

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»

На правах рукописи



Каримов Марат Шайдоллаулы

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

Специальность: 05.04.03 – машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Руденко М.Ф.

Астрахань - 2018

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса о разработках и исследовании гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа для Республики Казахстан.....	11
1.1 Анализ теоретического потенциала энергии солнечной радиации по территории Республики Казахстан.....	11
1.2 Состояние исследований принципов работы адсорбционных гелиоэнергетических холодильных установок и рабочих веществ для них.....	15
1.3 Теоретические основы процессов адсорбции.....	38
1.4 Состояние исследований конструктивных особенностей гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа.....	44
1.5 Выводы к первой главе.....	55
Глава 2. Разработка гелиоэнергетической холодильной установки с модернизированной конструкцией генератора-адсорбера.....	57
2.1 Разработка и описание схемных решений экспериментального гелиоэнергетического термотрансформатора.....	57
2.2 Моделирование гелиоприемного устройства как элемента конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки по оптическим параметрам.....	59
2.3 Моделирование генератора-адсорбера совмещенной конструкции с гелиоприемным устройством по способу теплоэнергетического баланса.....	62
2.4 Моделирование реактора генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора.....	72

2.5 Выводы ко второй главе.....	82
Глава 3. Экспериментальные исследования теплофизических процессов, физико-химических характеристик рабочих веществ и работы гелиоэнергетической холодильной установки	84
3.1 Определение сорбционных свойств активированных углей для гелиоэнергетической холодильной установки	84
3.2 Экспериментальные исследования изотерм адсорбции активированных углей с различными адсорбатами: аммиаком, метиламином, этиламином.....	91
3.3 Обработка экспериментальных данных по структурным уравнениям.....	93
3.4 Экспериментальные исследования гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа и гелиоприемного устройства генератора-адсорбера.....	102
3.4.1 Исследование тепловых нагрузок гелиоприемного устройства генератора-адсорбера.....	102
3.4.2 Описание конструктивных решений аппаратов гелиоэнергетической холодильной установки.....	106
3.4.3 Экспериментальные исследования гелиоэнергетической холодильной установки повышенной эффективности на основе термотрансформатора адсорбционного типа	110
3.4.4 Оценка погрешностей измерений проведенных исследований.....	117
3.5 Выводы к третьей главе.....	118
Глава 4. Аналитические исследования эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа	120
4.1 Разработка расчетной модели для определения термодинамической и эксергетической эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки.....	120
4.2 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной	

установки на рабочей паре активированный уголь – аммиак.....	123
4.3 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на рабочей паре активированный уголь – метиламин.....	131
4.4 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на рабочей паре активированный уголь – этиламин.....	138
4.5 Мощностные характеристики гелиоэнергетической холодильной установки на основе адсорбционного термотрансформатора по усредненным показателям.....	142
4.6 Области применения гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа.....	143
4.7 Выводы к четвертой главе.....	147
Заключение.....	148
Список литературы.....	150
Приложения.....	164

ВВЕДЕНИЕ

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., Радужкевича 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, повышение качества эксплуатационных характеристик и совершенствование 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-Радужкевича;

- 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-Радускевича 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» (Нижекамск, 2012); III-, IV-, V- и VI- 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 – 5, 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 РФ, 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О РАЗРАБОТКАХ И ИССЛЕДОВАНИИ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ АДСОРБЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

1.1 Анализ теоретического потенциала энергии солнечной радиации по территории Республики Казахстан

Для выработки рекомендаций по внедрению и применению гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа, работающих на возобновляемых источниках энергии (в частности, энергии солнечной радиации) в Западных, Юго-западных и Южных регионах Республики Казахстан необходима, прежде всего, достоверная информация по ресурсам солнечной энергетики в данных регионах. Исследования, проведенные с этой целью актинометрическими станциями Республики Казахстан, и исследования ряда ученых, описанные в работах [6, 13, 29, 46], дают статистическую информацию о солнечной энергетике этих регионов. К сожалению, доля актинометрических станций в общем количестве метрологических станций на территории республики относительно невелика. К тому же систематизацию применительно к разрабатываемым нами установкам, имеющим специфические особенности работы в циклическом режиме действия, еще никто не проводил.

Теоретический потенциал солнечной энергии различных районов республики представляет среднегодовую суммарную энергию солнечного излучения, которая падает на соответствующую площадь района в течение одного года. Теоретический потенциал можно определить по методике, изложенной в работе [6, 56].

Районы разделяют на зоны, в которых климатические, географические и погодные условия, а также плотность энергии солнечной радиации и альbedo Земли существенно не отличаются по всей площади. Обычно линейные размеры

E_{oi} , кВт·ч/(м²мес) – энергия диффузионного потока солнечной радиации, падающая на единицу горизонтальной поверхности зоны в течение одного месяца года по данным среднесуточных наблюдений; E_{io} , кВт·ч/(м²мес) – энергия солнечной радиации, падающая на единицу горизонтальной поверхности зоны в течение одного месяца года при безоблачном небосводе по данным среднесуточных наблюдений; t_{ci} , ч/мес – продолжительность солнечного сияния в расчетной зоне данной местности в течение одного месяца; $t_c = \sum_i t_{ci}$, ч/год, – продолжительность солнечного сияния в расчетной зоне в течение одного года; t_{oi} , ч/мес – возможная астрономическая продолжительность сияния солнца для расчетной зоны в течение одного месяца [56, 57].

В зоне расположения метеорологической станции (где ведутся многолетние наблюдения по параметрам падающей энергии солнечной радиации в течение каждого месяца $E_i = E_{ni} + E_{Di}$) расчет производим по формуле:

$$E = \sum_i E_i, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, 12 \text{ – месяцы, года.} \quad (1.1)$$

Теоретический потенциал энергии солнечной радиации определяется по формуле:

$$W_b = E \cdot S \quad (1.2)$$

Если для зоны отсутствуют метеорологические данные падающей энергии солнечной радиации за месяц, то, используя данные соседних метеорологических станций, рассчитывают значения продолжительности сияния солнца t_{ci} для каждого месяца по известным формулам [48]:

$$E_i = E_{oi} \cdot \left(a_i + b_i \cdot \frac{t_{ci}}{t_{oi}} \right) \quad (1.3)$$

где: a_i, b_i - эмпирические коэффициенты ($a_i + b_i = 1$).

$$E_{oi} = (I_m) \cdot \cos \theta \cdot t_{oi} \quad (1.4)$$

$$(I_m) = 1000 \cdot \left(\frac{1000}{1360} \right)^{M-1}, \text{ Вт/м}^2 \quad (1.5)$$

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\sin \omega_s}{\omega_s} \quad (1.6)$$

где δ и ω_s рад - соответственно, средний угол солнечного склонения и угол движения солнца (восхода-захода) в i -й месяц; φ - широта местности; θ - угол падения на горизонтальную площадку.

$$M = \frac{2}{\sqrt{(\cos \theta)^2 + 0,06 + (\cos \theta)}} \quad (1.7)$$

$$t_{0i} = 12 \cdot n_i \cdot \frac{2 \cdot \omega_s}{\pi}, \text{ час/мес} \quad (1.8)$$

где n_i - число дней в i -ом месяце [40, 44].

Среднесуточные значения суммарной солнечной радиации и продолжительности солнцестояния в отдельных регионах Республики Казахстан приведены в приложении А, приложении Б, приложении В. Республика Казахстан, как показали расчеты по приведенной методике, обладает колоссальными ресурсами солнечной энергии, которые достигают 12544 млн. ГДж/год, что в 24,5 раза превышает настоящие потребности в тепловой, холодильной, электрической энергии. Изменение поступления энергии солнечной радиации в течение суток на территории республики находится в диапазоне от нуля в ночное время, которое в теплое время года длится 9 -9,5 часов, до 750 – 850 (Вт/м²) в 12 часов солнечного времени, дневное время длится 14,5 – 15 часов. В течение года максимальное месячное излучение суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, приходится на июль (700-750 МДж/м² в месяц), минимальное излучение наблюдается в декабре месяце (50-100 МДж/м² в месяц). В Магистрауской области значения суммарной солнечной радиации колеблются от 90 до 750 МДж/м². Это связано с неустойчивостью (облачностью) погоды в зоне Каспийского моря, а в Западно-Казахстанской, Костанайской, Восточно-Казахстанской и другими северными областями республики суммарная радиация колеблется и составляет от 50 до 700 МДж/м² в месяц. Имеются различия в поступлении солнечной радиации на горизонтальные поверхности, которые определяются углом широты местности, изменяющейся в пределах 18 %. Различие в продолжительности солнечного излучения между областями Западной

и Мангистауской областями составляет 15%. Среднемесячная продолжительность солнечного излучения для Западного Казахстана приходится на июль (280 – 354 часов), минимальное солнечное излучение приходится на декабрь (50 – 150 часов). В Мангистауской области продолжительность солнечного излучения колеблется от 133 до 354 часов. В Западно-Казахстанской области – от 63 до 280 часов.

В южных регионах республики значения излучения солнечной радиации и продолжительность солнечного сияния имеют показатели выше рассчитанных для Западных регионов.

1.2 Состояние исследований принципов работы адсорбционных гелиоэнергетических холодильных установок и рабочих веществ для них

Второе развитие гелиоэнергетических холодильных установок началось в восьмидесятых годах прошлого столетия. Первыми исследователями были французы Guilleminot J.J. и Meunier F., которые предложили теоретическую модель установки с плоским коллектором солнечной энергии типа «горячий ящик» (рис.1.2) и обосновали взаимодействие различных пар адсорбент- адсорбат. Дальнейшие работы ученых [99, 119, 123] подтвердили эту модель. Модель установки представляла собой установку циклического действия с совмещенной конструкцией реактора генератора-адсорбера, работающую в две фазы. Первая фаза – адсорбция, зарядка – насыщение адсорбента (твердого сорбента) адсорбатом (хладагентом) при охлаждении твердого сорбента в адсорбере в ночное время. В этот период времени в изолированной камере испарителя термотрансформатора получают эффект охлаждения: охлаждается воздух, и если там имеется влага, то она замораживается и превращается в лед. Вторая фаза – регенерация, разрядка – выделение хладагента из насыщенного адсорбента в реакторах генератора днем при обогреве его солнечной энергией. В этот период времени в конденсаторе холодильной установки за счет более низкой температуры воздуха или воды окружающей среды происходит сжижение хладагента и накопление его в ресиверном аппарате. В процессе нагрева реактора

генератора давление системы возрастает до давления насыщения, которое соответствует температуре конденсации, начинается процесс десорбции и последующей конденсации. В процессе охлаждения адсорбера давление системы понижается до давления насыщения, соответствующего температуре кипения, начинается процесс адсорбции и испарения. Твердый сорбент насыщается адсорбатом, то есть увеличивает концентрацию хладагента в реакторе, а в испарителе производится холод. В течение суток динамика этих процессов протекает очень медленно, поэтому можно считать процессы в реакторе гелиоэнергетического термотрансформатора непрерывными и обратимыми [111, 115].

В дальнейшем сначала Lemmini F. и др. [107], а затем Hassan H.Z. [102], Laidi M. [106] и др. разработали и усовершенствовали теоретический цикл работы холодильной установки циклического действия для рабочей пары активированный уголь-метанол. Результаты показали, что при температуре кипения минус 10°C пара активированный уголь-метанол хорошо подходит для получения льда. Однако большим недостатком этой пары является работа ее при пониженных давлениях в холодильной установке (при вакууме). Это обстоятельство требует повышенного внимания к герметизации аппаратов и арматуры установки: приток воздуха извне через неплотности конструкции сводит эффекты работы установки к нулю. Проходные сечения между аппаратами установки должны быть большого сечения, чтобы не возникали депрессии давления в проходных каналах. Dupont M. и Guilleminot J.J. [92] изменили конструкцию плоского солнечного коллектора типа «горячий ящик», развернув реакторы генератора-адсорбера по линии восток-запад с уклоном на южную сторону. В результате чего им удалось увеличить количество поглощенной энергии минимум в два раза и, следовательно, увеличить температуру горячего источника в генераторе-адсорбере термотрансформатора.

