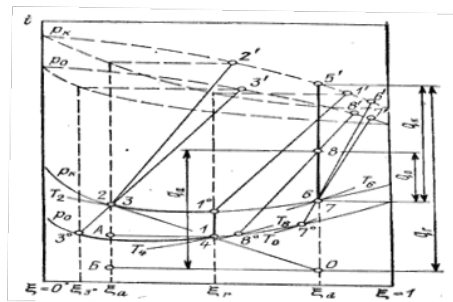


Рис. 2. Процессы, происходящие в абсорбционной холодильной машине в ξ -i диаграмме

Fig. 2. Processes occurring in an absorption refrigeration machine in the ξ -i diagram

В основе работы абсорбционной холодильной машины лежит процесс разделения смеси на хладагент и абсорбент, этот процесс происходит в генераторе при подводе

значительного количества теплоты. При этом хладагент, как вещество с нижекипящей температурой выпаривается из раствора абсорбента и далее поступает, как в обычной парокомпрессионной холодильной машине в конденсатор и через регулирующий вентиль, дросселируется в испаритель, где отбирает теплоту от объекта или потока холодоносителя.

Слабый раствор, дросселируется параллельно в абсорбер, где поглощает пары хладагента, образующиеся и выходящие из испарителя (рис.1) [8, 10- 12, 17- 19]. Процесс разделения основывается на фазовом переходе хладагента, однако если процесс разделения осуществить без фазовых превращений хладагента в пар и обратно в жидкость, то можно получить более эффективный и экономичный режим работы холодильной машины, без значительных затрат тепловой энергии (рис. 3). Такой процесс разделения, без фазового перехода, возможно осуществить, применив для разделения аппараты и процессы мембранного разделения жидких растворов [1].

Методы исследования. Проведем сравнительный анализ энергетических показателей работы абсорбционной холодильной машины и холодильной машины, использующей для разделения мембранные модули, изготовленные на базе промышленно выпускаемой композиционной мембраны марки «Лестосил», которая состоит из тонкой пленки лестничного сополимера – поли (диметилсилоксана-ди(фенилсилоксана)), толщиной 5 мкм, нанесенной на подложку из фторопласта, который, в свою очередь, нанесен на капроновую сетку. Фторопластовая подложка и капроновая сетка являются дренажом мембраны и обеспечивают механическую прочность. Данный полимерный материал устойчив к среде аммиака и не теряет своих свойств (проницаемость, селективность) при длительной работе.

Исследование проводилось с помощью численного эксперимента и проверкой полученных результатов на экспериментальном стенде для исследования процесса мембранного разделения. [3, 4,13] Поскольку в испарителе обеих машин будет поступать не чистый хладагент, а его смесь с абсорбентом расчетное давление кипения P_0 уменьшаются на величину $\Delta P_0 = (0,01 \div 0,005)$ МПа, тогда $P_0 = P'_0 - \Delta P_0$. По значению T_0 определяется высшая температура кипения в испарителе $T_8 = T_0 + \Delta T$. Значение $(T_8 - T_0)$ зависит как от конструктивных особенностей испарителя, так и от концентрации исходного или кипящего раствора. Чем будет слабее концентрация раствора в испарителе, тем эта разность будет больше.

Рассмотрим устройство водоаммиачной смесевой холодильной установки, в которой для процесса разделения смеси, в которой хладагентом является аммиак, а вода абсорбентом, применяются полуволоконные мембраны. При этом для такой схемы холодильной установки нет необходимости использовать генератор с источником теплоты и конденсатор, так как разделение смеси на компоненты будет осуществляться в мембранном блоке без изменения агрегатного состояния холодильного агента [2, 15].

На рис. 3 представлена схема одноступенчатой мембранной абсорбционной холодильной установки.

