

На правах рукописи



Каримов Марат Шайдоллаулы

**ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА С МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ
ГЕНЕРАТОРОМ-АДСОРБЕРОМ**

**Специальность 05.04.03 – машины, аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Астрахань-2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Руденко Михаил Федорович

Официальные оппоненты: Бараненко Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО), советник при ректорате.

Базаев Эмиль Ахмедович - кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем геотермии» Дагестанского научного центра Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет».

Защита диссертации состоится «19» декабря 2018 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.052.06 в ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля 70, диссертационный зал административного корпуса, кабинет 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» www.dstu.ru. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «8» ноября 2018 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент**



О.В. Евдулов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Республика Казахстан находится в регионе с жарким климатом и большим количеством солнечных дней в году, располагает огромными возобновляемыми источниками энергии и богатыми природными ресурсами, что создает прочный фундамент для ее дальнейшего экономического развития. Однако, доля альтернативных возобновляемых источников энергии в энергетике страны чрезвычайно мала, особенно в агропромышленном комплексе и рыбном хозяйстве.

Объекты потребления, в силу территориальной рассредоточенности, малочисленности населения, относительно небольшой мощности разного рода технологического оборудования и значительного их количества, требуют решения проблемы по энергосбережению. В первую очередь к объектам потребления относятся: крестьянские (фермерские) хозяйства, небольшие сельские поселки, водопойные пункты, личные подсобные хозяйства, индивидуальные и мелкие перерабатывающие предприятия сельскохозяйственной продукции, рыбоперерабатывающие заводы. Внедрение гелиоэнергетической техники может значительно сократить потребление электрической энергии, позволит получить значительно больший социальный эффект и добиться весомых технических результатов.

Гелиоэнергетические холодильные установки на основе адсорбционных термотрансформаторов могут применяться в системах охлаждения, замораживания, кондиционирования, отопления и горячего водоснабжения.

Создание автономной гелиоэнергетической холодильной техники на основе адсорбционных термотрансформаторов нового поколения, простых в изготовлении, эффективных в эксплуатации, способных работать на местных адсорбентах и хладагентах является важной проблемой. Совершенствование конструкций аппаратов таких установок и поиск новых рабочих пар являются актуальными задачами.

Государственной программой энергосбережения Республики Казахстан в период становления рыночных отношений предусмотрено увеличение масштабов использования в народном хозяйстве солнечной, ветровой, геотермальной энергии и энергии биомассы.

Степень разработанности проблемы. Изучение проблемы развития и реализации энергосберегающих технологий и, в частности, преобразования энергии солнечной радиации в аппаратах и установках холодильной техники сорбционного типа для охлаждения, замораживания и кондиционирования, отражено в научных работах ряда многих ученых (труды Архарова А.М., Дубинина М.М., Радущкевича В.Л., Стребкова Д.С., Галимовой Л.В. Руденко М.Ф., Надирова Н.К., Dupont M., Follin S., Hadj Ammar M.A., Pan Q.W., Wang L.W. и др.).

Анализ работ вышеназванных авторов и определение их значимости показали, что среди них отсутствуют исследования, связанные с совершенствованием конструктивного оформления гелиоприемной части

аппаратов гелиоэнергетической холодильной техники, поиском новых рабочих пар для повышения эффективности работы гелиоэнергетических установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа, повышением качества эксплуатационных характеристик и совершенствованием общих схемных решений. Эти обстоятельства и определили цели, задачи и направление настоящего исследования.

Цель работы и задачи исследования.

Целью исследования является разработка гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа циклического действия с усовершенствованной конструкцией гелиоприемной части основного аппарата установки – генератора-адсорбера и применения новых рабочих веществ.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ научной литературы по конструкциям, методам эксплуатации и теплофизическим процессам в гелиоэнергетических холодильных установках адсорбционного типа и оценка потенциала солнечного энергетического ресурса Республики Казахстан".
2. Моделирование гелиоприемного устройства и реактора как элемента конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки.
3. Изучение физических характеристик сорбентов и процессов адсорбции активированных углей (АС) с такими адсорбатами, как аммиак, метиламин и этиламин.
4. Разработка и испытание гелиоэнергетической холодильной установки с модернизированным генератором-адсорбером.
5. Определение оптимальных режимов работы гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа на новых холодильных агентах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана энергосберегающая технология получения холода за счет преобразования солнечной энергии в гелиоэнергетической холодильной установке на основе термотрансформатора адсорбционного типа с оптимальными геометрическими характеристиками оптической части гелиоприемного устройства генератора-адсорбера и низкими тепловыми потерями;

- разработана методика в форме алгоритма аналитических зависимостей для проектирования полезных тепловых нагрузок гелиоприемных устройств холодильных установок, работающих на солнечной энергии;

- предложена методика определения количественных соотношений использования рабочего сорбента в реакторах различной конструкции за счет расчета и анализа температурных полей и тепловых потоков;

- впервые получены обобщающие зависимости адсорбционной способности рабочих пар (АС-метиламин, АС-этиламин) на основе уравнений Дубинина-Радушкевича;

- получены новые данные об эффективности работы гелиоэнергетических холодильных установок и определены области использования их на новых рабочих парах по расчету и анализу тепловых и эксергетических коэффициентов.

Теоретическая значимость работы. Разработаны теоретические основы расчета и проектирования гелиоприемного аппарата генератора-адсорбера совмещенной конструкции для гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа. Теоретически определены через анализ эксергетических коэффициентов полезного действия области применения гелиоэнергетических холодильных установок на новых рабочих парах (АС-метиламин и АС-этиламин). Проведен комплекс экспериментальных исследований по сопоставлению полученных данных с расчетными.

Практическая ценность результатов. В целом результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований являются основой для создания новых технических и технологических решений в химическом машино- и аппаратостроении для холодильной техники, промышленной теплоэнергетики и гелиоэнергетики.

Разработанные модели, расчетные программы, методика расчета гелиоприемного устройства гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа (генератор-адсорбер и реактор) приняты для проектирования новой техники в ОАО «Астраханский станкостроительный завод»; разработана новая схема с использованием гелиоэнергетического термотрансформатора адсорбционного типа для термоподготовки воды в рыбоводных хозяйствах, которая защищена патентом на полезную модель № 126894; материал данной работы используется в учебном процессе в АГТУ на кафедрах энергетического профиля.

