

Ю. В. Чивиленко, Б. Ж. Туркпенбаева, М. Ф. Руденко, В. М. Федотов

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК СОРБЦИОННОГО ТИПА

### Введение

Создание гелиоэнергетических холодильных установок сорбционного типа циклического действия, работающих от энергии солнечной радиации, – это один из способов экономии традиционных энергоносителей и сохранения экологической чистоты окружающей среды. Такие установки могут использоваться для охлаждения и замораживания продуктов и кондиционирования воздуха, а при использовании теплоты абсорбции – для нагрева воды. Кроме того, в них используются дешевые, озонобезопасные хладагенты и сорбенты.

### Результаты исследования и их обсуждение

В связи с этим была исследована возможность повышения эффективности гелиоэнергетических холодильных установок как за счет интенсификации физико-химических процессов, так и путем совершенствования конструкций аппаратов.

Объектом исследования служила гелиоэнергетическая холодильная установка на твердых сорбентах, созданная в Астраханском государственном техническом университете (АГТУ), которая может работать на солях щелочноземельных металлов ( $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{SrBr}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaBr}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ) и холодильных агентах (аммиак, этанол, метиламин, этиламин и др.) и использует естественные температурные перепады окружающей среды в течение суток и солнечную радиацию в дневное время (рис. 1).

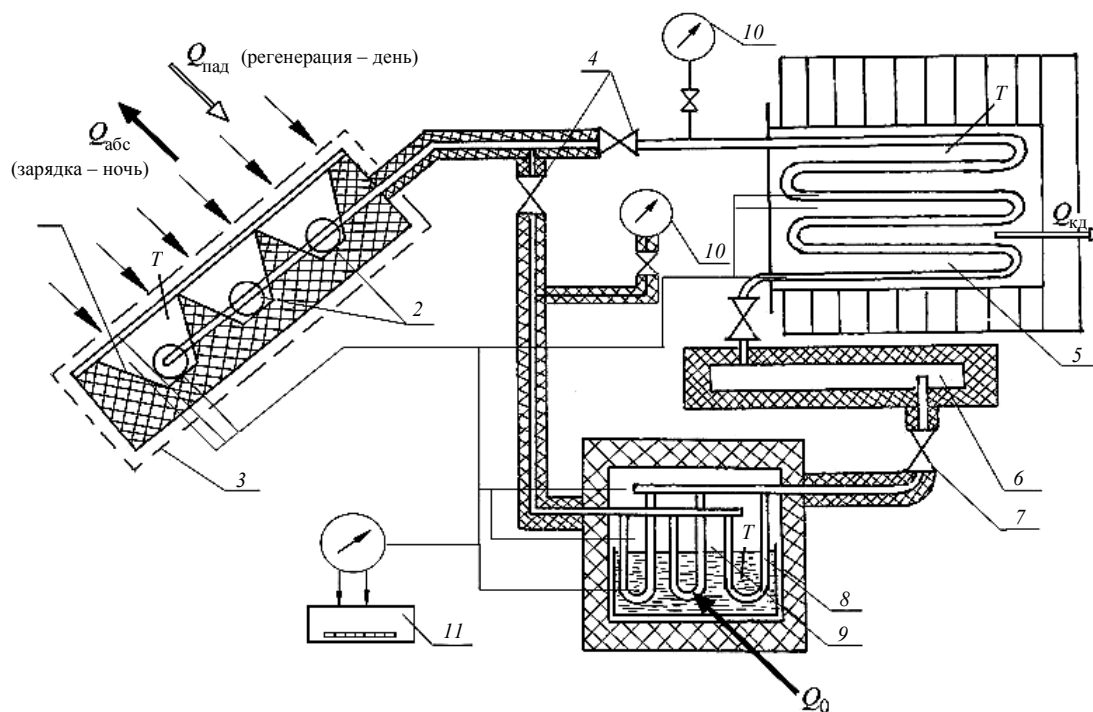


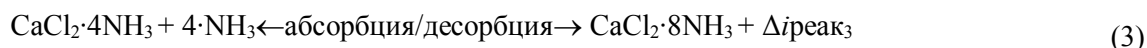
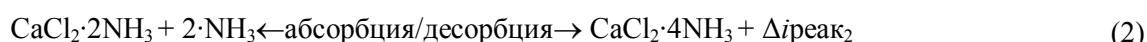
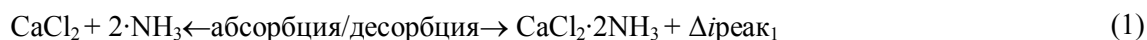
Рис. 1. Схема экспериментальной гелиоэнергетической холодильной установки циклического действия:  
1 – генератор-абсорбер; 2 – реакторы; 3 – «горячий» ящик; 4 – запорные вентили; 5 – конденсатор;  
6 – ресивер; 7 – регулирующий вентиль; 8 – испаритель; 9 – охлаждаемая камера;  
10 – манометры; 11 – прибор для измерения термо-ЭДС

