

8. Kuzmina L. I. Exact solution for 1D deep bed filtration with particle capture by advection and dispersion / L. I. Kuzmina, Yu. V. Osipov // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2021. – Vol. 137. – P. 103830.
9. Nazaikinskii V. E. Exact solution for deep bed filtration with finite blocking time / V. E. Nazaikinskii, P. G. Bedrikovetsky, L. I. Kuzmina, Y. V. Osipov // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2020. – Vol. 80 (5). – P. 2120–2143.
10. Kuzmina L. I. Analytical model for deep bed filtration with multiple mechanisms of particle capture / L. I. Kuzmina, Y. V. Osipov, Y. G. Zhiglova // International Journal of Non-linear Mechanics. – 2018. – Vol. 105. – P. 242–248.
11. Kuzmina L. I. Asymptotics for filtration of polydisperse suspension with small impurities / L. I. Kuzmina, Y. V. Osipov, T. N. Gorbunova // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 2021. – Vol. 42 (1). – P. 109–126.
12. Osipov Y. V. Calculation of filtration of polydisperse suspension in a porous medium / Y. V. Osipov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 117. – P. 00131.
13. Kuzmina L. I. Deep bed filtration asymptotics at the filter inlet / L. I. Kuzmina, Yu. V. Osipov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 153. – P. 366–370.
14. Safina G. L. Calculation of retention profiles in porous medium / G. L. Safina // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 170. – P. 21–28.
15. Сафина Г. Л. Решение задачи фильтрации численными методами Numerical solution of filtration in porous rock / Г. Л. Сафина // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 4 (75). – С. 68–73.
16. Галагуз Ю. П. Моделирование процесса вытеснения суспензии / Ю. П. Галагуз, Г. Л. Сафина // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 13 (8). – С. 944–951.
17. You Z. Asymptotic model for deep bed filtration / Z. You, Y. Osipov, P. Bedrikovetsky, L. Kuzmina // Chemical Engineering Journal. – 2014. – Vol. 258. – P. 374–385.
18. Dev Burman G. K. Groundwater exploration in hard rock terrain: An experience from eastern India / G. K. Dev Burman, P. K. Das // The Hydrological Basis for Water Resources Management. – 1990. – Vol. 197. – P. 19–30.

© Г. Л. Сафина, Э. Р. Рахматуллина

Ссылка для цитирования:

Сафина Г. Л., Рахматуллина Э. Р. Фильтрация суспензии в пористой среде с двумя типами функции концентрации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 16–22.

УДК 620.9:621.57

DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-22-28

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОРБЦИОННЫЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

М. Ф. Руденко, В. Н. Саинова, Ю. В. Шипулина, Л. П. Третьяк, А. А. Токарева

Руденко Михаил Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: mf.rudenko@mail.ru;

Саинова Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: sainovav@yandex.ru;

Шипулина Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: aleera78@mail.ru;

Третьяк Людмила Павловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: miss.tretyak@list.ru;

Токарева Анна Анатольевна, кандидат географических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: margam_gamma@mail.ru

Энергосбережение и чистая экология – две основные тенденции развития современной энергетики южных регионов страны для производства электрической энергии, горячей воды, отопления и кондиционирования. Рассматриваются термотрансформаторы абсорбционного и адсорбционного принципа действия различного назначения (тепловые насосы и холодильные машины), выпускаемые промышленностью. Предлагаются экспериментальные разработки термотрансформаторов сорбционного типа циклического действия, реализующие технологию получения теплоты и холода из энергии солнечной радиации. Особенностью их работы является использование физических и химических процессов адсорбции – десорбции и «сухой» абсорбции – десорбции в обратных термодинамических циклах. Конструктивно они представляют развитые гелиоприемные аппараты, состоящие из двух параллельно соединенных генераторов-адсорберов, реакторы которых

устанавливаются в индивидуальных теплоизолированных корпусах типа «горячий ящик». Повышенная эффективность работы таких термотрансформаторов 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. Геометрические характеристики генератора-адсорбера основаны на расчетах оптической и теплоэнергетической эффективности моделей аппарата.

