



УДК 620.91:621.472

## ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА ИЗ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. РАЗРАБОТКА ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

### RECEIVING COLD FROM SOLAR ENERGY. DEVELOPMENT OF HELIOPOWER THERMOTRANSFORMERS OF CYCLIC ACTION

**Шипулина Ю.В.**Астраханский государственный технический университет  
id.yug2016@gmail.com**Руденко А.М.**

Астраханский государственный технический университет

**Ермачков А.А.**

Астраханский государственный технический университет

**Власов В.А.**

Астраханский государственный технический университет

**Григорьев М.И.**

Астраханский государственный технический университет

**Аннотация.** Рассматриваются принципы преобразования энергии солнечной радиации в термотрансформаторах сорбционного типа для получения теплоты и холода. Приведены принципы работы термотрансформаторов «сухой» абсорбции на рабочей паре хлорид кальция – аммиак и адсорбционного типа на рабочей паре – активированный уголь – аммиак. Повышение эффективности работы таких установок достигается за счет применения сорбентов из щелочноземельных металлов с примесями графита, использования новых технологий получения селективных покрытий реакторов и разработкой новых технических решений экспериментальных образцов аппаратов и самих термотрансформаторов. Полученные экспериментальные характеристики доказывают эффективность получения охлаждающего эффекта при прямом солнечном облучении гелиоприемного аппарата термотрансформатора.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, термотрансформаторы, «сухая» абсорбция, сорбенты, адсорбаты, эффект охлаждения.

**Shipulina Yu.V.**Astrakhan state technical university  
id.yug2016@gmail.com**Rudenko A.M.**

Astrakhan state technical university

**Ermachkov A.A.**

Astrakhan state technical university

**Vlasov V. A.**

Astrakhan state technical university

**Grigoriev M.I.**

Astrakhan state technical university

**Annotation.** The principles of transformation of energy of solar radiation in thermotransformers of sorption type for obtaining warmth and cold are considered. The principles of operation of thermotransformers of Sukhoi of absorption are given in working couple calcium chloride – ammonia and the adsorptive type on working couple – absorbent carbon – ammonia. Increase in overall performance of such installations is reached due to application of sorbents from shchelochnozemelny metals with impurity of graphite, use of new technologies of receiving selective coverings of reactors and development of new technical solutions of experimental samples of devices and thermotransformers. The received experimental characteristics prove efficiency of obtaining the cooling effect at direct solar radiation of the helioreception device of the thermotransformer.

**Keywords:** solar power, thermotransformers, «dry» absorption, sorbents, adsorbates, effect of cooling.

Энергетической программы развития экономики России до 2020 г. предусматривается широкое внедрение нетрадиционных, возобновляемых источников энергии: солнечной, геотермальной, приливной, ветровой, а также биомассы для различных систем народного хозяйства.

Следует отметить, что особый интерес представляет использование в южных регионах страны энергии солнечной радиации для получения теплоты и холода.

Наиболее благоприятные климатические зоны эксплуатации гелиоэнергетических установок в России являются Нижнее Поволжье (Астраханская и Волгоградская области), Кавказский регион, Краснодарский, Ростовский и Ставропольские края, Хакасия, Забайкальский край и Дальний Восток.

Тепловую энергию от Солнца получают или через теплоноситель при помощи прямого воздействия на коллекторные устройства, или фокусированием солнечных лучей через гелиостаты на объекты нагрева, концентрируя через зеркальные отражатели или линзы Френеля на различные адаптирующие поверхности и т.п. Эту тепловую энергию используют для получения технической горячей воды в системах отопления, водоснабжения, технологических процессах и т.д. [1].

А вот получение холода из энергии солнечной радиации является задачей весьма не простой [2].