Генератор-абсорбер 1 совмещенного типа представляет собой «горячий ящик» 3 с двухстекляной оболочкой площадью 1,38 м<sup>2</sup> и тремя горизонтальными, равноудаленными друг от друга реакторами 2, установленными внутри плоских зеркал. На поверхность зеркал, концентрирующих солнечную энергию, нанесено конверсионное солнцепоглощающее покрытие [1]. Аппарат ориентирован гелиоприемной частью строго на юг под углом 45° к горизонту. В охлаждаемой камере 9 находится U-образный испаритель 8, нижняя часть которого погружена в емкость с водой. Конденсатор 5 в зависимости от схемного решения установки позволяет исследовать ее при водяном или воздушном охлаждении. В реактор 2 засыпан твердый сорбент, в ресивер – хладагент. Конструкция генератора-абсорбера защищена патентом РФ [2].

Гелиоэнергетическая холодильная установка работает в две фазы: фаза зарядки – абсорбция хладагента при охлаждении абсорбера ночью, сопровождаемая охлаждением испарителя; фаза регенерации – десорбция хладагента при обогреве генератора солнцем, сопровождаемая сжижением хладагента в конденсаторе.

Большое значение имеет выбор схемы работы гелиоэнергетических холодильных установок. Перспективным является применение двухконтурных схем установок с горизонтальным расположением реакторов.

Авторами был проведен анализ и сопоставление рабочих пар (табл.) с помощью критериев работы гелиоэнергетических холодильных установок и уточнены уравнения реакций образования комплексных соединений солей и хладагентов в термодинамических процессах «сухой» абсорбции/десорбции (1)–(3).



**Сравнительная характеристика рабочих пар NH<sub>3</sub>/CaCl<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>/SrCl<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>/BaCl<sub>2</sub>**

Параметр	NH <sub>3</sub> /CaCl <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> /SrCl <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> /BaCl <sub>2</sub>
Температура реакции при 1,6 МПа, °С	95/105	102	98
Температура реакции при 0,3 МПа, °С	54/64	58	56
Условная массовая холодопроизводительность установки, кДж <sub>х.а.</sub> /кг <sub>абс.</sub> *	1 190	973	745
Количество комплексов, участвующих в реакциях	2, 2, 4	1, 1, 6	1, 7
Условная объемная производительность установки, кДж <sub>х.а.</sub> /л <sub>абс.</sub>	333	379	–
Стоимость сорбентов, у. е.	25	100	125
Область применения	Стационарные холодильные установки	Транспортные холодильные установки, кондиционеры	Тепловые насосы

\* х. а. – хладагент; абс – абсорбент.

Условная объемная производительность – это произведение удельной холодопроизводительности при температуре –10 °С, удельной плотности аммиака и отношения объема хладагента к объему соответствующей соли, а условная массовая производительность – это произведение удельной холодопроизводительности при температуре –10 °С, количества молекул аммиака, участвовавших в процессе абсорбции, и отношения молекулярных весов хладагента и соответствующей соли.

Изучение кинетики и динамики развития процессов на различных стадиях протекания реакций образования и распада комплексных соединений аммиакатов проводилось на основе разработанных физико-химических моделей абсорбции/десорбции щелочноземельных солей хладагентами. Модели позволяют оценивать направления процессов, протекающих в гелиоэнергетических холодильных установках и регулируемых температурными параметрами, и учитывать элементы объемного изменения структурной фазы поглотителя в процессах образования аммиакатов и остаточные явления реакций.

Упрощенный теоретический цикл работы гелиоэнергетической холодильной установки может быть представлен и проанализирован в диаграмме Клапейрона (lnP–(–1/T)) [3]. Анализ цикла показал, что основное влияние на эффективность работы гелиоэнергетической холодильной установки оказывает изостерический процесс нагрева и процесс десорбции в генераторе и кипения в испарителе.