Ключевые слова: энергосбережение, солнечная энергия, сорбционные термотрансформаторы, адсорбция, «сухая» абсорбция, сорбенты, хладагенты, отопление, кондиционирование.

SOLAR SORPTION THERMOTRANSFORMERS FOR HEATING AND AIR CONDITIONING SYSTEMS

M. F. Rudenko, V. N. Sainova, Yu. V. Shipulina, L. P. Tretyak, A. A. Tokareva

Rudenko Mikhail Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: mf.rudenko@mail.ru;

Sainova Victoria Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: sainovav@yandex.ru;

Shipulina Yuliya Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: aleera78@mail.ru;

Tretyak Lyudmila Pavlovna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: miss.tretyak@list.ru;

Tokareva Anna Anatolyevna, Candidate of Geography, Associate Professor of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: marga_gamma@mail.ru

Energy saving and clean ecology are two main trends in the development of modern energy in the southern regions of the country for the production of electricity, hot water, heating and air conditioning. Thermotransformers of the absorption and adsorption principle of operation for various purposes (heat pumps and refrigeration machines) produced by the industry are considered. Experimental developments of thermotransformers of the sorption type of cyclic action are proposed, which implement the technology for obtaining heat and cold from the energy of solar radiation. A feature of their work is the use of physical and chemical processes of adsorption - desorption and "dry" absorption-desorption in reverse thermodynamic cycles. Structurally, they are highly developed solar receivers, consisting of two parallel-connected generator-adsorbers, the reactors of which are installed in individual heat-insulated "hot box" housings. The increased efficiency of such thermotransformers lies in the optimal arrangement of all elements of the generator-adsorber, including a reactor, two flat mirror concentrators, a thermal substrate, a reduced volume of internal air space, a double-glazed window and a rational thickness of the heat-insulating ripor. The geometric characteristics of the generator-adsorber are based on the calculations of the optical and thermal power efficiency of the apparatus models.

Keywords: energy saving, solar energy, sorption thermal transformers, adsorption, "dry" absorption, sorbents, refrigerants, heating, air conditioning.

Энергосбережение и чистая экология – две основные тенденции развития современной энергетики южных регионов страны для производства электрической энергии, горячей воды, отопления и кондиционирования. Первая тенденция заключается в использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии и прежде всего солнечной энергии и вторичных источников тепловой энергии от технологических отходов или тепловых сбросов производств. Вторая тенденция вытекает из первой, то есть при производстве электроэнергии, теплоты и холода используются технологии и технические устройства, исключающие выбросы в атмосферу парниковых и углекислого газов. Чистыми технологиями при производстве электрической энергии может быть фотоэлектриче-

ское преобразование энергии солнечной радиации в кристаллах полупроводниковых веществ, таких как кремний, германий, индий и др. Получение теплоты от энергии солнца возможно при непосредственном нагреве теплоносителей в водо- и воздушнонагреваемых коллекторах типа «горячий ящик» или вакуумных коллекторах, используя для увеличения мощности солнечной энергии концентраторы солнечной энергии различной конфигурации или линзы Френеля, а для лучшего поглощения солнечного излучения – селективные покрытия твердых поверхностей. Получение холода от энергии солнечной радиации более сложный процесс. Его можно организовать, используя физико-химические процессы абсорбции и адсорбции [1–3].

Сорбционные термотрансформаторы – это устройства, в которых тепловая энергия преобразуется из низко- в высокопотенциальную с меньшим коэффициентом трансформации (повышающие тепловые насосы до температуры 120–140 °С); из высокопотенциальной энергии в тепловую меньшего потенциала, но с высоким коэффициентом трансформации (понижающие тепловые насосы, температура на выходе 50–60 °С); из высокопотенциальной энергии в низкопотенциальную с высоким коэффициентом трансформации (холодильные машины, кондиционеры с температурой на выходе –8 °С ... +10 °С) [4, 5]. Сорбционные термотрансформаторы по сравнению с парокомпрессионными имеют ряд преимуществ: меньшее потребление электроэнергии, низкие шумовые характеристики, отсутствие вибрации, простота обслуживания и эксплуатации, установка машин вне специальных закрытых помещений.