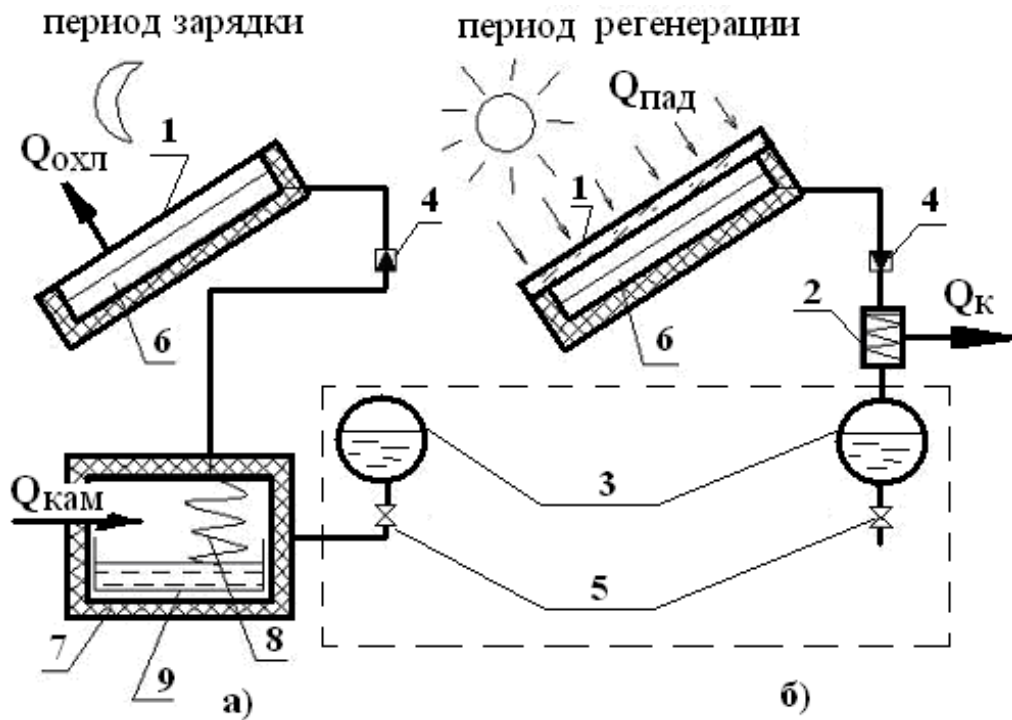


Рисунок 1.2 – Модель адсорбционной гелиоэнергетической холодильной установки циклического действия

Abu-Hamdeh N.H. и др. [73] рассматривали теорию и моделирование циклов работы холодильной установки на рабочей паре активированный уголь - метанол. Они установили, что эти рабочие пары эффективно работают при температурах $(110 - 130)^\circ \text{C}$. Если усовершенствовать плоские коллекторы, реакторы покрыть селективными покрытиями и поставить двойное остекление, то при температуре 120°C в холодильных установках целесообразно иметь водяной конденсатор. Для оценки степени термодинамического совершенства гелиоэнергетического термотрансформатора авторы применяли следующие показатели: COP_{carno} - КПД Карно; COP_{term} - термодинамический КПД; η_{exerg} - эксергетический КПД.

$$\eta_{exerg} = \frac{COP_{term}}{COP_{carno}}$$

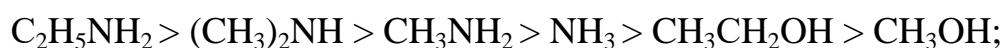
Большая работа по исследованию теплофизических и термодинамических основ гелиоэнергетических термотрансформаторов (холодильных и теплонасосных установок) адсорбционного типа была проделана Астраханской научной школой под руководством профессора Руденко М.Ф. [45, 46, 49, 51, 54].

Учеными этой школы обобщены теплофизические и физико-химические свойства адсорбентов активированных углей и адсорбатов (хладагентов - аммиака (NH_3), метиламина (CH_3NH_2), этиламина ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$), диметиламина [$(\text{CH}_3)_2\text{NH}$], метанола (CH_3OH), этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) [43]. Они установили влияние на адсорбционную способность и на процесс адсорбции температуры, основности вещества, полярности молекул, пористости, капиллярности и др. рабочих пар термотрансформаторов (адсорбатов и адсорбентов).

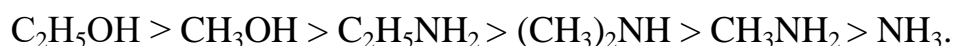
Основываясь на исследованиях профессора Усюкина И.П., авторами в работах [59] были предложены новые рабочие адсорбенты для холодильных циклов, обладающих рядом достоинств по сравнению с широко применяемыми. Например, аммиак обладает хорошими теплофизическими и термодинамическими характеристиками, однако рабочие давления в циклах гелиоэнергетических холодильных установок довольно высокие и могут достигать 1,8 – 2,0 МПа и более [112, 125, 127].

Применение метанола и этанола с более лучшими термодинамическими характеристиками повышает рабочие КПД гелиоэнергетических установок [87, 103], однако низкие рабочие давления в аппаратах 10 – 40 мм.рт.ст. ухудшают эксплуатационные характеристики средней и крупной мощности установок. Особенно опасна разгерметизация установок. Поэтому весьма интересным является применение таких адсорбатов, как этиламина и метиламина в рабочей паре с активированным углем.

Анализируя силу адсорбционной способности, авторами было предложено и обосновано расположение адсорбатов (хладагентов) по показателю рН:



по критическим температурам :



Руденко М.Ф. и др. [41] разработали физическую модель процессов адсорбции-десорбции активированного угля со спиртами. Отличительной особенностью модели являлось рассмотрение динамики развития процессов в различные периоды времени: наступление и окончание процессов адсорбции и

десорбции; регулирование направлений процессов температурными параметрами при отводе и подводе тепловой энергии; учитывалась полярность поверхности активированных углей; свойства адсорбатов как поверхностно-активных веществ; учитывалась расположенность молекул адсорбата в порах адсорбента [42]; учитывались элементы изменения структурной фазы в указанных процессах, включающих при адсорбции активированными углями в работу макро-, микро- и мезопоры и процессы капиллярной конденсации.

Руденко М.Ф. и др. разработали методику экспериментального определения физических характеристик адсорбентов [40], с помощью которых получены кажущиеся удельная масса, пористость активных углей, суммарный объем пор.

Учеными этой школы получено уравнение [65] для определения удельной теплоты процесса десорбции, затраченной на подогрев, парообразование и десорбцию адсорбата из адсорбента, происходящей в изобарном процессе цикла работы термотрансформатора в дневное время.

$$q_{(dec)} = r_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_s}{P}\right) + \left[\alpha \cdot \frac{R \cdot T}{D \cdot n}\right] \cdot \left[T \cdot \ln\left(\frac{P_s}{P}\right)\right]^{-1}, \quad (1.9)$$

где r_0 - удельная теплота испарения адсорбата, R - газовая постоянная, T - температура процесса десорбции, P_s , P - соответственно давления насыщения и процесса, α , D , n - коэффициенты.

Уравнение получено на основании совместного решения уравнений Дубинина-Радушкевича и Клапейрона.

В работах [60, 68] проанализирован термодинамический цикл в диаграмме Клапейрона $[\ln P - (-1/T)]$, в котором может работать гелиоэнергетическая холодильная установка. Идеализированный (расчетный) цикл работы адсорбционной холодильной установки определялся температурными уровнями: T_0 , T_k , $T_{адс.к}$, $T_{дес.к}$ - температурами кипения, конденсации, конца адсорбции, конца десорбции и давлениями: $P_0(T_0)$ и $P_k(T_k)$ - давлениями пара при температуре кипения и при температуре конденсации.

Расчетный цикл адсорбционного термотрансформатора состоит четырех фаз. Первая фаза (А-Б) - изостерический обогрев, когда теплота $Q_{изст}$, подводимая в

этом процессе, расходуется на нагрев различных элементов гелиоэнергетической части термотрансформатора, особенно на нагрев насыщенного активированного угля до начала температуры процесса десорбции $T_{десн}$.

$$Q_{нагр}^{уизст} = \int_{T_a}^{T_{\delta}} \left(\frac{q_{уизст}(T, P)}{\partial T} \right)_a \cdot dT + \int_{T_a}^{T_{\delta}} \left(\sum_{i=1}^{i=n} c_i(T) \right) dT \quad (1.10)$$

В этом процессе температура и давление в реакторах генератора-адсорбера установки растут, но концентрация адсорбента не меняется.

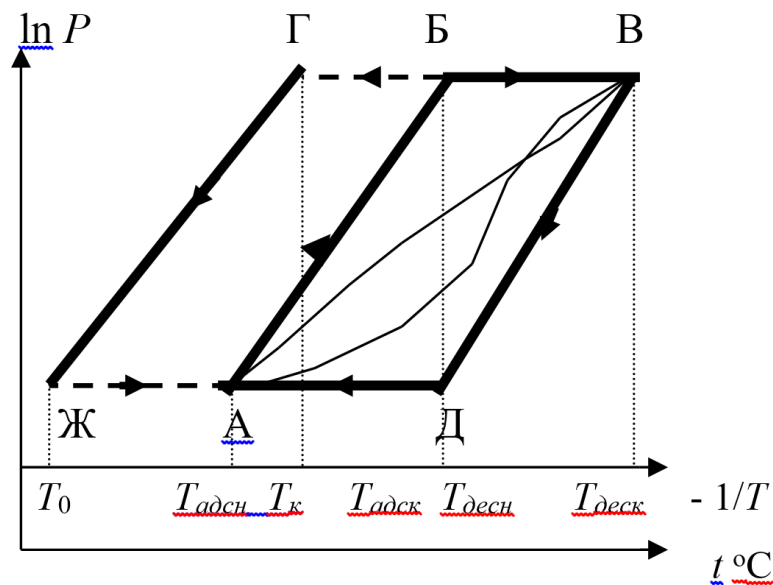


Рисунок 1.3 – Цикл работы гелиоиспользующей адсорбционной холодильной установки

Вторая фаза (Б-В) - десорбция, Г - конденсация. В этой фазе протекают два изобарических процесса, в процессе Б-В теплота $Q_{дес}$ подводится к активированному углю в реакторе генератора-адсорбера, где из него отделяются пары адсорбата, концентрация адсорбента уменьшается; в процессе Г теплота Q_k отводится в окружающую среду, при этом происходит конденсация адсорбата.

$$Q_{дес} = \int_{T_{\delta}}^{T_{\epsilon}} \left(\frac{q_{дес}(T, P) \cdot \Delta a}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \int_{T_{\delta}}^{T_{\epsilon}} \left(\frac{q_{уизст}(T, P)}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \int_{T_a}^{T_{\delta}} \left(\sum_{i=1}^{i=n} c_i(T) \cdot a_i \right) \cdot dT \quad (1.11)$$

Подводимая теплота от солнечной радиации увеличивает температуру в реакторе генератора-адсорбера до температуры конца десорбции $T_{деск}$.

Температура конденсации – величина постоянная и определяется давлением насыщения пара адсорбата.

Третья фаза (В-Д) – изостерическое охлаждение. Прекращение подвода теплоты Q_{dec} в вечернее и ночное время вызывают охлаждение реактора и адсорбент в нем при изостерическом процессе $Q_{изст}$. Давление и температура в реакторе постепенно снижаются до точки Д, $P = P_0(T_0)$, а температура является начальной адсорбции $T_{адсв}$.

$$Q_{изост}^{охл} = - \left[\int_{T_0}^{T_D} \left(\frac{q_{изст}(T,P)}{\partial T} \right)_a \cdot dT + \int_{T_0}^{T_D} \left(\sum_{i=1}^{i=n} c_i(T) \cdot a_i \right) \cdot dT \right] \quad (1.12)$$

Четвертая фаза (Д-А) – адсорбция, Ж – кипение. Эта фаза начинается после достижения давления в реакторе генератора-адсорбера, равного давлению насыщенного пара при T_0 .

В реакторе генератора-адсорбера происходит изобарический процесс отвода теплоты $Q_{адс}$ и насыщение активированного угля адсорбатом. Концентрация адсорбента растет по мере снижения его температуры. В испарителе происходит изобарический процесс кипения адсорбата с подводом теплоты Q_0 при постоянной температуре T_0 .

$$Q_{адс} = - \left[\int_{T_D}^{T_a} \left(\frac{q_0(T,P)}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \int_{T_D}^{T_a} \left(\sum_{i=1}^{i=n} c_i(T) \cdot a_i \right) \cdot dT \right] \quad (1.13)$$

$$\text{Теплота, отводимая в испарителе: } Q_0 = q_0(T, P) \cdot \Delta a \quad (1.14)$$

$$\text{Теплота, отводимая в конденсаторе: } Q_{\kappa} = q_{dec}(T, P) \cdot \Delta a \quad (1.15)$$

Действительный цикл может отличаться от рассмотренного теоретического и может быть представлен тонкими линиями в диаграмме $\ln P - (-1/T)$, что требует дополнительного изучения.

Разработан экспериментальный стенд, на котором можно имитировать работу термотрансформатора периодического действия. Стенд работает как от термостата с водоглицериновой смесью, так и от солнечной энергии, на котором исследовались различные термодинамические свойства адсорбатов и

активированных углей и различные процессы, происходящие с рабочими парами в термотрансформаторе.

Построены изотермы адсорбции [2] исследуемых ими рабочих пар: активированные угли – этанол и активированные угли – метанол.