Применение плоских солнечных концентраторов может увеличить коэффициент оптической концентрации гелиоприемников в 3–4 раза (рис. 2), а температуру нагреваемой поверхности повысить на 10–12 °С. Теоретические исследования работы реакторов генератора показали, что эффективность плоских зеркальных концентраторов с трубками-поглотителями треугольного сечения (рис. 2), рассчитанных по формуле (4), больше, чем у круглых и плоских трубчатых аналогов [4]. Анализ геометрических параметров плоских концентраторов треугольного сечения в зависимости от углов раскрытия зеркал, размеров трубки-поглотителя и угла падения солнечных лучей позволяет определить оптимальную конструкцию реакторов.

$$C_0 = \frac{\left\{ a + 2 \cdot \left[ \frac{L_{02} \cdot \sin(\Theta/2)}{\cos(\Theta/2)} + \sqrt{|AE|^2 + \left( \frac{|CZ| \cdot \sin(\Theta/2 + \angle X)}{\sin(\Theta/2)} \right)^2} - 2 \cdot |AE| \cdot \left( \frac{|CZ| \cdot \sin(\Theta/2 + \angle X)}{\sin(\Theta/2)} \right) \right] \right\}}{a} \quad (4)$$

где  $\angle X = \arcsin\left(\frac{a \cdot \sin(\Theta - 30^\circ)}{|CZ|}\right)$  и  $|AE| = \sqrt{L_0 \cdot \text{tg}(\Theta/2)^2 + L_{01}^2}$ .

Здесь  $a$  – характерный размер трубки – поглотителя;  $L_i$  – соответствующие геометрические размеры;  $\Theta$  – угол раскрытия зеркал;  $C_0$  – оптический коэффициент.

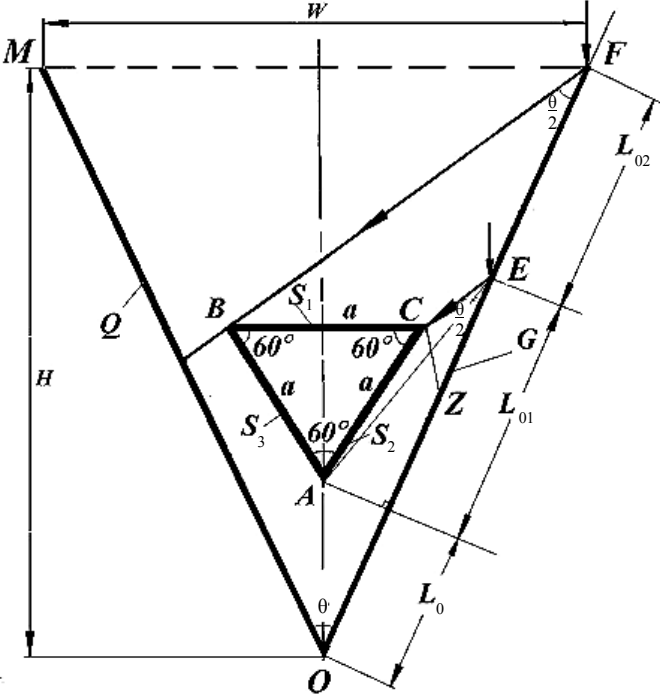


Рис. 2. Расчетная модель зеркальных концентраторов энергии на поглощающей поверхности треугольной формы (равносторонний треугольник вершиной вниз):

$Q$  и  $G$  – поверхности зеркал концентраторов;  $W$  – величина раскрытия зеркал;  
 $S_1, S_2, S_3$  – величина поглощающей поверхности;  $a$  – характерный размер поглощающей поверхности;  
 $H$  – высота концентраторов;  $L_0, L_{01}, L_{02}$  – геометрические размеры;  $\Theta$  – угол раскрытия зеркал

С целью увеличения инсоляции солнечной радиации на рабочие элементы систем и аппаратов были разработаны конверсионные солнцпоглощающие покрытия, полученные методом оксидирования в горячей нитратсодержащей воде [1]. Изучение защитных, оптических и радиационных свойств нагрева полученных покрытий позволило выявить высокую адаптивную способность и увеличить эффективность поверхности в 1,9–2,4 раза. Оксидированные покрытия являются относительно дешевыми и экологически безопасными, вследствие чего они предпочтительнее для применения в гелиоэнергетических холодильных установках.

Методом нестационарного нагрева проволоки получены экспериментальные зависимости коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $a$  и теплоемкости  $C$  щелочноземельных солей  $SrCl_2$  и  $CaCl_2$  от концентрации примесей графита, которые показывают увеличение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  в 1,2–3,7 раза; коэффициента теплоемкости  $C_p$  до 3,9 раза в зависимости от процентного содержания графита и плотности насыпной массы. Повышение теплоемкости соли хлорида кальция при добавлении в него графита в 3,9 раза, очевидно, было вызвано эффектом аддитивности.

