

Конструктивные особенности реактора генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок

М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова, Е.В. Андреева

Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16, Россия

Резюме. Целью исследования является определение конструктивных особенностей основной части генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок абсорбционного типа реактора – устройства, где находится насыщенный хладоном сорбент, и в котором при нагреве и охлаждении протекают термохимические реакции десорбции и абсорбции. Исследование проводится для выявления принципов рационального устройства, реализующего эффективность действия и максимальную возможность использования физико-химических свойств рабочих пар (сорбента и хладагента). **Метод.** Анализируется динамика развития одного из основных элементов аппарата гелиоэнергетических холодильных установок - реактора генератора-абсорбера, работающего на твердых сорбентах и озонобезопасных хладагентах. **Результат.** Рассмотрены разработанные конструкции реакторов, применяемых в гелиоэнергетических холодильных установках; выявлены достоинства и недостатки, механизмы взаимодействия и регулирования внутренних процессов в термохимическом компрессоре; определены перспективы развития новых сорбентов и хладагентов для инновационных моделей, пути повышения эффективности работы реакторов и перспективы развития на их основе гелиоэнергетических холодильных установок и агрегатов. Отмечаются особенности применения технических решений, лежащих в основе работы схемных устройств, повышающих эффективность работы как генератора-абсорбера, так и всей гелиоэнергетической холодильной установки. **Вывод.** На повышение производительности работы гелиоэнергетической холодильной установки оказывает влияние группа факторов: механизм регулирования механических деформаций рабочего сорбента в реакторе; разработка и внедрение новых сорбентов и поиск эффективных рабочих пар; применение нанесенных селективных покрытий на наружную поверхность реактора, обогреваемого солнцем; рациональное фокусирование солнечной энергии на нагревательные элементы реактора днем; возможность создания эффективных условий для охлаждения всей поверхности реактора ночью. Найти компромиссное конструктивное решение в противоречивых задачах, сопровождающих процессы в реакторе, является основной задачей разработчиков подобных гелиоэнергетических термотрансформаторов для холодильников, кондиционеров, генераторов пищевого льда и т.п.

Ключевые слова: реактор, гелиоэнергетический холодильник, сорбенты, хладагенты

Для цитирования: М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова, Е.В. Андреева. Конструктивные особенности реактора генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):52-62. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-52-62

Design features of the generator-absorber reactor of solar power refrigeration plants

M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova, E.V. Andreeva

Astrakhan State Technical University,
16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the design features of the main part of the generator-absorber of solar power refrigeration units of the absorption type reactor - a device where the sorbent saturated with freon is located, and in which thermochemical reactions of desorption and absorption occur during heating and cooling. The study is carried out to identify the principles of a rational device that implements the efficiency of action and the maximum possibility of using the physicochemical properties of the sorbent and refrigerant. **Method.** The dynamics of the generator-absorber reactor development operating on solid sorbents and ozone-safe refrigerants is analyzed. **Result.** The designs of reactors used in solar power refrigeration units are considered; advantages and disadvantages, mechanisms of interaction and regulation of internal processes in the thermochemical compressor are identified; prospects for the development of new sorbents and refrigerants, ways to improve the efficiency of reactors and prospects for the development of solar power refrigeration units and units are determined. The article notes the features of application of technical solutions increasing the efficiency of the generator-absorber and solar power refrigeration plant. **Conclusion.** The increase in the performance of the solar power refrigeration plant is influenced by the following factors: mechanism for regulating mechanical deformations of the working sorbent in the reactor; introduction of new sorbents and search for effective working pairs; application of selective coatings on the outer surface of the reactor heated by the sun; rational focusing of solar energy on the heating elements of the reactor during the day; creation of effective conditions for cooling the reactor surface at night. A compromise design solution is the main task of developers of such solar power thermal transformers for refrigerators, air conditioners, food ice generators, etc.

Keywords: reactor, solar power refrigeration plant, sorbents, refrigerants

For citation: M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova, E.V. Andreeva. Design features of the generator-absorber reactor of solar power refrigeration plants. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):52-62. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-52-62

Введение. Внедрение гелиоэнергетических холодильных установок в народное хозяйство в системы кондиционирования, производство пищевого льда, бытовых холодильников там, где климатические условия позволяют это делать, выгодно по следующим причинам: во-первых, автономная работа осуществляется за счет потребления возобновляемой солнечной энергии, поэтому происходит энергосбережение традиционных источников из водородно-углеродного топлива; во-вторых, улучшается экология окружающей среды, так как нет выбросов от парниковых и углекислых газов в атмосферу от производства электрической энергии на ТЭС (тепловых электрических станциях) - чистота атмосферы; в третьих, применение озонобезопасных хладагентов и химически безопасных сорбентов в качестве рабочих пар установок снижает токсикологические нагрузки на окружающую среду [1-3]. Такие установки при получении теплоты и холода могут не потреблять электрическую энергию вообще, а работа их осуществляется в циклическом режиме. Днем идет накопление хладагента (режим регенерации), ночью получают теплоту в абсорбере и холод в испарителе (режим генерации) [4-6].