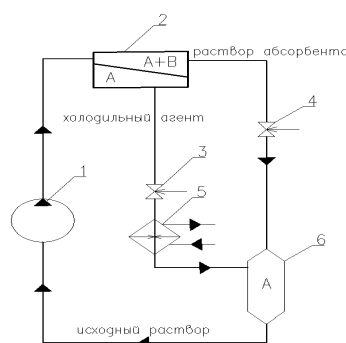


Рис. 3. Мембранная абсорбционная холодильная установка: 1 - насос, 2 – мембранный блок, 3, 4 – регулирующие вентили, 5 – испаритель, 6 – абсорбер

Fig. 3. Membrane absorption refrigeration unit: 1 - pump, 2 - membrane block, 3, 4 - control valves, 5 – evaporator, 6 – absorber

Модуль с полуволоконными или трубчатыми мембранами для разделения жидких смесей состоит из пучка (связки) мембран в виде полых волокон-капилляров или труб, расположенных параллельно друг другу и заключенных в кожухе.

Пространство между мембранами ограничено кожухом модуля и рассматривается как внешнее пространство мембран. На кожухе с обеих противоположных сторон для подачи и отвода потока имеются патрубки, соединенные с внешним пространством мембран, и коллекторы, соединенные с внутренним пространством мембран.

Процессы течения во внутреннем и внешнем объеме мембран с поперечным проникновением из внутреннего объема мембран во внешний объем модуля описан работе [3].

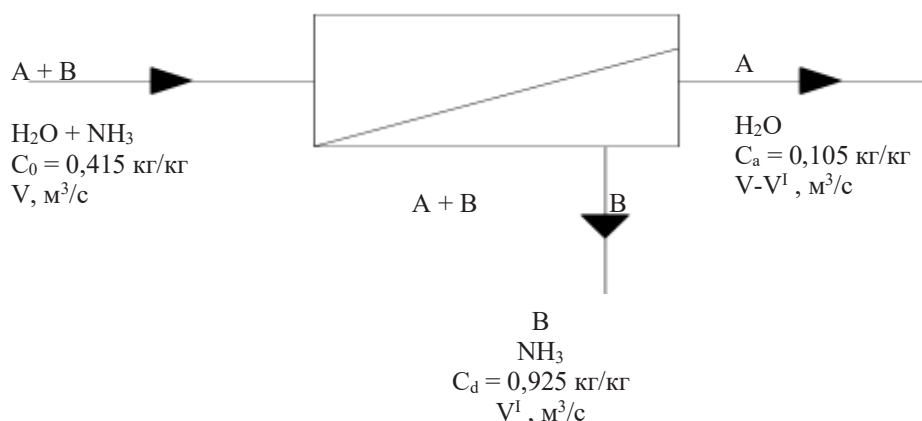


Рис. 4. Мембранный модуль

Fig. 4. Membrane module

В мембранном модуле, представленном на рис. 4, рассматривается следующее соотношение потоков: $A+B$ – исходная смесь для разделения; A – растворитель (H_2O – абсорбент; B – компонент, растворенный в растворителе (NH_3 – хладагент).

Обсуждение результатов. Осуществим расчет цикла работы и сопоставим энергетические показатели классической абсорбционной холодильной машины и мембранной абсорбционной холодильной машины. Для расчета циклов абсорбционных холодильных машин должны быть заданы следующие внешние условия: рабочее тело и абсорбент; высшая температура греющего источника; низшая температура охлаждающего источника (температура окружающей среды).

Для расчета циклов абсорбционных холодильных машин кроме перечисленных условий должна быть задана высшая температура охлаждаемого источника.

По заданным параметрам внешних источников, пользуясь термодинамическими диаграммами и таблицами термодинамических параметров равновесных фаз растворов, вписывают обратный цикл работы машины в диаграмму, определяют термодинамические параметры рабочего тела и абсорбента в узловых точках циклов, рассчитывают удельные тепловые потоки в аппаратах, составляют тепловой баланс машины и определяют значение теплового коэффициента, характеризующего термодинамическую эффективность циклов и схемы машины [20, 21].

Примем для анализа следующие параметры работы сравниваемых холодильных машин. Рассчитаем тепловые потоки водоаммиачной абсорбционной холодильной машины без теплообменника и ректификатора.

Исходные данные для расчета: давление греющего насыщенного пара P_g , МПа – 0,5886; температура охлаждающей воды T_{w1} , К – 293; температура охлаждаемого рассола T_{s2} , К – 263.