Предлагаемые рекомендации были использованы и исследованы на гелиохолодильной установке (см. рис. 1).

Исследования проводились на рабочей паре хлорид кальция (с примесями графита) – аммиак. Добавки графита интенсифицировали процесс абсорбции.

Параметры солнечной радиации измерялись актинометром и пиранометром, температура аппаратов установки – термопарами и термометрами, давление – образцовыми манометрами, количество жидкого хладагента – мерной емкостью ресивера.

На рис. 3 представлены зависимости температурных параметров в аппаратах. Для различных точек нагрева реактора в конструкции генератора в дневное время изменения температуры носят синусоидальный характер. Максимальные значения колеблются в пределах 116,3–119,7 °С. На температуре нижней части реактора сказывается тепловая инерционность (максимальная температура составляет 110 °С).

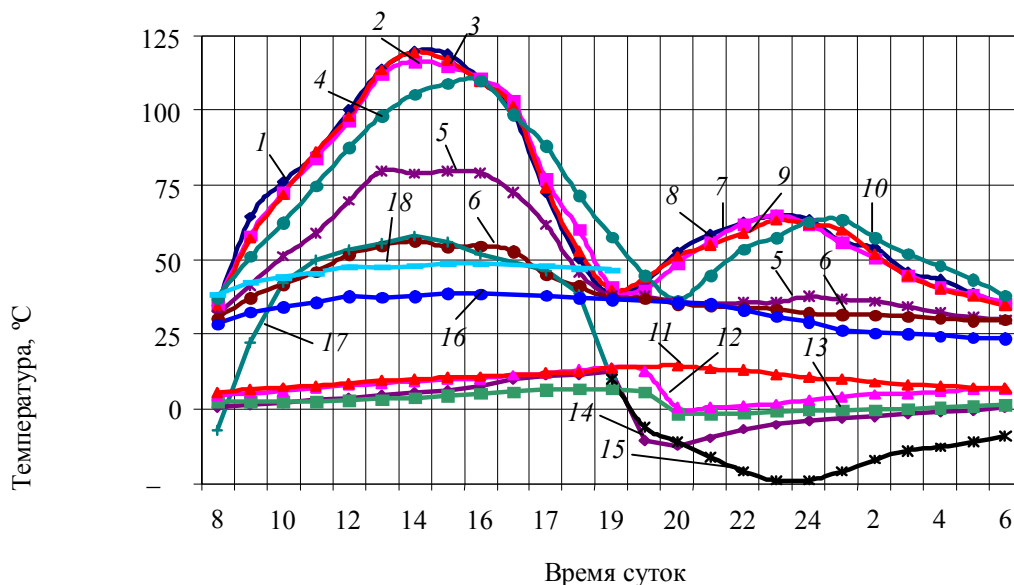


Рис. 3. Графики зависимости измеряемых температур в различных точках аппаратов: 1–3 – температура нагрева верхней поверхности реакторов при десорбции; 4 – температура нижней части реактора при десорбции; 5 – температура торцевой поверхности гелиопремника; 6 – температура нижней поверхности гелиоприемника; 7–9 – температура верхней поверхности реакторов при абсорбции; 10 – температура нижней части реактора при абсорбции; 11 – температура воздуха в камере; 12 – температура воды в охлаждаемой емкости; 13 – температура воздуха в камере у поверхности испарителя; 14 – температура поверхности испарителя; 15 – расчетная температура насыщения кипящего аммиака по давлению в испарителе; 16 – температура окружающей среды; 17 – расчетная температура насыщения аммиака по давлению конденсации; 18 – температура на поверхности конденсатора

Применение горизонтально расположенных реакторов со специальным покрытием в плоских зеркальных концентраторах солнечной энергии позволяет интенсифицировать тепломассообменные процессы десорбции в гелиоэнергетическом термотрансформаторе за счет длительности действия потока энергии солнечной радиации и повышения температуры химико-физических реакций.

Температура абсорбера в различных точках поверхности в ночное время достигала 63,2–64,8 °С при суточных изменениях давления в установке от 0,016 до 0,248 МПа. Теплоту абсорбции можно использовать для нагрева в вечернее время суток.

При открывании регулирующего вентиля в установке наблюдалось бурное протекание процесса абсорбции в начальный момент и резкое закипание хладагента в испарителе. Минимальная температура на поверхности испарителя достигала  $-12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что приводило к замерзанию воды (минимальная температура  $-1,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при этом температура воздуха в камере составляла около  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Исследования были проведены и на поверхностях конденсатора при водяном и воздушном охлаждении. Воздушный конденсатор имеет меньшую тепловую инерционность, что положительно сказывается на работе установки при одноконтурной схеме.

