

Повышение энергетической эффективности экологически безопасных гелиохолодильных установок

Д-р техн. наук М.Ф. РУДЕНКО, канд. техн. наук Ю.В. ЧИВИЛЕНКО, А.Е. АНТИПОВ
ФГОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»

Solar power refrigerating plant on solid sorbents can be improved through the intensification of physical-chemical processes or by improvement of design. The introduction of graphite additives into the working substances intensifies thermophysical processes. The developed physical and chemical model of the processes of «dry» absorption-desorption makes it possible to explain the dynamics of variation of thermophysical properties of working substances during formation and decomposition of mono-, di-, tetra- and octoammoniates. A formula and nomograms for the calculation of geometrical characteristics of flat mirror concentrators are obtained. Solar absorption coatings of solar receiving surface influence the intensification of heat and mass exchange during desorption.

Создание гелиохолодильных 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, в которых применяются озонобезопасные хладагенты и сорбенты, могут использоваться для охлаждения и замораживания продуктов и кондиционирования воздуха, а также для нагрева воды теплотой абсорбции.

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

Объектом исследования была гелиохолодильная установка на твердых сорбентах, созданная в Астраханском государственном техническом университете. Она использует естественные суточные перепады температуры окружающей среды и солнечную радиацию в дневное время и может работать

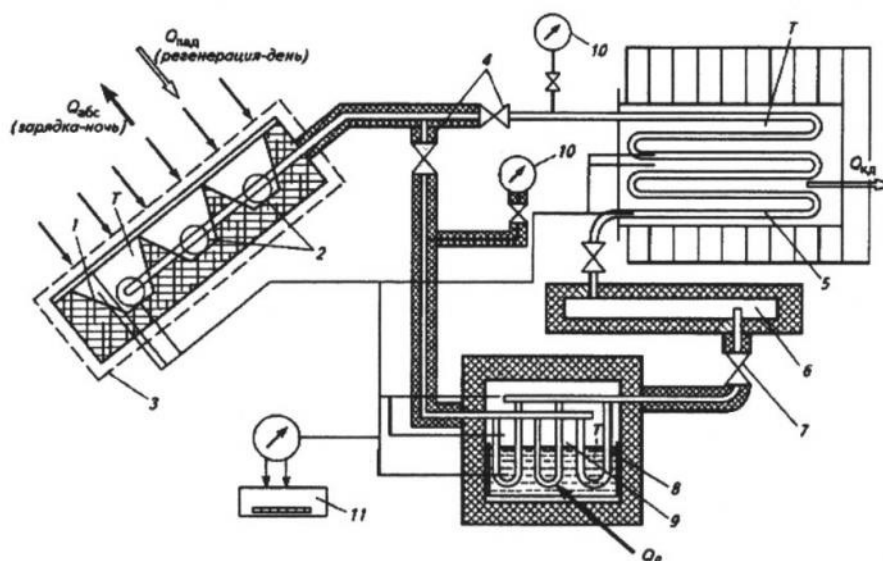


Рис. 1. Схема экспериментальной гелиохолодильной установки циклического действия:

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

на солях щелочноземельных металлов (SrCl_2 , SrBr_2 , CaCl_2 , CaBr_2 , MnCl_2 , BaCl_2) и таких хладагентах, как аммиак, этанол, метиламин, этиламин и др.

Генератор-абсорбер 1 (рис. 1) совмещенного типа состоит из «горячего» ящика 3 с двухстекольной оболочкой (площадью $1,38 \text{ м}^2$) и трех горизонтальных равноудаленных друг от друга реакторов 2, установленных внутри плоских зеркал с солнцепоглощающим покрытием, концентрирующих солнечную энергию [7]. Аппарат был ориентирован гелиоприемной частью строго на юг и расположенным под углом 45° к горизонту. В охлаждаемой камере 9 находился U-образный испаритель 8, нижняя часть которого была погружена в емкость с водой. Конденсатор 5 в зависимости от схемного решения установки позволял исследовать ее при водяном или воздушном охлаждении. В реактор 2 был засыпан твердый сорбент, в ресивер 6 был залит хладагент. Конструкция генератора-абсорбера защищена патентом РФ [6].

