Для цитирования: *Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В., Каримов М.Ш., Руденко А.М. Повышение эффективности работы гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(4): 32-41. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41*
For citation: *M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, A.M. Rudenko. Increasing the working efficiency of solar power absorption refrigerator units. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 32-41. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК. 621.576:614.8.084
DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК АДСОРБЦИОННОГО ТИПА

Руденко М.Ф.[1], Шипулина Ю.В.[1], Каримов М.Ш.[2], Руденко А.М.[1]
[1]Астраханский государственный технический университет,
[1]414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия,
[2]Атырауский государственный университет им. Х.Досмухамедова,
[2]060011, г. Атырау, пр. Студенческий, 212, Казахстан

Резюме. Цель. *Разработать холодильную установку адсорбционного типа циклического действия, реализующую технологию получения холода из энергии солнечной радиации. Отличительной особенностью ее является сильно развитая гелиоприемная часть, состоящая из двух параллельно соединенных генераторов-адсорберов, реакторы которых устанавливаются в индивидуальных теплоизолированных корпусах типа «горячий ящик».* ***Метод.*** *Геометрические характеристики генератора-адсорбера основаны на расчетах оптической и теплоэнергетической эффективности моделей аппарата.* ***Результат.*** *Проведены исследования физико-химических характеристик активных углей (АС) различного производства. Определена адсорбционная способность рабочих пар: АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин. Получены расчетные коэффициенты для структурных уравнений Дубинина-Радушкевича. Испытана экспериментальная гелиоэнергетическая холодильная установка на рабочей паре АС-аммиак на открытом полигоне. Доказана работоспособность модернизированной установки. По разработанному программному алгоритму на основе упрощенного термодинамического цикла определены зависимости эксергетических коэффициентов. Определены области возможного применения и использования гелиоэнергетических холодильных установок на исследуемых рабочих парах.* ***Вывод.*** *Повышенная эффективность установки заключается в оптимальной компоновке всех элементов генератора-адсорбера, включающего реактор, два плоских зеркальных концентратора, тепловую подложку, уменьшенного объема внутреннего воздушного пространства, стеклопакет из двух стекол и рациональной толщины теплоизолирующего рипора.*

Ключевые слова: *солнечная энергия, адсорбционная холодильная установка, модернизированный генератор-адсорбер, АС-аммиак, АС-метиламин, АС- этиламин, эксергетические коэффициенты* http://vestnik.dgtu.ru/ISSN (Print) 2073-6185 ISSN (On-line) 2542-095X

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

INCREASING THE WORKING EFFICIENCY OF SOLAR POWER ABSORPTION REFRIGERATOR UNITS

M.F. Rudenko[1], Yu.V. Shipulina[1], M.Sh. Karimov[2], A.M. Rudenko[1]
[1]Astrakhan State Technical University,
[1]16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia,
[2] Kh. Dosmukhamedov Atyrau State University ,
[2]212 Student Ave., Atyrau 060011, Kazakhstan

Abstract. Objectives.*The aim of the study is to develop a cyclic absorption refrigerator unit that implements technology for producing cold from solar radiation energy. Its distinctive feature comprises a highly developed solar receiving unit, consisting of two parallel-connected absorber generators whose reactors are installed in individual heat-insulated “hot box” cabinets.* ***Method****. The geometric characteristics of the absorber generator are based on the calculations of the optical and heat energy efficiency of the device models.* ***Results.*** *The physicochemical characteristics of activated carbons (AC) of various production are studied. The absorption capacity of the following working pairs is determined: AC-ammonia, AC-methylamine, AC-ethylamine. The calculated coefficients for the Dubinin-Radushkevich structural equations are obtained. An experimental solar energy refrigerator unit is tested using a working pair of AC-ammonia in an open test area. The operability of the upgraded device is proven. Exergetic coefficient dependencies are determined according to the developed software algorithm based on a simplified thermodynamic cycle. The areas of possible application and use of solar power refrigerator units with the studied working pairs are determined.* ***Conclusion.*** *The increased unit efficiency consists in the optimal layout of all elements of the absorber generator, including the reactor, two flat mirror concentrators, a thermal substrate, a reduced internal air space volume, a double-glazed window made of two sheets of glass and a calculated thickness of heat-insulating Ripor foamed polyurethane.*

Keywords: *solar power, absorption refrigerator unit, modernised generator-absorber, AC-ammonia, AC-methylamine, AC-ethylamine, exergetic coefficients*

Введение. В гелиоэнергетических холодильных установках адсорбционного типа реализуется новая важная технологическая задача: преобразование энергии солнечной радиации в энергию теплоты и холода, что является эффективным способом экономии традиционного энергетического сырья (угля, нефти, газа, урана) и обеспечения чистоты окружающей среды [1].

В основе физического процесса адсорбции лежит способность сгущаться парообразным молекулам хладагента над твердой поверхностью сорбента и затем конденсироваться в пористую структуру с понижением температуры последнего при отводе теплоты. Этот процесс обратим, и при подводе к сорбенту тепловой энергии в нем происходит десорбция - выделение хладагента [2].

Постановка задачи. В установках адсорбционного типа циклического действия применяют простые сорбенты (активные угли, силикагель, цеолит) и озонобезопасные хладагенты (аммиак, вода, метанол, этанол). Такие установки можно использовать для охлаждения и хранения медикаментов, замораживания пищевых продуктов, получения льда, кондиционирования воздуха и подогрева воды теплом адсорбции [3-5].