На рис. 1 изображена схема типовой конструкции современной гелиоэнергетической установки. Под реактором гелиоэнергетического холодильника будем понимать часть элемента конструкции генератора-абсорбера, в котором находится насыщенный хладагентом сорбент. В данной конструкции генератор-абсорбер выполнен из двух изолированных обогреваемых солнцем гелиоприемников (емкостей) типа «горячий ящик», с двустекольным покрытием в виде вакуумного стеклопакета, внутри которого установлены плоские зеркальные отражатели, концентрирующие солнечные лучи на цилиндрическую горизонтально расположенную поверхность реактора.

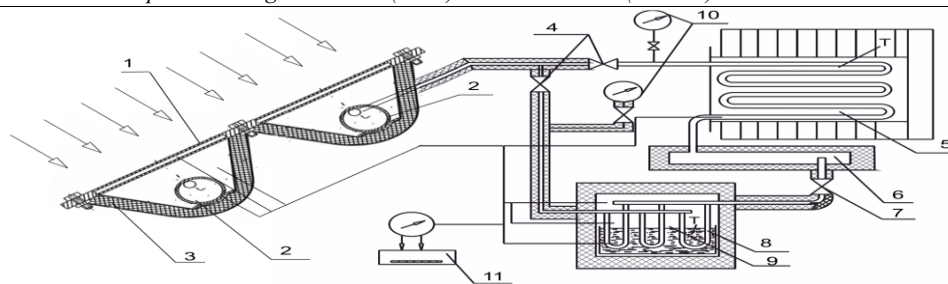


Рис. 1 - Типовая схема конструкции гелиоэнергетической установки (холодильник для бытовых целей): 1 – генератор-абсорбер; 2 – реакторы 3 – гелиоприемное устройство, 4 – вентили 3 – изоляция, 5 конденсатор, 6 – ресивер, 7 – регулирующий вентиль, 8 – испаритель, 9 – охлаждаемая камера, 10 – матометры, 11 – измеритель температур

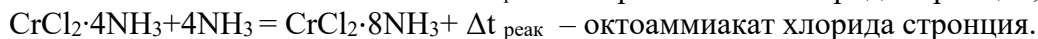
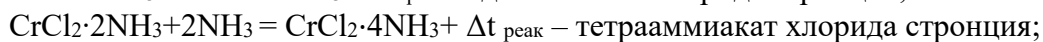
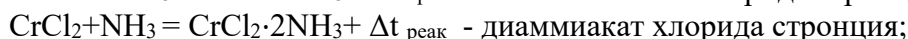
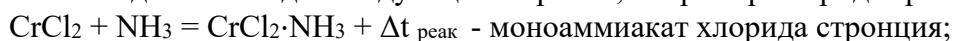
Fig. 1 - Typical design diagram of a solar power plant (a refrigerator for domestic purposes):

1 – generator-absorber; 2 – reactors 3 – solar receiving device, 4 – valves 3 – insulation, 5 – condenser, 6 – receiver, 7 – control valve, 8 – evaporator, 9 – cooled chamber, 10 – matometers, 11 – temperature meter

Постановка задачи. Повышение эффективности работы термохимического компрессора за счет совершенствования конструктивной части реактора генератора-абсорбера является важным условием в улучшении преобразования энергии солнечной радиации и эффективного использования суточных перепадов давлений в дневное и ночное время в аппаратах гелиоэнергетических холодильных установок.

Методы исследования. В основе работы термохимического компрессора лежат химические процессы, связанные со структурой изменения химического состава вещества – сорбента и абсорбата (хладагента) при протекании абсорбции с отводом теплоты и обратным процессом десорбции при подводе к насыщенному сорбенту теплоты. Веществами сорбентами могут быть щелочно-земельные соли: такие как хлорид кальция, хлорид стронция, хлорид бария и другие [7], в качестве абсорбента – аммиак.

Почему именно на эти вещества впервые обратили внимание исследователи? Точного объяснения причины пока нет, но обращает внимание то, что эти соли в атомах на последних орбитах имеют по восемь свободных электронов, и к ним при определенных энергетических ситуациях могут присоединяться биполярные молекулы аммиака, образуя ступенчато при определенных температурах ди-, тетра-, окто- аммиакаты. При увеличении энергии молекул происходит обратный процесс ступенчатого распада молекул в обратной последовательности до чистого состава соли. Термохимическая реакция щелочноземельных солей с хладагентом идет следующим образом, например хлорид стронция-аммиак:



При процессах абсорбции связанных с поглощением сорбентом хладагента происходят и объемные изменения аммиакатов, объем которых увеличивается в 2 -3 раза по сравнению с чистой солью. В табл.1 и 2 представлены сравнительные характеристики, наиболее часто встречающихся в холодильных устройствах рабочих пар, по которым можно дать беглую оценку их применения. Основные физико-химические параметры чистых щелочноземельных сорбентов и их аммиакатов, а также с металлическими примесями (обобщенные данные) приводятся в литературе [7]. Реакторы первых сорбционных холодильных установок изготавливались плоскими пластинчатыми или кожухотрубными цилиндрическими с трубками наружного оребрения между которыми засыпался сорбент. При многократной циклической работе, проходила деформация пластин и ребер, что в конечном счете при нескольких лет эксплуатации приводило их к поломкам и выводам реакторов из эксплуатации. Это были установки периодического действия и работали они от нагрева при сжигании дров, угля или электроэнергии [4].