Методология и методы исследования. В процессе решения обозначенных в работе задач использовались принципы системного подхода при анализе и систематизации данных по определению тепловых нагрузок на гелиоприемные устройства аппаратов, методы теплофизического моделирования, теория теплопроводности однородных тел, теория адсорбции, экспериментальные методы исследования, статистические данные. Основными методами исследования являлись математическое моделирование, эксперимент и алгоритмы компьютерного программирования.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

- модель определения полезных тепловых нагрузок и температурных полей на реакторы генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки;

- экспериментальные физико-химические характеристики сорбентов и значения коэффициентов адсорбционной способности в структурных уравнениях Дубинина-Радушкевича для рабочих пар АС-метиламин и АС-этиламин;

- экспериментальные зависимости температурных характеристик гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа в суточном режиме;

- анализ степени термодинамического совершенства гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа на основе математического моделирования.

Степень достоверности результатов исследования. Разработанный и реализованный принцип охлаждения за счет использования энергии солнечной радиации в адсорбционных термотрансформаторах, модели основного аппарата гелиоэнергетической холодильной установки генератора-адсорбера, адсорбционные характеристики новых рабочих пар достоверны за счет использования фундаментальных законов теплофизики и физики низких температур, теории адсорбции и химической термодинамики, экспериментальных методов натуральных испытаний и подтверждены удовлетворительным совпадением результатов расчета с данными других исследователей. Результаты работы были опубликованы в журналах и обсуждены на научно-технических конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств и пути их решения» (Нижнекамск, 2012); Международной научно-практической конференции «Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа» (Астрахань, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016); VI Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки» (Москва, 2012); Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, 2012); IV Всероссийской научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: пути развития» (Петропавловск-Камчатский, 2013); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Наука и образование 2013» (Мурманск, 2013); Международной научно-практической конференции «Десятые Надировские чтения» (Атырау, 2012).

Публикации. Результаты выполненных исследований опубликованы в 17 научных трудах, из них рецензируемых – 6, в том числе 2 статьи в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему

цитирования Scopus, 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК, получен патент РФ на полезную модель.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Основная часть диссертации изложена на 149 страницах, включая 73 рисунка, 3 таблицы, ссылки на литературу из 127 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются актуальность вопроса, цель, задачи, новизна, практическая значимость, апробация, положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса о разработках и исследовании гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа для Республики Казахстан» проведен анализ теоретического потенциала энергии солнечной радиации на территории Республики Казахстан и отмечено эффективное использование гелиоэнергетической техники для производства холода посредством адсорбционных холодильных установок, работающих на солнечной энергии в отдельных регионах.

Проведен обзор состояния исследований по разработке гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа, их рабочих веществ, термодинамических, теплофизических и физических процессов, протекающих в них.

Рассматриваются основные особенности теории адсорбции на поверхности твердого тела и экспериментальные зависимости, полученные различными учеными. Большое внимание уделяется исследованию конструктивных особенностей аппаратов и их элементов в генераторах-адсорберах гелиоэнергетических холодильных установках, особенно с плоскими концентраторам на круглые поверхности.

Отмечается, что повышение эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки может быть достигнуто за счет совершенствования теплофизических и физико-химических процессов в конструкции генератора-адсорбера, применения новых рабочих веществ.

Во второй главе «Разработка гелиоэнергетической холодильной установки с модернизированной конструкцией генератора-адсорбера» описывается конструкция гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа и принцип ее действия (рисунок 1). В основе работы установки лежат солнечная энергия и суточные перепады значений температуры окружающей среды. Установка работает в двух режимах: режим регенерации (десорбции) – выделение адсорбата (хладагента) из насыщенного адсорбента при обогреве реактора генератора-адсорбера солнечной радиацией днем, его сжижение в конденсаторе за счет охлаждающей среды и накопление в ресивере; режим зарядки (адсорбции) –

поглощение адсорбата адсорбентом в реакторе при охлаждении его ночью, в испарителе в это время за счет испарения хладагента возникает охлаждающий эффект. Запорными 4 и регулирующим 7 вентилями осуществляется регулирование работы гелиоэнергетической холодильной установки по суточному циклу.

Основным аппаратом гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа является генератор-адсорбер совмещенной конструкции, реакторы которого заключены в гелиоприемное устройство типа «горячий ящик». Реакторы заполнены твердым насыщенным адсорбентом (активированный уголь (АС) и адсорбатом (хладагент).

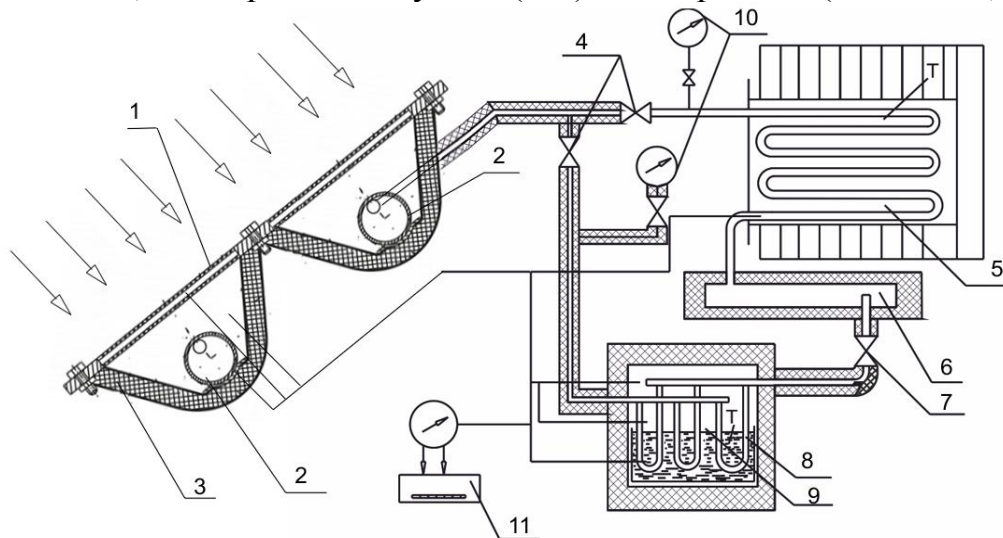


Рисунок 1 - Схема гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа с модернизированной конструкцией генератора-адсорбера: 1-генератор-адсорбер, 2- реактор, 3- гелиоприемные конструкции, 4 – запорные вентили, 5- конденсатор, 6- ресивер, 7- регулирующий вентиль, 8- испаритель, 9- охлаждаемая емкость, 10 – манометры, 11- прибор для измерения термо-ЭДС.

В гелиоприемном устройстве (рисунок 2) имеются симметрично расположенные плоские зеркальные концентраторы под определенным углом раскрытия Θ , град. В центральной части зеркал установлен реактор трубчатого профиля с наружным радиусом R , м. Зеркала имеют ширину раскрытия W , м, длину конструкции аппарата l , м, поверхности отражения солнечных лучей Q и G , m^2 . Поверхности поглощающие солнечное излучение, это поверхность трубки реактора $S=\pi \cdot R \cdot l$, m^2 , и поверхность металлической подложки F , m^2 .