К таким тепловым термотрансформаторам прежде всего следует отнести абсорбционные бромистолитиевые и водоаммиачные тепловые насосы и холодильные машины. Эти установки выпускаются в полной заводской готовности как в России большой мощности 2500–5000 кВт [6], так и за рубежом малой, средней и крупной производительности 35–250 кВт и больше [7]. Крупными установками (например, АБТН, АБХМ Теплосибмаш, г. Новосибирск), можно осуществлять обогрев и охлаждения крупных офисных помещений, гипермаркетов, бассейнов, крупных охлаждающих станций и т. п.

Особый интерес представляют гелиоэнергетические термотрансформаторы циклического действия, перспективы развития и способы совершенствования рабочих веществ (сорбентов, адсорбатов, озонобезопасных хладагентов), которые можно применять в таких установках для систем отопления и кондиционирования.

В рамках данной статьи рассмотрим результаты разработок и экспериментальных исследований сорбционных термотрансформаторов, которые могут работать от энергии солнечной радиации как в дневное время, когда есть тепло и солнце и возможно накопление теплоты, так и в ночное время, когда можно получать тепло в адсорбере, а охлаждающий эффект в испарителе. Такие термотрансформаторы могут применяться в системах отопления и получения горячей воды; сушки древесины, фруктов, зерна; опреснения и охлаждения воды; охлаждения и хранения медикаментов и пищевых продуктов, пива и молока; замораживания рыбы и мяса; получения льда; кондиционирования и охлаждения воздуха в бытовых и производственных помещениях.

В гелиоэнергетических термотрансформаторах реализуется технология получения тепла и холода

за счет использования солнечной энергии и суточного перепада температур окружающей среды.

Термотрансформаторы циклического действия можно разделить на термотрансформаторы «сухой» абсорбции и установки адсорбционного типа. Работа установок «сухой» абсорбции основана на физико-химических изотермических реакциях образования из некоторых щелочноземельных солей и хладагентов (аммиака) аммиакатов при охлаждении с повышением объема образующегося вещества в два–три раза. Эта реакция обратима и при подводе теплоты и нагреве аммиакатов соединение распадается на соль и чистый хладагент. Реакция идет ступенчато, фиксируя при определенных значениях температур определенное количество долей аммиака в соли. Соли могут быть разные: CaCl_2 , SrCl_2 , BaCl_2 , MgCl_2 , CaBr_2 , SrBr_2 и др., а хладагентом – аммиак (NH_3) и метанол (CH_3OH) [8, с 40].

Работа термотрансформаторов адсорбционного типа основана на физическом процессе: при понижении температуры сорбента сгущать пары адсорбата (хладагента) над поверхностью его и конденсировать в поры с отводом теплоты. Этот процесс является обратимым, масса сорбента при насыщении хладагентом в объеме не изменяется.

Термотрансформаторы адсорбционного типа циклического действия работают на таких сорбентах, как активные угли, силикагель, цеолит, а в качестве адсорбатов используются озонобезопасные хладагенты аммиак, вода, метанол, этанол [9].

Гелиоэнергетические термотрансформаторы циклического действия по конструкции не различаются. Различаются в генераторе-адсорбере конструкции реакторов, в которых находится сорбент. В установках «сухой» абсорбции внутренняя конструкция реактора должна иметь подвижные элементы, компенсирующие объемные расширения сорбента. Если реактор простой (пустая цилиндрическая конструкция), то сорбент обычно не досыпают в него, что снижает величину рабочей поверхности нагрева. Улучшение объемной поверхности сорбента в реакторе осуществляется его гранулированием, а улучшение теплопроводящих свойств сорбента – добавлением в него примесей графита или армированием [10]. В реакторах термотрансформаторов адсорбционного типа может применяться внутреннее ребрение поверхности [11].