Экспериментальные данные по адсорбции активированных углей спиртами были обобщены в форме уравнений Дубинина – Радускевича:

- для адсорбции активированных углей с этанолом (ф-лы 1.16, 1.17)

$$a = (Z_0 \cdot 1000 \cdot \rho) / 46 \cdot \exp\{-1,53 \cdot 10^{-7} \cdot (T_2 / 0,612) \cdot [\lg(P_s/P)]^2\} \quad (1.16)$$

$$Z = W_0 \cdot \rho \cdot \exp\{-1,627 \cdot 10^{-7} \cdot T_2 \cdot [\ln(P_s/P)]^2\}$$

(1.17)

- для адсорбции активных углей с метанолом (ф-лы 1.18, 1.19)

$$a = (Z_0 \cdot 1000 \cdot \rho) / 32 \cdot \exp\{-3,24 \cdot 10^{-7} \cdot (T_2 / 0,402) \cdot [\lg(P_s/P)]^2\} \quad (1.18)$$

$$Z = W_0 \cdot \rho_m \cdot \exp\{-3,27 \cdot 10^{-7} \cdot T_2 \cdot [\ln(P_s/P)]^2\}. \quad (1.19)$$

Lemmini F. и др. [107] исследовали эффективность работы французских гелиоэнергетических холодильных установок в Марокко. В качестве адсорбента они использовали активированный уголь марки AC35 и AC40, а в качестве адсорбата – метанол. Благодаря разработанной ими модели, они рассчитали степень эффективности работы термотрансформатора за год эксплуатации.

Гелиоэнергетические холодильные установки производительностью 25–35 кг льда в сутки, состоящие из 4-х модулей площадью 6 м², в корпусе гелиоприемника имели заслонки для охлаждения реактора генератора-адсорбера в ночное время; конденсатор охлаждался воздухом; испаритель имел емкость с водой для производства льда.

Авторы провели эксперименты, позволившие им построить и получить расчетные пиктограммы. Пиктограммы показали, что максимальная производительность одинаковых установок на различных адсорбентах может быть разная, а смеси активированных углей различных марок дают разную

производительность в зависимости от качества угля и количественного соотношения.

Различается работа гелиоэнергетических термотрансформаторов зимой и летом. Номинальная производительность для холодильных установок на активированных углях – метанол: АС40 равняется 590 кДж/м^2 , а на АС35 равняется 490 кДж/м^2 .

Учеными Hadi Ammar M.A., Benhasua B., Bouras F. [101] была разработана гелиоэнергетическая холодильная установка на основе термотрансформатора адсорбционного типа состоящая из генератора-адсорбера конструкции «горячий ящик». Установка была установлена на субсахарной территории Алжира. В качестве рабочей пары в установке использовался активированный уголь – метанол, что соответствует реальным климатическим условиям данного региона. Для исследования процесса адсорбции в генераторе-адсорбере использовались уравнения Дубинина-Астахова. Изучались параметры активированных углей, размеры трубок адсорбера-генератора, материал стенки реактора и крышка остекления конструкции «горячий ящик». Энергетический баланс для всей системы был определен с относительной погрешностью 0,014%. Они установили, что оптимальным размерам реактора генератора-адсорбера соответствует диаметр 0,118 м., количество труб - 8 шт. на квадратный метр площади, необходимо двойное остекление, такие параметры соответствуют засыпке 38,59 кг активированного угля на основе каменного угля. В такой установке коэффициент преобразования солнечной энергии составляет 0,21, при эффективности коллектора $\eta = 44,23\%$. Угол наклона составил 20,5 градуса в течении августа месяца. В дальнейших работах [100] они сообщают, что получили оптимальный коэффициент производительности (COP) равный 0,73, при этом общий объем потребляемой солнечной составил в год 18740,05 КДж, а ежедневное производство льда 13,65 кг в сутки, при температуре -3°C в испарителе. Опыт эксплуатации таких установок в Сахаре показал, что оптимальная производительность системы может быть получена даже при низкой температуре окружающей среды и конденсации, и высокой температуре испарителя большое

количество льда, если начальная температура воды будет низкая. Использование гелиоэнергетических холодильных установок в районах Алжира позволит сохранить электрическую энергию в год до 28303 МВт или 2434 тыс. тонн ископаемого топлива, что соответствует 18396, 95 тоннам выброса углекислого газа в атмосферу.

В Московском государственном техническом университете им. Баумана Ю.В. Никифоров, В.А. Сеницын и А.А. Фомкин [32] исследовали адсорбцию и десорбцию спиртов (метанола и этанола) на активированных углях. Ученые при помощи весового метода определили и построили изотермы адсорбции этанола на активированных углях марки ФАС и БАУ в диапазоне температур (+20 - +110)°С и давлений $P/P_s = 0,95$. Ими измерена кинетика десорбции этанола при скоростях нагрева адсорбата ($\Delta t/\Delta \tau$)= 2...3 град/мин. Они отметили, что высокие значения скрытой теплоты испарения адсорбата – это главное требование к рабочей паре адсорбат-адсорбент в диапазоне рабочих температур. Они проводили испытания по выбранному адсорбату при комнатной температуре и давлении $P/P_s < 0,8...1,0$. При этом температура десорбции достигала значений ($t_{dec} < (100...+120)^\circ\text{C}$), при которых наблюдалась высокая скорость десорбции адсорбата. При выборе адсорбента для адсорбционной холодильной машины авторы сделали предпочтение активированным углям, имеющим более равновесные значения адсорбции, нежели сорбенты на основе цеолитов и силикагелей. Однако следует отметить, что несмотря на хорошие термодинамические характеристики рабочей пары активированный уголь-спирты, существенным эксплуатационным недостатком термотрансформаторов является работа на вакууме.

Follin S., Goetz V., Guiliot V. [97] исследовали эффективность работы термотрансформатора в охлаждающем режиме в зависимости от адсорбата, адсорбента и термодинамических условий работы цикла.

Для рабочей пары активированный уголь - аммиак цикл работы оценивался уравнением Дубинина-Астахова, связывающего физические характеристики активированного угля: объем и размер микропор; физические характеристики адсорбата в зависимости от уровня температуры при получении охлаждающего

эффекта в термотрансформаторе. Это же уравнение применили и ученые Hadi Ammar M.A. для обработки своих данных [100].

Они определили физические характеристики активированного угля и адсорбционную способность адсорбата по уравнению Дубинина-Астахова [4, 64]:

$$W=W_0 e^{[-(A/\beta \times E_0)^n]}, \quad (1.20)$$

где A – адсорбционная способность, $A=R \cdot T \cdot \ln(P_0/P)$; W – объем поглощаемого пара; W_0 – объем микропор; β – коэффициент сродства адсорбата; E_0 – энергия, зависящая от структуры микропор; описываемая зависимостью Дубинина-Стокли [34]:

$$x=13,028-1,53 \cdot 10^{-5} \cdot (E_0 \cdot 10^{-3})^{3,5} / (E_0 \cdot 10^{-3}). \quad (1.21)$$

Показатель n определяется значениями от 1 до 3, его значение зависит от размера пор.

Расчетные зависимости COP, полученные ими представлены на рис. 1.4.

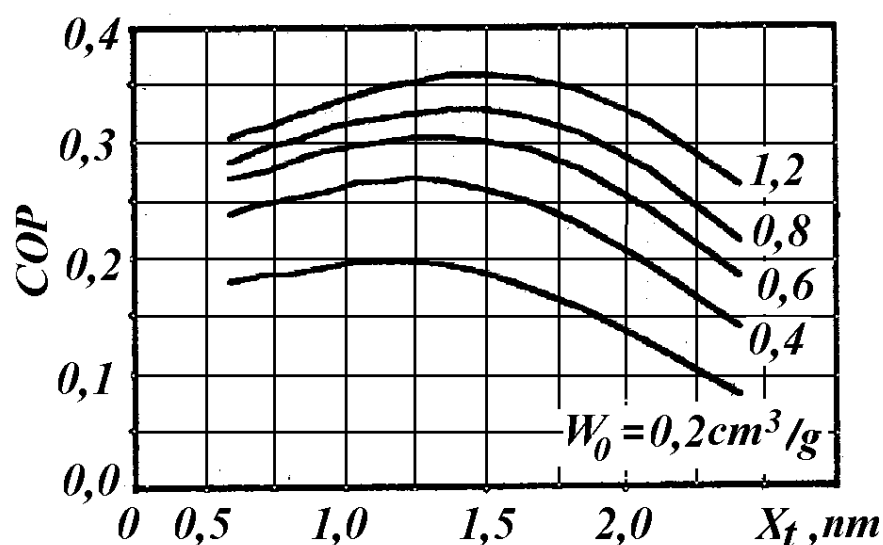


Рисунок 1.4 – Эффективность COP гелиоэнергетических холодильных установок в зависимости от объема микропор W_0 и размера пор x_t активированного угля

В работе Chekirou W., Boukheit N., Karaali A. [87] исследователи подтверждают на основании термодинамического моделирования адсорбционного процесса по уравнению Дубинина-Астахова, что условия работы

адсорбционных гелиоэнергетических холодильных установок зависит от температуры регенерации, конденсации, испарения и особенно температуры адсорбции в конце регенерации. Регенерация тепла играет важную роль в процессах работы гелиоэнергетической холодильной машины.

В работе [121] и [127] исследовались модели с различными углеродными адсорбентами и аммиачным хладагентом. Углеродные адсорбенты могут изготавливаться из разных материалов, но лучшим является скорлупа кокосового ореха и углерод во множестве форм: монолитный, гранулированный, уплотненно-гранулированный, волоконный, уплотненно-волоконный, тканевый, уплотненно-тканевый и порошок. Авторы получили различные сорбционные характеристики углеродных адсорбентов и просчитали коэффициенты полезного действия рабочих пар по разработанной ими модели.

Результаты моделирования различных пар активированного угля-аммиака были представлены при типичных условиях: $T_c=35^\circ\text{C}$, $T_e=-5^\circ\text{C}$ и $T_1=35^\circ\text{C}$ в установках для замораживания льда; $T_c=35^\circ\text{C}$, $T_e=10^\circ\text{C}$ и $T_1=35^\circ\text{C}$ в установках для кондиционирования воздуха и $T_c=40^\circ\text{C}$, $T_e=5^\circ\text{C}$ и $T_1=40^\circ\text{C}$ для теплонасосных установок. Рабочая температура T_3 варьируется от 80°C до 200°C ($80^\circ\text{C} < T_3 < 200^\circ\text{C}$). Моделирование было выполнено для трех конфигураций слоев углерода-аммиака: один слой, два слоя и неопределенное количество слоев. При исследовании двухслойной конфигурации при низкой рабочей температуре 100°C (механизмы, управляемые солнечной энергией или использованного тепла низкого качества) и высокой рабочей температуре 200°C (выхлопной газ двигателя или механизмы, работающие на газе) были получены наилучшие характеристики.

Максимальные КПД полученные ими при 100°C для замораживания льда составляют 0,45 - 0,48, а при 200°C – 0,58 - 0,68; для кондиционирования воздуха при 100°C – 0,61 - 0,66, а при 200°C – 0,85 - 0,87; для теплонасосных установок при 100°C – 1,47 - 1,50, а при 200°C – 1,62 - 1,70.

В работе [127] представлен термодинамический цикл работы адсорбционной установки на рабочей паре активированный уголь – аммиак (рис.1.5).

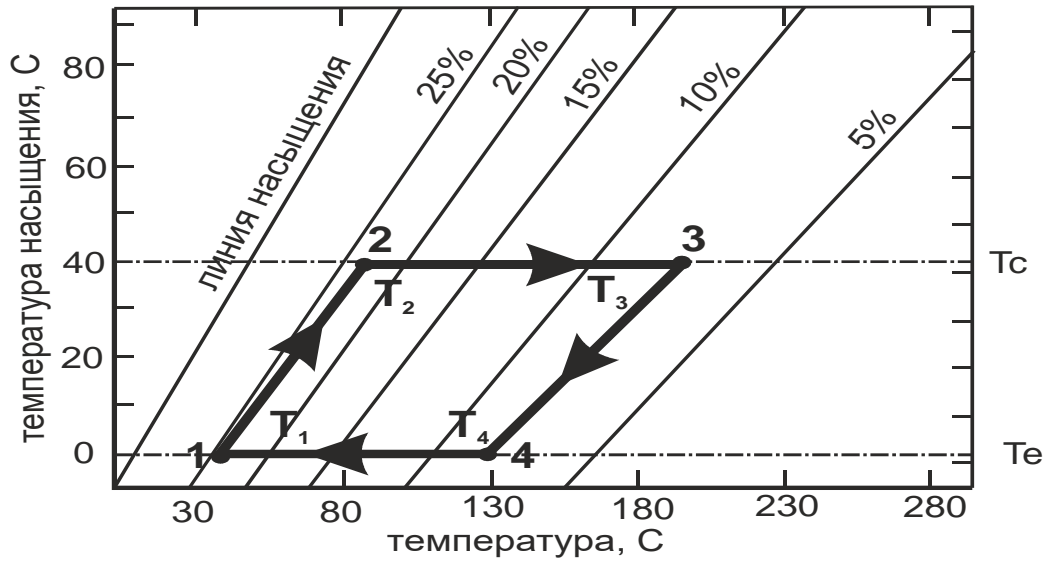


Рисунок 1.5 – Цикл термодинамической адсорбции

В этой работе проведено термодинамическое моделирование уравнения равновесия рабочей пары АС-аммиак по уравнению Дубинина - Радужкевича:

$$x = x_0 \cdot \exp \left[-k \left(\frac{T}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \quad (1.22)$$

где: x – это концентрат аммиака (кг аммиака кг^{-1} угля); T – температура угля (К); x_0 – концентрат аммиака в условиях насыщения (кг аммиака кг^{-1} угля); T_{sat} – это температура насыщения, соответствующая давлению газа (К).