На рисунке 2 представлена оптическая модель конструкции гелиоприемной части генератора-адсорбера. На основе анализа эффективности однократного солнечного облучения цилиндрической поверхности плоскими зеркалами при соотношении от $W/2 \cdot R=3,5$ до $W/\pi \cdot R=3,5$ устанавливается угол раскрытия зеркал Θ . Длина зеркал L_z рассчитывается таким образом, чтобы при перпендикулярном падении солнечных лучей на гелиоприемное устройство, (вдоль оси аппарата)

однократное отражение луча от верхней до нижней кромки зеркал G и Q полностью попадало на поверхность S реактора.

Эти условия лежат в основе трехкратного облучения солнечной радиацией цилиндрической поверхности реактора. Кроме того, подложка с поверхностью F, являющаяся прямым ребром и подводит дополнительно теплоту в нижней части реактора при надежном контакте с корпусом.

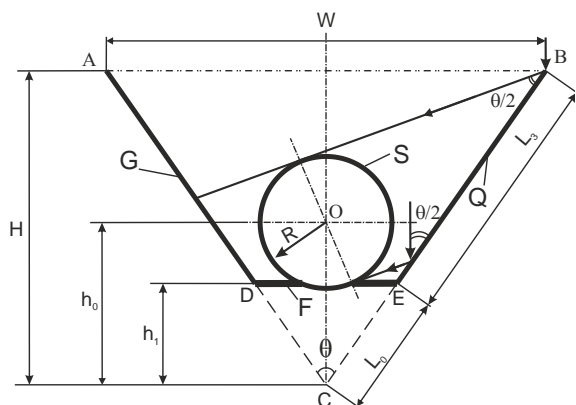


Рисунок 2 - Схема оптического моделирования генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки

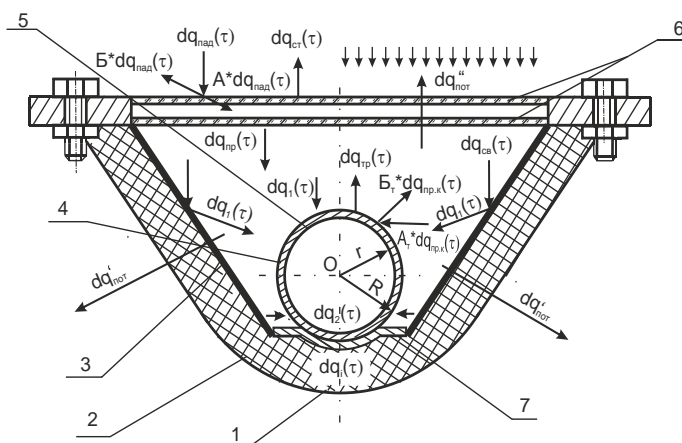


Рисунок 3 - Схема теплоэнергетической модели генератора - адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки: 1 – корпус гелиоприемника; 2 – изоляция; 3 – зеркальные отражатели; 4 – корпус реактора; 5 – адсорбент (AC); 6 – прозрачное покрытие; 7 – подложка

Тогда, согласно схеме на рисунке 2 конструктивные элементы гелиоприемной части генератора-адсорбера выражаются через соотношения радиуса реактора R и фиктивного угла раскрытия зеркал Θ :

$$W = \pi \cdot 3,5 \cdot R \quad (1), \quad L_3 = 3 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot \sin(\Theta/2)] \quad (2),$$

$$L_0 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [8 \cdot \sin(\Theta/2)] \quad (3), \quad H = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [2 \cdot \tan(\Theta/2)] \quad (4),$$

$$h_1 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot \tan(\Theta/2)] \quad (5), \quad h_0 = h_1 + R, \quad (6).$$

Оптические параметры моделирования и баланс энергетических потоков солнечной радиации легли в основу разработки теплоэнергетической модели генератора-адсорбера холодильной установки (профиль конструкции рисунок 3).

Тепловой поток $dq_{\text{пад}}(\tau)$, падающий на прозрачную поверхность гелиоприемного устройства генератора-адсорбера, определяется по значениям мощности падающей прямой $dI_d(\tau)$ и диффузионной $dI_d(\tau)$ составляющей энергии солнечной радиации в течение малого промежутка времени ($\tau=1$ час). При этом учитываются широта местности, угол склонения солнца и угол наклона гелиоприемника у горизонта.

Тепловой поток (за единицу времени), проходящий через прозрачную оболочку площадью $W \cdot l$ в гелиоприемник, можно описать выражением, Вт,

$$dq_{\text{пр}}(\tau) = K_{\text{пз}} \cdot K_{\text{пп}} [dq_{\text{пад}}(\tau) - dq_{\text{пад}}(\tau) \cdot A - dq_{\text{пад}}(\tau) \cdot B - \varepsilon_{\text{ст}} \cdot c_0 \cdot (T_{\text{ст}}(\tau)/100)^4], \quad (7)$$

где $K_{пз}$, $K_{пп}$ – коэффициенты потерь энергии при прохождении солнечных лучей через запыленность и несколько прозрачных оболочек в конструкции «горячего ящика»; A , B – коэффициенты поглощения и отражения энергии солнечной радиации от прозрачной оболочки; $\varepsilon_{ст} \cdot c_0 \cdot (T_{ст}(\tau)/100)^4$ – собственное излучение материала оболочки по формуле Стефана-Больцмана, Вт; $\varepsilon_{ст}$ – степень черноты материала оболочки; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{ст}(\tau)$ – абсолютная температура прозрачной оболочки в единицу времени, К.

Мощность полезной тепловой энергии будет складываться из энергии солнечной радиации, падающей непосредственно на поверхность цилиндрического корпуса реактора генератора-адсорбера, энергии потока солнечной радиации, отраженного от плоских зеркал, и тепловой энергии от нижней подложки реактора.

Часть энергии солнечной радиации расходуется на подогрев элементов конструкции генератора-адсорбера, Вт,

$$dq_i(\tau) = \sum m_i \cdot c_{ti} \cdot \Delta t_i, \quad (8)$$

где m_i – масса, кг, соответствующего материала i -го элемента конструкции (металла, изоляции, зеркал, стекол и т.п.); c_{ti} – удельная тепловая инерция материала (Дж/кг \cdot °C \cdot с), равная $c_{ti} = c_i/\tau$; c_i – массовая теплоемкость материала i -ого элемента конструкции (Дж/кг \cdot °C); Δt_i – темп роста температуры за определенный период времени τ i -го элемента конструкции между замерами и расчетами тепловых потоков.

Часть энергии, поступающей в «горячий ящик», тратится на подогрев воздуха в замкнутом объеме и потери через элементы изолированной конструкции $dq'_{пот}(\tau)$ и стекло $dq''_{пот}(\tau)$.