Исследование эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора в условиях северных широт солнцезактивной зоны, которой является Астраханский регион, проводилось на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 1.

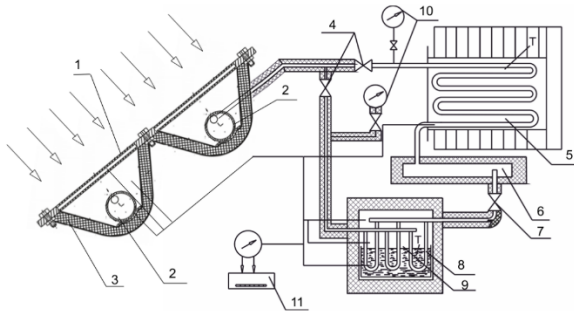


Рис. 1. Экспериментальная гелиоэнергетическая установка термотрансформатора:
 1 – генератор-адсорбер, 2 – реактор, 3 – гелиоприемное устройство «горячий ящик», 4 – вентили, 5 – конденсатор, 6 – ресивер, 7 – вентиль подачи хладагента, 8 – испаритель, 9 – холодильная камера, 10 – манометры, 11 – цифровой микроамперметр В7-40

Специфика метрологических характеристик северных широт заставляет в гелиоэнергетических установках развивать гелиоприемную часть, в которую могут входить несколько параллельно соединенных реакторов аппарата – генератора-адсорбера. Чем больше производительность термотрансформатора, тем должно быть и больше реакторов, расположенных горизонтально земли на некоторой высоте друг от друга в отдельных изолированных корпусах типа «горячий ящик». Гелиоприемная часть установки располагается строго на юг, под углом наклона к горизонту, равным широте местности (45° для Астраханской области).

Компоновка генератора-адсорбера из нескольких реакторов в индивидуальных теплоизолирующих каркасах типа «горячий ящик» с разъемной в торце пробкой позволяет сократить объем воздушного пространства внутри, снижая днем тепловые потери за счет конвекции, а применение двойного вакуумного стеклопакета уменьшает потери через прозрачную часть. Съемные пробки улучшают отвод теплоты от реактора ночью. Реакторы изготовлены из цилиндрической цельнотянутой трубы диаметром $\varnothing 76 \times 4$ мм, внутри них установлены перфорированные оребренные хладопроводы малого диаметра. Остекленная площадь поверхности каждого гелиоприемного

устройства составляет $0,64 \text{ м}^2$. Наружная поверхность реактора имеет селективное покрытие.

В установке имеются и другие аппараты, осуществляющие термодинамический цикл работы термотрансформатора: водяной конденсатор, ресивер, холодильная камера с испарителем и регулирующая арматура.

Работает установка следующим образом. В реакторе гелиоприемного устройства генератор-адсорбера находится насыщенный сорбент. Под действием энергии солнечной радиации нагреваются реактор и сорбент. Из реактора десорбируются пары адсорбата, которые направляются в конденсатор, где охлаждаются и сжижаются, накапливаясь в ресивере. В вечернее время, когда нет солнца и понижается температура окружающей среды, охлажденный адсорбат дросселируется в испаритель. В нем начинается процесс испарения и кипения адсорбата при пониженном давлении и его пары поглощаются сухим сорбентом реактора. В основе принципа работы таких установок заложено суточное изменение температуры воздуха окружающей среды и энергии солнечной радиации. В испарителе на теплообменной поверхности температура в ночное время достигает минусовых значений, что может привести в охлаждаемом контуре к замерзанию воды и образованию льда. Днем, когда эффекта охлаждения нет и идет процесс накопления жидкого адсорбата в ресивере, полученный ночью лед поддерживает в холодильной камере температуру порядка $4\text{--}8 \text{ }^\circ\text{C}$. Последние разработки позволили модернизировать конструкцию гелиоэнергетического термотрансформатора за счет установки концентраторов солнечной энергии из плоских зеркал, совершенствования реактора и улучшения теплоизоляции корпуса гелиоприемника.