В связи с этим изучалась возможность повышения эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа за счет: совершенствования конструкций основных аппаратов, входящих в общую компоновку и поиска новых хладагентов, эффективных для работы таких установок.

Объектом исследования являлась экспериментальная гелиоэнергетическая холодильная установка, представленная на рис.1. Особенностью установки является сильно развитая гелиоприемная часть, представляющая два соединенных параллельно аппарата – генератора-адсорбера, реакторы которых расположены в отдельных изолированных корпусах типа «горячий ящик».

Генератор-адсорбер совмещенного действия, попеременно выполняет обратимые действия (днем работает как генератор, ночью – как адсорбер). Реакторы расположены параллельно уровню земли, но на некоторой высоте друг от друга. Гелиоприемная часть обращена строго на юг, под оптимальным углом наклона к горизонту, что составлял 45^0 для Астраханской области в период вероятной эксплуатации таких установок в данной местности. В установку входят и другие аппараты, позволяющие осуществлять периодически полный цикл работы установки: водяной конденсатор, ресивер, холодильная камера с испарителем и регулирующая арматура.

Методы исследования. Принцип работы установки основан на использовании теплоты получаемой от энергии солнечной радиации днем и суточном изменении температуры окружающей среды, позволяющим создавать в аппаратах установки необходимые для работы давления. Цикл работы установки состоит из двух процессов: регенерация, когда днем насыщенный сорбент в реакторах генератора-адсорбера нагревается и идет процесс десорбции с выделением из сорбента паров хладагента, который сжижается в конденсаторе и накапливается в ресивере; зарядка, когда ночью в реакторах генератора-адсорбера идет процесс адсорбции с поглощением хладагента сорбентом, при этом в испарителе кипит хладагент производя эффект охлаждения в изолированной камере. Вечером, охлажденный до температуры окружающей среды хладагент из ресивера при помощи регулирующего вентиля подается в испаритель.

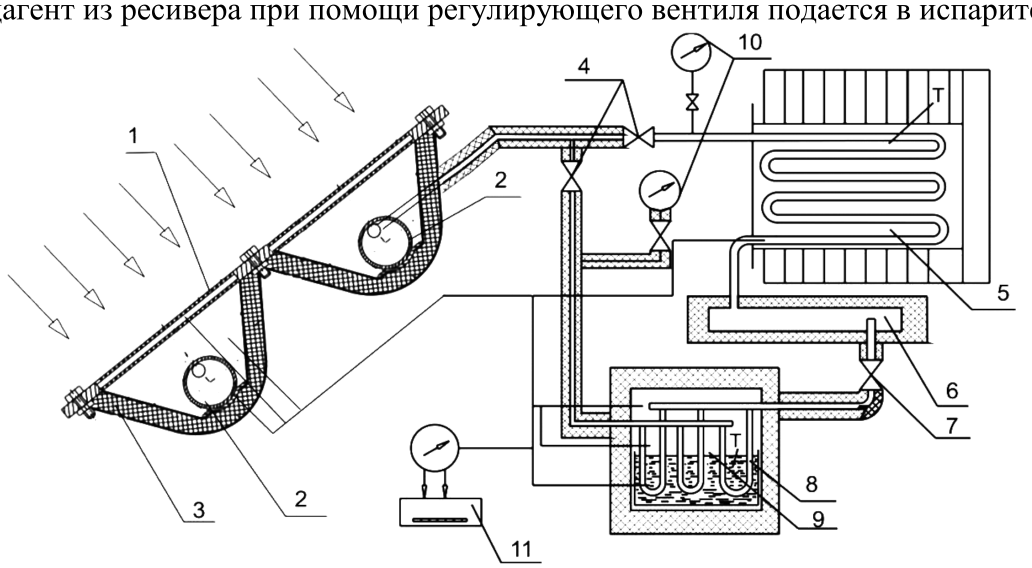

Рис.1 Гелиоэнергетическая холодильная установка:
генератор-адсорбер, 2- реактор, 3- гелиоприемное устройство «горячий ящик», 4 – вентили, 5- конденсатор, 6- ресивер, 7- вентиль подачи хладагента, 8- испаритель, 9- холодильная камера, 10 – манометры, 11- цифровой микроамперметр В7-40
Fig. 1 Solar energy refrigeration unit:
adsorber generator, 2- reactor, 3 "hot box" solar receiving device, 4 - valves, 5- condenser, 6- receiver, 7- refrigerant supply valve, 8- evaporator, 9-chamber, 10 - pressure gauges, 11- digital microammeter B7-40

Разделение двух аппаратов генераторов-адсорберов одного назначения и установление их в разных теплоизолирующих каркасах типа «горячий ящик» позволяют сократить объем воздушного пространства внутри аппарата, в котором возможно формирование нежелательных конвективных потоков, а двойное остекление прозрачной стенки, за счет установления вакуумного стеклопакета, значительно уменьшило потери теплоты через него днем; в торцах гелиоприемника, предусмотрены открывающиеся пробки, которые ночью извлекаются из теплоизолирующего каркаса, для лучшего охлаждения реакторов, днем пробки снова устанавливаются на место.

Интенсивность обогрева реактора осуществляется днем за счет централизованного фокусирования энергии солнечной радиации плоскими зеркальными концентраторами и металлической подложки на круглую цилиндрическую поверхность реактора.

Реактор цилиндрической конструкции представляет цельнотянутую трубу диаметром $\varnothing 76 \times 4$ мм, внутри которой в верхней части установлен перфорированный оребренный хладопровод в форме цилиндра диаметром $\varnothing 24 \times 2$ мм. Реактор аппарата через запорные вентили подключается в зависимости от режима работы либо к конденсатору, либо к испарителю. В качестве запорных вентилей при автоматическом регулировании могут устанавливаться обратные клапаны.