Принятые значения температур и давлении раствора следующие. Температура греющего пара при $p_g = 0,5886$ МПа примерно равна $T_g = 430$ К.

Высшая температура кипения раствора в генераторе составит: $T_2 = T_g - \Delta T = 430 - 7 = 423$ К. Низшая температура раствора в конденсаторе $T_6 = T_{w1} + \Delta T = 293 + 5 = 298$ К.

Давление в конденсаторе и генераторе определяется по температуре конденсации чистого аммиака $T = 298$ К, что составляет $p = 1,0006$ МПа.

Низшая температура раствора в абсорбере при условии параллельной подачи воды в конденсатор и абсорбер составит:

$$T_4 = T_{w1} + \Delta T = 293 + 5 = 298 \text{ К.}$$

Высшая температура раствора в испарителе: $T_8 = T_{s2} = 263$ К. Низшая температура раствора в испарителе (при обязательном условии $\xi_7 < \xi_d$):

$$T_0 = T_7 = T_{s2} - \Delta T = 263 - 4 = 259 \text{ К}$$

Давление в испарителе и абсорбере: $p_0 = p'_0 - \Delta p_0 = 0,2466 - 0,0504 = 0,1962$ МПа,

где p'_0 – давление насыщенного аммиачного пара при $T_0 = 259$ К.

По диаграмме $\xi - I$ для водоаммиачного раствора с учетом исходных данных определены параметры узловых точек цикла работы, согласно рис. 2 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры узловых точек цикла работы

Table 1. Parameters of work cycle nodes

Состояние вещества/ State of matter	T, К	p, МПа	ξ , кг/кг	i, Дж/кг
Жидкость/ Liquid:				
после генератора state of matter	$T_2 = 423$	$p = 1,0006$	$\xi_a = 0,105$	561,46
после абсорбера after the absorber	$T_4 = 298$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_r = 0,415$	-142,46
в начале кипения в генераторе at the beginning of boiling in the generator	$T_1 = 352$	$p = 1,0006$	$\xi_r = 0,415$	111,04
после конденсатора after the capacitor	$T_6 = 298$	$p = 1,0006$	$\xi_d = 0,878$	20,95
в конце кипения в испарителе at the end of boiling in the evaporator	$T_8 = 263$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_8 = 0,726$	-228,36
Пар: Steam:				
равновесный крепкому раствору в генераторе equilibrium with a strong solution in the generator	$T_1 = 352$	$p = 1,0006$	$\xi_{1'} = 0,970$	1470,69
равновесный слабому раствору в генераторе equilibrium with a strong solution in the generator	$T_2 = 423$	$p = 1,0006$	$\xi_{2'} = 0,535$	2136,9
в конце кипения в испарителе at the end of boiling in the evaporator	$T_8 = 263$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_d = 0,878$	609,64
выходящий из генератора при $\xi_m = 0,260$ кг/кг leaving the generator at $\xi_m = 0.260$ kg/kg.	$T_{5''} = 385$	$p = 1,0006$	$\xi_d = 0,878$	1657,14

В результате получим следующие удельные энергетические характеристики цикла работы абсорбционной холодильной машины.

Кратность циркуляции раствора составит:

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{0,878 - 0,105}{0,415 - 0,105} = 2,494 \quad \text{кг/кг.} \quad (1)$$

Удельная теплота, подводимая в генераторе:

$$q_a = i_{5'} - i_2 + f(i_2 - i_4) = 1657,14 - 561,46 + 2,494(561,46 + 142,46) = 2851,29 \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

Удельная теплота, отводимая в конденсаторе:

$$q_0 = i_8 - i_6 = 609,64 - 20,95 = 588,69 \text{ кДж/кг.} \quad (3)$$

Удельная теплота, подводимая в испарителе

$$q_0 = i_8 - i_6 = 609,64 - 20,95 = 588,69 \text{ кДж/кг.} \quad (4)$$

Удельная теплота, отводимая от абсорбера:

$$q_a = i_8 - i_2 + f(i_2 - i_4) = 609,64 - 561,46 + 2,494(561,46 + 142,46) = 1803,79 \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

Для тех же исходных данных проводится расчет удельных энергетических показателей работы для мембранной холодильной машины.