Экспериментальные исследования легли в основу разработки нового технического решения конструкции реактора генератора-абсорбера [2]. Такие реакторы позволяют улучшить работу генератора-абсорбера на основе интенсификации теплообменных процессов и увеличения скорости физико-химических реакций, протекающих в них, а также повысить эффективность и степень термодинамического совершенства всей гелиохолодильной установки.

Нами был проведен сравнительный анализ экспериментальных температурных зависимостей, полученных в июле-августе на открытом полигоне кафедры холодильных машин АГТУ, с аналогичными данными [5, 6]. Анализ показал, что они сходны по характеру изменений. Однако следует учесть другую широту местности расположения испытательного полигона и специфические особенности северного климата.

### Выводы

1. Теоретические исследования термодинамического цикла работы гелиоэнергетической холодильной установки «сухой» абсорбции в диаграмме Клапейрона позволяют определить эффективность подвода и отвода тепловой энергии в протекающих процессах.

2. Теоретические исследования тепломассообменных процессов «сухой» абсорбции/десорбции на основе разработанной физико-химической модели позволяют объяснить динамику изменения теплофизических свойств рабочих веществ при образовании и распаде моно-, ди-, тетра- и октоаммиаков.

3. Исследования теплофизических свойств рабочих веществ ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{SrCl}_2$  и др.) с компонентами добавок графита до 10 % позволяют интенсифицировать теплофизические процессы, протекающие в реакторах гелиоэнергетической холодильной установки.

4. Исследования плоских зеркальных концентраторов солнечной энергии позволили получить аналитические выражения для расчета их геометрических характеристик и энергетических параметров.

5. Солнцепоглощающие покрытия, полученные методом оксидирования, являются экологически чистыми, позволяют улучшить адаптирующие свойства гелиоприемной поверхности и повысить температуру в реакторах на  $8\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что интенсифицирует тепломассообмен в процессе десорбции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко М. Ф., Коноплева Ю. В. Эффективность солнечных гелиоприемников с плоскими концентраторами // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: Сб. науч. тр. – Вып. 1. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. – С. 146–154.
2. Мирзаев Ш. М., Узаков О. Х. Испытания адсорбционного гелиохолодильника бытового назначения // Вестн. Междунар. академии холода. – 2001. – № 1. – С. 38–40.
3. Коноплева Ю. В., Руденко М. Ф., Сорваков И. И. Теплофизическая модель эффективности работы гелиоэнергетических термотрансформаторов // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы IV Междунар. конф. – Вологда: ВолГТУ, 2004. – С. 101–104.
4. Rudenko M. F., Ilyin A. K., Konopleva Y. V. Efficiency of Flat Concentrators of Energy on the Surfaces with Different Configurations in the Solar Powered Devices // Science and Technology: International Journal of Scientific Articles / Association of Universities of Pre-Caspian States. – Atyrau: Atyrau Institute of Oil and Gas. – 2002. – Issue 1. Part 1. – P. 126–130.
5. Ачилов Б. М., Мангалжалов Ч. Холодильная гелиоустановка с твердым сорбентом // Холодильная техника. – 1990. – № 2. – С. 5–7.
6. Инсولیрующие антикоррозионные покрытия для гелиотехники / Е. Е. Кравцов, С. П. Скрипниченко, А. А. Кожевников и др. // Экологичность ресурсо- и энергосберегающих производств на предприятиях народного хозяйства: Материалы Всерос. конф. – Пенза: ПДЗ, ПГАСА, 2002. – С. 84–86.

Статья поступила в редакцию 31.01.2008

**INCREASE OF EFFICIENCY  
OF SOLAR POWER SORPTION REFRIGERATING SYSTEM**

*Yu. V. Chivilenko, B. Zh. Turkpenbaeva, M. F. Rudenko, V. M. Fedotov*

The increase of efficiency of sorption cyclic refrigerating system working on the power of solar energy is considered. The scheme of experimental refrigerating unit is given, the reactions of ammine formations and physical and chemical model of the processes of dry absorption-desorption are described. The comparative characteristic of different operating pairs – sorbent and refrigerant used in the units is presented. The use of flat mirror concentrators focusing solar energy on the triangular reactors of generator-absorber in the solar receiving parts of the unit is examined and the corresponding mathematical dependence is shown. The different sorbents blending with graphite, which increase heat engineering characteristics of materials, are investigated.

**Key words:** sun, refrigerating system, increase of efficiency, intensification of reactions, energy concentrator, selective covering, new constructions, the results of experiments.