Для улучшения контакта между подложкой и поверхностью соприкосновения реактора в генераторе-адсорбере зазор обрабатывается теплопроводящей пастой КПТ-8. Для исключения теплового контакта хладопровода выходящего из реактора устанавливается текстолитовая втулка.

Зазор между стеклопакетом на пластмассовой основе и металлическим корпусом гелиоприемника уплотняется мягкой резиновой прокладкой. Теплоизоляция основного корпуса гелиоприемного устройства с внутренней части обработана напылением рипора. Остекленная площадь поверхности каждого гелиоприёмного устройства 0,64 м^2. Наружная солнцевоспринимающая часть поверхности реактора обработана селективным покрытием, выполненное по патенту [6].

Основные геометрические параметры конструкции генератора-адсорбера выполнены на основании исследований оптических и теплоэнергетических модельных конструкций (рис. 2).

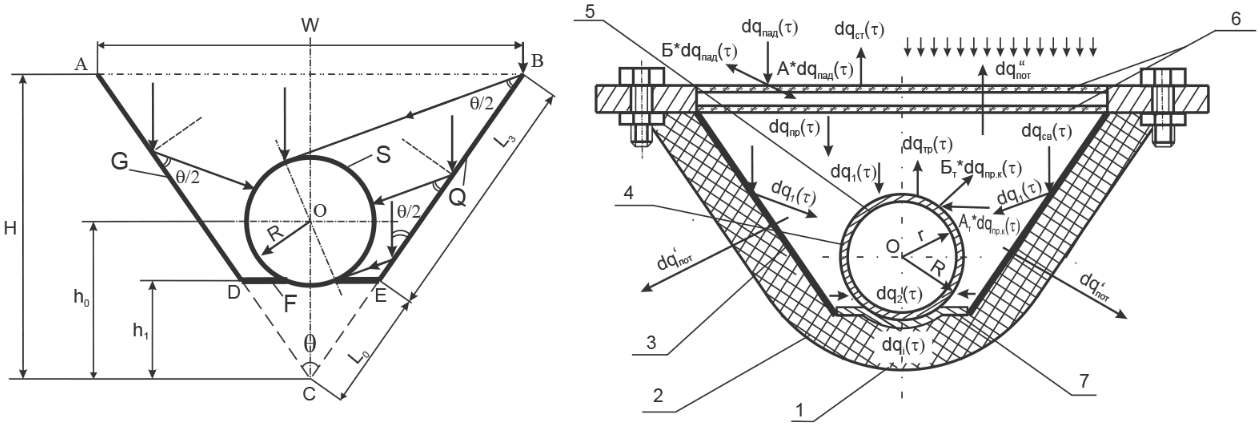

Рис.2 Модели оптической (а) и теплоэнергетической (б) эффективности генератора-адсорбера (1-наружный корпус гелиоприемника типа «горячий ящик», 2- изоляция корпуса, 3 – плоские зеркальные отражатели, 4 – корпус реактора, 5 – адсорбент (активированный уголь), 6 – стеклопакет, 7 – металлическая подложка.

Fig. 2 Models of the optical (a) and heat energy (b) efficiency of the adsorber generator (1-external housing of the "hot box" type solar receiver, 2 - housing insulation, 3 - flat mirror reflectors, 4 - reactor vessel, 5 - adsorbent (activated coal), 6 - a double-glazed window, 7 - a metal substrate.

Модель оптической эффективности конструкции генератора-адсорбера представлена таким образом, что солнечный луч, падающий перпендикулярно оси симметрии всей конструкции, полностью отражается от зеркальных поверхностей, и на наружную поверхность реактора, падают прямые и отражаемые лучи.

Ширина раскрытия зеркал W (м), площади поверхности зеркал Q и G (м^2) и площадь поверхности трубки реактора S (м^2) связаны аналитическими зависимостями с радиусом реактора R (м) и углом раскрытия плоских зеркал θ (град). F- площадь металлической подложки (м^2), $L_з$ – длина зеркала (м), H (м), h_o(м), h_1(м) – соответствующие высоты концентратора.

На основании анализа коэффициентов оптической и оптико-энергетической концентрации плоских зеркал [7] наибольшие значения их достигают при соотношениях в диапазоне от $W/2\cdot R = 3{,}5$ до $W/\pi\cdot R = 3{,}5$. Угол раскрытия был выбран $\theta = 55^0$.

При конструировании оптической части генератора-адсорбера были заложены следующие аналитические соотношения:

$$W/\pi\cdot R = 3{,}5; \quad H= \pi\cdot 3{,}5\cdot R/[2\cdot (tg\,\theta/2)]; \quad h_1= \pi\cdot 3{,}5\cdot R/[4\cdot(tg\,\theta/2)]; \tag{1}$$
$$L_o= \pi\cdot 3{,}5\cdot R/[8\cdot(\sin\theta/2)]; \quad L_з= 3\cdot\pi\cdot 3{,}5\cdot R/[4\cdot (\sin\theta/2)]; \quad h_o = h_1+R .$$

В основе теплоэнергетической модели лежат тепловые энергетические балансы: днем - между падающей энергией солнечной радиации и энергии, отводимой в конденсаторе; ночью – между теплотой, отводимой в испарителе и теплотой адсорбции.

$$dq_{пад}(\tau) = dq_{дес}(\tau)+ dq_{из}(\tau)+ dq_{пот}(\tau)= dq_{кон}(\tau) \tag{2}$$