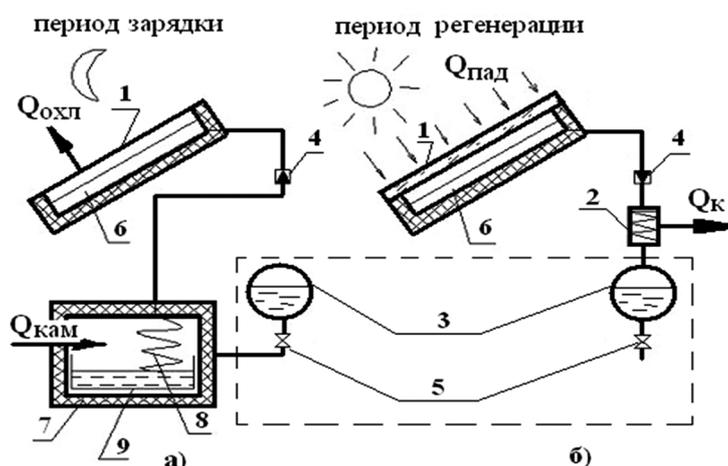
Анализ существующих способов и методов получения холода с точки зрения улучшения экологии, снижения использования традиционного топлива (угля, жидкого топлива, газа и т.д.), уменьшения эксплуатационных затрат и т.п. с помощью солнечной энергии позволяет выделить сорбционный способ преобразования через термотрансформаторы как наиболее перспективный [3].

В настоящее время у нас в стране и за рубежом разработаны и эксплуатируются абсорбционные бромистолитиевые термотрансформаторы большой, средней и малой холодопроизводительности, применяемые в основном для охлаждения воды на ТЭЦ, кондиционирования воздуха в жилых помещениях, хранения пищевых продуктов и медикаментов.

Опыт создания абсорбционных гелиоэнергетических термотрансформаторов выявил специфическую особенность их проектирования: необходимость учета количества энергии солнечной радиации, падающей на квадратный метр земной поверхности, продолжительности солнцестояния в сезоне предполагаемой эксплуатации, метеорологических параметров движения солнца по небосводу. Исходя из этого, в установках предусматривают сильно развитые поверхности гелиоприемной части (солнечные коллекторы, генераторы, генератор-абсорберы) ориентированные в строго определенном направлении с оптимальным углом наклона к горизонту, меняющимся при движении солнца. Более высокая температура обогрева генератора гелиоэнергетического термотрансформатора повышает ее эффективность (КПД), но в то же время усложняет конструкцию гелиоприемной части и удорожает стоимость.

В настоящее время интенсивно развиваются гелиоэнергетические термотрансформаторы циклического действия: «сухой» абсорбции и адсорбционного типа, которые показывают хорошие характеристики в реестре малых гелиоэнергетических холодильных установок для использования в быту.

В основе работы гелиоэнергетического термотрансформатора циклического действия лежат известные обратимые экзотермические сорбционные процессы, периодически протекающие в аппаратах установки за счет суточных изменений температуры и давления (рис. 1).



**Рисунок 1** – Принцип работы гелиоэнергетических сорбционных термотрансформаторов циклического действия:  
 1 – генератор-адсорбер; 2 – конденсатор; 3 – ресивер; 4 – обратные клапана; 5 – дросселирующий (запорный) вентиль; 6 – реактор; 7 – охлаждающая камера; 8 – испаритель; 9 – аккумулятор холода;  
 а – режим работы ночью (теплота подводится в охлаждаемой камере  $Q_{кам}$ , а отводится в генераторе адсорбере  $Q_{охл}$ ); б – режим работы днем теплота подводится в генераторе – адсорбере к реактору  $Q_{пад}$ , а отводится в конденсаторе  $Q_{к}$ )

Днем – высокие температуры и давления, за счет энергии солнечной радиации, позволяют осуществлять протекания процессов десорбции (выделение паров хладагента из сорбента) и конденсации (сжижение паров хладагента и накопления конденсата в ресивере) – это, так называемый процесс регенерации. Ночью – низкие температуры и давление (за счет ночной температуры окружающей среды и сорбционных процессов) позволяют осуществлять процессы испарения из жидкого состояния хладагента и поглощения его сорбентом – это, так называемый процесс – «сухой» абсорбции или адсорбции в зависимости от применяемого сорбента.