Таблица 1. Обобщенные характеристики различных аммиаков
Table 1. General characteristics of various ammonias

Теплофизические характеристики Thermophysical Characteristics	$SrCl_2 \cdot 1NH_3$	$SrCl_2 \cdot 8NH_3$	$CaCl_2 \cdot 2NH_3$	$CaCl_2 \cdot 8NH_3$
Эффективный коэффициент температуропроводности, $a, 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ Effective thermal diffusivity	0,12÷0,14	0,06÷0,07	0,13÷0,14	0,06÷0,07
Эффективный коэффициент теплопроводности, $\lambda, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Effective thermal conductivity	0,05÷0,08	0,04÷0,05	0,05÷0,08	0,07÷0,08
Объемная теплоемкость, $C_v(p_c) \text{ кДж/м}^3\text{К}$ Volumetric heat capacity	339÷426	920÷1254	395÷505	942÷1420
Коэффициент теплопередачи, $k, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Heat transfer coefficient	10÷90	10÷40	60÷140	20
Удельная плотность, Specific density $\rho, \text{кг/м}^3$	380÷400	510÷540	280	450÷530
Пористость, ψ Porosity	0,83÷0,84	0,59÷0,61	0,82	0,52÷0,59

Таблица 2. Обобщенные данные для рабочей пары $SrCl_2/NH_3$ с металлическими примесями
Table 2. Generalized data for the working pair $SrCl_2/NH_3$ with metallic impurities

Характеристики Characteristics	$SrCl_2 \cdot 1NH_3$	$SrCl_2 \cdot 8NH_3$
Эффективная температуропроводность, $a, 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ Effective thermal diffusivity	0,73	0,29
Эффективная теплопроводность, $l, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Effective thermal conductivity	0,12	0,17
Теплоемкость, $C_p, \text{кДж/кг}^2\text{К}$ Heat capacity	167,0	563,5
Коэффициент теплопередачи, $k, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Heat transfer coefficient	10-20	10-30

С привлечением к работе энергии солнечной радиации изменились и конструкции реакторов гелиоэнергетических установок. Развитие гелиоприемников холодильных установок пошло по двум направлениям: использование параболических концентраторов в фокусирующей части которых устанавливается трубчатая конструкция реактора, обогреваемая днем солнцем или трубчатая коллекторная конструкция, устанавливаемая вертикально в «горячий ящик», который наклонен под углом широты местности к горизонту и остекленной стороной направленный на южную сторону, через которую солнечная радиация освещает реакторы. Вертикальное расположение труб реактора позволяло располагать сорбент в нижней части конструкции. При расширении сорбента (образовании аммиаков) соль перемещалась в верхнюю часть реактора. В верхней части обычно располагался и хладопровод, отводящий пары хладанента из генератора в конденсатор.

Конструкция реактора простая, однако из-за неравномерного нагрева или охлаждения поверхности реактора, плохой теплопроводности соли во всем объеме по высоте реактора образовывались пустоты, приводящие к выходу части сорбента из работы аппарата. Решить задачу полного наполнения реактора сорбентом, улучшив его эксплуатационные качества удалось ученым [8]. Конструкторы вставили в трубчатый реактор поршень (рис. 2). Перемещаясь по перфорированному хладопроводу внутри реактора поршень подпрессовывал сорбент, компенсируя химические расширения аммиаков механическими усилиями расширяющейся пружины. Пружина прикреплена к внутренней части корпуса реактора генератора-абсорбера.

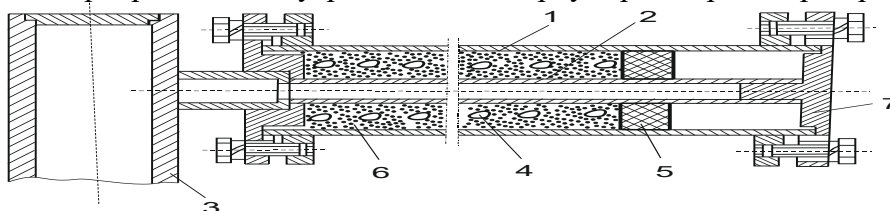


Рис. 2 – Схема конструкции реактора генератора-абсорбера с подвижным поршнем и пружиной, работающей на расширение: 1 – корпус реактора; 2 – трубка перфорированная 3 – трубка для отвода - подвода хладагента к реактору; 4 – пружина в сорбенте; 5 – поршень; 6 – сорбент; 7 – крышка реактора

Fig. 2 – Schematic diagram of the design of the reactor-absorber with a movable piston and a spring operating on expansion: 1 – reactor body; 2 – perforated tube 3 – tube for the removal - supply of coolant to the reactor; 4 – spring in the sorbent; 5 – piston; 6 – sorbent; 7 – reactor cover

Находясь в середине объема сорбента и работая на расширение, пружина разрыхляла его и не давала слеживаться. В данной конструкции реактора используется эффект и энергия растяжения круглой пружины. При абсорбции сорбент расширяется и пружина растягивается, часть полезного пространства в реакторе не работает из-за внутреннего расположения поршня, что увеличивает удельные массогабаритные характеристики конструкции реактора и уменьшает количество сорбента. Поршень под воздействием пружины постоянно осуществлял подпрессовку и рыхление аммиаков сорбента, что улучшает равномерность его распределения в реакторе, ликвидируются возможные пустоты и полости, создается равномерность подвода и отвода тепловых потоков к сорбенту. Недостатком такой конструкции является то, что пружина работает на растяжение. К подобному действию могут привести конструкции реакторов, выполненных по схеме (рис. 3).