Гелиохолодильная установка имеет две рабочие 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.

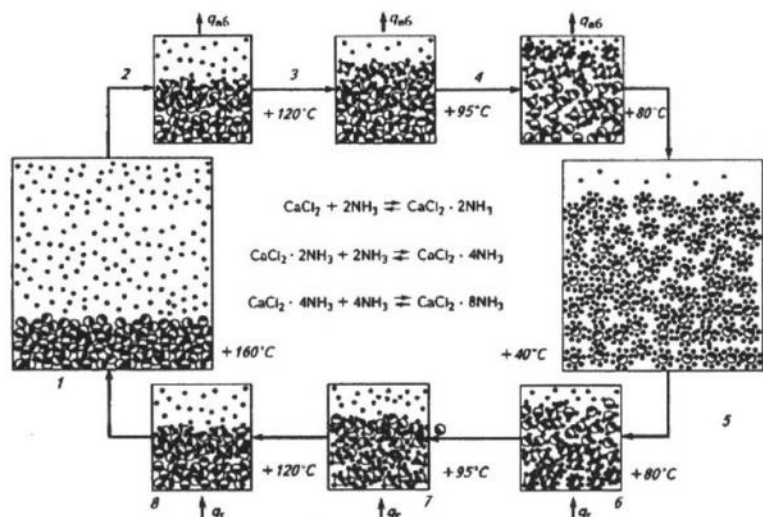


Рис. 2. Физико-химическая модель процесса «сухой» абсорбции-десорбции пары хлорид кальция — аммиак:
 $q_{аб}$ — теплота, отводимая в процессе абсорбции;
 $q_д$ — теплота, подводимая к генератору в процессе десорбции

Очень важен выбор схемы гелиохолодильной установки. Перспективным является применение двухконтурных схем с горизонтальным расположением реакторов.

Авторами были проведены анализ и сопоставление характеристик установки для различных рабочих пар хладагент — абсорбер (табл. 1), а также были уточнены уравнения реакций образования комплексных соединений солей и хладагентов в термо-

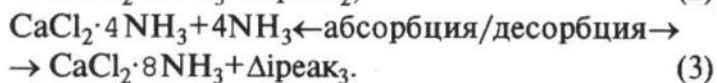
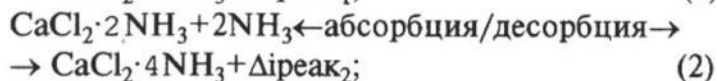
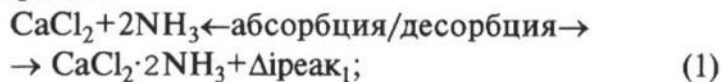
Таблица 1
 Сравнительные характеристики установки для рабочих пар $\text{NH}_3/\text{CaCl}_2$, $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$ и $\text{NH}_3/\text{BaCl}_2$

Характеристика	Пара хладагент/абсорбер		
	$\text{NH}_3/\text{CaCl}_2$	$\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$	$\text{NH}_3/\text{BaCl}_2$
Температура реакции при 1,6 МПа, °С	95/105	102	98
Температура реакции при 0,3 МПа, °С	54/64	58	56
Число комплексов, участвующих в реакциях	2,2,4	1,1,6	1,7
Условная объемная холодопроизводительность установки, $\text{кДж}_{\text{хл}}/\text{л}^*_{\text{абс}}$	333	379	—
Условная массовая холодопроизводительность установки, $\text{кДж}_{\text{хл}}/\text{кг}^{**}_{\text{абс}}$	1190	973	745
Стоимость сорбентов, у.е.	25	100	125
Области применения и использования	Стационарные холодильные установки	Транспортные холодильные установки, кондиционеры	Тепловые насосы

* Условная объемная холодопроизводительность — это произведение удельной холодопроизводительности при температуре -10°C , удельной плотности 1 моль аммиака и отношения объема хладагента к объему соответствующей соли.