В термотрансформаторах «сухой» абсорбции могут использоваться различные соли:  $SrBr_2$ ,  $CaBr_2$ ,  $MnCl_2$ ,  $CdCl_2$ , и  $BaCl_2$  но наибольшее применение нашли соли щелочноземельных металлов  $CaCl_2$  и  $SrCl_2$ , а хладагентом – аммиак [3]. В адсорбционных термотрансформаторах в качестве сорбентов используется активированный уголь АС, силикагель, цеолит, а хладагентом является аммиак, метанол, вода [4].

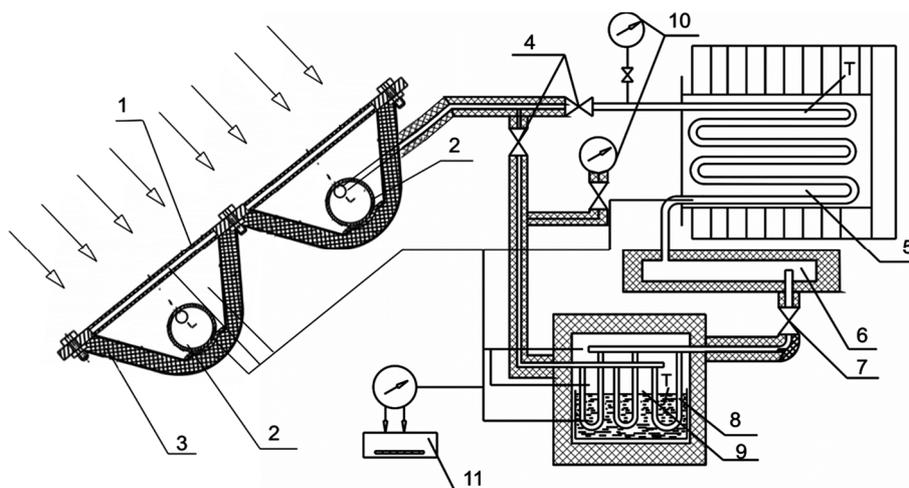
Наибольшее применение в гелиоэнергетических термотрансформаторах получила рабочая пара  $CaCl_2$  – аммиак. Один моль сухой соли  $CaCl_2$  при охлаждении способен поглотить 1, 2, 4 или 8 молей  $NH_3$ . При этом соответственно образуются моно-, ди-, тетра- или октоаммиакаты хлористого кальция. Соль хлористого стронция, например, может образовывать только моно-, ди- и октоаммиакаты. Существование комплексного образования таких соединений зависит и определяется только температурой.



В сорбционных термотрансформаторах химико-физические процессы в реакторах генератора-абсорбера проходят на стадии образования окто- или тетрааммиакатов, потому что образование диаммиаката требует подвода или отвода значительно большей тепловой энергии до достижения необходимых параметров температуры. Комплекс октоаммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ ) существует при  $-95$ – $100$  °С, комплекс тетрааммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$ ) существует при  $-105$ – $110$  °С, комплекс диаммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$ ) существует при  $-115$ – $120$  °С, а при прогреве соли до  $125$ – $130$  °С она становится сухой [3]. Соль  $\text{SrCl}_2$  имеет более низкие температуры существования комплексов, да к тому же переход сразу из диаммиаката в октоаммиакат, значительно снижает количество подводимой тепловой энергии. Однако использование  $\text{CaCl}_2$  определяется более низкой стоимостью и более высокой удельной сорбционной способностью – на 1 кг сухой соли приходится 1,22 кг аммиака.

Несмотря на хорошие сорбционные качества щелочноземельных солей, теплофизические характеристики их (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) остаются низкими. Это особенно плохо сказывается на протекании физико-химических реакций в реакторах генератора-абсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора (неравномерный подвод и отвод тепловой энергии, большая насыпная масса соли, изменение объемных параметров при формировании стадий комплексных соединений, неравномерность распределения внутри реактора тепловых потоков энергии и температурных параметров). Поэтому поиски перспективных сорбентов, комплексных добавок к уже известным сорбентам, являются прогрессивными тенденциями в вопросе повышения эффективности работы таких термотрансформаторов.