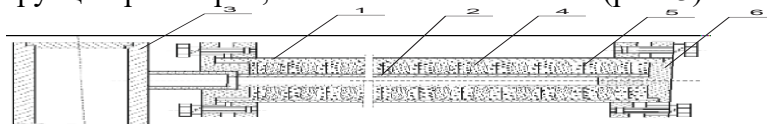


Рис. 3 – Схема конструкции реактора с сетчатыми проставками и подвижными шайбами:
 1 – корпус реактора, 2 – хладопровод, 3 – трубка для подвода хладагента, 4 – сетчатые шайбы,
 5 – плоские шайбы, 6 – крышка разъемная

Fig. 3 – Diagram of the reactor design with mesh spacers and movable washers: 1 – reactor body,
 2 – coolant pipe, 3 – coolant supply tube, 4 – mesh washers, 5 – flat washers, 6 – detachable cover

Сорбент в виде порошка соли засыпается в реактор частями, отделяясь между порциями сетчатой проставкой, выполненной из сетки или накрученной стальной проволоки и вертикальными плоскими шайбами с горизонтальными насечками. Сетка хорошо проводит тепло к сорбенту и деформируясь, компенсирует объемные изменения аммиаков, а шайбы компенсируют перемещения и удерживают сорбент от гравитационного сползания. Применение сеток из материалов с высокой теплопроводностью и хорошими антикоррозионными свойствами значительно повышает эффективность работы таких реакторов. Исследователи в работе [9] предложили на гладкий перфорированный хладопровод с отверстиями насадить лепестковые пластины с горизонтальными насечками, между которыми располагался насыщенный сорбент. Пластины зажимались пружиной, работающей на сжатие, образуя подвижной блок пластин (рис. 4). Количество пластин в блоке может составлять от 10 до 20 штук одинаковой конструкции, но различной модификации в зависимости от внутренней конструкции самого корпуса реактора.

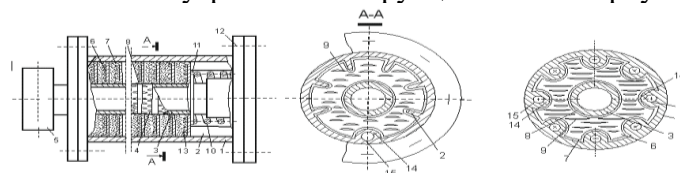


Рис. 4 - Схема конструкции реактора с внутренними подвижными ребрами
различной модификации

Fig. 4 - Diagram of the design of a reactor with internal movable ribs of various modifications

Виды пластин: 1- корпус цилиндрический, 2 – ребро продольное, 3 – трубка перфорированная, 4 – отверстие овальное, 5 – хладопровод, 6 – пластины подвижные лепестково-образные, 7 – буртики срезные внутренние, 8 – буртики срезные наружные, 9 – насечки горизонтальные, 10 – пружина винтовая, 11 – шайба подвижная, 12 – фланец корпуса, 13 – абсорбент, 14 – большое продольное ребро, 15 – отверстие для отвода тепла абсорбции.

Развитые горизонтальные насечки позволяют удерживать сорбент на пластинах, не давая сползать аммиакатам вниз под действием гравитационных сил, вертикальные пластины улучшают теплопроводность полного объема сорбента, перфорированный хладопровод, расположенный в центральной части конструкции реактора осуществляет равномерный подвод и отвод хладагента к полному объему сорбента, пружина сглаживает продольные деформации объемных изменений аммиаков. Заостренные заусены позволяют удерживать сорбент на внешних краях пластин и не дают слеживаться сорбенту.

Острые заусенцы пластин на внутренней и наружной части, перемещаясь в реакторе по наружной поверхности хладопровода срезают влажные слои аммиаков сорбента, не давая им слеживаться и очищают поверхности скольжения от сорбента. Длина горизонтальных заусенцев регулирует горизонтальные габариты всей конструкции перемещения и фиксирует подвижность общей конструкции пакета пластин. Лепестковообразные пластины могут быть различной модификации (две пластины представлены на рис. 4). Более сложная конструкция корпуса реактора с внутренним оребрением позволяет в оребрении делать каналы для движения теплоносителя, который можно нагревать днем от избытком энергии солнечной радиации, а ночью от теплотой абсорбции.

В такой конструкции используется эффект и энергия сжимаемой круглой пружины в отличие от растяжения время продолжительности работоспособности такого реактора значительно увеличивается, улучшаются, эксплуатационные характеристики и безотказность работы. В некоторых работах [10] был исследован гранулированный сорбент, который показал эффективность работы реактора гелиоэнергетического холодильника за счет большей и лучшей поверхности контакта при взаимодействии сорбента и хладагента.

Недостатком гранул является недолгий период взаимодействия и быстрое разрушение целостности гранул сорбента. Поэтому необходима оболочка сохраняющая значительное время сорбент в малом объеме, таком как гранулы. Учеными [11] была предложена конструкция реактора из капсул с армированными сетками цилиндрической формы, уложенной рядами в корпус реактора (рис.5). При такой конструкции используется эффект подпружиниваемой деформации сеток капсул, изменяя расстояние и зазоры между капсулами.