** Условная массовая холодопроизводительность — это произведение удельной холодопроизводительности при температуре -10°C , количества участвовавших в процессе абсорбции молекул аммиака и отношения молекулярных масс хладагента и соответствующей соли.

динамических процессах «сухой» абсорбции—десорбции:



Изучение кинетики и динамики процессов в различных стадиях протекания реакций образования и распада комплексных соединений аммиакатов проводилось на основе разработанных физико-химических моделей абсорбции — десорбции хладагента щелочноземельными солями (рис. 2). Модели позволяют оценивать направления процессов в гелиохолодильных установках, регулируемые температурными параметрами, и учитывать элементы объемного изменения структурной фазы поглотителя в процессах образования аммиакатов и остаточные явления реакций. Так, например, при «сухой» абсорбции аммиака хлоридами щелочноземельных металлов в работу включаются сначала верхние слои соли, затем средние и потом нижние, при процессах десорбции процесс разложения аммиакатов протекает также послойно, начиная с верхних слоев и кончая нижними [1]. При многократности циклов работы и неполном протекании реакций (из-за недостижения необходимых темпе-

ратур) возможно накопление комплексов аммиакатов в реакторе генератора-абсорбера. Неполное протекание реакций может привести к потере первоначальной структуры соли, превращению твердого сорбента в порошкообразную массу с потерей абсорбционных свойств.

Упрощенный теоретический цикл работы гелиохолодильной установки может быть представлен и проанализирован в диаграмме Клапейрона (рис. 3). Он состоит из процесса изостерического нагрева октааммиаката $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ до начала процесса десорбции АБ; изобарного процесса десорбции БВ (БГ, БК) с подводом теплоты; изостерического охлаждения комплексных соединений до начала абсорбции ВЕ (ГД, КМ); изобарного процесса абсорбции с отводом теплоты МА (ДА; ЕА); кипения в испарителе З с подводом теплоты; и процесса конденсации рабочего вещества в конденсаторе Ж с отводом теплоты [3]. Анализ цикла показал, что основное влияние на эффективность работы гелиохолодильной установки оказывают изостерический процесс нагрева и процесс десорбции в генераторе, а также процесс кипения в испарителе.

Применение плоских солнечных концентраторов может увеличить коэффициент оптической концентрации гелиоприемников в 3 — 4 раза, а температуру нагреваемой поверхности повысить на 10...12 °С. Теоретические исследования работы ре-

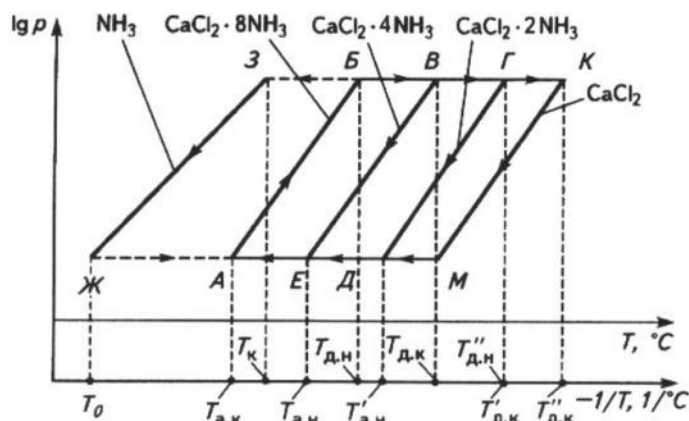


Рис. 3. Термодинамический цикл работы гелиохолодильной установки на рабочей паре $\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$ в диаграмме Клапейрона [$\ln p - (-1/T)$]:

T_0 — температура кипения хладагента;
 T_k — температура конденсации хладагента;
 $T_{a,n}$ — температура начала абсорбции ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$);
 $T_{a,k}$ — температура конца абсорбции;
 $T_{d,n}$ — температура начала десорбции;
 $T_{d,k}$ — температура конца десорбции ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$);
 $T'_{a,n}$ — температура начала абсорбции ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$);
 $T'_{a,k}$ — температура конца абсорбции ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$);
 $T'_{d,n}$ — температура начала десорбции ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$);
 $T'_{d,k}$ — температура конца десорбции (CaCl_2).