Тогда доля полезной теплоты, проходящей в «горячий ящик» и идущей на обогрев корпуса реактора, будет с одной стороны равна Вт ,

$$dq_{пр.к}(\tau) = dq_{пр}(\tau) - dq_{св}(\tau) - dq'_{пот}(\tau) - dq''_{пот}(\tau) \pm dq_i \quad (9)$$

С другой стороны на корпус реактора подводится теплота в виде потока $dq_1(\tau)$ лучистой энергии на видимую и отраженную от зеркал часть поглощающей поверхности площадью $3 \cdot \pi \cdot R \cdot l$, в виде потока $dq_2(\tau)$ - от теплоты подводимой за счет металлической плоской поверхности подложки, Вт,

$$dq_1(\tau) = [dq_{пр.к}(\tau) - dq_{пр.к}(\tau) \cdot A_T - dq_{1пр.к}(\tau) \cdot B_T], \quad (10)$$

где A_T , B_T – соответственно коэффициенты поглощения и отражения энергии солнечной радиации от трубки.

$$dq_2(\tau) = \lambda_T \cdot \delta_o \cdot m \cdot dT_o(\tau) \cdot th(m \cdot b) \cdot F_{осн}, \quad (11)$$

где λ_T , λ_o , δ_T , δ_o , R , r – соответственно коэффициент теплопроводности материала трубы и металлической подложки, Вт/(м \cdot К), толщины трубы и соответственно подложки, внешний и внутренний радиусы трубы, (м); T_o – температура у основания подложки, К; $m = [2 \cdot \alpha / (\lambda_o \cdot \delta_o)]^{0.5}$ – комплекс теплофизических переменных, α – коэффициент теплоотдачи от металлической подложки конвекцией Вт/(м 2 \cdot К); $b = 2 \cdot r$ – длина ребра, м; $F_{осн}$ – площадь основания ребра, м 2 .

Равенство балансов полезной теплоты определяется соотношением:

$$dq_{\text{пр.к}}(\tau) = dq_1(\tau) + dq_2(\tau) \quad (12)$$

Для расчета полезных тепловых нагрузок, воспринимаемых реактором генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки, на основании формул (1) – (12) была разработана расчетная программа в программном пакете Mathcad. Правильность предлагаемой методики проверена экспериментально.

Полезная тепловая нагрузка идет на процесс нагрева насыщенного адсорбента и процесс десорбции, Вт.

$$Q_{\text{дес}} = \{r_o + R \cdot T \cdot \ln(P_s/P) + [\alpha \cdot R \cdot T / (D \cdot n)] \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^{-1}\} \cdot \zeta \cdot \Delta a \quad (13)$$

где r_o – скрытая теплота парообразования адсорбата (Дж/кг); R – универсальная газовая постоянная (Дж/(кг/К)); P_s – давление насыщения (Па); P , T – давление и температура внутри реактора; α – коэффициент термического расширения адсорбционной фазы (1/К); D – коэффициент рабочей пары, n – параметр, характеризующий размер пор адсорбента; Δa – доля насыщения адсорбатом адсорбента (кг/с); ζ – коэффициент равномерности распределения тепловой энергии в реакторе генератора-адсорбера.

Проведено моделирование реактора генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки. Для численного расчета нестационарной теплопроводности использовалось нелинейное гармоническое уравнение теплопроводности Фурье, в векторной форме записи:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] \pm q^*, \quad (14)$$

где q^* – это поток присутствующий в процессе реакции. В зависимости от направления реакции q^* , идущей с поглощением теплоты – знак «плюс», так и при выделении теплоты – знак «минус».

Распределение хладагента происходит в адсорбенте около трубы, смещенной относительно центра, которая играет роль перфорированного хладопровода. Хладопровод может иметь ребра вдоль длины реактора.

В полярных координатах поля температур, когда не учитываются краевые эффекты в торцах реактора, можно рассматривать двумерный поперечный разрез реактора (рис.3а). Получаем следующее соотношение:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_r}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda_r}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} + \frac{\lambda_\phi}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \cdot \frac{1}{r^2} \pm \frac{q^*}{\rho \cdot c_p}. \quad (15)$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – теплоемкость вещества; ρ – плотность вещества.

Для численного расчета данного выражения использовали программный пакет Elcut, в котором была проведена обработка значений температуры нагрева поверхности реактора, полученных экспериментальным путем.

Математические модели позволяют отображать суточные изменения температуры и тепловых потоков в реакторе при различной температуре окружающей среды и различных углах падения солнечных лучей.

С помощью модели можно рассчитать коэффициент равномерности распределения тепловой энергии в реакторе:

$$\zeta = S_{\text{дес}}/S_{\text{таг}} \quad (16)$$

где $S_{\text{дес}}$, $S_{\text{таг}}$ - площади полей по модели со значениями температуры начала десорбции и выше и общая площадь реактора с адсорбентом соответственно.

Через ζ можно определить долю потери мощности гелиоэнергетической холодильной установки за счет нереализуемой массы рабочего сорбента в реакторе генератора-адсорбера при протекании в нем физических процессов десорбции и адсорбции.

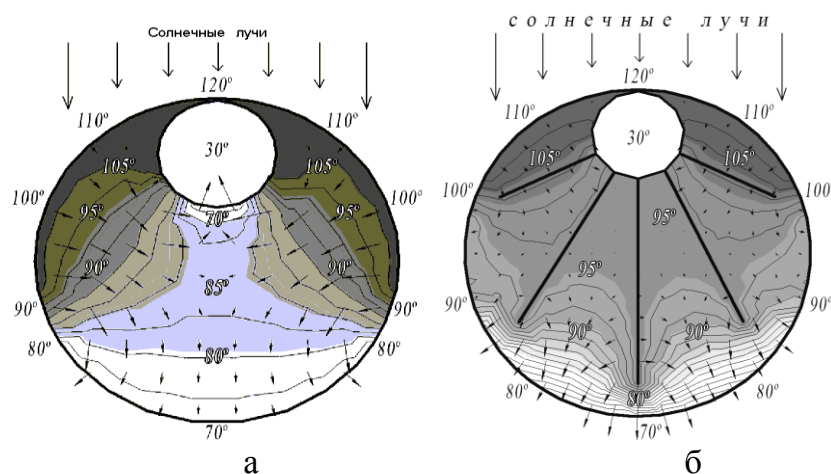


Рисунок 4 - Распределение температурных полей и тепловых потоков в поперечном сечении реактора: а - в простой; б - в оребренной конструкции. Стрелками показаны векторы тепловых потоков

На рисунок 4 показаны две модели реакторов: простой конструкции с асимметричной перфорированной трубкой по центру (экспериментальный реактор) и с оребренной перфорированной трубкой (теоретическая модель) вдоль длины реактора. При одинаковом облучении внешней оболочки корпуса реактора $\zeta_{\text{экс}}=0,52$, а $\zeta_{\text{теор}}=0,81$. Применение внутреннего оребрения позволяет до 30% улучшить подвод, отвод и распределение полезной энергии в реакторе.