Предполагается, что в 1-ом, 2-х и n -ом слое распределения адсорбента в генераторе-адсорбере тепловую нагрузку каждого слоя вычисляли интегрированием эффективной удельной теплоемкости (dQ/dT) на всем протяжении процесса от начальной температуры T_1 до температуры генерации T_3 , как было описано Менуером [11]. Удельная теплоемкость (dQ/dT) на всем протяжении изостерического процесса (1-2) определяется следующей формулой:

$$\frac{dQ}{dT} = C_{pc}(T) + xC_{pa} \quad (1.23)$$

где: C_{pc} – это удельная теплоемкость угля ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), которая изменяется под воздействием температуры, а C_{pa} – это удельная теплоемкость фазы адсорбции ($C_{pa} \sim 4900 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ для аммиака).

Удельная теплоемкость (dQ/dT) по всему изостерическому процессу (2-3) определяется следующей формулой:

$$\frac{dQ}{dT} = C_{pc}(T) + xC_{pa} + H \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right)_P \quad (1.24)$$

где: H – это теплота десорбции, определяемая следующим образом:

$$H = R(P, T) \cdot A \cdot \frac{T}{T_{sat}} \quad (1.25)$$

где: R – это газовая постоянная при давлении P и температуре T в системе ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); A – это наклон линии насыщенной адсорбции на диаграмме Клайперона ($A=2823,4 \text{ К}$); T – это температура угля (К); T_{sat} – это температура насыщения, соответствующая давлению газа (К).

Поскольку соотношение T/T_{sat} является постоянным по всей изостере, то температура на завершающей стадии фазы изостерного повышения давления T_2 может быть выражена следующим образом:

$$T_2 = \frac{T_C}{T_E} \cdot T_1 \quad (1.26)$$

где: T_1 , T_C и T_E – это начальная температура, температура конденсации и испарения соответственно (К).

Похожая технология применялась при оценке тепла, отведенного слоем (теплота адсорбции и удельная теплота). Все предыдущие формулы остаются без изменений, кроме формулы (1-24), в которой учитывается эффект охлаждения слоя из-за холодного газа, поступающего от испарительной установки, и уравнения (1.26).

Таким образом, удельная теплоемкость (dQ/dT) по пути изостерического процесса (4-1) определяется следующей формулой:

$$\frac{dQ}{dT} = C_{pc}(T) + xC_{pa} + [H - (h_{gas}(T) - h_{gas}(T_E))] \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right)_P \quad (1.27)$$

Так же, как и в формуле (1-25), температура на завершающей фазе стадии сброса изостерного давления T_4 может быть выражена как:

$$T_4 = \frac{T_E}{T_c} \cdot T_3 \quad (1.28)$$

где: T_3 - это температура слоя на стадии завершения фазы десорбции.

В Индийском технологическом институте (теплонасосной лаборатории) учеными Rane M.V. и Teferi S.T. была изготовлена экспериментальная гелиоэнергетическая установка, работающая на рабочей паре активированный уголь - аммиак [115]. Схема установки представлена на рисунке 1.6.

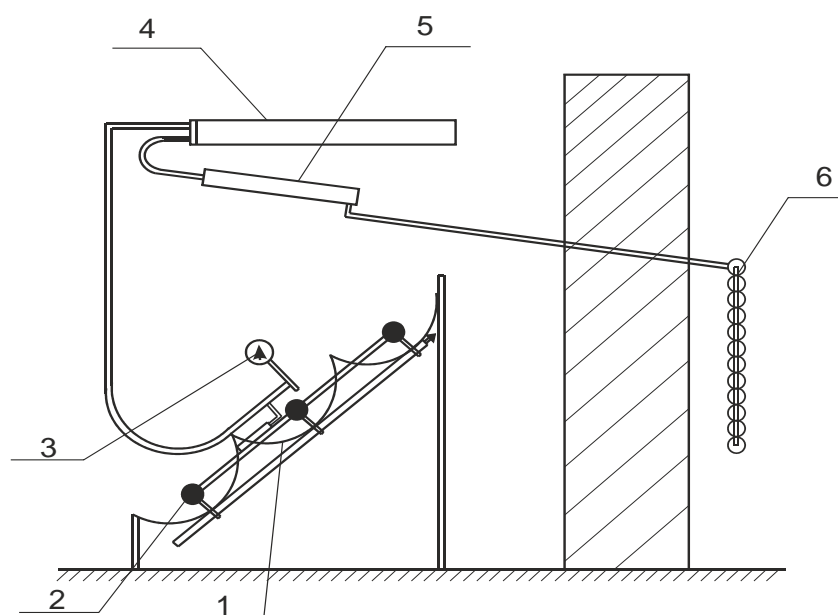


Рисунок 1.6 – Схема гелиоэнергетической холодильной установки

Она представляла ряд реакторов генератора-адсорбера, заправленных активированным углем, установленных в параболические зеркальные концентраторы солнечной энергии (коэффициент концентрации 2,1), водяной конденсатор, ресивер, воздушный испаритель в охлаждающей камере.

При испытаниях на открытом воздухе солнечная энергия нагревала активированный уголь до 180°C . Температура конденсации аммиака достигала 28°C . Температура кипения аммиака в испарителе -10°C .

Термодинамический цикл работы солнечной холодильной установки представленный учеными в диаграмме Клайперона по экспериментальным данным на рисунке 1.7.

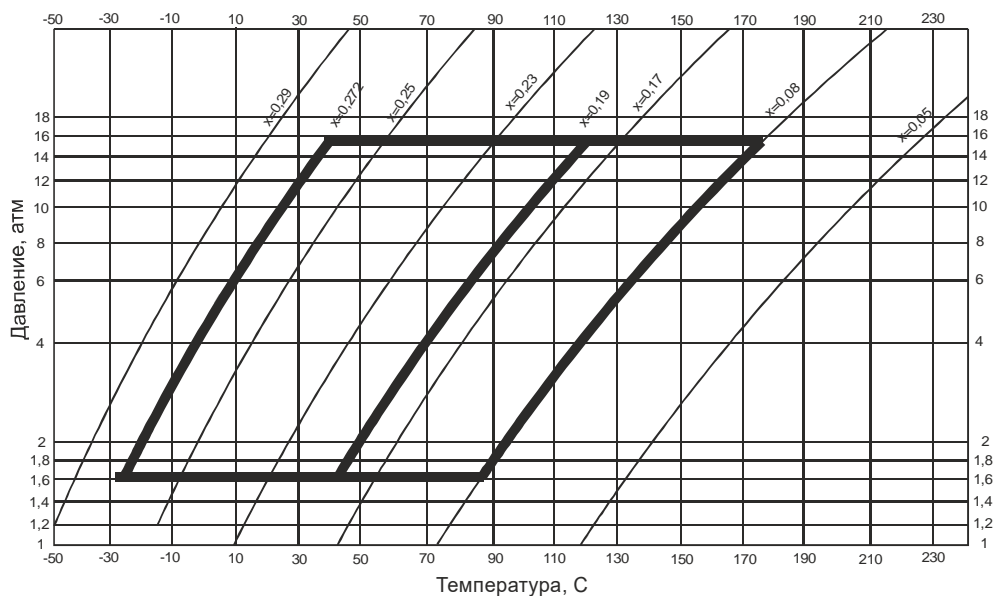


Рисунок 1.7 – Цикл работы гелиоэнергетической холодильной установки

Ученые доказали работу гелиоэнергетического холодильника на рабочей паре активированный уголь–аммиак в условиях Индии.

Китайские ученые Wang L.W., Wang R.Z., Oliveira R.G. и др. [123, 124] провели испытания гелиоэнергетической холодильной установки и получили лед из воды. Они использовали активированный уголь марок СНК-3, СJK-2, ЯХ-15 и метиловый спирт. Имея площадь гелиоприемника $0,92 \text{ м}^2$, они за сутки получили 4-5 кг льда, причем коэффициент преобразования энергии составил 0,1 - 0,12.

Ученые оценивали степень совершенства термотрансформатора коэффициентом COP , равным отношению охлаждающего эффекта при производстве льда к теплоте, идущей на нагрев и десорбцию адсорбата (хладагента).

Графики, полученные ими (рис.1.8), позволяют оценить эффективность работы холодильной установки.

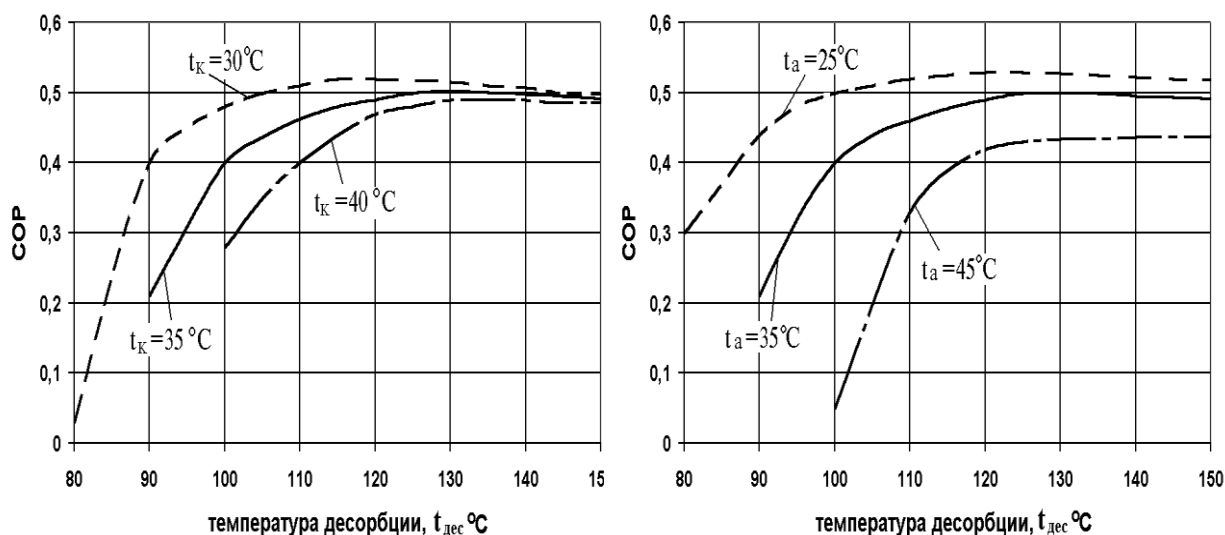


Рисунок 1.8 – Эффективность термотрансформатора COP в зависимости от температур десорбции t_{dec} , конденсации t_k и адсорбции t_a

В работе Pan, Q.W., Wang R.Z., Lu Z.S., Wang L.W. [112] исследовали работу адсорбционного холодильника с композитной адсорбентом, состоящим из хлорида кальция и активированного угля в качестве адсорбата использовали аммиак. Исследования показали, что установка быстро входит в рабочие параметры и работа ее очень стабильна. Экспериментальные результаты показывают, что при температуре испарения -5°C , температуре нагрева 130°C , температуре охлаждающей воды 25°C оптимальный коэффициент производительности (COP) 0,197; удельная мощность охлаждения (SCP) 205,2 Вт/кг; мощность охлаждения прототипа 1,64 кВт.

В дальнейших работах [113] они детально обосновали применение различных рабочих пар для охлаждения и кондиционирования с точки зрения моделей, описывающих адсорбционное равновесие. По их мнению, применение различных рабочих пар для разных ситуаций связано с теплотой адсорбции, которая обуславливается температурами охлаждения и желаемыми рабочими давлениями. Сравнивая адсорбционную активность различных рабочих пар, они анализируют и предлагают дальнейшие направления исследования рабочих пар, среди которых новые композиционные сорбенты на основе активированного угля.

Учеными «Института Тепло и Массообмена им. Лыкова» Л.Л. Васильевым, Д.А. Мишкинисом, А.А. Антух, Л.Л.Васильевым-младшим была разработана и исследована солнечная/газовая тепловая сорбционная установка для транспортных систем, работающая как тепловой насос и холодильная установка на рабочей паре, в частности, углеродное волокно – аммиак [125].

Тепловые насосы и холодильники с двойными источниками энергии (солнечный/газовый, солнечный/электричество), с усовершенствованным волокном активированного угля "Busofit" и NH_3 . В качестве высоких температурных источников энергии используют: солнце, газ и электричество. Низкие температурные источники энергии – подземная вода, грунт и воздух. Новые холодильные установки и поколение тепловых насосов включают в себя комбинацию химикатов с волокном активированного угля, для увеличения сорбционной поглотительной способности NH_3 .

Солнечный холодильник и тепловой насос представляют собой установку, состоящую из солнечного коллектора, сосуда с адсорбируемым природным газом (АПГ) и компактной, транспортабельной системы нагрева/охлаждения, включающую в себя два малых адсорбера с системой тепловых труб для регенерации тепла.