Разделение раствора на компоненты осуществляется без изменения агрегатного

состояния холодильного агента в модуле, оснащенном полуволоконными мембранами [5, 6].

При бесконечно тонкой мембране скорость уменьшения количества диффундирующего вещества в одной ячейке (объем V^I) равна скорости увеличения в другой (объем V^{II}) и определяется стационарным диффузионным потоком через мембрану:

$$\bar{V}^I dC^I = -V^{II} dC^{II} = -\frac{D \left(\bar{C}^{II} - \bar{C}^I \right)}{l} dl \quad (6)$$

Здесь C^I, C^{II} - концентрации диффундирующего вещества соответственно в объемах V^I и V^{II} , $\bar{C}^I, \bar{C}^{II}$ - концентрации диффундирующего вещества внутри мембраны у поверхностей, примыкающих соответственно к объемам V^I и V^{II} .

Из закона сохранения массы вещества следует:

$$V^I C^I + V^{II} C^{II} = (V^I + V^{II}) C_\infty = V^I C_0^I + V^{II} C_0^{II}. \quad (7)$$

После соответствующей подстановки из уравнения (7) в уравнение (6) получим дифференциальное уравнение разделения:

$$\frac{V^I V^{II}}{V^I + V^{II}} dC^I = -\frac{D \sigma}{l} S (C_\infty - C^I) dt, \quad (8)$$

где S - площадь мембраны.

При постоянно обновляющемся растворе в одной из секций ячейки, т. е. при $V^{II} \rightarrow \infty$,

$$\text{получаем} \quad \frac{C^I - C_0}{C_\infty - C_0} = \exp \left[\frac{D \sigma S}{V^I l} t \right], \quad (9)$$

где D - коэффициент диффузии; l - толщина мембраны;

σ - коэффициент растворимости, который определяется соотношением:

$$\sigma = \frac{\bar{C}^I}{C^I},$$

где $\bar{C}^I$ - концентрация диффундирующего вещества в объеме V^I ;

$\bar{C}$ - концентрация диффундирующего вещества внутри мембраны.

На основании материального баланса внутри мембранного блока определяем кратность циркуляции исходного и рабочего растворов:

$$V \cdot C_0 = V_I \cdot C_d + (V - V_I) \cdot C_a, \quad (10)$$

после преобразований получим:

$$\frac{V}{V_I} = \frac{C_d - C_a}{C_0 - C_a}. \quad (11)$$

Идентичность выражений (1) и (11) позволяет сделать вывод о том, что для построения процесса разделения в мембранном блоке и нахождения параметров растворов после разделения возможно применение методики аналогичной абсорбционной холодильной машине, с учетом отсутствия фазового перехода.

Для сопоставления параметров работы абсорбционной холодильной машины и мембранного блока примем, что холодопроизводительность обеих установок составит 500 кВт. При этих условиях массовый расход холодильного агента в абсорбционной холодильной установке составит:

$$m_0 = \frac{Q_0}{q_0}. \quad (12)$$

При разделении в мембране фазовый переход не осуществляется, поэтому в предельном состоянии разделения концентрацию получаемого вещества определяют по $I - \xi$ – диаграмме при пересечении луча $t = \text{const}$, проведенного от точки начала сжатия в насосе для давления разделения.

В рассматриваемом случае конечная концентрация холодильного агента (компонента В) составит $C_d = 0,925$ кг/кг. При этом удельная теплота, отводимая в испарителе, составит:

$$q_{0M} = (i_{1'_{\text{м}}} - i_{6_{\text{м}}}) \cdot C_d = (450 - 60) \cdot 0,925 = 360,75 \text{ ккал / кг} = 1510,46 \text{ кДж/кг} \quad (13)$$

Тогда количество жидкого холодильного агента, необходимого для отвода теплоты в испарителе составит:

$$m_{0M} = \frac{Q_0}{q_{0M}} = \frac{500}{1510,46} = 0,331 \text{ кг / с}.$$

Объемные расходы холодильного агента в обеих холодильных машинах, необходимые для работы насосов и определяющие эффективную площадь мембранного блока определяются по формуле:

$$V_I = \frac{m_0}{\rho_{\text{ХА}}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{ХА}}$ – плотность жидкого холодильного агента в испарителе, кг/м³.