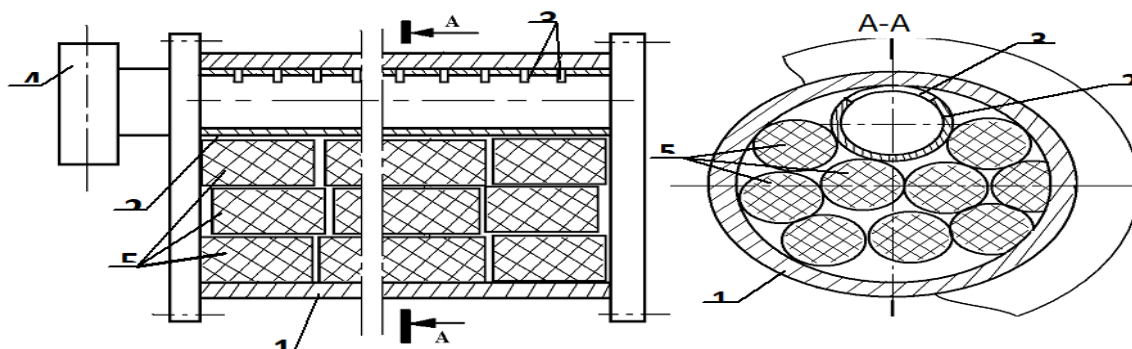


Рис. 5 – Схема реактора с цилиндрическими сетчатыми капсулами октоаммиаката соли сорбента в цилиндрическом реакторе: 1 – корпус цилиндрический; 2 – внутренняя перфорированная трубка; 3 – дугообразные щелевые отверстия; 4 – хладопровод; 5 – капсулы аммиаката соли
Fig. 5 – Scheme of the reactor with cylindrical mesh capsules of octoammine salt sorbent in a cylindrical reactor: 1 – Cylindrical body; 2 – Inner perforated tube; 3 – arc-shaped slotted holes; 4 – coolant; 5 – ammine salt capsules

Наличие армированной сетки улучшает не только объемную поверхность контакта к сорбенту но и теплопроводность его. Хладопровод, расположенный в верхней части реактора вдоль всего корпуса щелевыми отверстиями, вниз предохраняется от попадания сорбента соли в него и создает равномерное пространство для отвода и подвода хладагента к сорбенту. Рабочий объем реактора заполнен полностью. Этим достигается эффективность работы реактора. Другим способом использования армированных конструкций является применение энергии скручивающего сжатия плоской ленточной пружины, закрученной по спирали Архимеда (рис.6). Пружина вместе с армированной сеткой скручивается в спираль и как пружина компенсирует деформации перемещения при сжатии и расширении сорбента. Возможно, изготовить пружину из металлов со свойствами запоминания формы [12].

В настоящее время рядом иностранных фирм и некоторыми российскими научно-производственными институтами разрабатываются новые сорбенты на основе передовых

нанотехнологий, которые не только обладают хорошими абсорбирующими свойствами, но и имеют небольшие объемные расширения по сравнению с щелочноземельными солями.

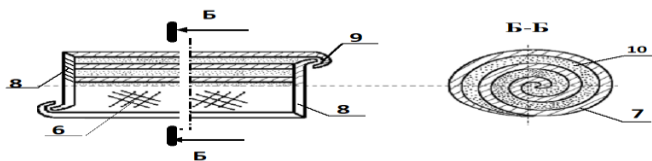


Рис. 6 – Схема реактора с армированной сеткой:

8 – армированная сетка, 9 – замок на сетке, 7 – пружина в форме спирали Архимеда,
8 – стенка сетки, слой армированного сеткой сорбента

Fig. 6 – Reactor diagram with reinforced mesh: 8 – reinforced mesh, 9 – mesh lock,
7 – Archimedes spiral spring, 8 – mesh wall, mesh-reinforced sorbent layer

Разработан новый сорбент – кремнезем модифицированный нитратом кальция. Изготавливаются гибридные и комбинированные соединения в форме матриц из активированных углей или вермикулита с включением в структуру сухих солей, исследуются различные графитометаллические добавки в сухих солях для улучшения пористости структуры соли и ее теплофизических свойств (теплопроводности, теплоемкости, абсорбционной способности, влагоотталкиванию и т.д.), что приводит к увеличению сроков эксплуатации сорбента и увеличивает количество циклов работы термотрансформаторов.

Особое значение в работе реакторов имеет применение селективных покрытий [13]. Селективные покрытия наружного корпуса реактора днем максимально поглощают практически все частоты энергии солнечной радиации, а отражают лишь часть составляющей энергии от всего диапазона, таким образом, доводя энергию поглощения до 98,8 %. В ночное время такие поверхности при охлаждении при определенных температурных режимах максимально отдают во внешнюю среду частоту инфракрасного теплового излучения. Селективные покрытия светопроницающей части конструкции генератора-абсорбера пропускают весь спектр солнечного излучения в «горячий ящик» на корпус реактора и не выпускает обратно инфракрасную составляющую. Это тоже увеличивает производительность термотрансформаторов, на 5-6 % даже в пасмурные дни.