Для улучшения характеристики адсорбционного термотрансформатора работающего на углероде/аммиаке было предложено использование тепловых труб. Было показано, что теплопередача в пределах слоя сорбента активированного угля может быть улучшена при помощи ребристой тепловой трубы. Солнечные сорбционные циклы могут также применяться в сорбционных холодильниках или тепловых насосах, в которых источником энергии является горючее топливо или бросовое тепло. Концептуальная задача такой программы исследования состоит в том, чтобы извлечь наибольшую энтальпию от низкопотенциальной теплоты прежде, чем она попадет в окружающую среду. Это легко выполнить, если автономные сосуды (АПГ) низкого давления используются вместе с газовой горелкой и энергия бросового газа используется, чтобы нагреть

низкий температурный слой сорбента. Учеными был применен солнечный концентратор, сделанный в виде алюминиевой тарелки диаметром 1,8 м. Внутренняя поверхность покрыта металлической полимерной пленкой с высокой степенью отражения 0,68. Покрытие из алюминиевого нитрида увеличивает коэффициент поглощения солнечного приемника до 92 %. Эта система должна иметь ориентируемый по солнцу механизм, чтобы перемещать солнечный концентратор.

Скорость адсорбции/десорбции аммиака на поверхности «Busofita» была оценена анализом изотерм при различных температурах нагрева различных слоев сорбента.

Теория микропористого наполнения объема, выработанная Дубининым М.М., широко используется для количественной характеристики адсорбционных свойств и основных разновидностей пористой структуры. Основное уравнение этой теории – уравнение Дубинина – Астахова, которое описывает равновесную газовую адсорбцию на адсорбирующих веществах с микропористой однородной структурой:

$$a = \left(\frac{W_0}{\nu} \right) \cdot \exp \left(- \left[\frac{A}{E_0 B} \right]^n \right) \quad (1.29)$$

Уравнение Дубинина-Радушкевича – это частный случай уравнения Дубинина-Астахова, ($n=2$):

$$a = \left(\frac{W_0}{\nu} \right) \cdot \exp \left(- BT^2 \left[\lg \left(\frac{P_s}{P} \right) \right]^2 \right) \quad (1.30)$$

где a – сорбционная емкость, г/г; $A = R \cdot T \cdot \ln(P_s/P)$ – характеристическая энергия сорбции, кДж/моль; B – структурная константа, которая характеризует размер и распределение микропор, K^{-2} ; E_0 – характеристическая энергия стандартного газа (обычно бензола) кДж/моль; P – давление, Па; T – температура, °С, К; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); V – объем, м³; W_0 – объемный предел микропоры см³/г; Z – коэффициент сжимаемости; β – связанный коэффициент, ν – адсорбционный мольный объем вещества см³/моль.

Эмпирический коэффициент в уравнении (2) для активированного угля «Busofit АУТМ-055» имеет следующие значения: $W_0 = 0,491$ и $B = 8,56 \cdot 10^{-6}$.

Связанный коэффициент β – независимый аргумент и определяется как отношение двух газовых адсорбционных потенциалов в неизменном адсорбирующем веществе. Вычисленные значения связанных коэффициентов аммиака к бензолу (это вещество обычно принимается за стандартное) отличаются друг от друга в различных литературных источниках. Например, β аммиака к бензолу для волокон активированного угля подобно "Busofity" равен 0,309 и был получен на основании экспериментальных данных.

Другая важная характеристика сорбента – особый размер пор. Он может быть определен согласно эмпирическому выражению для пористой щелевидной модели, предложенной М.М. Дубининым:

$$x = k/E_0, \quad (1.31)$$

где x – половина ширины микропоры (нм); E_0 – характеристическая энергия бензола, равная 20,5 КДж/моль; k – коэффициент пропорциональности, равный 12,0.

По экспериментальным данным учеными были определены и построены изотермы адсорбции и десорбции аммиака на углеродистой ткани «Busofit».

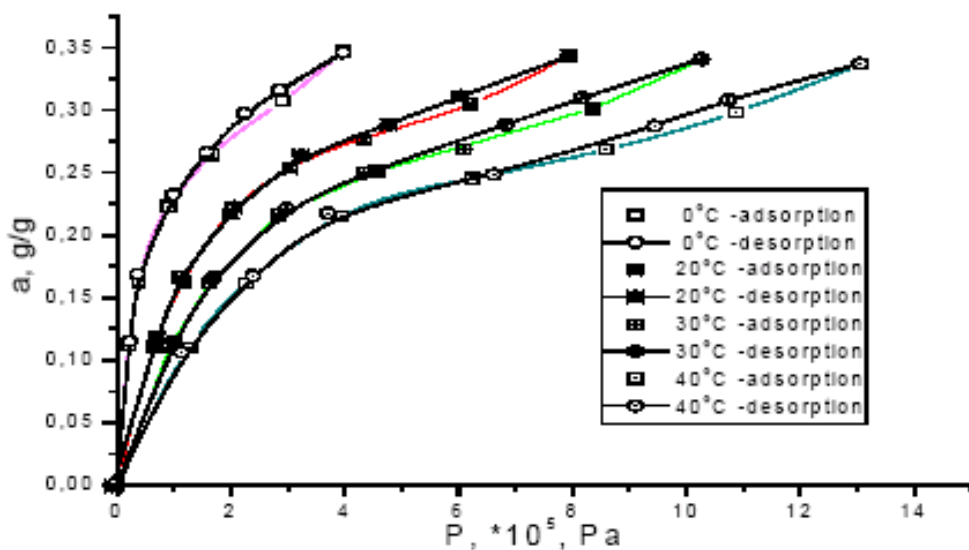


Рисунок 1.9 – Изотермы адсорбции/десорбции аммиака на "Busofit"

В литературе описано много исследований, которые были сосредоточены на разработках солнечной абсорбционной холодильной машины. Voubakri A. [82, 83] предложил новую концепцию адсорбционных солнечных ледогенераторов, оснащенных одним теплообменником, который играет поочередно роль конденсатора и испарителя. Это показывает, что при последовательной разработке различных компонентов солнечной холодильной установки адсорбционного типа, суточная добыча льда может превышать 5,2 кг, с КПД более чем на 0,14.

Ogueke N. и Anyanwu E. [111] изучали влияние различных конструктивных параметров коллектора на выступления от солнечных батарей твердый холодильник адсорбции и сделали вывод, что с оптимальным выбором трубки были получены диапазоны 29-38% для солнечного коллектора и 26-35% для выхода конденсата. Расстояние, адсорбент, плотность упаковки и пластины коллектора – адсорбентов комбинации материалов труб. El Fadar A. и др. [95, 96] сообщили численное исследование системы непрерывной холодильной адсорбции, состоящей из двух слоев адсорбента и питающейся от параболического желоба солнечного коллектора (РТС). Полученные результаты показывают, что система может достичь удельной мощности охлаждения (SCP), порядка $104 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$, солнечный коллектор холодильного цикла - 0,43 и может производить ежедневный полезный эффект охлаждения 2515 кДж на площадь коллектора $0,8 \text{ м}^2$, а его валовой солнечной КС может достигать 0,18. Кроме того, автор иллюстрировал возможность достижения высокой производительности за счет высокой эффективности РТС, а также высокой плотности потока тепловой трубки. Desideri U. и др. [91] дали технико-экономическое обоснование солнечной системы охлаждения – поглощения. El Mers A. и соавт. [76] сосредоточили свою работу на спектральном анализе и оптимизации солнечного реактора и процессов адсорбции и охлаждения. Машина работает на рабочей паре активированный уголь – аммиак. Zhai X.O. и Wang R.Z. [122] разработали солнечное охлаждение адсорбционной системы, которая может переключаться между системой с аккумуляцией тепла и системой без аккумуляции тепла. Кроме того,

эксперименты проводились для сравнения эксплуатационных характеристик системы в рамках этих двух режимов работы. Solmus I. и соавт. [120] экспериментально исследовали возможности адсорбции воды на природный цеолит при различных температурах и давлениях водяного пара в процессе адсорбции и десорбции. Mateus T. и Oliveira A.C. [110] оценили потенциал интегрированной солнечной системы охлаждения поглощения в системе отопления.

Работа [121] направлена на выявление влияния диаметров цилиндрического адсорбера, содержащего активированный уголь и пары аммиака, нагретого за счет солнечной энергии и состоящего из ряда цилиндрических сварных труб с внешним оребрением, на эффективность работы солнечных адсорбционных холодильных машин. Были определены геометрические параметры адсорбера (радиус адсорбера, размер ребра), которые максимально используются в гелиоэнергетических установках и солнечных коллекторах, с точки зрения критерия оптимизации. Авторы провели анализ чувствительности солнечных коллекторов к параметрам модели, вычислили геометрические параметры адсорбера, которые оптимизируют солнечные коллекторы гелиоэнергетических установок на рабочих парах активированный уголь-аммиак.

В работах Ma L., Rui Z., Wu.Q. , Yang H. [109] исследовалась новая рабочая пара для гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа. Формовочный на основе углеродных нанотрубок сорбент MiL-101 и в качестве адсорбата применялся этанол. Исследования проходили на имитационном устройстве. Результаты показали, что адсорбционная способность этанола на новом сорбенте 0,74 кг/кг при температуре 25⁰С. Температура полной десорбции составила 100⁰С, а максимальная десорбция начиналась при температуре 54⁰С. Исследователи утверждают, что холодопроизводительность рабочей пары MiL-100-3-этанол в 2,2 раза выше, чем у рабочей пары активированный уголь-этанол.

Дальнейшие исследования нового сорбента – на основе многослойной углеродной нанотрубке MIL-100(Fe) [114] говорят о хороших адсорбционных

характеристиках его и возможной замене в будущем традиционных сорбентов таких как активированный уголь и силикагель.

В работе [88] учеными Cherrad N., Benchabane A., Segira L., Rouag A. была разработана численная модель, называемая CBSR для определения рабочих температур во временном диапазоне цикла адсорбции активированного угля и адсорбата при нестационарных нагрузках солнечного облучения. Данные для расчета характеристик были взяты из литературы для различных рабочих пар. Модель позволяет определить оптимальную производительность гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа в режимах характерных для эксплуатации в условиях средиземноморского и североафриканского климата, однако для регионов северных широт эта модель не работает.

Оценку энергетической эффективности работы холодильных машин на основе термотрансформаторов сорбционного типа были предложены и проработаны профессорами Галимовой Л.В. [9, 10], Архаровым А.М. [3], Надировым Н.К. [60], Амерхановым Р.А.[1], Руденко М.Ф. [44, 50]. В своих книгах и работах они оценивают работу холодильных машин и термотрансформаторов сорбционного типа через теплоэнергетические и эксергетические коэффициенты преобразования затраченной тепловой энергии (эксергии) к полезной энергии (эксергии) охлаждения. Однако, характер преобразования солнечной энергии в гелиоприемных устройствах генератора-адсорбера холодильных установок адсорбционного типа в условиях нестационарного подвода теплоты пока изучен не полностью.

В некоторых работах таких ученых как Кныш Л.И. [23], Майоров В.А. [26], Обухов С.Г. [33], Петров В.М. [36], Резцов В.Ф. [39], Чивиленко Ю.В. [63], Шипулина Ю.В. [68], Щеклеин С.Е. [71], Pan Q.W. [113], Reda A.M. [115], Li M. [108] и другие рассматриваются вопросы, связанные с анализом, исследованием и расчетами преобразования солнечной энергии в гелиоприемных устройств, однако, они в основном посвящены общим вопросам развития

гелиоэнергетической техники, а применительно к холодильным преобразователям адсорбционного типа требуют значительной доработки.

1.3 Теоретические основы процессов адсорбции

В адсорбционных холодильных установках адсорбатом является хладагент, который переходит в парообразное состояние и ведет себя, как газ.

Адсорбцию веществ из раствора исследовал еще в 1785 году русский академик Т.Е. Ловиц [11]. Затем французский ученый Соссюр в 1814 году установил, что те пористые материалы, которые способны адсорбировать газы обычно выделяют тепловую энергию. Он также заметил, что адсорбция идет тем лучше, чем легче сжижается газ [20]. Гиббсом были разработаны основы общей теории термодинамической адсорбции [7].

Ленгмюр И., Поляни, Брунауэр, М. М. Дубинин [11, 21, 24, 64] и другие ученые исследовали подробно и тщательно явление адсорбции.

В разрабатываемых адсорбционных установках протекает физическая адсорбция, так как процессы в ней всегда обратимы. Физическая адсорбция может протекать самопроизвольно. Однако для каждой концентрации адсорбата в окружающей среде при определенной температуре существует адсорбционное равновесное состояние, которое подобно состоянию между конденсацией и испарением. Чем выше концентрация адсорбата и ниже температура, тем больше адсорбция.

Процесс адсорбции можно описать уравнением количества адсорбированного вещества α_0 в зависимости от температуры при равновесных давлениях $P_0 = \text{const}$ или концентрации $C = \text{const}$.