В третьей главе «Экспериментальные исследования теплофизических процессов, физико-химических характеристик рабочих веществ и работы гелиоэнергетической холодильной установки» рассматриваются вопросы, подтверждающие экспериментами основы теоретического моделирования (глава 2) генератора-адсорбера, описаны исследования адсорбции различными видами активированных углей и разными адсорбатами (аммиаком, метиламином и этиламином), подтверждается эффект охлаждения в испарителе гелиоэнергетической холодильной установки.

Весовым способом были определены характеристики исследуемых адсорбентов казахстанского и российского производства.

Получены адсорбционные параметры адсорбентов и исследованы процессы адсорбции рабочих пар. По экспериментальным значениям построены изотермы адсорбции рабочих пар АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин и проведена обработка экспериментальных данных в логарифмической анаморфозе для получения расчетных коэффициентов в структурных уравнениях Дубинина-Радушкевича.

$$a(P,T) = \rho(T) \cdot W'_0 \cdot \exp\{-D \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^n\}, \quad (17)$$

где $a(P,T)$ – величина адсорбции для равновесных давлений (P/P_s) и температур T , кг/кг; W'_0 – предельный объем адсорбционного пространства, м³/кг; $\rho(T)$ – плотность адсорбата при соответствующей температуре, кг/м³; T – температура эксперимента, К; P_s, P – давление насыщения и рабочее, Па; D – коэффициент энергии адсорбции; n – показатель распределения размерности пор.

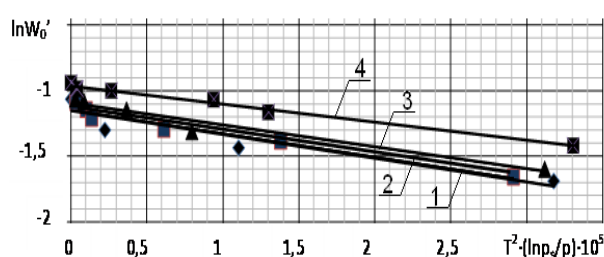


Рисунок 5 - Зависимость $\ln W'_0$ от $T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2$ рабочей пары АС-метиламин при $T=293\text{K}$ (1-4-типы АС-образцов)

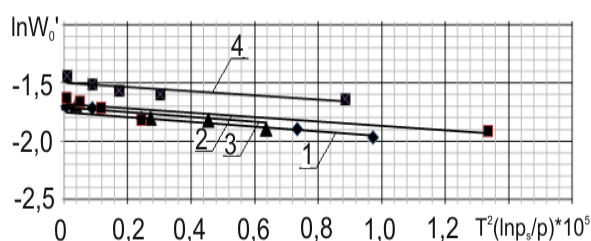


Рисунок 6 - Зависимость $\ln W'_0$ от $T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2$ для рабочей пары АС-этиламин (1-4 –типы АС-образцов).

Для исследуемых рабочих пар получены следующие коэффициенты D : для рабочих пар АС-аммиак $D = 12,17 \cdot 10^{-7}$; для рабочих пар АС-метиламин $D = 16,58 \cdot 10^{-7}$; для рабочих пар АС-этиламин $D = 21,17 \cdot 10^{-7}$. На рисунках 5, 6 приведены зависимости $\ln W'_0$ текущего объема адсорбционного пространства от $T^2 \cdot [\ln(P_s/P)]^2$ для исследуемых рабочих пар. Зависимости для метиламина и этиламина носит прямолинейный убывающий характер, что подтверждается исследованиями по адсорбции с другими рабочими парами, такими как АС-аммиак, АС-метанол. Лучшим из исследуемых активированных углей для использования в гелиоэнергетических холодильных установках является образец 4 российского производства.

Проведены испытания гелиоэнергетической холодильной установки с модернизированным генератором-адсорбером на рабочей паре АС-аммиак, давшие положительный эффект охлаждения.

Дневная максимальная температура реактора достигала 138 - 142 °С, температурная неравномерность нагрева поверхности реактора составляла 6 - 12 °С днем; ночная температура реактора в режиме адсорбции достигала 64,6 - 65,3 °С); охлаждение испарителя ночью достигало (-6,4 - -8,2 °С). Время десорбции адсорбата (хладагента) 6,5 - 7 часов, время адсорбции - 10 - 11 часов. Давление в аппаратах колеблется от 2,2 МПа днем до 0,25 МПа ночью. Температура воздуха в охлаждающей камере в течение суток изменялась в пределах 4 - 12 °С. Средняя холодопроизводительность гелиоэнергетической холодильной установки $Q_0 \approx 100$ Вт.

На рисунке 7 показаны графики изменения температуры в аппаратах холодильной установки в суточном режиме.