Для улучшения эффективности работы реакторов и термотрансформатора в целом изобретены новые синтетические силикагели и цеолитоподобные алюмофосфаты-сорбенты с уникальными специфическими свойствами. [14]. Активно внедряются в гелиоэнергетические установки смеси, состоящие из активированного угля и щелочноземельных солей в пропорции 1:4, рабочие пары на основе сорбентов силикагеля, цеолита и хладагента – воды, рассматриваются вопросы применения хладагента метанола, метиламина, этиламина, озонобезопасных фреонов и смесей [15, 16].

Обсуждение результатов. Данное исследование показало, что повышение производительности термотрансформаторов возможно за счет совершенствования конструкции реакторов. Достоинство гелиоэнергетических термотрансформаторов в том, что в них возможно не использовать электрическую энергию для получения тепла и холода вообще. Так, производство и серийный выпуск гелиоэнергетических холодильных установок во Франции поставлен на коммерческую основу. Там выпускают бытовые холодильники и генераторы пищевого льда, которые при эксплуатации в северной Африке продемонстрировали хорошие показатели. В РФ подобные гелиоэнергетические холодильные установки и агрегаты могут работать летом в Астраханской области, Калмыкии, в отдельных районах Дагестана и Кавказа, в Крыму, Хакасии и других регионах.

В работах [17, 18] представлены результаты проведенного исследования по влиянию внутреннего оребрения конструкции реактора на эффективность его работы.

Авторы разработали в пакете MatCAD графоаналитическую модель для проектирования реакторов гелиоэнергетических холодильных установок и агрегатов. На основании расчета температурных полей по наружным температурам цилиндрической

конструкции реактора и специфических элементов внутренней конструкции его методом расчета конечной разности температур рассчитываются и затем определяются градиенты тепловых потоков в сорбенте при режимах стационарных значений. Определяются тепловые поля с учетом особенностей внутренних конструкций аппаратов, таких как ребра, перфорированные хладопроводы, взаимное расположение их в реакторе.

Модель двумерная и при расчетах принимаются следующие допущения: сорбент по всей площади рассматривается как однородная среда; его материал имеет постоянную для всех температур теплопроводность, не учитываются естественные от всей его площади потери теплоты реактора, облучение солнечными лучами происходит при перпендикулярном расположении Солнца над поверхностью цилиндра конструкции реактора. Для численного расчета нестационарной теплопроводности использовалось нелинейное гармоническое уравнение теплопроводности Фурье. Уравнение в векторной форме представлено следующей формулой:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] \pm q^* \quad (1)$$

где q^* – удельный тепловой поток, подведенный или отведенный в процессе реакции. При подведении теплового потока реакция q^* берется со знаком «минус», при отведении – со знаком «плюс» (дополнительный подвод теплоты при реакции – десорбция; выделение теплоты при реакции адсорбция).

Адсорбция и десорбция хладагента (аммиака) происходит относительно хладопровода, расположенного в середине корпуса реактора. Между внешней стенкой реактора и хладопроводом засыпан сорбент. Температура на модели, соответствовала только углу при перпендикулярном освещении поверхности реактора солнечной энергией. Серия подобных моделей с различными параметрами внешнего облучения поверхности реактора солнцем при различных величинах температур окружающего воздуха позволяет воссоздать общую картину изменения тепловых процессов в реакторе генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора и делать соответствующий анализ об эффективности как реактора так и всей установки. Анализ разных конструктивных решений реактора позволил оптимизировать его геометрические параметры, улучшив эффективность его функционирования в сорбционной энергетической установке, и тем самым повысить коэффициент полезного действия всей установки.

Математическая модель позволяет отображать суточные изменения температуры и тепловых потоков в реакторе генератора-адсорбера при различных температурах его стенок, которые устанавливаются в зависимости от параметров окружающей среды, углов падения солнечных лучей, массы прогрева насыщенного сорбента. Модель позволяет оценить неравномерность прогрева насыщенного сорбента по температурным параметрам, введя коэффициент распределения тепловой энергии в реакторе:

$$\zeta = S_{t_{\text{дес}}} S_{t_{\text{наг}}} \quad (2)$$

где $S_{\text{дес}}$ - площадь теплоты с температурными параметрами равными температуре десорбции и выше, $S_{\text{наг}}$ - полная площадь прогрева сорбента, равная диаметру реактора, ζ - коэффициент показывает равномерность распределения тепловой энергии в реакторе генератора-адсорбера.

На этой основе можно моделировать и исследовать различные конструкции внутреннего оребрения реакторов. В качестве примера на рис. 7 представлены две модели реакторов в поперечном разрезе. Первая модель реактора простой конструкции с перфорированной хладоотводящей трубкой, расположенной в верхней части по оси симметрии и модель реактора с оребренной перфорированной трубкой хладоотвода, имеющего оребрения вдоль всей длины корпуса реактора. Из рис.7 видно, что применение внутреннего оребрения способно распределять в слое сорбента равномерно по всему объему. Увеличивается глубина прогрева сорбента и значения температурных градиентов, масса сорбента хорошо прогревается, снижается процент неиспользованного рабочего вещества. Если предположить, что облучение

солнечными лучами внешней оболочки корпуса будет одинаковым, то коэффициент $\zeta_{\text{прост}}=0,52$, а $\zeta_{\text{оребр}}=0,81$.