Изотермы для высоких температур лежат ниже, чем изотермы для низких температур, так как величина равновесной адсорбции с понижением температуры будет уменьшаться. Однако предел адсорбции не должен зависеть от температуры и определяется только размерами молекул, так как количество адсорбата, осаждающегося на единицу поверхности при плоской упаковке в мономолекулярном слое молекул, не изменяется. Если изотермические процессы

осуществлялись при высоких температурах, то предел адсорбции соответствовал бы высокому давлению или концентрации и изотермы адсорбции сливались бы в одну линию, однако на практике это обычно не наблюдается. Изотермы адсорбции по виду напоминают параболу. Фрейндлих [21] предложил аналитическое эмпирическое уравнение вида:

$$\alpha = K \cdot P^{(1/n)} \quad (1.32)$$

Наиболее простым случаем взаимодействия молекул адсорбата с поверхностью адсорбента является адсорбция неполярной молекулы неполярным адсорбентом. В этом случае работают дисперсионные силы притяжения и броуновские силы отталкивания. Потенциал Q_0 , можно выразить уравнением Леннарда-Джонса [64]:

$$Q_0 = -C \cdot r^{-6} + B \cdot r^{-12} \quad (1.33)$$

Константа C дисперсионного притяжения может выражаться через электрические и магнитные свойства взаимодействующих молекул с помощью уравнений, основанных на квантомеханических представлениях. Существенно, что не только энергия дисперсионных, но и индукционных, и ориентированных сил притяжения зависит от расстояния r между центрами частиц пропорционально шестой степени расстояния, как это показано в физической химии [24].

Анализируя уравнение (1.33), можно сделать вывод, что на относительно далеких расстояниях должны действовать силы притяжения, а на относительно малых расстояниях - силы отталкивания. На каком-то расстоянии эти силы могут быть равные - это состояние соответствует минимальной свободной энергии системы.

Если адсорбент имеет ионное строение, то на него влияют не только дисперсионные силы, но и индукционные силы притяжения диполя, индуцированные в молекуле адсорбата электрическим полем, которое создаётся ионами решетки адсорбента. Для индукционных сил при этом в адсорбционном

взаимодействии равнозначна поляризуемости молекулы адсорбата и пропорциональна квадрату напряженности электростатического поля.

Может возникнуть индукционное притяжение, когда на неполярном адсорбенте адсорбируются полярные молекулы адсорбата, то в них индуцируются электрические моменты, которые добавляются к дисперсному притяжению.

Если на адсорбенте, имеющем на поверхности ионы или диполи, адсорбируются полярные молекулы, то возникает полное взаимодействие всех элементов адсорбата с электрическим полем адсорбента, и при этом наблюдается ориентационное кулоновское взаимодействие.

При кулоновском взаимодействии отрицательный полюс диполя молекулы адсорбата может, с одной стороны, притягиваться катионом решетки адсорбента, с другой, одновременно испытывать отталкивание со стороны соседних с этим катионом анионов.

Энергия межмолекулярного притяжения определяется в основном энергией дисперсионного притяжения.

Адсорбцией, похожей на физическую, может быть также и образование водородных связей, при которой осуществляется связь адсорбента с адсорбентом на поверхности, содержащей гидроксильные группы молекул, таких, как у воды, аммиака, аминов, спиртов.

Обратным эффектом адсорбции является процесс десорбции, когда при отделении адсорбата из адсорбента требуется подвод энергии для разрыва водородных связей.

Имеется несколько теорий физической адсорбции, из которых прежде всего интересна теория мономолекулярной адсорбции Ленгмюра [64].

Теория Ленгмюра основывается на следующих положениях.

Во-первых, он считал, что адсорбция бывает только локальной и вызывается химическими силами, к которым он относил силы поверхностного натяжения, силы кристаллизации, скрытого парообразования, силы когезионной прочности вещества и тому подобное.

Во-вторых, он предполагал, что адсорбция молекул происходит только на поверхности вещества в активных центрах, таких, как возвышения, пики, ребра, углы кристаллов имеющихся на гладкой поверхности. Насыщенность силового поля у центров адсорбции вызывает насыщение молекул адсорбента [24].

В-третьих, вследствие того, что у адсорбционных сил малый радиус действия, то, адсорбируя молекулу адсорбата, каждый центр теряет свойства адсорбции. Это способствует образованию только мономолекулярного слоя адсорбата.

В-четвертых, он считал временным свойством адсорбции удерживать в центрах молекулы адсорбата. Время это зависит от температуры. С повышением температуры процесса время удерживания молекул в центрах адсорбции значительно сокращается.

В-пятых, Ленгмюр не учитывал силы, которые оказывают влияние друг на друга молекул адсорбата, находящихся в центрах адсорбции.

Ленгмюр вывел уравнение адсорбции как квазихимическую реакцию в результате образования комплекса между молекулой адсорбата и активным центром адсорбента, которую можно записать:

$$\alpha = K \cdot P \cdot \alpha_0 \quad (1.34)$$

Считая, что одна молекула занимает только один активный центр, запишем:

$$\alpha + \alpha_0 = \alpha_{\max} \quad (1.35)$$

Преобразовав выше приведенные уравнения, Ленгмюр получил уравнение изотермы:

$$\alpha = \alpha_{\max} \cdot \frac{K \cdot P}{1 + K \cdot P} \quad (1.36)$$

Уравнение Ленгмюра, по сравнению с уравнением Фрейндлиха [4], хорошо описывает изотерму адсорбции. Расчеты показали, что при малых давлениях P адсорбированное количество адсорбата пропорционально равносному давлению, что соответствует почти прямолинейному начальному участку изотермы. При высоких значениях давления адсорбированная масса вещества не

зависит от давления, поэтому изотерма имеет относительно прямолинейный участок, который идет практически параллельно оси давлений.

Уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра хорошо применять, когда адсорбция не осложняется диссоциацией молекул десорбированного вещества на поверхности адсорбента.

При адсорбции возникает и капиллярная конденсация в микро и мезо порах адсорбента. Механизмом конденсации является наличие в мелких порах (капиллярах) вогнутых менисков, которые способствуют слиянию молекул адсорбата при смачивании стенок капилляров в результате адсорбции.

Томсон В. [11] установил связь между радиусом r шаровидного мениска в капилляре и давлением насыщенного пара P над мениском:

$$P = P_0 \cdot \exp \left[- \left(2 \cdot \sigma \cdot \frac{V_{\text{мол}}}{r} \cdot R \cdot T \right) \right] \quad (1.37)$$

Задаваясь давлениями по уравнению В.Томсона, вычисляют максимальный радиус капилляров. В этих капиллярах может происходить конденсация. Это явление необходимо знать для правильного выбора адсорбента.

Явление конденсации не является процессом физической адсорбции.

Теория капиллярной конденсации специфического воздействия поверхностных сил не учитывает.

Следует упомянуть и теорию адсорбции Поляни, который рассматривал нелокализованную физическую адсорбцию. Основным положением его теории было представление о потенциальном поле адсорбента, которое простиралось на значительные расстояния от поверхности адсорбента. Это поле как бы захватывает молекулы адсорбата и удерживает их, при этом адсорбционный слой полимолекулярен, но плотность слоя убывает по нормали от поверхности. Поляни рассматривает изотермическую работу сжатия пара адсорбата, находящегося далеко от поверхности адсорбента при движении от равновесного давления P в объемной фазе в область поверхностного слоя с насыщенным давлением пара P_0 . Он вводит понятие адсорбционного потенциала ε :

$$\varepsilon = R \cdot T \cdot \ln(P_0/P) \quad (1.38)$$

С помощью теории Поляни можно хорошо объяснить адсорбцию на адсорбентах с резкой энергетической неоднородностью, такой, которая встречается на активированных углях. Однако уравнения для построения изотерм адсорбции, Поляни не предложил.

Теория многослойной адсорбции БЭТ (Брунауэр, Эммет, Теллер) объясняет много различных явлений и моментов адсорбции, в частности, теория Ленгмюра описанная выше, является одним из полагающихся моментов этой полной теории.

Для расчета адсорбционной способности используются много зависимостей, но наиболее эффективные, на наш взгляд, уравнение Дубинина М.М. (1.39) и Дубинина-Радушкевича (1.40).

$$a(P,T) = (Z_0 \cdot 1000 \cdot \rho) / M \cdot \exp\{-B \cdot (T^2 / \beta^2) \cdot [\lg(P_s/P)^2]\}, \quad (1.39)$$

где $a(P,T)$ – величина адсорбции для равновесных относительных давлений P/P_s и абсолютных температур T , ммоль/г; Z_0 – предельный объем адсорбционного пространства см³/г; ρ – плотность адсорбата (хладагента) при температуре эксперимента, г/см³; M – молекулярная масса спирта, ммоль/кг; T – температура, К; P_s, P – соответственно давление насыщения и рабочее, мм рт.ст.; β – коэффициент аффинности характеристических кривых; B – константа.

$$a(P,T) = \rho(T) \cdot W_0 \cdot \exp\{-D \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^n\}, \quad (1.40)$$

где $a(P,T)$ – величина адсорбции для равновесных относительных давлений (P/P_s) и абсолютных температур T , кг/кг; W_0 – предельный объем адсорбционного пространства, м³/кг; $\rho(T)$ – плотность адсорбата при температуре эксперимента, кг/м³; T – температура, К; P_s, P – давление соответственно насыщения и рабочее, Па, D – коэффициент, учитывающий энергию адсорбции и зависящий от используемой пары адсорбент/адсорбат; n – показатель, характеризующий распределение размерности пор.

1.4 Состояние исследований конструктивных особенностей гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа

Первые конструкции гелиоэнергетических холодильных установок [19, 104, 128] имели гелиоприемные устройства совмещенного типа: генератор-адсорбер с реакторами совмещенный с гелиоприемным устройством типа «горячий ящик».

К таким установкам можно отнести установку Ачилова Б.М. [5], Мирзаева, Узакова [28]. Однако Серквенік В. и другие [89, 71] доказали, что для солнечной установки в зависимости от формы ориентации реакторов гелиоприемника в пространстве поглощение солнечной энергии различно.

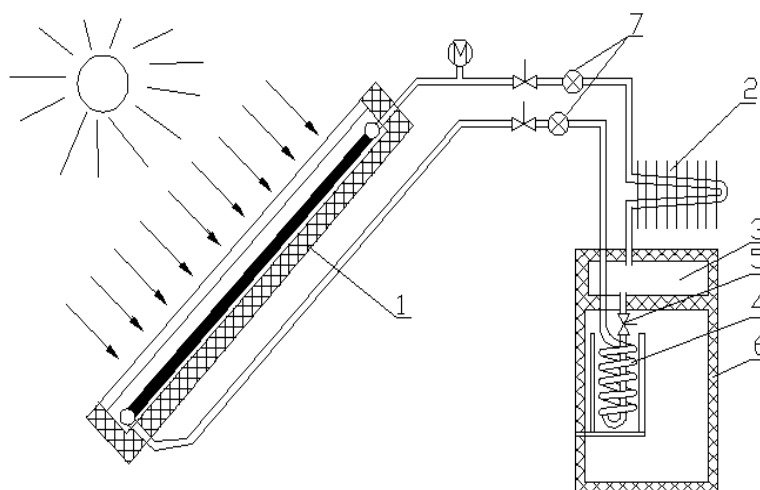


Рисунок 1.10 – Схема гелиоэнергетического термотрансформатора [5]:

1 – генератор-адсорбер типа «черный ящик»; 2 – конденсатор воздушный; 3- ресивер; 4 – испаритель; 5 - вентиль регулирующий; 6 – охлаждаемая камера; 7 – обратные клапана.

Они изучали теплоэнергетические характеристики коллектора с цилиндрическими параболическими концентраторами при различной ориентации в пространстве. Конструкции гелиоприимных устройств с горизонтальным расположением реакторов позволили увеличить время солнечной инсоляции на адаптирующую поверхность примерно до 30%.

Далее все последующие гелиоэнергетические устройства стали выполнять с горизонтальными реакторами. К таким гелиоэнергетическим установкам можно отнести установки Elechon J. [94], Folling S. [97], Руденко М.Ф. [43] и других.

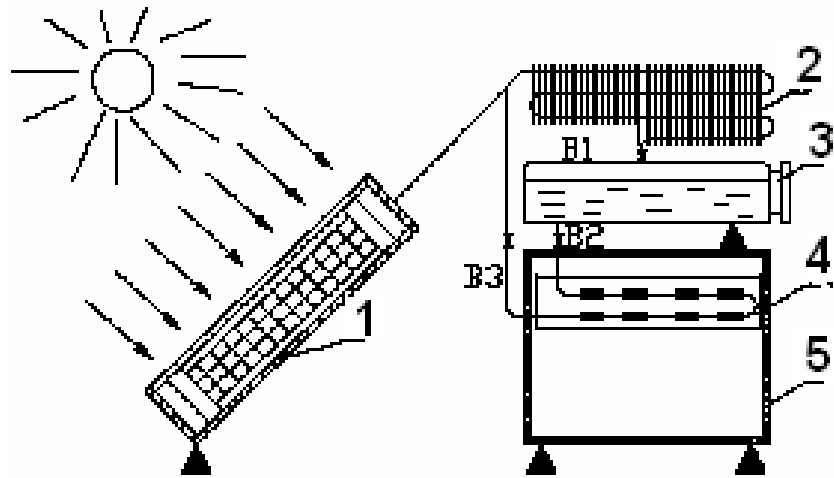


Рисунок 1.11 – Схема гелиоэнергетической установки [28]:

1 – генератор-адсорбер; 2 – конденсатор воздушный; 3- ресивер; 4 – испаритель; 5 - охлаждаемая камера.