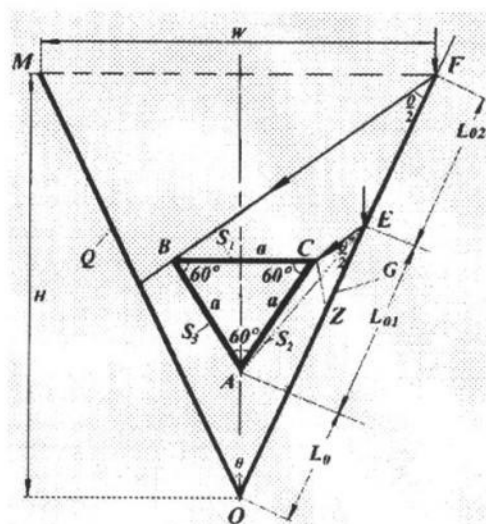


Рис. 4. Расчетная модель зеркальных концентраторов энергии на поглощающей поверхности треугольной формы (равносторонний треугольник вершиной вниз):
 Q и G — поверхности зеркал концентраторов;
 W — величина раскрытия зеркал; H — высота концентраторов; S_1, S_2, S_3 — поглощающие поверхности;
 a — характерный размер поглощающей поверхности; L_{01}, L_{02} — геометрические размеры;
 θ — угол раскрытия зеркал

акторов генератора показали, что эффективность плоских зеркальных концентраторов с трубками-поглотителями треугольного сечения (см. рис. 3), рассчитанными по формуле (4), больше, чем у круглых и плоских трубок-аналогов [8]. 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.

$$C_0 = \frac{\left\{ a + 2 \left[\frac{L_{01} \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\Theta}{2}\right)} + \sqrt{|AE|^2 + \left[\frac{|CZ| \sin\left(\frac{\Theta}{2} + \angle X\right)}{\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \right]^2} - 2|AE| \left[\frac{|CZ| \sin\left(\frac{\Theta}{2} + \angle X\right)}{\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \right] \right\}}{a} \quad (4)$$

где C_0 — оптический коэффициент;

L_{01} — соответствующие геометрические размеры;

Θ — угол раскрытия зеркал;

$$|AE| = \sqrt{\left(L_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right)^2 + L_{01}^2 \right)};$$

$|CZ|$ — (рис. 4);

$$\angle X = \arcsin\left(\frac{a \sin(\Theta - 30)}{|CZ|} \right);$$

a — характерный размер трубки-поглотителя.

С целью увеличения инсоляции рабочих элементов систем и аппаратов были разработаны конвер-

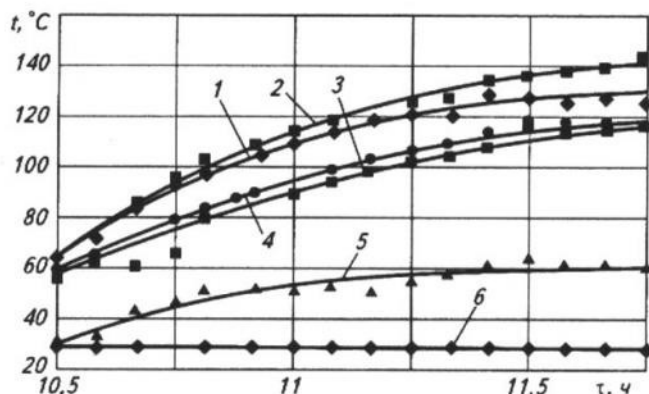


Рис. 5. Зависимость температур нагрева адаптирующей поверхности t от времени солнечного облучения τ :

1 — оксидирование; 2 — хроматирование; 3 — оцинковка;
4 — окрашивание; 5 — белая поверхность;
6 — температура наружного воздуха