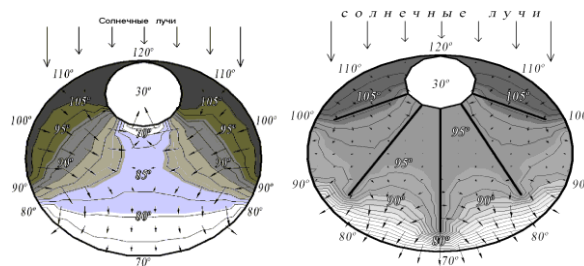


Рис. 7 – Распределение тепловых потоков от солнечной радиации в реакторе простой и сложной конструкции с внутренним оребрением

Fig. 7 – Distribution of heat flows from solar radiation in a reactor of simple and complex design with internal finning

Применение внутреннего оребрения хладагостова в реакторе позволит до 30% улучшить распределение тепловой энергии в реакторе. По данным исследования математической модели разработаны перспективные конструкции реакторов [17]. Такие конструкции позволят облегчить заправку реактора аммиаком, повысят теплопроводность адсорбента, снизят нежелательные эффекты в реакторах при реакциях адсорбции и десорбции, улучшив тем самым теплофизические параметры реакторов.

Вывод. Повысить эффективность работы гелиоэнергетического термотрансформатора можно за счет разработок новых конструкций реакторов, некоторые схемы которых рассмотрены были в статье. В основе работы улучшающих рабочие характеристики сорбента в реакторе лежат процессы: подпрессовка сорбента, увеличение теплопроводности, увеличение площади контакта сорбента с хладагентом, разрыхление и снижение слеживания сорбента, образование компактного объема. Определенное место в повышении эффективности работы реактора занимает его покрытие специальным селективным слоем, способным в дневное световое время хорошо поглощать энергию солнечной радиации в широком диапазоне оптических частот, а в ночное время хорошо излучать тепловую энергию в окружающее пространство. Такие покрытия были разработаны в АГТУ и успешно применялись в испытаниях новых реакторов, повышая эффективность работы на 3-5 %.

Авторы надеются, что данная работа вызовет интерес не только у конструкторов, разработчиков и ученых по созданию гелиоэнергетической холодильной техники, но и у специалистов, которые могут изготавливать подобные установки (холодильники, охладители воды, льдогенераторы). Возможно, многие обогатят своими идеями и инновационными решениями конструкции этого важного аппарата гелиоэнергетической установки. Если конструкции бытовых холодильников, работающих на энергии солнечной радиации, в коммерческом варианте уже выпускают в Европе и они успешно работают в северной Африке, то эффективные кондиционеры ждут своей очереди.

Библиографический список:

1. Руденко, М.Ф. Гелиоэнергетические сорбционные термотрансформаторы для систем отопления и кондиционирования//М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова А.А., Токарева Л.П., Третьяк Инженерно-строительный вестник Прикаспия 2022. № 1 (39) С.22-28.
2. Руденко, М.Ф. Обеспечение энергетической безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций южных городов//М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, А.М. Руденко/Пожарная и техносферная безопасность и пути совершенствования: 2020, Вып.19(5). Донецк, ГОВПО, «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. С.517-521.
3. 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.- P. 238-250
4. М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина В.Н. Саинова. Технические аспекты развития гелиоэнергетических холодильных установок на твердых сорбентах//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т.50 (3).-С.37-45

5. Шипулина, Ю.В., Моделирование и разработка конструкции генератора-адсорбера экологически безопасной гелиоэнергетической холодильной установки/ Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко//Химическое и нефтегазовое машиностроение 2013. № 2.-С.36-41
6. Руденко М.Ф., Чивиленко Ю.В., Антипов А.Е. Повышение энергетической эффективности экологически безопасных гелиохолодильных установок//Вестник международной академии холода. Санкт-Петербург – Москва. 2006. № 3. С.3-8
7. Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия: монография. Астрахан.гос.техн.ун-т.-Астрахань:Изд-во АГТУ, 2013. 172 с.
8. А.С. СССР № 1983 Захидов Р.А., Шадиев С., Киргизбаев Д.А., Ачилов Б.М. Генератор-адсорбер гелиохолодильника.
9. Генератор-адсорбер гелиохолодильника: патент 2137991 РФ. № 98100862/06/Руденко М.Ф., Альземеньев А.В., Анихуви Жак Анри Джиджохе, Черкасов В.И., Макеев П.А.;заявл.05.01.98 ; опубл. 20.09.99, Бюл.№ 26. 4с.
10. Ачилов Б.М., Ч.Мангалжалав. Холодильная установка с твердым сорбентом // Холодильная техника № 2, 1990. С.5-7.
11. Реактор генератора-адсорбера гелиохолодильной установки (варианты): патент 2263859 Рос.Федерация. № 2003106499/06 / Руденко М.Ф., Ильин А.К., Коноплева Ю.В., Ильин Р.А., Заикин Е.Ю.; заявл.07.03.2003; опубл.10.11.2005, Бюл. № 31. 4с.
12. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Ленинградский государственный университет 1987 г. 218с.
13. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь: патент 2365676 РФ. № 2008130824/02 / Долецкая К.А., Кравцов Е.Е., Горская А.С., Мифтахова Г.Ф., Руденко М.Ф., Сурков М.И., Кириченко В.И., Шнбор М.И., Огородникова Н.П., Кондратенко Т.С.; заявл. 25.07.2008 ; опубл. 27.08.2009, Бюл.№ 24. 4с.
14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>. K. Missaoui Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A case study for indigenous fruits preservation/Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabsiMohammed El Ganaoui. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;40: 102472
15. Y.Yu, Q.W. Pan, L.W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020;14:328–336 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
16. Mariella Mateo-Villanueva, Rodolfo Echarri D. Solar adsorption refrigeration system:Comparison between equilibrium, universal and transient model. Système frigorifique solaire à adsorption: Comparaison entre les modèles d'équilibre, universel et transitoire. *International Journal of Refrigeration*. 2024;157: 23-33
17. Каримов М.Ш., Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Повышение эффективности адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 3. С.31-35.
18. 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