В Астраханском государственном техническом университете на протяжении ряда лет ведутся разработки и испытания сорбционных термотрансформаторов циклического действия. Экспериментальная установка последней конструкции представлена на рисунке 2. Гелиоэнергетический термотрансформатор представляет установку состоящую из следующих основных аппаратов: генератора-адсорбера 1 совмещенного исполнения, выполненного заодно с плоскими концентраторами солнечной энергии 2, трехкратно фокусирующими на цилиндрическую поверхность реактора 3 генератора-адсорбера энергию солнечной радиации; конденсатор 4 воздушного или водяного охлаждения; ресивер 5 – накопитель конденсата; испаритель 6, встроенный в охлаждаемую камеру 7; обратные клапаны 8, 9; запорный вентиль 10 – осуществляющий подачу холодильного агента в испаритель.



**Рисунок 2** – Схема конструкции экспериментального гелиоэнергетического термотрансформатора «сухой» абсорбции

Как было сказано выше, только ночью осуществляется процесс охлаждения, причем температура на стенках испарителя при испарении, например, аммиака может достигать отрицательных значений, что не только охлаждает воздух в изолированном пространстве камеры 11, но и приводит к замораживанию воды в ванночки 12, установленной в холодильном контуре. Лед, полученный в ночное время, является аккумулятором холода днем, поддерживая низкую температуру.

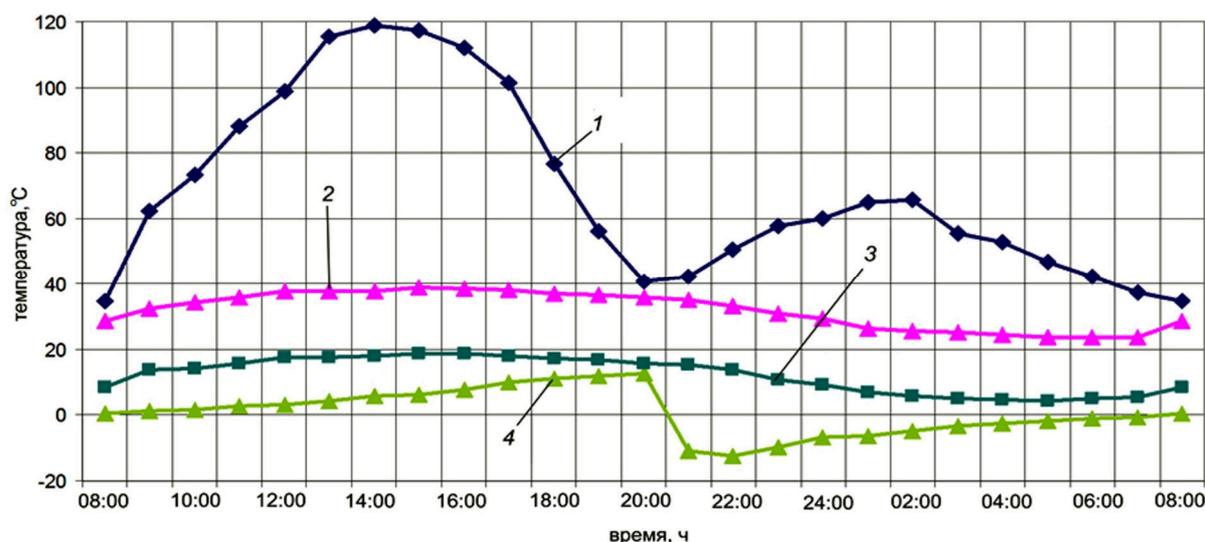
Экспериментальные исследования по повышению эффективности термотрансформаторов. В зависимости от заправки реактора генератора-адсорбера сорбентом в термотрансформаторе могут протекать химико-физические реакции: «сухая» абсорбция – десорбция (термотрансформаторы «сухой» абсорбции) С целью улучшения теплофизических свойств сорбентов в работах проводились исследования по применению графитовых добавок в соединениях солей  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{SrCl}_2$  [4]. Графит на порядок выше имеет коэффициент теплопроводности ( $\lambda_{\text{солиCaCl}_2} = 0,05 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\lambda_{\text{графит}} = 18,3 \text{ Вт/м}^2$ ). Порошок графита – мелкозернистый материал, хорошо перемешивающийся и проникающий между кри-