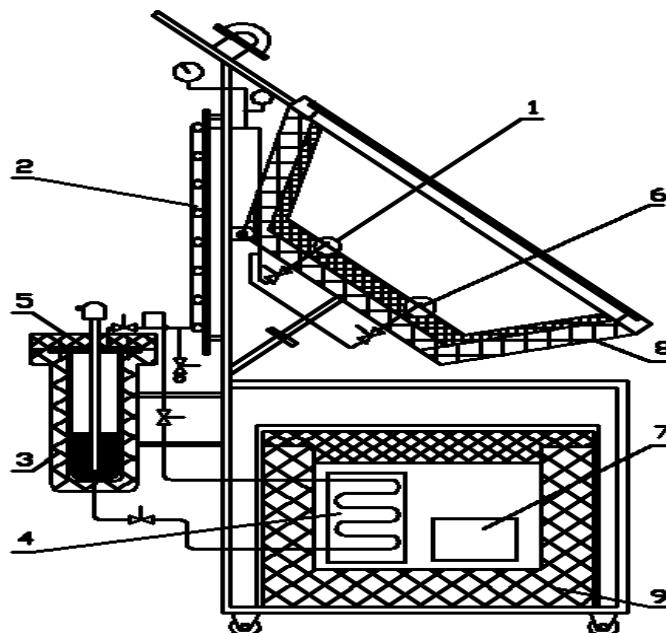


Рисунок 1.12 – Схема гелиоэнергетической холодильной установки [94]:

1- основной генератор-адсорбер; 2- конденсатор; 3- ресивер;
4- испаритель; 5-регулирующее устройство; 6-вспомогательный генератор;
7- емкость со льдом; 8- концентратор; 9- изоляция

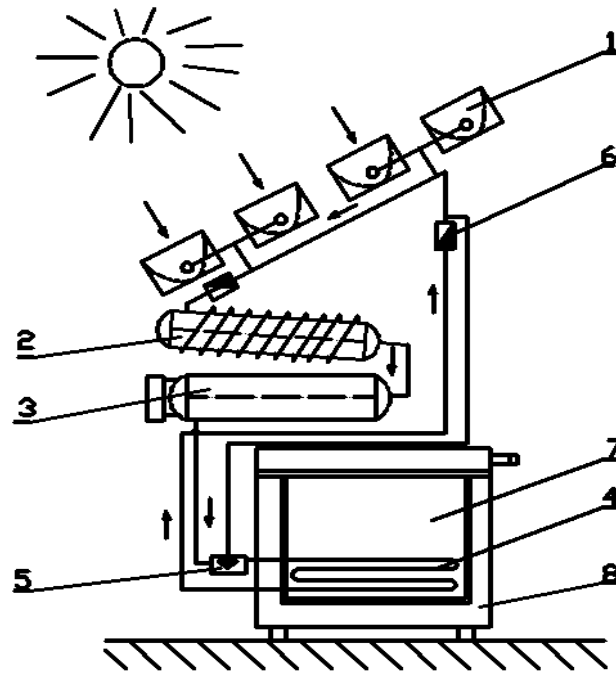


Рисунок 1.13 – Гелиоэнергетическая холодильная установка [97]

- 1- генератор-абсорбер; 2- конденсатор; 3- ресивер; 4- испаритель; 5- клапан; 6-обратный клапан; 7-камера; 8-изоляция

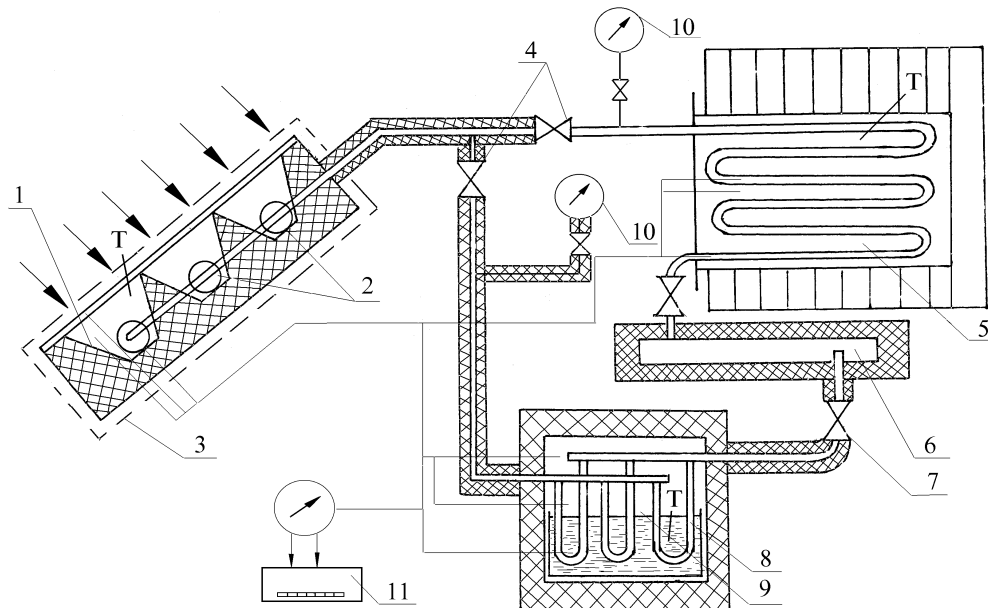


Рисунок 1.14 – Гелиоэнергетическая холодильная установка на основе адсорбционного термотрансформатора [43]:

- 1-концентраторы солнечной энергии; 2-реакторы; 3- гелиоприемник; 4-запорные вентили; 5-конденсатор воздушный; 6-ресивер; 7-регулирующий вентиль; 8-испаритель затопленный; 9 – охлаждаемая камера; 10-манометры; 11-вольтметр цифровой.

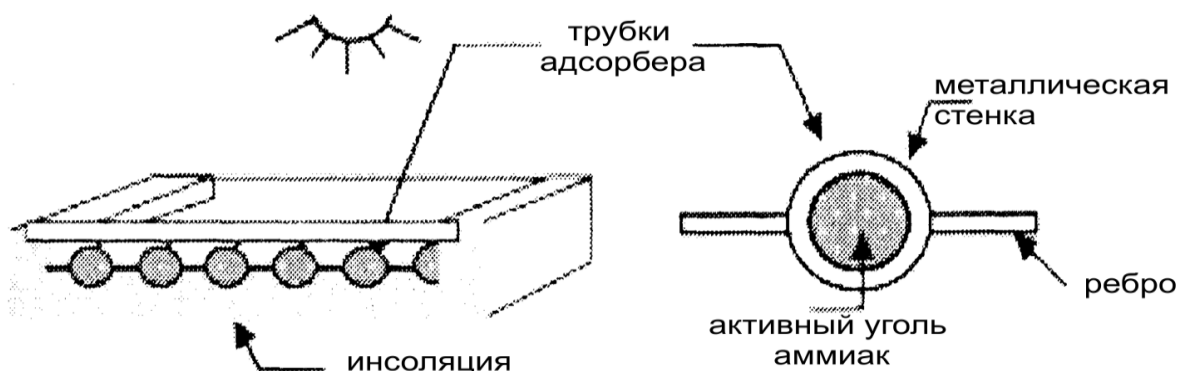


Рисунок 1.15 – Конструкция генератора-адсорбера совмещенного вида

В работе [121] приводится описание конструкции адсорбера, совмещенного с конструкцией солнечного коллектора.

Внутри конструкции гелиоприемного устройства типа «горячий ящик» расположены цилиндрические элементы трубок с наружными ребрами, в трубки засыпается сорбент - активированный уголь (рис.1.15). Они исследовали соотношения диаметра реактора генератора-адсорбера с длиной оребрения.

Общая компоновка солнечной охлаждающей адсорбционной установки представлена на рис.1.16. Принципиально она не отличается от ранее рассмотренных конструкций.

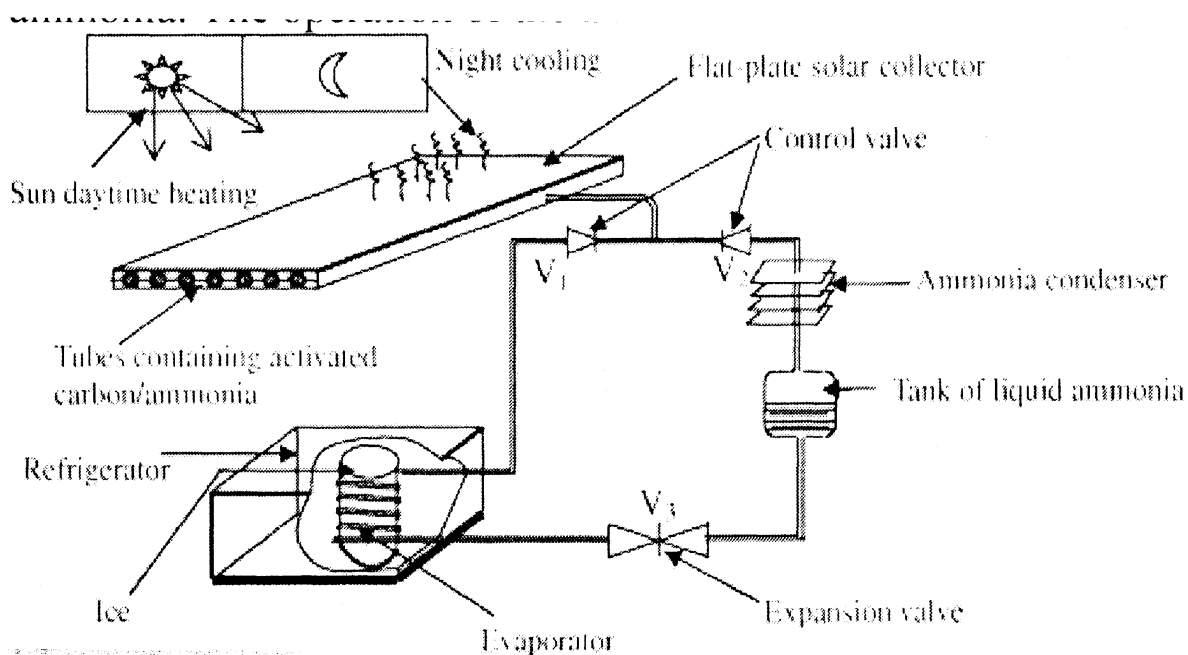


Рисунок 1.16 – Схема солнечной адсорбционной установки

Определение оптимальных диаметров трубок и ребер реакторов генератора-адсорбера на рабочих парах активированный уголь-аммиак представлено на рисунке 1.17. Экспериментальные зависимости получены учеными на реакторах с различными отношениями диаметров и ребер при различных температурах адсорбции и десорбции.

На основании разработанной ими расчетной модели учеными были сделаны следующие выводы. Коэффициент полезного действия установки зависит от диаметра реактора с ребрами генератора-адсорбера, расположенного в гелиоприемном устройстве.

По результатам ученых получается, что лучшим является соотношение диаметра трубки реактора и длины ребра значения $L=D/2$.

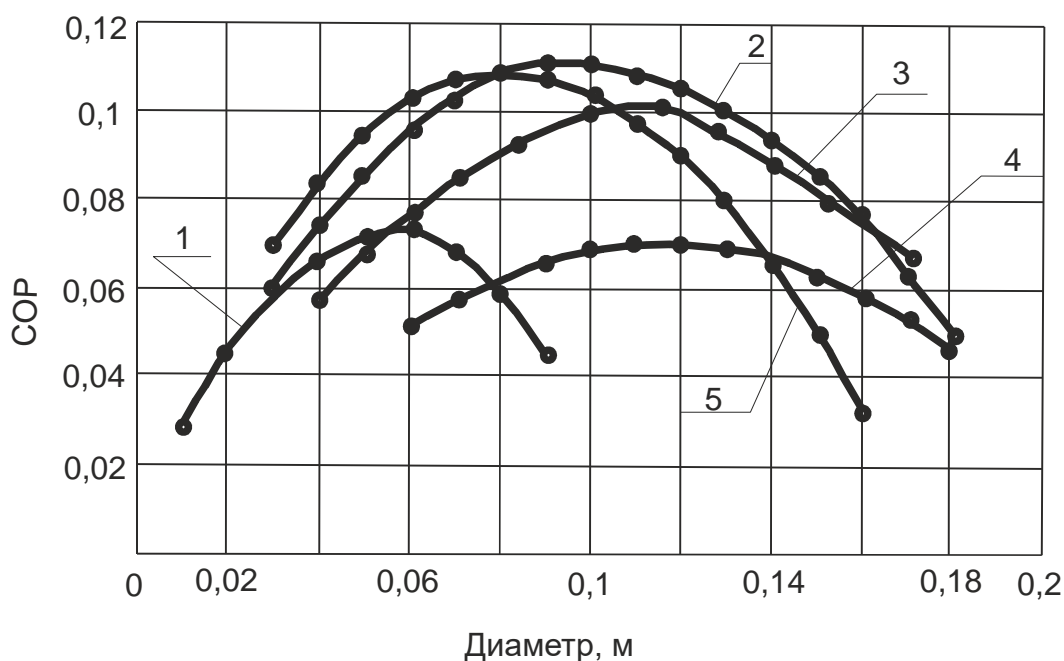


Рисунок 1.17 – Зависимость КПД гелиоэнергетической холодильной установки от диаметра реактора генератора-адсорбера при различных соотношениях длины ребра к диаметру

В зависимости от ориентации генератора-адсорбера в пространстве меняется температура нагрева пористого сорбента внутри реактора, так как в некоторых

положениях учитывается эффект лучшего нагрева за счет оребрения (разность температур составляет до 16°C).