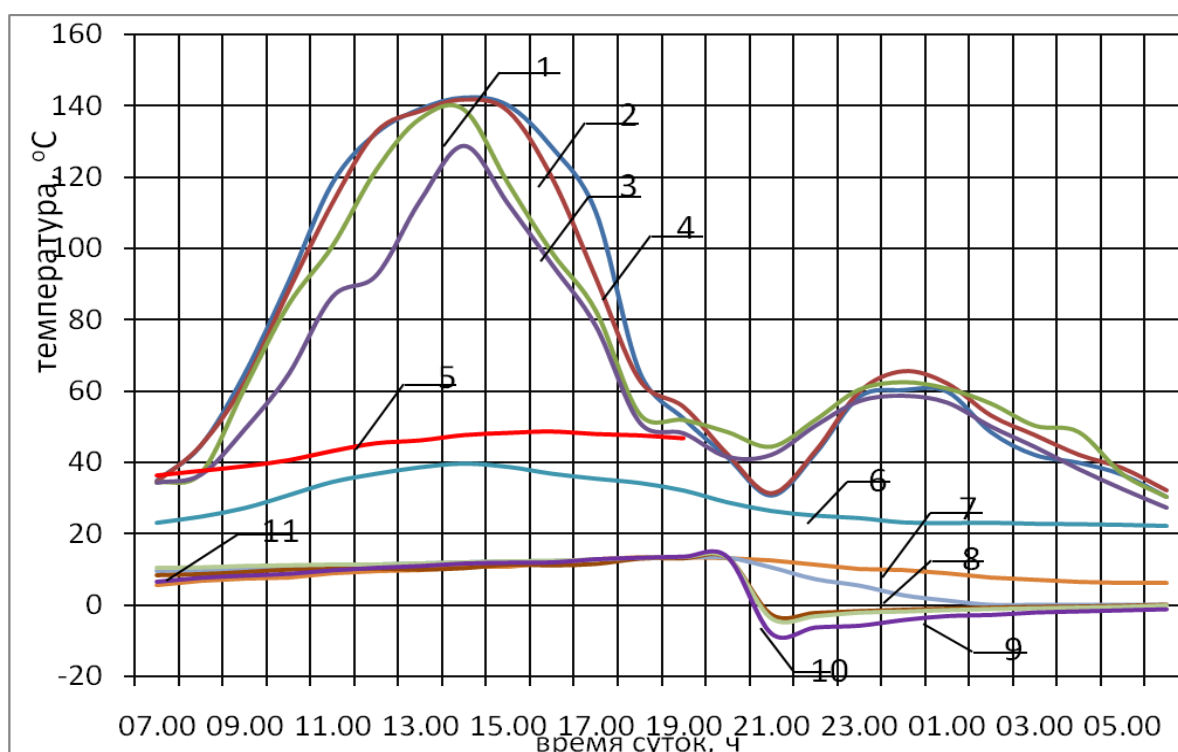


Рисунок 7 - Графики зависимости усреднённых значений температуры гелиоэнергетической холодильной установки: 1-4 – температура нагрева поверхности реактора генератора-адсорбера в различных точках по поверхности; 5 – температура поверхности конденсатора; 6 – температура наружного воздуха; 7 – температура воздуха в охлаждающей камере; 8 – температура охлаждения воды в камере; 9, 10 – температура поверхности испарителя

Утром теплота подводится к реактору генератора-адсорбера и его температура растет. Затем начинается процесс десорбции, который постепенно охватывает весь сорбент по мере его прогрева и осушения. К 17.00 часам начинается изостерическое охлаждение сухого сорбента и падение давления в реакторе. Схема установки перестраивается. В 19.30 часов открывается регулирующий вентиль и хладагент дросселируется в

испаритель охлаждающей камеры. Эффект охлаждения наблюдается в испарителе и охлаждаемой камере в течение всего ночного времени.

Одновременно с охлаждением в ночное время из реактора по мере насыщения адсорбента отводится теплота адсорбции и наблюдается сначала повышение температуры корпуса реактора, а затем понижение. На следующее утро установка переключается и цикл работы установки повторяется.

На рисунке 8 показана модель модернизированного элемента генератора-адсорбера.

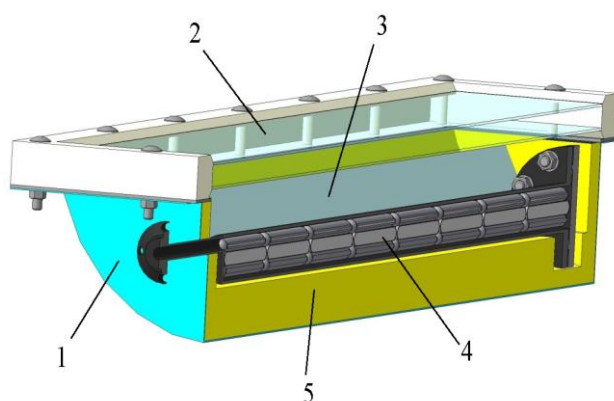


Рисунок 8 - Модель модернизированного генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки: 1-корпус гелиоприемника; 2-стеклопакет; 3-зеркальное покрытие; 4-трубка реактора; 5-изоляция

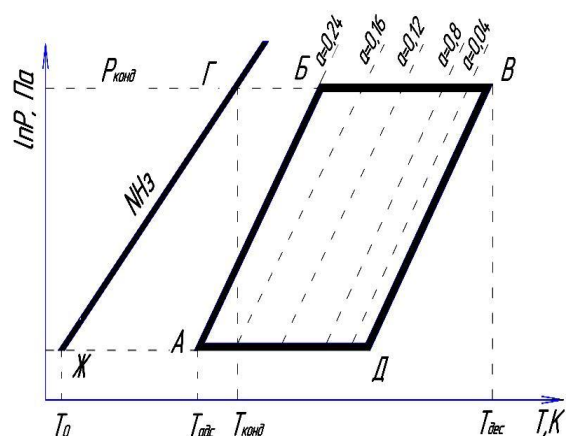


Рисунок 9 - Термодинамический цикл работы гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа

В четвертой главе исследуется работа гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа с помощью термодинамического и эксергетического коэффициентов на основе моделирования термодинамического цикла (рисунок 9). Определяются диапазон и условия работы гелиоэнергетических холодильных установок с новыми конструкциями генератора-адсорбера на хладагентах аммиаке, метиламине и этиламине.

В основе моделирования лежат следующие логические рассуждения. В процессе изостерического нагрева АБ, несмотря на увеличение температуры и давления, величина количества хладагента в насыщенном адсорбенте остается постоянной: $a(T_{\text{адс}}, P_s) = \text{const}$. Процесс АБ заканчивается при температуре конденсации (т.Б), соответствующей давлению насыщения $P_s = P(T_K)$. Процесс десорбции БВ идет при возрастании температуры и постоянном давлении. В результате из активированного угля выделяется хладагент и доля насыщения адсорбатом уменьшается: $a_0 - a_{01} = \Delta a$. Процесс

десорбции заканчивается при максимальной заданной $T_{\text{дес(max)}}$ температуре.

Термодинамическая эффективность работы термотрансформатора на рабочей паре АС–адсорбат рассчитывалась следующим образом. Определяли теплоту, затраченную на обогрев реактора генератора-адсорбера в процессах изостерического нагрева $Q_{\text{АБ}}$ и изобарической десорбции $Q_{\text{БВ}}$, и полезную теплоту в процессе изобарического кипения хладагента в испарителе Q_0 .

$Q_{\text{АБ}} = c_i \cdot m_i \cdot \Delta T$, где c_i , m_i , теплоемкость и масса i -х элементов реактора генератора-адсорбера: металла, адсорбента и хладагента; ΔT температура разности нагрева элементов реактора от температуры десорбции до начала десорбции.

$Q_{\text{БВ}} = Q'_{\text{БВ}} + Q_{\text{дес}}$, где $Q'_{\text{БВ}}$ – теплота, идущая на нагрев i -х элементов реактора генератора-адсорбера в процессе десорбции; $Q_{\text{дес}}$ – теплота физико-химических процессов, идущая на выход молекул адсорбата из микро-, макро-, мезопор сорбента, которая определялась по формуле (13).

$$Q_0 = r_0 \cdot \Delta a$$

Термодинамический коэффициент эффективности гелиоэнергетической холодильной установки

$$\eta = Q_{\text{пол}} / Q_{\text{зат}}, \quad (18)$$

Степень термодинамической эффективности гелиоэнергетической холодильной установки определяется при помощи эксергетического коэффициента:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{пол}}}{\mathcal{E}_{\text{зат}}} = \frac{Q_{\text{пол}}[(T_{\text{ос}} - T_0)/T_0]}{Q_{\text{зат}}[(T_{\text{дес}} - T_{\text{ос}})/T_{\text{дес}}]}, \quad (19)$$

где $\mathcal{E}_{\text{пол}}$, $\mathcal{E}_{\text{зат}}$ – эксергии полезная и затраченная, $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды.