где $dq_{пад}(\tau)$ – энергия солнечной радиации, падающая на прозрачную поверхность гелиоприемного устройства за конкретный промежуток времени (τ = 1ч); $dq_{дес}(\tau)$ – энергия идущая на осуществления процесса десорбции в реакторе генератора-адсорбера; $dq_{из}(\tau)$ – энергия идущая на процесс изостерического процесса подогрева адсорбата и адсорбента в реакторе; $dq_{пот}(\tau)$- энергия тепловых потерь в гелиоприемном устройстве генератора-адсорбера в дневное время; $dq_{кон}(\tau)$ – энергия отводимая в конденсаторе.

$$dq_{ад}(\tau) = dqо(\tau)+ dq'_{из}(\tau) \tag{3}$$

где $dq_{ад}(\tau)$ – отводимая энергия из реактора генератора-адсорбера в процессе адсорбции; $dq_о(\tau)$ – энергия подводимая в испарителе охлаждающей камеры в ночное время; $dq'_{из}(\tau)$ – энергия отводимая от реактора при изостерическом процессе охлаждения адсорбата и адсорбента.

Экспериментально установлено, что время протекания процессов адсорбции больше, чем время протекания процессов десорбции. Методика расчета гелиоэнергетической части аппарата изложена в работе [8].

Количество загруженного адсорбента в реактор составляло 12 кг.

В АГТУ были проведены исследования физико-химических характеристик некоторых типов активных углей российского и казахстанского производства по методике [9]. Исследовались удельная (истинная d и кажущаяся δ) масса, г/см^3; суммарный объем пор $V_{сум}$, см^3/г ; пористость, % ; кислотность $pH=lgC_{H+}$.

Лучшим из отечественных образцов по комплексу изученных характеристик является активный уголь кубанского производства из косточек фруктов.

Обсуждение результатов. Авторами были получены изотермы адсорбции аммиака, метиламина и этиламина на активных углях различного производства и определены структурные коэффициенты для уравнения Дубинина-Радушкевича (D-R):

$$a\,(P,T) = \rho(T)\cdot W_o\cdot \exp\{-D\cdot [T\cdot \ln(P_s/P]^n\} \tag{4}$$

где a(P,T) – пропорциональная зависимость массы хладагента в сорбенте к массе сухого адсорбата, кг/кг; W_o – максимальный объем адсорбционного пространства, м^3/кг; $\rho(T)$ - плотность жидкого хладагента, кг/м^3; T – температура изотермического процесса, К; P_s, P – давление насыщенного и равновесного состояния процесса, Па, D – энергетический коэффициент адсорбции для определенной рабочей пары адсорбент-хладагент; n – показатель распределения размерности пор.

Текущий объем адсорбционного пространства адсорбента (м^3/кг),

$$W= a(P,T)/ \rho(T). \tag{5}$$

На рис. 3 показаны зависимости изменения адсорбционного пространства активных углей различного производства при адсорбции паров аммиака, метиламина и этиламина в логарифмической анаморфозе. Разброс расчетных значений не превышает 16%.

http://vestnik.dgtu.ru/ISSN (Print) 2073-6185 ISSN (On-line) 2542-095X

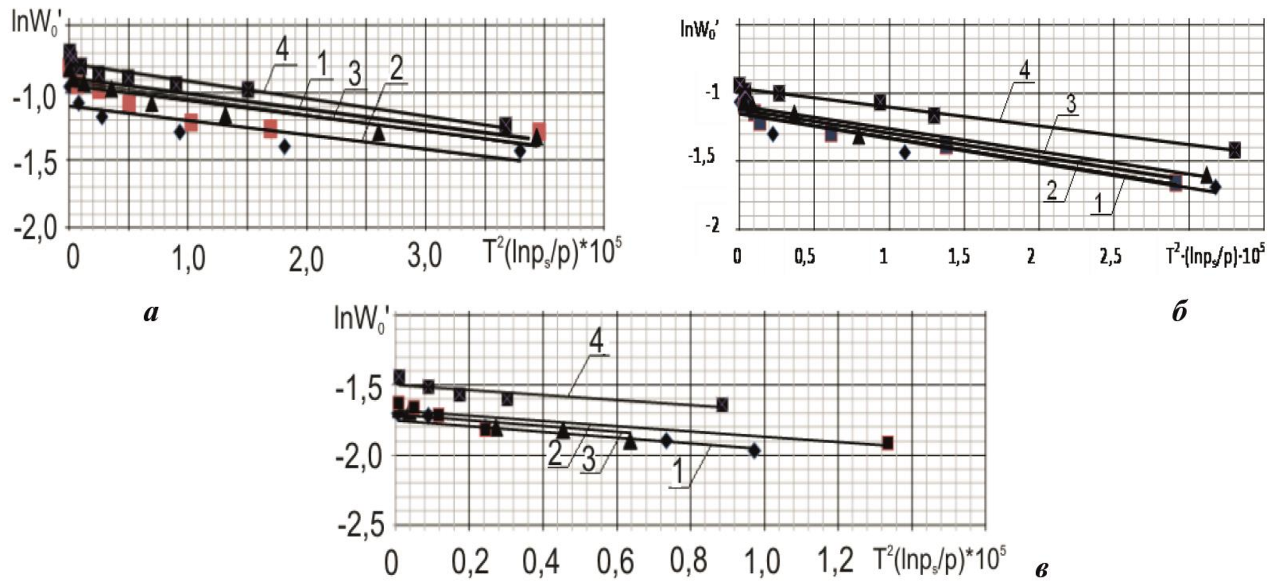

Рис.3 Зависимости изменения величины адсорбционного пространства рабочих пар (а - АС-аммиак, б – АС–метиламин, в – АС-этиламин) для активных углей различных видов (1-алматинский, 2- усть-каменогорский, 3-казанский, 4-краснодарский)