сталлами аммиаатов, он ведет себя в смесях как металл, не вступая ни в какие реакции с жидкостями. Результаты исследований показали, что коэффициент теплопроводности с увеличением добавок графита в соли возрастает у  $\text{CaCl}_2$  приблизительно в 4 раза по сравнению с чистой солью, тогда как у  $\text{SrCl}_2$  лишь в 1,3 раза. Это можно объяснить структурой данных солей:  $\text{CaCl}_2$  – сыпучий мелкодисперсный белый порошок, тогда как  $\text{SrCl}_2$  имеет игольчатую структуру. При утряске солей уже не наблюдается такого разброса в полученных данных, т.к. у  $\text{SrCl}_2$  разрушаются иглы, что обеспечивает плотность прилегания частиц соли друг к другу. Вторым направлением повышения эффективности работы реакторов генератора-абсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора является разработка технологии нанесения специальных селективных покрытий на инсолирующие поверхности, в частности на реактор генератора-адсорбера. Разработано было несколько видов селективных покрытий, защищенных патентами РФ (№ 2137861, № 2287613, № 2365676) [5–7]. В основе получения этих покрытий лежат методы черного хромирования цинка, черного оксидирования стали, осаждения черных антикоррозионных покрытий на сталь. Полученные при этом электролиты помимо известных веществ, имеют соединения с новыми структурными формулами. Такие комплексные соединения позволяют не только улучшить инсолирующие свойства поверхностей, но и эксплуатационные и эстетические. Такие покрытия позволяют увеличить эффективность работы поверхностей по сравнению с простым окрашиванием матовой черной краской в 1,8–2 раза.

Третьим направлением улучшения работы термотрансформаторов является усовершенствование конструкций как реакторов генераторов-абсорберов, так и самих установок. Разработано несколько оригинальных конструкций реакторов (Патенты РФ № 21379911 и № 2263859). В основе разработок лежат подвижные элементы деталей, компенсирующие объемные изменения сорбента при образовании и распаде аммиаатов, которые могут достигать 3-х кратных размеров, и металлические конструктивные фрагменты, улучшающие подвод и отвод тепловой энергии во внутренние слои сорбента, а также капсульный способ зарядки реактора армированными гильзами, включающими в себя подвижные винтообразные детали из сплава с памятью формы. Разработана также новая конструкция автономного гелиоэнергетического холодильника (Патент РФ № 2315923). Отличительной особенностью гелиоэнергетического холодильника является горизонтально расположенные на различных уровнях относительно Земли реакторы имеющие два входа и выхода хладагента, один хладопроводящий неизолированный коллектор-конденсатор и дополнительный ресивер, автоматизированная работа осуществляется тремя терморегулирующими вентилями и перепускными трубками соединяющие испаритель и ресивера по температурным перепадам в генераторе-абсорбере.

Экспериментальные испытания термотрансформатора. Испытания подобной рисунку 2 схеме конструкции гелиоэнергетического термотрансформатора были проведены летом на открытом полигоне в условиях климата Астраханского региона. На рисунке 3 представлены графики изменения среднестатистических значений температур в аппаратах установки в течении суток.



**Рисунок 3** – График изменения среднестатистических значений температур гелиоэнергетического термотрансформатора «сухой» абсорбции и параметров окружающей среды в течении суток:

1 – поверхность генератора-абсорбера; 2 – наружного воздуха; 3 – в холодильной камере; 4 – в испарителе

Из графика видно, что максимальная температура поверхности реакторов генератора-абсорбера может достигать 118–120 °C (это проявляется примерно в 12 часов солнечного времени); в ночное время нагрев реакторов может достигать 68–70 °C, что может использоваться для нагрева



теплоносителя. Таким образом, теплоту в гелиоэнергетическом термотрансформаторе можно поддерживать практически круглые сутки. Охлаждающий эффект может быть достигнут только в ночное время, как видно из графика в условиях Астрахани с 21–22 часов при этом температура сначала резко падает до минус 15 °С, а затем медленно расчет растет сохраняя отрицательные параметры в течение всего ночного времени.