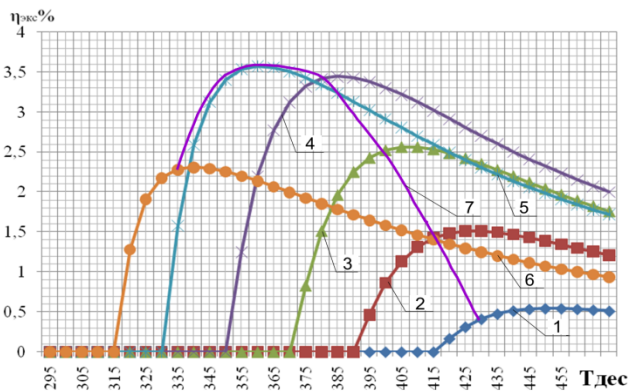


Рисунок 10 – Зависимость эксергетического коэффициента от температуры десорбции рабочей пары АС-метиламин для различных значений температуры кипения адсорбата при постоянных температурах $T_{\text{адс}}$, $T_{\text{конд}}$, $T_{\text{о.с.}}$: 1– $T_0=253\text{K}$; 2– $T_0=258\text{K}$; 3– $T_0=263\text{K}$; 4– $T_0=268\text{K}$; 5– $T_0=273\text{K}$; 6– $T_0=278\text{K}$; 7 – линия максимальных значений

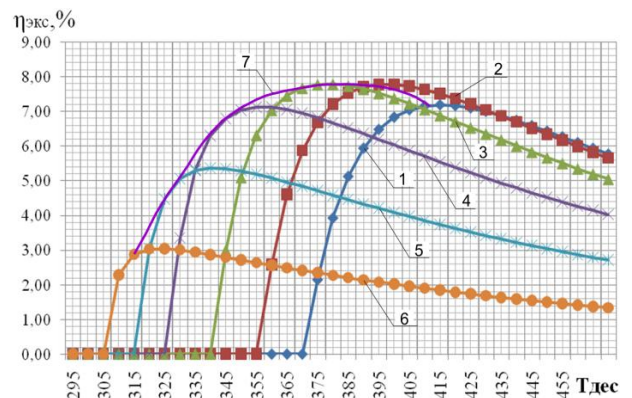


Рисунок 11 – Зависимость эксергетического коэффициента от температуры десорбции рабочей пары АС-аммиак для различных значений температуры кипения адсорбата при постоянных температурах $T_{\text{адс}}$, $T_{\text{конд}}$, $T_{\text{о.с.}}$: 1– $T_0=253\text{K}$, 2– $T_0=258\text{K}$, 3– $T_0=263\text{K}$, 4– $T_0=268\text{K}$, 5– $T_0=273\text{K}$, 6– $T_0=278\text{K}$, 7 – линия максимальных значений

Анализ результатов расчетных исследований показал, что термодинамический и эксергетический коэффициенты для трех исследуемых рабочих пар с повышением температуры нагрева генератора-адсорбера сначала не изменяются, а затем наблюдается их резкое увеличение (скачок) при протекании процесса десорбции и последующее постепенное снижение на 10-12% от максимальных значений. Это можно объяснить неравномерным протеканием самого процесса десорбции. При постоянных значениях температуры адсорбции, конденсации и окружающей среды анализ эксергетического коэффициента $\eta_{\text{экс}}$ холодильной установки показал, что при изменении температуры кипения в испарителе и изменении температуры десорбции в реакторе генератора-адсорбера наблюдается оптимальный диапазон устойчивых температурных параметров, при которых $\eta_{\text{экс}}$ гелиоэнергетической холодильной установки имеет максимальные значения.

На рисунке 10 для рабочей пары АС-метиламин оптимальным условиям с высокими эксергетическими КПД соответствует линия графика 5, имеющая при $T_0=273\text{K}(0^\circ\text{C})$, при $T_{\text{дес}}=(345-375)\text{K}(72-102)^\circ\text{C}$ - $\eta_{\text{экс(мет)}}=0,035$, что соответствует параметрам кондиционирования.

На рисунке 11 для рабочей пары АС-аммиак оптимальным условиям с высокими эксергетическими КПД соответствует линия графика 3, имеющая при $T_0=263\text{K}(-10^\circ\text{C})$, при $T_{\text{дес}}=(365-395)\text{K}(92-122)^\circ\text{C}$ - $\eta_{\text{экс(амм)}}=0,078$, что соответствует параметрам замораживания.

Термодинамические коэффициенты на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{\text{(амм)}}=0,22$; $\eta_{\text{(мет)}}=0,058$; в режимах кондиционирования $\eta_{\text{(амм)}}=0,342$; $\eta_{\text{(мет)}}=0,254$; $\eta_{\text{(этл)}}=0,2$.

Степень термодинамической эффективности, соответственно на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{\text{экс(амм)}}=0,078$; $\eta_{\text{экс(мет)}}=0,015$; в режимах кондиционирования $\eta_{\text{экс(амм)}}=0,052$; $\eta_{\text{экс(мет)}}=0,035$; $\eta_{\text{экс(этл)}}=0,0092$.

Математическое моделирование по полученным данным позволяет провести анализ влияния различных факторов на термодинамическую эффективность гелиоэнергетической холодильной установки.

Давление в холодильной установке на рабочей паре АС-метиламин меньше, чем на рабочей паре АС-аммиак в 3,3-2,6 раза.

Полученные экспериментальные значения легли в основу методики расчета гелиоэнергетической холодильной установки с модернизированным генератором-адсорбером.

Заключение

1. Оценка потенциала солнечного энергетического ресурса западных и южных регионов Республики Казахстан показала, что среднесуточные значения суммарной солнечной радиации (Атырауская, Мангистауская, Кызылординская, Шымкентская области) $E= 8,5 - 31,5 \text{ МДж/м}^2$, а продолжительность солнечного сияния составляет 5 - 11,5 часов.

Эти параметры являются вполне удовлетворительными для развития гелиоэнергетической техники, и в частности гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа.