Fig. 3 Dependences of changes in the adsorption space of working pairs (a - AC-ammonia, b - AC-methylamine, c - AC-ethylamine) for active carbons of various types (1-Almaty, 2-Ust-Kamenogorsk, 3-Kazan, 4 Krasnodar)

Усредненные расчетные коэффициенты для уравнения (D-R):

- для рабочей пары АС-аммиак $W_{o(амм)} = 442{,}8\cdot10^{-6}$ кг/м^3; $D_{(амм)}=12{,}17\cdot10^{-7}$; n=2;
- для рабочей пары АС-метиламин $W_{o(мет)}.= 355{,}2\cdot10^{-6}$ кг/м^3; $D_{(мет)}=16{,}58\cdot10^{-7}$; n=2;
- для рабочей пары АС-этиламин $W_{o(этм)}.= 201{,}2\cdot10^{-6}$ кг/м^3; $D_{(этм)}=21{,}17\cdot10^{-7}$; n=2.

Проведены экспериментальные исследования суточного цикла работы гелиоэнергетического термотрансформатора на рабочей паре АС-аммиак.

На рис. 4 представлены зависимости измеряемых температур в различных точках гелиоэнергетической холодильной установки в суточном режиме. Утром тепловая энергия солнечной радиации разогревает реакторы в генераторе-адсорбере, прогревается насыщенный сорбент, температура которого растет и затем начинается процесс десорбции. Термопары (1 - 4), установленные в различных точках реактора, показывают неравномерность нагрева сорбента. Максимальная температура и давление достигается днем в момент максимального солнцестояния, но затем, по мере склонения солнца, спадает энергия солнечной радиации и снижается температура нагрева реакторов и давление. К 17.00 начинается процесс изостерического охлаждения. Переключаются запорные вентили. Охлаждается не только адсобент (АС), но и жидкий хладагент, накапливаемый в ресивере установки. В 19.30 часов через регулирующий вентиль хладагент поступает в испаритель холодильной камеры, в которой находится емкость с водой, служащей аккумулятором холода при превращении воды в лед.

Сначала наблюдается резкое падение давления и быстрое понижение температуры, за счет бурного испарения и поглощения паров хладагента. Затем, по мере насыщения сорбента, медленно растет давление в испарителе и снижается температура кипения хладагента. Охлаждающий эффект производится установкой в течение всего ночного времени до утра. В ночное время за счет теплоты адсорбции нагреваются реакторы генератора-адсорбера. Утром запорные вентили снова переключаются. Охлаждающий эффект днем поддерживается за счет холода создаваемого тающим льдом.

Максимальные дневные температуры на поверхностях реактора генератора достигали 138 – 142 ^{0}С, температурная неравномерность нагрева поверхности реактора составляла 6-12 ^{0}С, темпы роста температуры днем на реакторе 0,5 – 1 ^{0}С/мин.; температура поверхности адсорбера ночью достигала 64,6 – 65,3 ^{0}С, суточные колебания давления в установке при охлаждении водой днем достигало 2,53 МПа., а ночью – 0,14 МПа. После открытия регулирующего вентиля наблюдается падение давления в испарителе и снижение температуры испарителя до -6,4 - -8,2 ^{0}С, происходит подмораживание влаги. Температура воздуха в холодильной камере изменяется в пределах +4 - +12 ^{0}С за сутки.

Анализ полученных экспериментальных зависимостей температур в суточном режиме работы холодильной установки (май – сентябрь) на открытом полигоне показал аналогичный характер изменения по данным работ [10, 11].

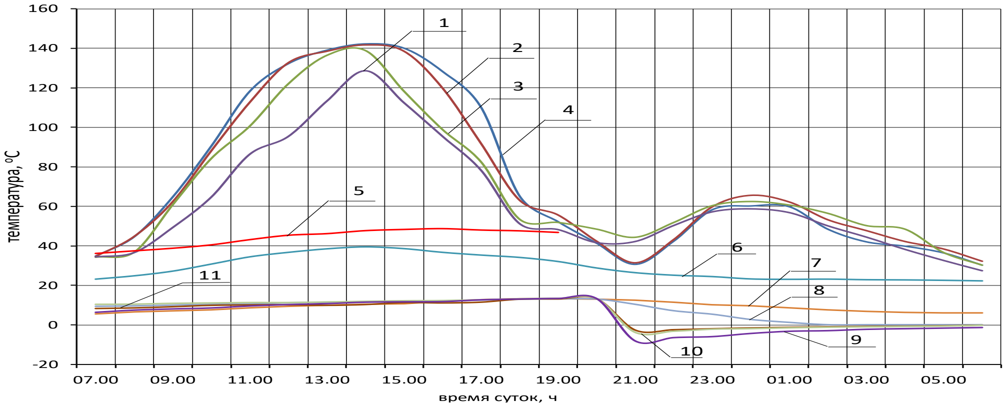

Рис. 4. Зависимости измеряемых температур гелиоэнергетической холодильной установки на различных аппаратах в течение суточного цикла времени: 1-4 – температуры нагрева поверхности реактора генератора-адсорбера в различных точках по поверхности; 5 – температура конденсатора; 6 – температура окружающего воздуха; 7 – температура в охлаждающей камере; 8 – температура охлаждения воды в камере; 9 – 10 – температуры поверхности испарителя.