Расчеты основных геометрических характеристик элемента компоновки генератора-адсорбера экспериментальной установки были выполнены на основании расчетов по оптической и теплоэнергетической моделям (рис. 2).

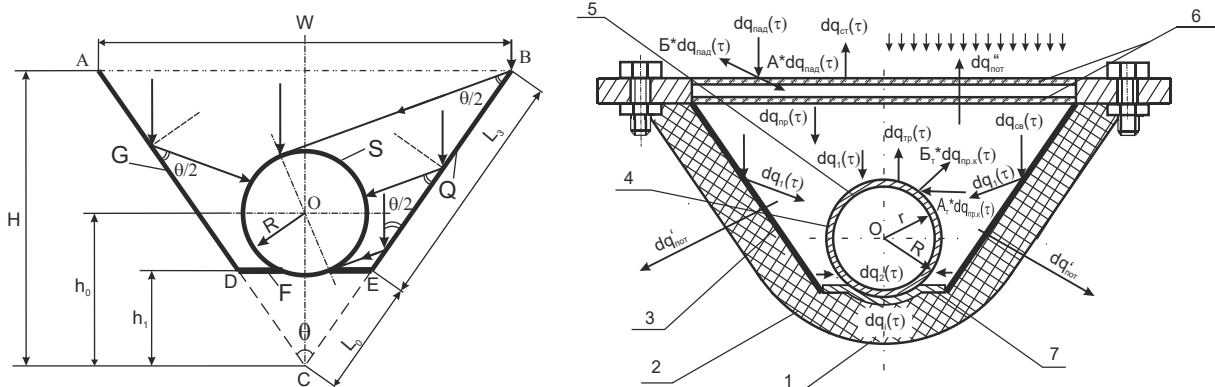


Рис. 2. Оптическая (а) и теплоэнергетическая (б) модели компоновки элемента генератора-адсорбера экспериментальной установки:
 1 – наружный корпус гелиоприемника типа «горячий ящик», 2 – изоляция корпуса, 3 – плоские зеркальные отражатели, 4 – корпус реактора, 5 – адсорбент (активированный уголь), 6 – стеклопакет, 7 – металлическая подложка

Оптическая модель позволяет оптимизировать геометрические размеры плоских зеркальных концентраторов на круглую поверхность реактора в диапазоне следующих соотношений от $W/2 \cdot R = 3,5$ до $W/\pi \cdot R = 3,5$ при угле раскрытия $\theta = 55^\circ$, что позволяет эффективно фокусировать энергию солнечной радиации (R – радиус внешней окружности трубки реактора; W – величина раскрытия концентратора).

Оптическая часть экспериментальной установки элемента генератора-адсорбера была рассчитана и сконструирована по следующим геометрическим выражениям (рис. 2, а):

$$W/\pi \cdot R = 3,5; \quad H = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [2 \cdot (\operatorname{tg} \theta / 2)];$$

$$h_1 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot (\operatorname{tg} \theta / 2)];$$

$$L_0 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [8 \cdot (\sin \theta / 2)];$$

$$L_3 = 3 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot (\sin \theta / 2)]; \quad h_0 = h_1 + R.$$

Теплоэнергетическая модель помогает определить полный баланс тепловой энергии термотрансформатора при подводе солнечной энергии к гелиоприемному устройству днем и отводе тепловой энергии ночью. Все это обуславливает эффективность работы всей установки:

- в дневное время баланс между падающей энергией $dq_{\text{пад}}(\tau)$ от солнечной радиации и энергиями, идущими на процессы изостерического нагрева $dq_{\text{из}}(\tau)$, десорбции $dq_{\text{дес}}(\tau)$, потерь $dq_{\text{пот}}(\tau)$ теплоты в окружающую среду и энергией $dq_{\text{кон}}(\tau)$, отводимой в конденсаторе

$$dq_{\text{пад}}(\tau) = dq_{\text{дес}}(\tau) + dq_{\text{из}}(\tau) + dq_{\text{пот}}(\tau) = dq_{\text{кон}}(\tau);$$