Учитывая кратность циркуляции согласно (1) и (11). Получим, что объемный расход в обеих холодильных установках составит, м³/с:

$$V = f \cdot V_I. \quad (15)$$

Площадь мембранного блока F_M , м² определится по соотношению:

$$F_M = \frac{V \cdot \rho_{\text{ХА}}}{G},$$

где G – средняя проницаемость мембраны, моль/(м² С Па).

Для рассматриваемой мембраны «Листосил» по экспериментальным данным [5], средняя проницаемость аммиака составляет 4622 10-10 моль/(м² С Па).

Для начальной концентрации раствора хладагента, получаемого после разделения в мембранной холодильной установке в пределах от 0,787% (соответствующего работе АБХМ) до 0,992% проведен анализ энергетических и материальных параметров, влияющих на процессы разделения и ее холодопроизводительность.

Зависимость изменения удельной холодопроизводительности установки с учетом установившейся конечной концентрации представлена на рис. 5-7.

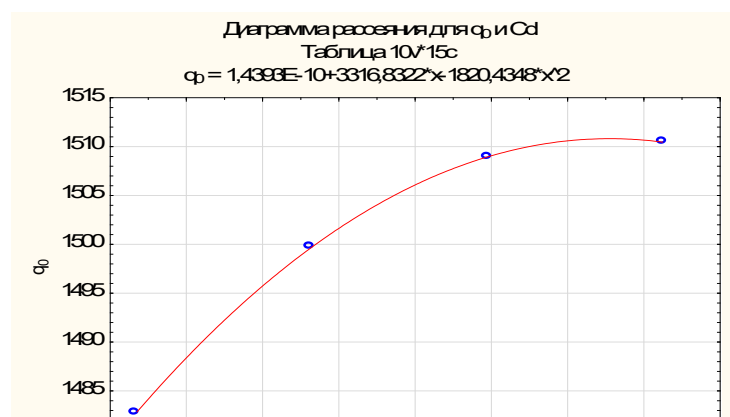


Рис. 5. Изменение удельной холодопроизводительности мембранной холодильной установки в зависимости от параметров разделения смеси

Fig. 5. Change in specific refrigeration capacity of a membrane refrigeration unit depending on the mixture separation parameters

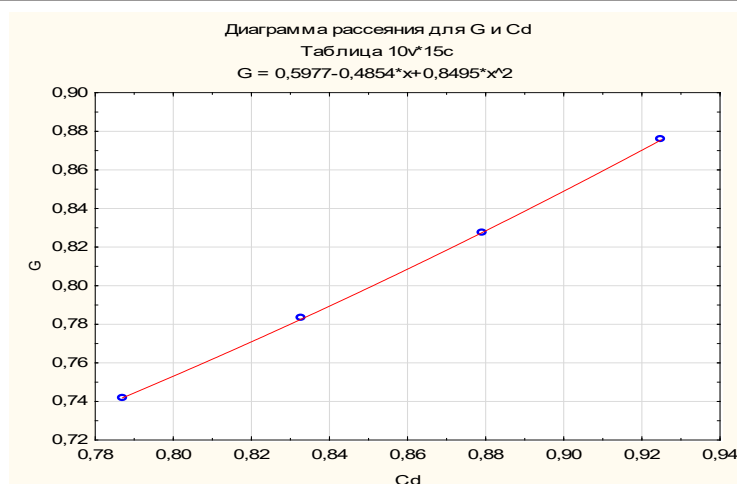


Рис.6. Зависимость изменения общего количества раствора для работы мембранной холодильной установки в зависимости от параметров разделения

Fig.6. Dependence of changes in the total amount of solution for the operation of a membrane refrigeration unit depending on separation parameters