Fig. 4. The dependences of the measured temperatures of the solar energy refrigeration unit on various devices during the daily cycle of time: 1-4 - the temperature of the surface of the reactor of the generator-adsorber at various points on the surface; 5 - temperature of the condenser; 6 - ambient temperature; 7 - temperature in the cooling chamber; 8 - temperature cooling water in the chamber; 9 - 10 - surface temperature of the evaporator.

Были разработаны программные алгоритмы расчета и проанализированы степени термодинамического совершенства по упрощенному циклу работы гелиоэнергетической холодильной установки на трех рабочих парах (АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин) по математической модели, описанной в работе [12].

Эксергетический коэффициент определялся по уравнению:

$$\eta_{экс} = (Э_{хол}/Э_{ген}), \qquad (6)$$

где $Э_{хол} = r_o \cdot \Delta a \cdot [(T_{осд} - T_o)/T_o]$ – эксергия, отводимая от охлаждающей камеры;

$Э_{ген} = (Q_{из} + Q_{дес}) \cdot [T_{дес} - T_{осн}/T_{осн}]$– эксергия, подводимая к генератору термотрансформатора, для производства холода; Δa – масса адсорбата (хладагента), циркулирующая в термотрансформаторе; r_o – скрытая теплота парообразования соответствующего адсорбата; $Q_{из}$- теплота изостерического процесса нагрева рабочей пары в реакторе генератора, равная произведению их массы, теплоемкости и соответствующего прироста температуры; $Q_{ген} = q_d \cdot \Delta a$ – теплота изобарического процесса десорбции; $T_{дес}$, T_o ,$T_{осд}$, $T_{осн}$ – абсолютные температуры соответственно десорбции в реакторе генератора, кипения в испарителе, окружающей среды днем и ночью; $q_d = r_o + R \cdot T \cdot \ln(P_s/P) + (\alpha \cdot R) \cdot (n \cdot D) \cdot [\ln(P_s/P)]^{-1}$ – удельная теплота десорбции; R – универсальная газовая постоянная; α – коэффициент расширения жидкой фазы адсорбата.

На рис. 5 показаны зависимости эксергетического коэффициента гелиоэнергетической холодильной установки работающей на различных рабочих парах.

Если соединить экстремальные точки на графиках, то можно оценить параметры работы термотрансформатора в диапазонах предполагаемых температур.

Рабочую пару АС-метиламин предпочтительнее использовать для охлаждения и кондиционирования.

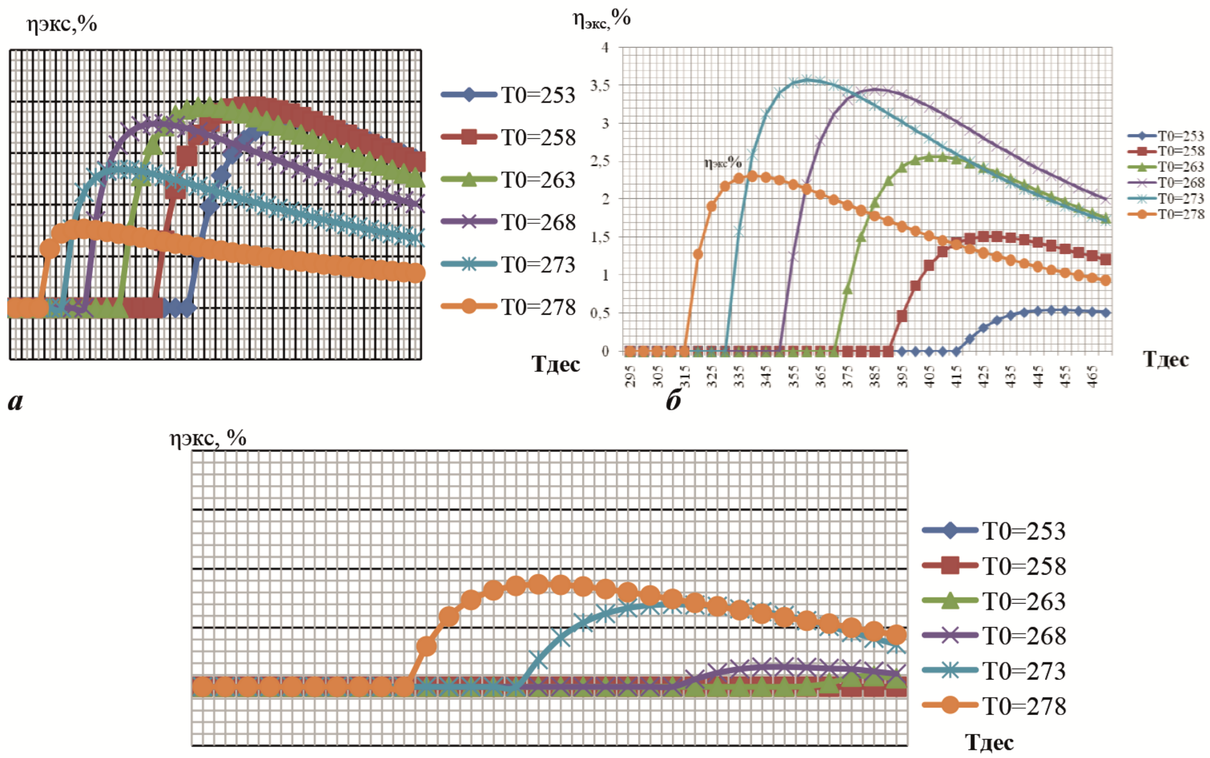

Рис. 5 Зависимости эксергетического коэффициента $\eta_{экс}$ от температуры десорбции рабочих пар активный уголь-аммиак (а); АС-метиламин (б); АС- этиламин для различных температур кипения хладагента при постоянных температурах $T_{адс}$, $T_{конд}$, $T_{ос}$.
Fig. 5 Dependences of the exergy coefficient ηex on the desorption temperature of active carbon-ammonia working vapor pairs (a); AC-methylamine (b); AC-ethylamine for various refrigerant boiling points at constant temperatures Tads, Tkond, Tos.