- в ночное время баланс между отводимой энергией от реактора $dq_{\text{ад}}(\tau)$ при процессе адсорбции и энергиями, включающими теплоту $dq_0(\tau)$, отводимую из испарителя, и $dq'_{\text{из}}(\tau)$ изостерического охлаждения сорбента в реакторе

$$dq_{\text{ад}}(\tau) = dq_0(\tau) + dq'_{\text{из}}(\tau).$$

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

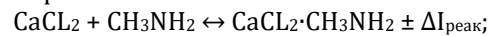
Коэффициенты преобразования теплоты в гелиоэнергетических термотрансформатор небольшие, но следует учитывать, что энергия солнца возобновляемая и бесплатная.

Средний коэффициент преобразования для термотрансформаторов «сухой» абсорбции на рабочей паре (CaCl_2 – аммиак) в режиме отопления в ночное время (тепловой насос) составляет $\eta^{\text{TH}} = 0,42$ – $0,48$; в режиме кондиционирования (холодильная машина) $\eta^{\text{XM}} = 0,26$ – $0,34$ [8, с. 117]. Его можно повысить за счет улучшения теплопроводящих свойств сорбента, лучшей его абсорбционной способностью. В АГТУ были проведены исследования сорбентов CaCl_2 , SrCl_2 и BaCl_2 с 10 %-ной добавкой графитового порошка. Это способствует увеличению теплопроводности смеси на 3–5 %. Испытывались новые пары сорбентов, разработанных в Новосибирском инсти-

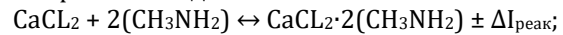
туте катализа СО РАН им. Г. К. Борескова (вермикулит – 59 % CaCl_2 – аммиак) и (вермикулит – 60 % BaCl_2), которые показали хорошие абсорбционные свойства и малый объем расширения сорбента в реакторе. Исследовалось армирование сорбента металлической сеткой, что улучшает его теплопроводящие свойства. Для установок «сухой» абсорбции гелиоэнергетических термотрансформаторов предлагается новая рабочая пара (CaCl_2 – метиламин), которая позволит снизить рабочее давление в установке, по сравнению с рабочей парой (CaCl_2 – аммиак), в два раза. Метиламин с хлоридом кальция могут образовывать мителаминаты:

Реакция образования метиламинатов может идти по следующим схемам уравнений:

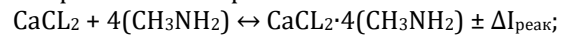
- образование монометиламината:



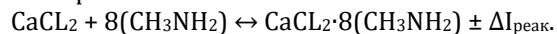
- образование диметиламината:



- образование тетраметиламината:



- образование октометиламината:



При поглощении сорбентом абсорбата (процесс «сухой» абсорбции) выделяется теплота реакции, а при разложении (процесс десорбции) – теплота реакции требует дополнительного подвода тепла.

Средний коэффициент преобразования для термотрансформаторов адсорбционного типа на рабочей паре (активированный уголь (АС) – аммиак) в режиме отопления в ночное время (тепловой насос) составляет $\eta^{\text{TH}} = 0,2$ – $0,27$; в режиме кондиционирования (холодильная машина) $\eta^{\text{XM}} = 0,19$ – $0,21$ [12]. Были проведены исследования термотрансформаторов на рабочих парах АС – метиламин и АС – этиламин. Они показали возможность использования таких пар. При этом, несмотря на уменьшение коэффициента термотрансформации рабочее давление в установках снижается, по сравнению с аммиачными, в 3,3–2,6 раз.

Интересным представляются перспективы использования комбинированных смесей, состоящих из соли CaCl_2 и АС в пропорциях 4:1, которые сочетают в себе достоинства термотрансформаторов «сухой» абсорбции и адсорбционных.

Проведены испытания гелиоэнергетического термотрансформатора на рабочей паре АС – аммиак. Суточный цикл изменения температур в различных точках аппаратов экспериментальной установки представлен на рисунке 3.