2. На основании анализа концентрической способности зеркальных отражателей, оптического моделирования солнечных лучей на поглощающую поверхность реактора и теплоэнергетического баланса в элементах генератора-адсорбера в программном пакете Mathcad получены формулы и методика расчета оптимальной конструкции генератора-адсорбера, встроенного в гелиоприемное устройство типа «горячий ящик».

3. Предложена методика моделирования конструктивных вариантов реактора генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки на основе программного обеспечения Elcut. Подобная модель позволяет оценить долю потери мощности гелиоэнергетической холодильной установки от неучаствующей в работе массы рабочей пары в реакторе, а применение внутреннего оребрения реактора может увеличить производительность на 30%.

4. Определены физико-химические характеристики некоторых сорбентов казахстанского производства, получены изотермы адсорбции активированных углей с аммиаком, метиламином и этиламином, позволяющие оценить адсорбционную способность адсорбента. Расчетным путем определены характерные коэффициенты в структурных уравнениях Дубинина-Радужкевича для исследуемых адсорбатов.

5. Исследование эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на различных рабочих парах по анализу эксергетического коэффициента позволило определить области их использования и применения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Статьи, опубликованные в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования (Scopus):

1. Каримов, М.Ш. 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. (0,6 п.л.(авт.0,2 п.л.)).

2. Каримов, М.Ш. Повышение эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора / М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2016. - №3 - С.31-35. (0,5 п.л.(авт.0,18 п.л.)).

II. Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

3. Каримов, М.Ш. Аналитические исследования концентраторов солнечной энергии с поглощающей поверхностью треугольной формы для морских и береговых энергетических комплексов / Ю.В. Шипулина, М.Ф.

Руденко, М.Ш. Каримов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2012. - №1. - С.135-140. (0,6 п.л.(авт.0,2 п.л.)).

4. Каримов, М.Ш. Методика определения тепловых нагрузок на реактор генератора- адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки / Ю.В.Шипулина, М.Ш.Каримов, М.Ф.Руденко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.- 2013.- №1.- С.148-154. (0,7 п.л.(авт.0,25 п.л.)).

5. Каримов, М.Ш. Методика расчета тепловых нагрузок на генератор-адсорбер гелиоэнергетического термотрансформатора / Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Геология, география и глобальная энергия. - 2014.- № 3(54).- С.204-207. (0,125 п.л.(авт.0,04 п.л.))

III. Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

6. Каримов, М.Ш. Определение сорбционных свойств некоторых активированных углей для адсорбционных термотрансформаторов/ М.Ш.Каримов // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы III Международной научно-практической конференции, 7 сентября 2012 г. - Астрахань: АГТУ, 2012. - С.15-17. (авт.0,125 п.л.)

7. Каримов, М.Ш. Определение изотерм адсорбции на активированных углях / М.Ш.Каримов, М.Ф. Руденко // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы III Международной научно-практической конференции, 7 сентября 2012 г. - Астрахань: АГТУ.- 2012. - С.17-19. (0,125 п.л.(авт.0,06 п.л.))

8. Каримов, М.Ш. Исследование рабочих пар для гелиоэнергетических термотрансформаторов адсорбционного типа / М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Актуальные вопросы науки: материалы VI Международной научно-практической конференции, 10 июля 2012г. - М.: Спутник+. - 2012. - С.49-56. (0,4 п.л.(авт.0,2 п.л.))

9. Каримов, М.Ш. Определение изотерм адсорбции рабочей пары активированный уголь-аммиак для гелиоэнергетических термотрансформаторов / М.Ш.Каримов, М.Ф.Руденко // Проблемы теплоэнергетики: сборник научных трудов. – Саратов: СГТУ, 2012. - Вып.2. - С.270-275 . (0,4п.л.(авт.0,2 п.л.))

10. Каримов, М.Ш. Термодинамическая эффективность адсорбционного термотрансформатора на рабочей паре активированный уголь-метиламин / М.Ш. Каримов, И.В. Байрашевский, Т.Р.Васильев, М.Ф.Руденко // Наука и образование – 2013: материалы Международной научно-технической конференции, 4-11 марта 2013г. - Мурманск: МГТУ, 2013. – С.846- 850 (0,5п.л.(авт.0,125))

11. Каримов, М.Ш. Аналитические исследования термодинамической эффективности адсорбционного термотрансформатора

на рабочей паре активированный уголь-аммиак / М.Ш. Каримов, И.В. Байрашевский, Т.Р. Васильев, М.Ф. Руденко // Наука, образование, инновации, пути развития: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, 23-25 апреля 2013г. - Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2013. – Ч. 1. - С.60-67. (0,75 п.л.(авт.0,18))

12. Каримов, М.Ш. Исследование адсорбционной способности рабочих пар для гелиоэнергетических термотрансформаторов / М.Ф.Руденко, М.Ш. Каримов, Ю.В. Шипулина, Р.И. Нургалиев, Н.П. Огородникова // Научно-развитие нефтегазового комплекса: доклады Десятых международных Надировских чтений. – Атырау, 2012. - С.473-479. (0,4п.л.(авт.0,08п.л.))

13. Каримов, М.Ш. Энергосберегающие и экологически безопасные технологии для нефтегазовой отрасли / М.Ф. Руденко, М.Ш. Каримов // Научно-технологическое развитие нефтегазового комплекса: доклады Десятых международных Надировских чтений. – Атырау, 2012. - С.480-484 (0,25 п.л. (авт.0,125п.л.)).

14. Каримов, М.Ш. Моделирование термодинамической эффективности термотрансформаторов для нефтегазовых комплексов / М.Ш. Каримов, И.В.Байрашевский, Т.Р.Васильев, М.Ф. Руденко // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем каспийского шельфа: материалы IV Международной научно-практической конференции, 6 сентября 2013 г. - Астрахань: АГТУ, 2013. - С.148-152 (0,18 п.л.(авт.0,04 п.л.)).

15. Каримов, М.Ш. Гелиоэнергетический термотрансформатор адсорбционного типа / М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы VI-Международной научно-практической конференции, 7 сентября 2015 г. - Астрахань: АГТУ, 2015. - С.115-119 (0,25п.л.(авт.0,125 п.л.)).

16. Каримов, М.Ш. Определение эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора / М.Ш.Каримов, М.Ф Руденко // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем каспийского шельфа: материалы VII Международной научно-практической конференции, 16 сентября 2016 г. - Астрахань: АГТУ, 2016. - С.223-225. (0,125 п.л.(авт.0,06 п.л.)).

III. Полученные объекты интеллектуальной собственности:

17. Патент № 126894 Российская Федерация, А01К 63/04, Установка по термоподготовке воды для содержания и выращивания гидробионтов / Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В., Третьяк Л.П., Нургалиев Р.И., Каримов М.Ш.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», заявл. 21.11.2012; опубл. 20.04.2013, Бюл.№11.