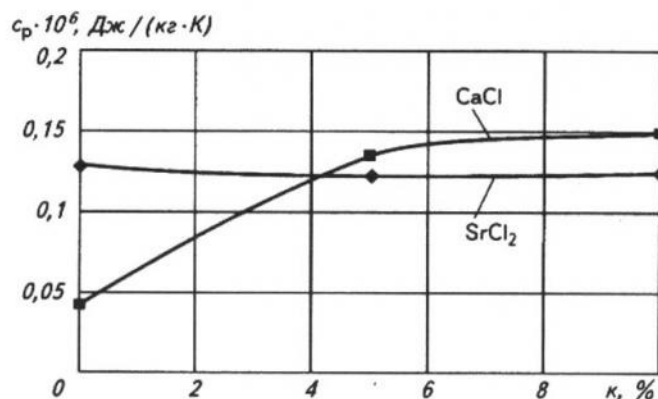


Рис. 6. Зависимости коэффициента теплоемкости c_p CaCl_2 и SrCl_2 от концентрации примесей графита κ

сионные солнцезащисающие покрытия, полученные методом оксидирования в горячей нитрат-содержащей воде [4]. Покрытия обладают высокой адаптивной способностью, эффективность поверхности увеличивается в 1,9 — 2,4 раза (рис. 5). Оксидированные покрытия относительно дешевы и экологически безопасны, вследствие чего наиболее предпочтительны для применения в гелиохолодильных установках. Они позволяют повысить температуру в реакторах на 8...10 °C.

Методом нестационарного нагрева проволоки получены экспериментальные зависимости коэффициентов теплопроводности λ , температуропроводности a и теплоемкости c_p щелочноземельных солей SrCl_2 и CaCl_2 от концентрации в них примесей графита, которые показывают увеличение коэффициента теплопроводности λ в 1,2 — 3,7 раза, коэффициента теплоемкости c_p — до 3,9 раза (рис. 6) в зависимости от процентного содержания графита и плотности насыпной массы. Эффект повышения теплоемкости соли хлорида кальция при добавлении в него графита в 3,9 раза, очевидно, был вызван эффектом аддитивности. В итоге применением рабочих веществ с компонентами добавок удалось интенсифицировать теплофизические процессы, протекающие в гелиохолодильных установках.

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

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

Параметры солнечной радиации измеряли актинометром и пиранометром, температуры — термо-

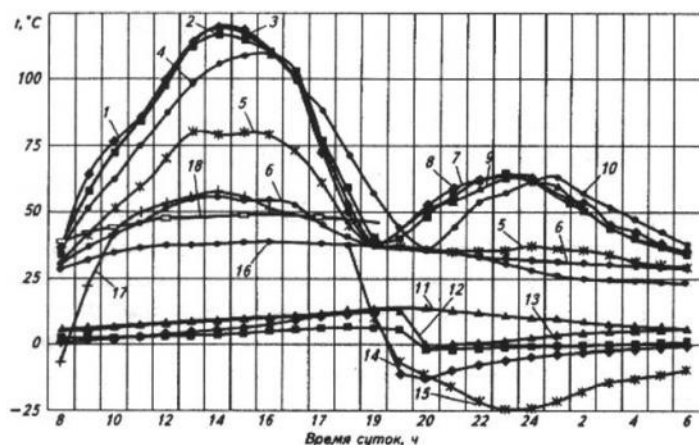


Рис. 7. Графики зависимости измеряемых температур t в различных точках аппаратов от времени суток:

1 – 3 – температура нагрева верхней поверхности реакторов при десорбции; 4 – температура нижней части реактора при десорбции; 5 – температура торцевой поверхности гелиоприемника; 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

парами и термометрами, давление — образцовыми манометрами, количество жидкого хладагента — мерной емкостью ресивера.

На рис. 7 представлены суточные изменения температурных параметров в аппаратах. Для различных точек аппаратов в дневное время температуры имеют синусоидальный характер изменения. Максимальные их значения колеблются в пределах $116,3...119,7^\circ\text{C}$. На температуре нижней (теневой) части реактора сказывается тепловая инерционность (максимальная температура составляет 110°C).