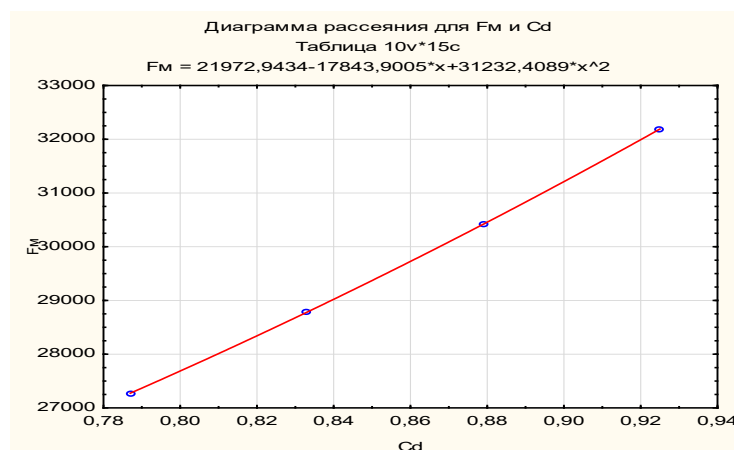


Рис.7. Фактическая общая площадь мембранных модулей необходимых для разделения смеси в мембранной холодильной установке с заданными параметрами

Fig.7. Actual total area of membrane modules required to separate the mixture in a membrane refrigeration unit with given parameters

Вывод. Результаты расчетов позволяют судить о перспективности применения мембранных холодильных машин. В настоящее время работы направлены на создание экспериментального стенда и практического подтверждения полученных теоретических результатов.

Библиографический список:

1. Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. - М.: Химия, 1991. - 496 с.
2. Беляев В.П. Абсорбционно-мембранная установка. RU 2 295 677 C2, Опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8.
3. Kelsey L.J., Pillarella M.R., Zydney A.L. Theoretical analysis of convective flow profiles in a hollow-fiber membrane bioreactor // Chem. Engng Sci. – 1990. – 45. – P. 3211–3220.
4. Андреев И.А. Мембранные технологии разделения раствора в абсорбционной холодильной установке / И.А. Андреев, М.В. Шамаров // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 973-975.
5. Хванг С.-Т., Каммермеер К. Мембранные процессы разделения: Пер. с англ. Под ред. Проф. Дытнерского Ю.И. – М.: Химия, 1981. – 464 с., ил.
6. Николаев Н.И. Диффузия на мембранах. – М.: Химия, 1980. – 232 с., ил.
7. Андреев И.А. Перспективы применения углекислотных холодильных машин в системах холодоснабжения/ И.А. Андреев, М.В. Шамаров// В сборнике: Механика, оборудование, материалы и