Утром с подъемом солнца над горизонтом энергия солнечной радиации разогревает реакторы в генераторе-адсорбере и нагревает насыщенный адсорбатом сорбент. Неравномерность температуры нагрева сорбента в реакторе от-

четливо фиксируется термомпарами (1–4), установленными в различных местах реактора. При достижении определенной температуры начинается процесс выделения адсорбата из сорбента. Максимальная температура и давление достигается днем в момент максимального солнцестояния, но затем, по мере склонения солнца, уменьшается энергия солнечной радиации, снижается температура нагрева. Около 17.00 начинается процесс охлаждения сухого сорбента в реакторе и сжиженного адсорбата в ресивере. Переключаются запорные вентили. Около 19.30 через регулирующий вентиль хладагент начинают перепускать в испаритель охлаждаемой камеры, в которой в качестве аккумуляции холода находится емкость с водой. Вода при дальнейшем понижении температуры

превращается в лед. Из графиков температур видно, что наблюдается резкое падение давления и быстрое понижение температуры за счет бурного испарения и поглощения паров хладагента. Затем, по мере отвода теплоты из ресивера, наблюдается длительное поддержание низких температур в испарителе и охлаждающей камере, а также одновременное увеличение температуры в реакторе генератора адсорбера. Нагревательный и охлаждающий эффект в термотрансформаторе производится в течение всего ночного времени до утра. Утром запорные вентили снова переключаются. Охлаждающий эффект днем поддерживается за счет таящего льда из охлаждающей камеры. А эффект нагрева воды может происходить круглосуточно.

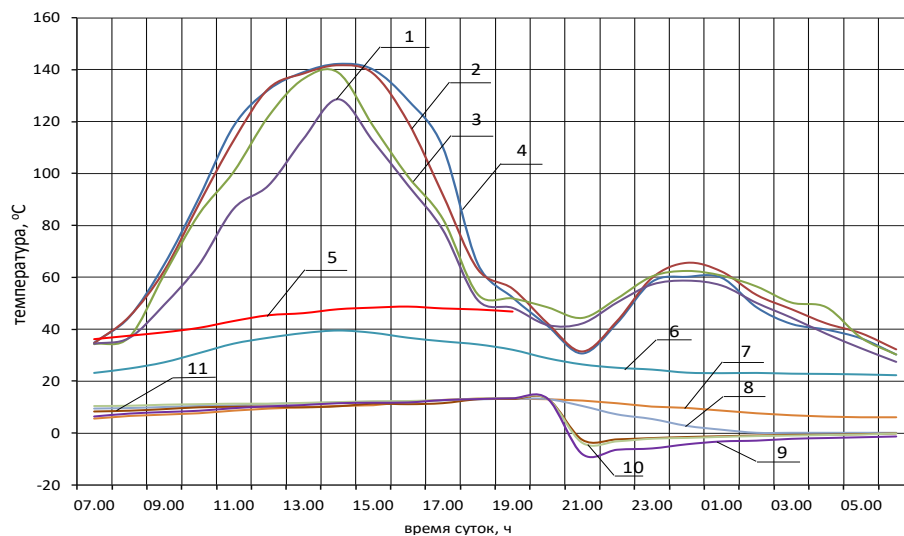


Рис. 3. Зависимости измеряемых температур гелиоэнергетической холодильной установки на различных аппаратах в течение суточного цикла времени:

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

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

Анализ полученных экспериментальных зависимостей температур в суточном режиме работы экспериментальной установки (май – сентябрь)

на открытом полигоне показал аналогичный характер изменения по данным работ [13–15].