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

Температуры в различных точках поверхности абсорбера в ночное время достигали $63,2...64,8^\circ\text{C}$

при суточных изменениях давления в установке от $0,016$ до $0,248$ МПа. Теплоту абсорбции можно использовать для нагрева в вечернее время суток.

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

Исследования 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 [5]. Такие реакторы позволяют улучшить работу генератора-абсорбера на основе интенсификации теплообменных процессов и увеличения скоростей физико-химических реакций, протекающих в них, а также повысить эффективность и степень термодинамического совершенства всей гелиохолодильной установки.

Проведен сравнительный анализ экспериментальных температурных зависимостей, полученных в июле — августе на открытом полигоне кафедры холодильных машин АГТУ с аналогичными данными работ [2, 5]. При сходности характера температурных зависимостей следует учесть другую широту местности расположения испытательного полигона и специфические особенности северного климата.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

✓ Теоретические исследования термодинамического цикла работы гелиохолодильной установки «сухой» абсорбции в диаграмме Клапейрона дают возможность определить эффективность подвода и отвода тепловой энергии в протекающих процессах.

✓ 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 октааммиакатов.

✓ Введение добавок графита (до 10 %) в рабочие вещества (CaCl_2 , SrCl_2 и др.) позволяет интенсифицировать теплофизические процессы, протекающие в реакторах гелиохолодильной установки.

✓ По результатам исследования плоских зеркальных концентраторов солнечной энергии были получены аналитические выражения и номограммы для расчета их геометрических характеристик и энергетических параметров. Теоретически обоснован и рассчитан с использованием оптического коэффициента гелиоэнергетический реактор треугольной формы с плоскими зеркальными концентраторами, имеющий лучшие энергетические и экономические характеристики, чем круглый. Мощность гелиоприемников увеличивается в 3 – 4 раза, а температура – на 10...12 °С.

✓ Применяемые солнцепоглощающие покрытия, полученные методом оксидирования, являются экологически чистыми, обеспечивают улучшенные адаптирующие свойства гелиоприемной поверхности и позволяют повысить температуру в реакторах на 8...10 °С, что интенсифицирует тепломассообмен в процессе десорбции.

Список литературы

1. Антипов А.Е., Руденко М.Ф., Нургалиев Е.Р. Методика исследования теплофизических процессов образования аммиаковых солей / Материалы IV Международ. конф. «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем». – Вологда: ВолГТУ, 2004.
2. Ачилов Б.М., Мангалжалов Ч. Холодильная гелиоустановка с твердым сорбентом // Холодильная техника. 1990. № 2.
3. Коноплева Ю.В., Руденко М.Ф., Сорваков И.И. Теплофизическая модель эффективности работы гелиоэнергетических термотрансформаторов / Материалы IV Международ. конф. «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем». – Вологда: ВолГТУ, 2004.
4. Кравцов Е.Е., Скрипниченко С.П., Кожевников А.А., Старкова Н.Н., Руденко М.Ф., Коноплева Ю.В., Грохов А.В. Инсолирующие антикоррозионные покрытия для гелиотехники // Материалы Всероссийской конф. «Экологичность ресурсо- и энергосберегающих производств на предприятиях народного хозяйства». – Пенза: ПДЗ, ПГАСА, 2002.
5. Мирзаев Ш.М., Узakov О.Х. Испытания адсорбционного гелиохолодильника бытового назначения // Вестник Международной академии холода. 2001. Вып. 1.
6. Патент 2263859 РФ. М.Ф. Руденко, А.К. Ильин, Ю.В. Коноплева, Е.Ю. Заикин, Р.А. Ильин. Реактор генератора-абсорбера гелиохолодильной установки (варианты).
7. Руденко М.Ф., Коноплева Ю.В. Эффективность солнечных гелиоприемников с плоскими концентраторами // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: Сб. науч. тр. Вып.1. – Саратов: Из-во Саратов. ун-та, 2001.
8. 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.