- технологии. 4 международная научно-практическая конференция. Краснодар, 2021. С. 518-526
8. Шамаров М.В. Анализ массогабаритных показателей поршневого компрессора для передвижной компрессорной станции / М.В. Шамаров, М.Ю. Мелёхина // В сборнике: Современные технологии машиностроительного производства, инновационные направления развития компрессорной техники и газоразделительных систем. сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ». ФГБОУ ВПО «КубГТУ», ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ», ООО «Издательский Дом - Юг». 2013. С. 50-53.
 9. Шамаров М.В. Мембранная абсорбционная холодильная установка // В книге: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Масюткина. 2020. С. 209-211.
 10. Шамаров М.В. Особенности математической модели холодильного поршневого компрессора с внешним кипящим охлаждением/ М.В. Шамаров, Ю.С. Беззаботов // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 976-980.
 11. Шамаров М.В. Использование прикладного моделирования при проектировании каскадной холодильной установки /М.В. Шамаров, А.М. Шамаров// В сборнике: Материалы пула научно-практических конференций. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского; Керченский государственный морской технологический университет; Луганский государственный педагогический университет ; Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Керчь, 2023. С. 214-218.
 12. Шамаров А.М. Разработка математической модели при проектировании двигателя стирлинга/ А.М. Шамаров, И.Е. Сязин, М.В. Шамаров// В сборнике: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. Керчь, 2023. С. 48-53.
 13. Губский В.С. Осушка и очистка природного газа посредством полимерных мембран / В.С. Губский, М.В. Шамаров// В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 566-573.
 14. Андреев И.А. Синергетика использования абсорбционных холодильных машин / И.А. Андреев, Ю.С. Беззаботов, М.В. Шамаров //В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 573-578.
 15. Зайцев А.С. Технология изготовления полуволоконной мембраны на основе полимерных волокон для сепарации газов / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров// В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 585-590.
 16. Соянок В.В. Особенности проектирования и применения абсорбционных холодильных машин / В.В. Соянок, М.В. Шамаров// В сборнике: Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых. Общеуниверситетская Студенческая научная конференция (СНК-2020). Краснодар, 2021. С. 156-160.
 17. Шамаров М.В. Создание холодильного поршневого компрессора с внешним охлаждением кипящим хладагентом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Краснодар, 2000.
 18. Способ испарительного охлаждения компрессора холодильной установки Шляховецкий В.М., Черных А.И., Шляховецкий Д.В., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2117222 C1, 10.08.1998. Заявка № 96114535/06 от 16.07.1996.
 19. Крышка блока цилиндров многорядного компрессора Шляховецкий В.М., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2139447 C1, 10.10.1999. Заявка № 97105117/06 от 02.04.1997.
 20. Шамаров М.В. Экспресс заморозка жидких продуктов для проведения анализа/ М.В. Шамаров, Д.А. Шилько // Сборник: Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство. материалы V Международной научно-технической конференции. 2018. С. 741-745.
 21. Евтишин И.А. Самоочищающаяся фильтрационная установка для жидких пищевых продуктов/ И.А. Евтишин, М.В. Шамаров // В сборнике: Пища. Экология. Качество. Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. Ответственные за выпуск: О.К. Мотовилов, О.А. Высоцкая, К.Н. Нициевская, Л.П. Хлебова. 2019. С. 260-264.
 22. Шамаров М.В. Альтернативные источники энергии для работы тепловых насосов М.В. Шамаров, В.М. Сазоненко// В сборнике: механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Литвинов А.Е., Плоmodityа Р.Л., Коновалова Т.В., Гукасян А.В., Война А.А., Вольченко Н.А., 2019. С. 445-449.