Из графиков на рис. 5 видно, что эксергетические коэффициенты для трех исследуемых рабочих пар при повышении температуры реактора, а, следовательно, и насыщенного хладагентом активного угля сначала остается постоянной до определенной критической температуры – границы между изостерическим процессом нагрева и процессом десорбции. Затем начинается резкое повышение коэффициента до максимальных значений, это связано с лавинообразным процессом выделения парообразного хладагента из прогретых наружных слоев адсорбата, и затем наблюдается снижение значений коэффициента на 10-12% от максимальных значений.

Таким образом, эксергетический коэффициент холодильной установки при изменении температур кипения в испарителе и температуры десорбции в реакторе сохраняет максимальные значения в пределах оптимального диапазона.

Результаты расчетов: средняя холодопроизводительность разработанной установки около Q_o=102 Вт. Термодинамические коэффициенты, соответственно на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{(амм)}$=О,22; $\eta_{(мет)}$=0,058; в режимах кондиционирования $\eta_{(амм)}$=0,342; $\eta_{(мет)}$=0,254; $\eta_{(этл)}$=0,2.

Степень термодинамической эффективности, соответственно на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{экс(амм)}$=0,075; $\eta_{экс(мет)}$=0,015; в режимах кондиционирования $\eta_{экс(амм)}$=0,03; $\eta_{экс(мет)}$=0,023; $\eta_{экс(этл)}$=0,0092. Рабочее давление в холодильной установке на рабочей паре АС-этиламин меньше, чем на рабочей паре АС-метиламин в 2,4-2,2 раза, а на рабочей паре АС-метиламин меньше, чем на рабочей паре АС-аммиак в 3,3 – 2,6 раза. Такие перспективные показатели приводят к снижению весовых характеристик холодильного оборудования.

Вывод. На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Новые конструктивные схемные решения и усовершенствованная конструкция генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки позволили получить высокие энергетические показатели работы установки и добиться положительного эффекта ее работы.
2. Исследование адсорбционной способности рабочих пар АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин показали, что лучшими адсорбционными свойствами обладает АС-аммиак, а худшими – АС-этиламин, однако все они могут применяться в холодильных установках адсорбционного типа, причем при выборе хладагента следует и учитывать массовые характеристики проектируемых аппаратов.
3. Расчетные зависимости эксергетических коэффициентов и области максимальных их значений определяют области развития и применения гелиоэнергетических холодильных установок с новыми рабочими парами, например рабочие пары АС-аммиак лучше использовать для замораживания и охлаждения, АС-метиламин – для охлаждения и кондиционирования, АС- этиламин – для кондиционирования.

Библиографический список:

1. Руденко М.Ф. Концепция развития экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства тепла и холода // Безопасность жизнедеятельности. 2006. №10. С.46-50.
2. Руденко, М.Ф. Адсорбционные свойства активного угля для гелиохолодильных установок / М.Ф. Руденко, И.А.Палагина, Ж.А.Анихуви, С.В.Золотокопова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1999. №12. С.22-23.
3. Руденко М.Ф. Разработка и исследование эффективности экологически безопасной адсорбционной гелиохолодильной установки / М.Ф. Руденко, Ю.В. Чивиленко, В.И. Черкасов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №8. С.26-28.
4. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator / G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa // Renewable Energy. 2016. Vol.86. pp. 238-250
5. Pan, Q.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, R.Z. Wang, Z.S. Lu, L.W.Wang // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol.72. pp. 275-282.
6. Патент РФ № 2365676, С1 от 27.08.2009. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь. 2008. Бюл.№24
7. Руденко, М.Ф. Эффективность гелиоприемных устройств с концентраторами для систем тепло- и хладоснабжения / Саратов. Лаборатория нетрадиционной энергетики ОЭП СНЦ РАН, 2001. 64 с.
8. Шипулина, Ю.В. Методика определения тепловых нагрузок на реактор генератора- адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки / Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2013. № 1. С.148-154
9. Руденко, М.Ф. Определение физических характеристик активного угля для адсорбционных холодильных машин / М.Ф. Руденко, И.А. Палагина, Ж.А. Анихуви, С.В. Золотокопова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №8. С. 39-40.
10. Wang, L.W. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // L.W. Wang, Z.Y.Xu, Q.W.Pan, S.Du, Z.Z.Xia. // Appl Energy. – 2016.Vol. 169 - P. 846-856.
11. Xu S.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon–ammonia working pair / S.Z. Xu, L.W. Wang, R.Z. Wang // Energy Conversion and Management. - 2016. Vol.117. pp. 31-42.
12. Шипулина, Ю.В. Моделирование термодинамического цикла работы адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора / Ю.В. Шипулина, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. 2011. №3. С.136-140.