References:

1. Rudenko, M.F. Solar energy sorption thermal transformers for heating and air conditioning systems// M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova A.A., Tokareva L.P., Tretyak. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region* 2022; (39):22-28(In Russ.)
2. Rudenko M.F., Y.V. Shipulina, A.M. Rudenko. Ensuring energy security in emergency situations of southern cities. Fire and technosphere safety and ways of improvement: 2020, Issue 19(5). Donetsk, GOVPO, "Academy of Civil Protection" of the Ministry of Emergency Situations of the DPR, 2020.:517-521. (In Russ.)
3. 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;86: 238-250
4. M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina V.N. Sainova. Technical aspects of the development of solar-energy refrigeration units on solid sorbents/ *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(3):37-45(In Russ.)
5. Y.V. Shipulina, M.S. Karimov, M.F.Rudenko. Modeling and design development of an adsorber generator for an environmentally safe solar energy refrigeration unit/ *Chemical and oil and gas engineering*. 2013;2:36-41(In Russ.)
6. Rudenko M.F. Chivilenko Y.V., Antipov A.E. Improving the energy efficiency of environmentally safe solar refrigeration units. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. Saint Petersburg – Moscow. 2006; 3:3-8(In Russ.)
7. Rudenko M.F. Solar energy thermal transformers of "dry" absorption of cyclic action: a monograph / M.F. Rudenko, Y.V.Shipulina. Astrakhan State Technical University.Astrakhan: Publishing House of AGTU, 2013. 172 p. (In Russ.)
8. A.S. USSR No.1983 S.S. USSR No.1983 Zakhidov R.A., Shadiev S.,Kirghizbaev D.A. Achilov B.M. Solar cooler adsorber generator (In Russ.)

9. Solar cooler adsorber generator: patent 2137991 Russian Federation. No. 98100862/06 / Rudenko M.F., Alzemenyev A.V., Anikhuvi Jacques Henri Djidjohe, Cherkasov V.I., Makeev P.A.; application 05.01.98 ; publ. 09/20/99, Bul. No. 26. 4s. (In Russ.)
10. Achilov B.M., Ch. Mangalzhayalav. Refrigeration unit with solid sorbent. *Refrigeration technology*. 1990; 2:5-7. (In Russ.)
11. Reactor of the solar cooling system absorber generator (variants): patent 2263859 Russian Federation. No. 2003106499/06 / Rudenko M.F., Ilyin A.K., Konopleva Y.V., Ilyin R.A., Zaikin E.Yu.; application no.07.03.2003; publ.10.11.2005;31:4. (In Russ.)
12. Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. Shape memory effect Leningrad State University, 1987. 218с. (In Russ.)
13. Electrolyte for deposition of black anticorrosive oxide coatings on steel: patent 2365676 Russian Federation. No. 2008130824/02 / Doletskaya K.A., Kravtsov E.E., Gorskaya A.S., Miftakhova G.F., Rudenko M.F., Surkov M.I., Kirichenko V.I., Shnbor M.I., Ogorodnikova N.P., Kondratenko T.S.; application. 07/25/2008; publ. 08/27/2009, Bul. № 24. 4p.
14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>. K. Missaoui Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A case study for indigenous fruits preservation/Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabsiMohammed El Ganaoui. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;40: 102472
15. Y.Yu, Q.W. Pan, L.W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020;14:328–336 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
16. Mariella Mateo-Villanueva, Rodolfo Echarri D. Solar adsorption refrigeration system: Comparison between equilibrium, universal and transient model. Système frigorifique solaire à adsorption: Comparaison entre les modèles d'équilibre, universel et transitoire. *International Journal of Refrigeration*. 2024;157: 23-33
17. Karimov M.S., Rudenko M.F., Shipulina Y.V. Improving the efficiency of an adsorption solar-energy thermal transformer. *Chemical and oil and gas engineering*. 2016; 3:31-35. (In Russ.)
18. Method of determining thermal loads on the reactor of an adsorber generator of a solar energy refrigeration unit /Yu.V. Shipulina, M.S. Karimov, M.F. Rudenko. *Bulletin of the AGTU. Series: Marine engineering and Technology*. 2013;1:148-154 (In Russ.)

Сведения об авторах:

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

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

Виктория Николаевна Саинова, кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология» sainovav@yandex.ru

Елена Викторовна Андреева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология» elpetrovicheva1970@gmail.com

Information about authors:

Mikhail F. Rudenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; mf.rudenko@mail.ru

Yulia V. Shipulina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; aleera78@mail.ru

Victoria N. Sainova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Life Safety and Environmental Engineering; sainovav@yandex.ru

Elena V. Andreeva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; elpetrovicheva1970@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 17. 01.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 06.03.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2025.