References

1. Dytnersky Yu. I. Basic processes and apparatus of chemical technology. Ed. Yu. I. Dytnersky, 2nd ed., revised. and additional. M.: *Chemistry*, 1991; 496. (In Russ)
2. Belyaev V.P. Absorption membrane installation. RU 2 295 677 C2, Publ. 03/20/2007, Bulletin. No. 8. (In Russ)
3. Kelsey L.J., Pillarella M.R., Zydney A.L. Theoretical analysis of convective flow profiles in a hollow-fiber membrane bioreactor. *Chem. Engng Sci.* 1990; 45: 3211–3220.
4. Andreev I.A. Membrane technologies for solution separation in an absorption refrigeration unit. I.A. Andreev, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference.* 2020; 973-975. (In Russ)
5. Hwang S.-T., Kammermeer K. Membrane separation processes: Transl. from English Ed. Prof. Dytnersky Yu.I. M.: *Chemistry*, 1981;464 (In Russ)
6. Nikolaev N. I. Diffusion on membranes. M.: *Chemistry*, 1980: 232l. (In Russ)
7. Andreev I.A. Prospects for the use of carbon dioxide refrigeration machines in refrigeration supply systems. I.A. Andreev, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. 4th international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2021; 518-526. (In Russ)
8. Shamarov M.V. Analysis of weight and size indicators of a piston compressor for a mobile compressor station / M.V. Shamarov, M.Yu. Melyokhina. In the collection: *Modern technologies of mechanical engineering production, innovative directions for the development of compressor equipment and gas separation systems. collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of OJSC Compressor Plant BORETS. FSBEI HPE "KubSTU", OJSC "Compressor Plant "BORETS", LLC "Publishing House - South".* 2013; 50-53. (In Russ)
9. Shamarov M.V. Membrane absorption refrigeration unit // In the book: *Innovative directions for the integration of science, education and production. Collection of abstracts of reports of participants of the I International Scientific and Practical Conference.* Under the general editorship of E.P. Masyutkina. 2020; 209-211.
10. Shamarov M.V., Bezzabotov Yu.S. Features of the mathematical model of a refrigeration piston compressor with external boiling cooling.. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference.* 2020; 976-980.
11. Shamarov M.V., Shamarov A.M. The use of applied modeling in the design of a cascade refrigeration unit In the collection: *Materials of a pool of scientific and practical conferences. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky; Kerch State Marine Technological University; Lugansk State Pedagogical University; Lugansk State University named after Vladimir Dahl.* Kerch, 2023; 214-218. (In Russ)
12. Shamarov A.M., Shamarov A.M., Syazin I. E., Shamarov M.V. Development of a mathematical model when designing a Stirling engine. In the collection: *Innovative directions for the integration of science, education and production. Collection of materials from the IV International Scientific and Practical Conference.* Kerch, 2023; 48-53. (In Russ)
13. Gubsky V.S., Gubsky V.S., Shamarov M.V. Drying and purification of natural gas using polymer membranes. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 566-573. (In Russ)
14. Andreev I.A. Synergetics of the use of absorption refrigeration machines / I.A. Andreev, Yu.S. Bezzabotov, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 573-578. (In Russ)
15. Zaitsev A.S., Zaitsev A.S., Shamarov M.V. Manufacturing technology of a hollow fiber membrane based on polymer fibers for gas separation. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 585-590. (In Russ)
16. Soyank V.V. Features of the design and application of absorption refrigeration machines. V.V. Soyank, M.V. Shamarov. In the collection: *Youth science. Collection of the best scientific works of young scientists. University-wide Student Scientific Conference (SNK-2020).* Krasnodar, 2021; 156-160. (In Russ)
17. Shamarov M.V. Creation of a refrigeration piston compressor with external cooling by boiling refrigerant // dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnodar, 2000. (In Russ)
18. Method of evaporative cooling of a compressor of a refrigeration unit Shlyakhovetsky V.M., Chernykh A.I., Shlyakhovetsky D.V., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2117222 C1, 08/10/1998. Application No. 96114535/06 dated July 16, 1996. (In Russ)
19. Cylinder block cover of a multi-row compressor Shlyakhovetsky V.M., Shamarov M.V. Patent for invention

- RU 2139447 C1, 10.10.1999. Application No. 97105117/06 dated 04/02/1997. (In Russ)
20. Shamarov M.V. Express freezing of liquid products for analysis / M.V. Shamarov, D.A. Shilko. In the collection: Innovative technologies in the food industry: science, education and production. materials of the V International Scientific and Technical Conference. 2018; 741-745. (In Russ)
 21. Evtishin I.A. Self-cleaning filtration unit for liquid food products/ I.A. Evtishin, M.V. Shamarov // In the collection: Food. Ecology. Quality. Collection of materials of the XVI International Scientific and Practical Conference. Responsible for the release: O.K. Motovilov, O.A. Vysotskaya, K.N. Nitsievskaya, L.P. Khlebova. 2019; 260-264. (In Russ)
 22. Shamarov M.V. Alternative energy sources for the operation of heat pumps M.V. Shamarov, V.M. Sazonenko. In the collection: mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference. Editorial board: Litvinov A.E., Plomodyalo R.L., Kononova T.V., Gukasyan A.V., Voina A.A., Volchenko N.A., 2019; 445-449. (In Russ)

Сведения об авторах

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru

Степанова Евгения Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; egs2128@mail.ru

Колинько Алексей Владимирович, аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru

Шамаров Артем Максимович, студент, Высшая школа кибертехнологий, математики и статистики; schmax@mail.ru

Information about authors:

Maxim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of technological equipment and life support systems; schmax@mail.ru

Evgenia G. Stepanova, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of technological equipment and life support systems; egs2128@mail.ru

Alexey V. Kolinko, Graduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; schmax@mail.ru

Artem M. Shamarov, Student, Higher School of Cyber Technologies, Mathematics and Statistics; schmax@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.10.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 29.10.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 29.10.2023.