В последние годы изучалась работа сорбционных термотрансформаторов адсорбционного типа циклического действия. Изучалась работа на рабочей паре – АС (активированный уголь) – аммиак и АС-метанол. В отличие от установок «сухой» абсорбции термотрансформаторы адсорбционного типа на аммиаке имеют несколько меньший термодинамический коэффициент преобразования солнечной энергии в охлаждение, для их работы необходимо создавать выше температуру обогрева реактора, а при работе на метаноле, необходимо поддерживать в установке вакуум. Пожалуй, действительным достоинством этих термотрансформаторов является: неизменность объема сухого и насыщенного хладагентом сорбента в рабочем цикле, низкая коррозионная активность сорбента и меньшие весовые характеристики при работе на вакууме.

Таким образом, по результатам рассмотренного материала можно сделать следующие выводы:

- в Астраханском государственном техническом университете разработана прочная фундаментальная база для разработки, совершенствования и внедрения в различные отрасли производства гелиоэнергетических термотрансформаторов циклического действия: «сухой» абсорбции и адсорбционного типа;
- исследованы теплофизические параметры различных рабочих пар (сорбент-хладагент) на основе щелочноземельных солей с примесями порошкового графита и активированных углей с такими хладагентами как аммиак, метанол и получены новые селективные покрытия на различных адаптирующих поверхностях;
- разработаны новые конструкции элементов гелиоэнергетических термотрансформаторов и схемные решения самих новых конструкций установок;
- изготовлен экспериментальный образец гелиоэнергетического термотрансформатора и проведены испытания его работы на рабочей паре  $\text{CaCl}_2$  с примесью графита – аммиак, доказывающие положительный эффект получения теплоты и холода в условиях южного региона страны.

#### Литература:

1. Руденко М.Ф. Теоретические основы проектирования экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства теплоты / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркпенбаева, Ю.В. Чивиленко; АктГУ им. Ш. Есенова. – Актау, 2008. – 165с.
2. Руденко М.Ф. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия / М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2013. – 172 с.
3. Чивиленко Ю.В. Повышение эффективности экологически безопасных гелиоэнергетических холодильных установок циклического действия / Ю.В. Чивиленко, Б.Ж. Туркпенбаева, М.Ф. Руденко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 6. – С. 17–20.
4. Каримов М.Ш. Повышение эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора адсорбционного типа // М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 31–35.
5. Патент РФ № 2365676 Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь. 27.08.2009 Бюл. № 24.
6. Патент РФ № 2263859 Реактор генератора-абсорбера гелиоохладительной установки (варианты) 10.11.2005 Бюл. № 31.
7. Патент РФ № 2315923 Гелиоэнергетический холодильник 27.01.2008. Бюл. № 3.

#### References:

1. Rudenko M.F. Theoretical bases of design of ecologically safe heliower equipment for production of warmth / M.F. Rudenko, B.Zh. Turkpenbayeva, Yu.V. Chivilenko; AktGU of Sh. Esenov. – Aktau, 2008. – 165 p.
2. Rudenko M.F. Heliower thermotransformers of Sukhoi of absorption of cyclic action / M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina; Astrakhan. state. techn. un-t. – Astrakhan : AGTU publishing house, 2013. – 172 p.
3. Chivilenko Yu.V. Increase in efficiency of ecologically safe heliower refrigeration units of cyclic action / Yu.V. Chivilenko, B.Zh. Turkpenbayeva, M.F. Rudenko // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2008. – № 6. – P. 17–20.
4. Karimov M.Sh. Increase in overall performance of the heliower thermotransformer of the adsorptive type // M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2016. – № 3. – P. 31–35.
5. The patent of the Russian Federation № 2365676 Electrolyte for sedimentation of black anticorrosive oxidic coverings on steel. 8/27/2009. Bulletin № 24.
6. The patent of the Russian Federation № 2263859 Reactor of the Generator Absorber of the Heliorefrigeration Unit (options) 11/10/2005. Bulletin № 31.
7. Patent of the Russian Federation № 2315923 Heliower refrigerator 1/27/2008. Bulletin № 3.