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Новые конструктивные решения основных аппаратов гелиоэнергетических термотрансформаторов позволяют добиваться высоких энергетических показателей работы установок и положительного эффекта их работы.
2. Исследование рабочих пар для термотрансформаторов «сухой» абсорбции путем внедрения различных новшеств помогает увеличивать коэффициенты преобразования тепла солнечной радиации и повысить эффективность его работы для отопления и кондиционирования.
3. При изучении адсорбционной способности рабочих пар АС – аммиак, АС – метиламин, АС – этиламин установлено, что лучшими адсорбционными свойствами обладает АС – аммиак,

а худшими – АС – этиламин. Все они могут применяться в термотрансформаторах адсорбционного типа, причем рабочие давления при хладагенте этиламине в два раза ниже, чем при метиламине и в четыре раза ниже, чем на аммиаке.

4. Приведенные степени термодинамического совершенства гелиоэнергетических термотрансформаторов свидетельствуют о том, что установки на рабочих парах CaCl_2 – аммиак и АС –

аммиак лучше применять для отопления и замораживания; CaCl_2 – CH_3NH_2 и АС – метиламин – для кондиционирования.

5. При испытании гелиоэнергетического термотрансформатора на рабочей паре АС – аммиак в климатических условиях лета Астраханского региона обнаружены эффект охлаждения и выделения теплоты в ночное время суток.

Список литературы

1. Руденко М.Ф. Концепция развития экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства тепла и холода // Безопасность жизнедеятельности. 2006. № 10. С. 46-50.
2. Wang, L.W., Xu Z.Y., Pan Q.W., Du S., Xia Z.Z. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // Appl Energy. – 2016. Vol. 169 - P. 846-856.
3. Abdel Aziz A.A., Hatab S.I., Moawed M., Zohir A.E., Berbish N.M. Experimental study on the Effect of adsorber with three shapes of conductive material on Performance of Adsorption Refrigeration Tube using Activated Carbon/ethanol pair // Appl Therm Eng.-2017.- Vol.19.- P.1246-1254.
4. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре. Информационно-методическое издание. М.: Из-во «Перо», 2016. 204 с. mpei.ru/personal/lits/CadrePapers/Attachments/2000/Верстка%20чистая.pdf.
5. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы YORK <http://www.eeforum.net/absorption-chillers/ru>
6. Абсорбционные тепловые насосы. <https://est-rus.ru/oborudovanie/teplovie-nasosy/>
7. АБХМ THERMAX на горячей воде. colden.ru/obrudvanie/abhm-thermax-na-goryachej-vde/.
8. Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия: монография. Астрахан. гос. техн.ун-т. Астрахань. Из-во АГТУ, 2013.172 с.
9. 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). С.32-41.
10. Кульбаракова М.Б., Пискунов Н.С., Шипулина Ю.В., Руденко М.Ф. Тенденции развития гелиоэнергетической техники: термотрансформаторы «сухой» абсорбции для систем природообустройства // Вестник Астраханского государственного технического университета. №1(63) май 2017. С.15-21.
11. Шипулина Ю.В., Руденко М.Ф., Каримов М.Ш. Моделирование и разработка конструкции генератора-адсорбера экологически безопасной гелиоэнергетической холодильной установки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. №2. С.36-41
12. Каримов М.Ш., Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Повышение эффективности работы гелиоэнергетического адсорбционного термотрансформатора // Химическое и нефтегазовое машиностроение 2016. №3, С.31-35.
13. Brites G.J.V.N., Costa J.J., Costa V.A.F. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator // Renewable Energy.- 2016. -Vol.86.- P. 238-250.
14. Pan Q.W., Wang R.Z., Lu Z.S., Wang L.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, // Applied Thermal Engineering. - 2014.-Vol.72. - P. 275-282.
15. Xu S.Z., Wang L.W., Wang R.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon-ammonia working pair // Energy Conversion and Management. - 2016.- Vol.117.- P. 31-42.

© М. Ф. Руденко, В. Н. Саинова, Ю. В. Шипулина, Л. П. Третьяк, А. А. Токарева

Ссылка для цитирования:

Руденко М. Ф., Саинова В. Н., Шипулина Ю. В., Третьяк Л. П., Токарева А. А. Гелиоэнергетические сорбционные термотрансформаторы для систем отопления и кондиционирования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 22–28.