References:

1. Rudenko M.F. Kontseptsiya razvitiya ekologicheski bezopasnoy gelioenergeticheskoy tekhniki dlya proizvodstva tepla i kholoda // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2006. №10. S.46-50. [Rudenko M.F. The concept of development of environmentally friendly solar energy technology for the production of heat and cold // Life safety. 2006. No. 10. pp.46-50. (In Russ)]
2. Rudenko, M.F. Adsorbtsionnyye svoystva aktivnogo uglya dlya geliokholodil'nykh ustanovok / M.F. Rudenko, I.A.Palagina, ZH.A.Anikhuvi, S.V.Zolotokopova // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. 1999. №12. S.22-23. [Rudenko, M.F. Adsorption properties of activated carbon for solar refrigeration units / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, J.A. Anihuvi, S.V. Zolotokopova // Chemical and oil and gas engineering. 1999. No. 12. pp.22-23. (In Russ)]
3. Rudenko, M.F. Razrabotka i issledovaniye effektivnosti ekologicheski bezopasnoy adsorbtsionnoy geliokholodil'noy ustanovki / M.F. Rudenko, YU.V. Chivilenko, V.I. Cherkasov // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. 2006. №8. S.26-28. [Rudenko, M.F. Development and study of the effectiveness of environ-

mentally friendly adsorption solar refrigeration unit / M.F. Rudenko, Yu.V. Chivilenko, V.I. Cherkasov // Chemical and oil and gas engineering. 2006. No8. pp.26-28. (In Russ)]

4. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrig-erator / G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa // Renewable Energy. 2016. Vol. 86.pp. 238-250
5. Pan, Q.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, R.Z. Wang, Z.S. Lu, L.W. Wang // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 72. pp. 275-282.
6. Patent RF № 2365676, S1 ot 27.08.2009. Elektrolit dlya osazhdeniya chernykh antikorrozionnykh oksidnykh pokrytiy na stal'. 2008. Byul.№24 [RF patent No. 2365676, C1 of 08.27.2009. Electrolyte for the deposition of black anticorrosive oxide coatings on steel. 2008. Bull.№24(In Russ)]
7. Rudenko, M.F. Effektivnost' geliopriyemnykh ustroystv s kontsentratorami dlya sistem teplo- i khladosnabzheniya / Saratov. Laboratoriya netraditsionnoy energetiki OEP SNTS RAN, 2001. 64 s. [Rudenko, M.F. Efficiency of solar receiving devices with concentrators for heat and cold supply systems / Saratov. Laboratory of Alternative Energy OEP SSC RAS, 2001. 64 p. (In Russ)]
8. Shipulina, YU.V. Metodika opredeleniya teplovykh nagruzok na reaktor generatora- adsorbera gelioenergeticheskoy kholodil'noy ustanovki / YU.V. Shipulina, M.SH. Karimov, M.F. Rudenko // Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2013. No. 1. pp.148-154 [Shipulina, Yu.V. Methodology for determining thermal loads on the reactor of an adsorber generator of a solar energy refrigeration unit / Yu.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko // Bulletin of the ASTU. Series: Marine Engineering and Technology. 2013. No. 1. pp.148-154(In Russ)]
9. Rudenko, M.F. Opredeleniye fizicheskikh kharakteristik aktivnogo uglya dlya adsorbtsionnykh kholo-dil'nykh mashin / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, ZH.A. Anikhuvi, S.V. Zolotokopova // Khimicheskoye i neftega-zovoye mashinostroyeniye. 2000. No.8. s. 39-40 [Rudenko, M.F. Determination of physical characteristics of activated carbon for adsorption refrigeration machines / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, J.A. Anihuvi, S.V. Zolotokopova // Chemical and oil and gas engineering. 2000. No8. pp. 39-40. (In Russ)]
10. Wang, L.W. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // L.W. Wang, Z.Y.Xu, Q.W. Pan, S. Du, Z.Z.Xia. // Appl Energy. 2016.Vol. 169 pp. 846-856.
11. Xu, S.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with acti-vated carbon – ammonia working pair / S.Z. Xu, L.W. Wang, R.Z. Wang // Energy Conversion and Management. 2016. Vol.117. pp. 31-42.
12. Shipulina, YU.V. Modelirovaniye termodinamicheskogo tsikla raboty adsorbtsionnogo gelioenerge-ticheskogo termotransformatora / YU.V. Shipulina, M.F. Rudenko // Vestnik AGTU. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. No.3. s.136-140. [Shipulina, Yu.V. Modeling the thermodynamic cycle of the adsorption solar energy thermal transformer / Yu.V. Shipulina, M.F. Rudenko // Bulletin of the ASTU. Marine engineering and technology. 2011. No3. pp.136-140. (In Russ)]

Сведения об авторах.

Руденко Михаил Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Шипулина Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; e-mail: aleera78@mail.ru

Каримов Марат Шойдаллаулы, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Программная инженерия»; e-mail: rudenko@astu.org

Руденко Александра Михайловна, студент направления «Программный инженеринг» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»; e-mail rudenko@astu.org

Information about the authors.

Mikhail F. Rudenko, Dr. Scie. (Technical), Prof., Department of Life Safety and Environmental Engineering; e-mai:l mf.rudenko@mail.ru

Julia V. Shipulina, Cand. Scie. (Technical), Assoc.Professor, Department of Life Safety and Environmental Engineering»; e-mail: aleera78@mail.ru

Marat Sh. Karimov, Cand. Scie. (Technical), Senior Lecturer, Department of Software Engineering; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Alexandra M. Rudenko, Student of the Direction "Software Engineering"; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.10.2019.

Принята в печать 06.11.2019.

Received 05.10.2019.

Accepted for publication 06.11.2019.