Как видно из зависимостей (рис. 17), применение оребрения в конструкции реактора генератора-адсорбера увеличивает КПД гелиоэнергетической холодильной установки с 0,075 до 0,111 при оптимальных значениях соотношения конструктивных параметров. Применение оребренных реакторов увеличивает температуру нагрева реактора с 77°C до 97°C . Однако следует учесть, что увеличение диаметра реактора и оребрения ведет к удорожанию стоимости гелиоэнергетической холодильной установки.

Как видно из конструкций и элементов гелиоэнергетических установок, рассмотренных выше, одним из основных является генератор-адсорбер совмещенного типа, в котором на реакторе за счет энергии солнечной радиации должна создаваться температура свыше 150°C . Такую температуру можно достичь на поверхности реактора, применяя системы концентраторов солнечной энергии и специальные селективные покрытия на адаптирующих поверхностях.

Ali. Abdel Aziz и другие [72] предложили в качестве интенсификации процессов тепломассообмена в реакторе адсорбера с активированным углем применять алюминиевые скрученные как стружка в радиальном направлении добавки. Анализируя и исследуя свою конструкцию, они утверждают, что применение добавок в абсорбер эффективнее применения внутреннего оребрения абсорбера, эффективнее простого абсорбера по коэффициентам производительности соответственно как 0,586; 0,543; 0,50. Эксперименты проводились при температурах 82°C и 5°C . Исследовалась рабочая пара АС-этанол. Вывод сделанный ими следующий: чем выше скорость теплопередачи в реакторе адсорбера-генератора, тем короче время цикла адсорбции и большая компактность аппарата.

Ряд работ посвящено исследованию гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа [84, 78, 79] для получения льда в северной Африке и Аравии на рабочей паре цеолит-вода. В Алжире была создана холодильная установка, состоящая из трубчатого коллектора емкостью 4-5 кг

адсорбента, конденсатора с воздушным охлаждением, испарителя с дополнительными компонентами. Исследования такой установки (рис.1.18) показали, что в коллекторе, представляющем генератор-адсорбер, температура изменяется от 95°C до 117°C , средняя температура окружающей среды 33°C , температура конденсации от 45°C до 53°C , давление в коллекторе с адсорбционным силикагелем изменяется от 80мбар до 100мбар.

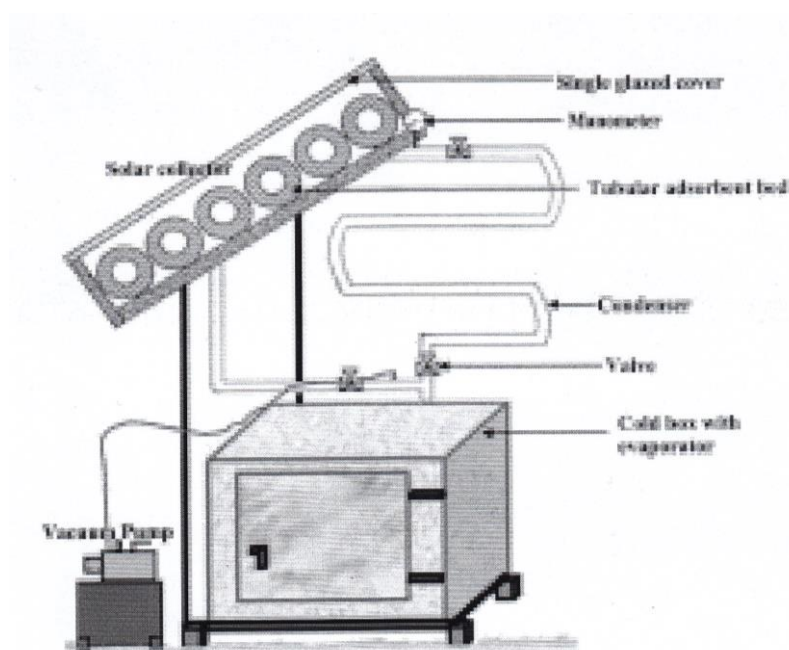


Рисунок 1.18 – Гелиоэнергетическое охлаждающее устройство на основе термотрансформатора адсорбционного типа [84]

Минимальная температура в испарителе составляла $+5^{\circ}\text{C}$. При полной годовой солнечной энергии, около 19 МДж/м^2 , это устройство может обеспечить преобразование солнечной энергии в холод от 0,083 до 0,09. Такое устройство исследователи предполагают для использования в медицине, хранение вакцин и лекарств в районах Сахары, где нет электроснабжения.

Другими авторами [93] проведено исследование двух сорбентов ZSM-5 и SAPO-34 в стеклянной трубке с параболическим зеркалом концентратором и водяным паром в качестве адсорбата. Исследовались процессы адсорбции и десорбции в режимах воздушного и водяного охлаждения. Авторы указывают на

лучшие характеристики тепло- и массопереноса силикагеля SAPO-34 и рекомендуют его применение в холодильной технике.

Исследователями Abu-Hamdeh N.H. и др. [73] была также сконструирована гелиоэнергетическая установка с параболическим концентратором. В качестве адсорбента использовались отходы оливковой древесины, а в качестве адсорбента – метанол. Проведены были суточные испытания установки, которые показали следующие характеристики: самая низкая температура в охлажденном пространстве составляла $+4^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды 27°C . Охлаждение начиналось с 20.30 часов и достигало 4°C в 01.30. Наибольший коэффициент производительности КОП составил 0,75.

Концентраторами солнечной энергии занимались многие исследователи [14, 25, 45, 65].

Одной из простых конструкций являются плоские зеркальные концентраторы [45].

В работе [45, 46] рассматриваются теоретические исследования по определению эффективности плоских зеркальных концентраторов солнечной энергии на плоские, цилиндрические, треугольные и другие адаптирующие поверхности гелиоэнергетических устройств, имеющих селективное покрытие трубчатые конструкции для нагрева теплоносителя жидкого или газового в коллекторах [39] или покрытого фотоэлементами круглой или псевдоквадратной формы, выпускаемых в настоящее время промышленностью.

Основные теоретические проработки этого вопроса изложены в работах [14, 45, 48]. Суть их заключается в следующем. В основу аналитических исследований положено следующее допущение: солнечные лучи полностью отражаются от зеркал и, претерпевая одно-, двух- и трехкратное преломление, падают на адаптирующую поверхность и полностью поглощаются.

На рисунке 1.19 показана расчетная модель зеркального концентратора, состоящего из двух зеркал, расположенных под углом друг к другу и направляющих двукратное отражение на плоскую адаптирующую поверхность, причем солнечные лучи направлены перпендикулярно поглощающей

поверхности. Критическим углом раскрытия таких концентраторов является фиктивный угол раскрытия зеркал $\Theta = 45^\circ$.

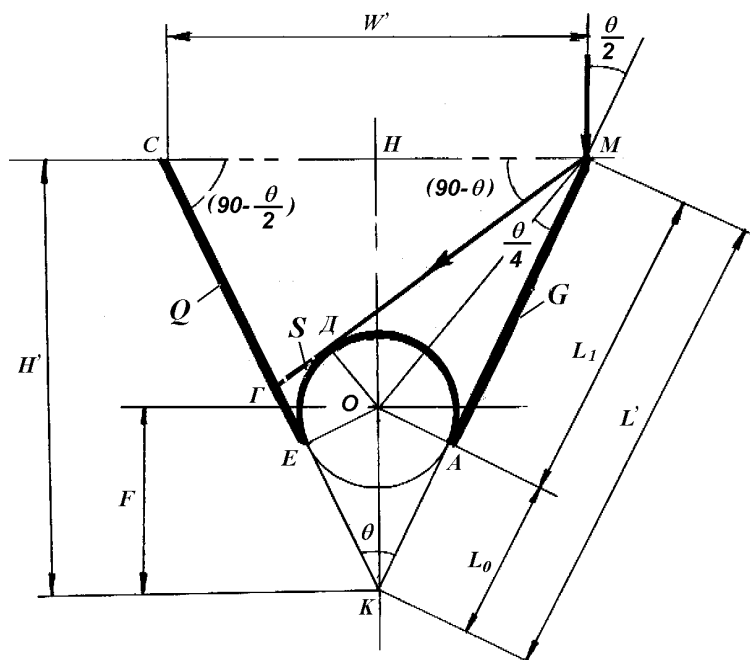


Рисунок 1.19 – Расчетная модель зеркального концентратора солнечной энергии, при одно- и двукратном отражении на круглую поверхность

Анализ оптического и оптико-энергетического коэффициентов концентрации на поглощающую круглую поверхности сечения в зависимости от степени раскрытия зеркал

Проведем анализ оптического и оптико-энергетического коэффициентов для плоских зеркальных концентраторов при перпендикулярном падении солнечных лучей на поглощающую поверхность круглого сечения. Расчеты проведем для эффективных конструкций концентраторов (рисунок 1.19), выдерживая отношения ширины раскрытия зеркал W к ширине поглощающей поверхности ($W/2R$). Соответственно $W/2R = 2$; $W/2R = 2,5$; $W/2R = 3$; $W/2R = 3,5$; $W/2R = 4$; $W/2R = 4,5$; $W/2R = 5$. Расчетные значения ($W/2R$) получены по коэффициентам C_0 и C_3 при различных углах раскрытия концентраторов.

$$C'_0 = \frac{\pi \cdot R + \frac{[90 - \arctg(R/L_1)] \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{360}}{\pi \cdot R} \quad - \quad \text{оптический коэффициент}$$

концентрации солнечной энергии;

$$C'_{\varepsilon-o} = \frac{\pi \cdot R + \frac{[90 - \arctg(R/L_1)] \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{360}}{2 \cdot L' \cdot \sin(\Theta/2)} \quad - \quad \text{оптико-энергетический}$$

коэффициент концентрации солнечной энергии

На основе соответствующих расчетов и вычисления оптического коэффициента концентрации для различных углов раскрытия зеркал и отношений $W/2R$ нами получены зависимости для поглощающих поверхностей круглого сечения при перпендикулярном освещении трубок солнечными лучами, представленные на рисунок 1.20. Из этих зависимостей видно, что максимальные оптические коэффициенты достигаются при минимальных углах раскрытия зеркал, ограниченных углами $\theta = 45^\circ$, лучшие результаты, предвещающие значительное увеличение температуры на адаптирующей поверхности, следует ожидать при отношениях $W/2R$ от 3,5 до 5,5.

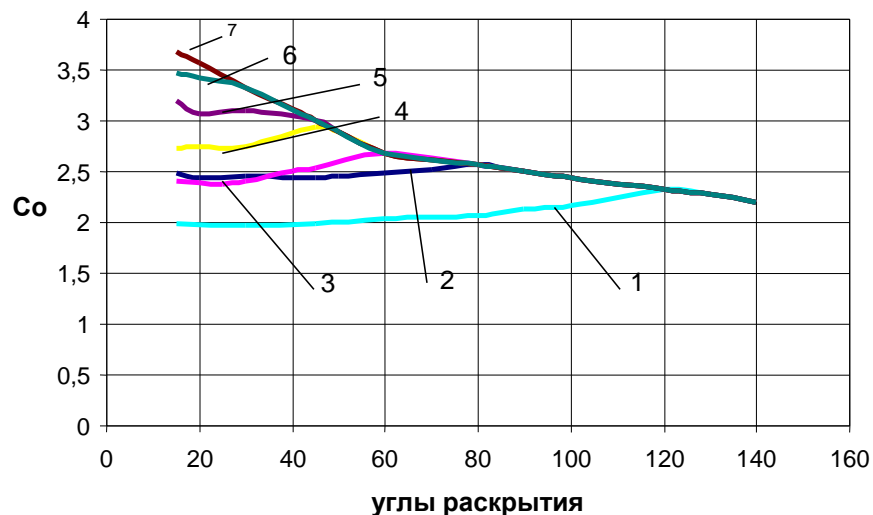


Рисунок 1.20 – Графики зависимости оптических коэффициентов плоских концентраторов на круглую поверхность от углов раскрытия зеркал при перпендикулярном освещении солнцем для различных отношений:

1-для $W/2R=2$; 2-для $W/2R=2,5$; 3-для $W/2R=3$; 4-для $W/2R=3,5$; 5-для $W/2R=4$; 6-для $W/2R=4,5$; 7-для $W/2R=5$

На рисунке 1.21 представлены графики зависимости оптико-энергетических коэффициентов при различных отношениях ($W/2R$) для поглощающих поверхностей круглого сечения при перпендикулярном освещении трубок солнечными лучами. Из них видно, что самой энергетически эффективной конструкцией плоских концентраторов можно считать конструкцию при $W/2R=3,5$ при углах раскрытия зеркал $\Theta < 80^\circ$.

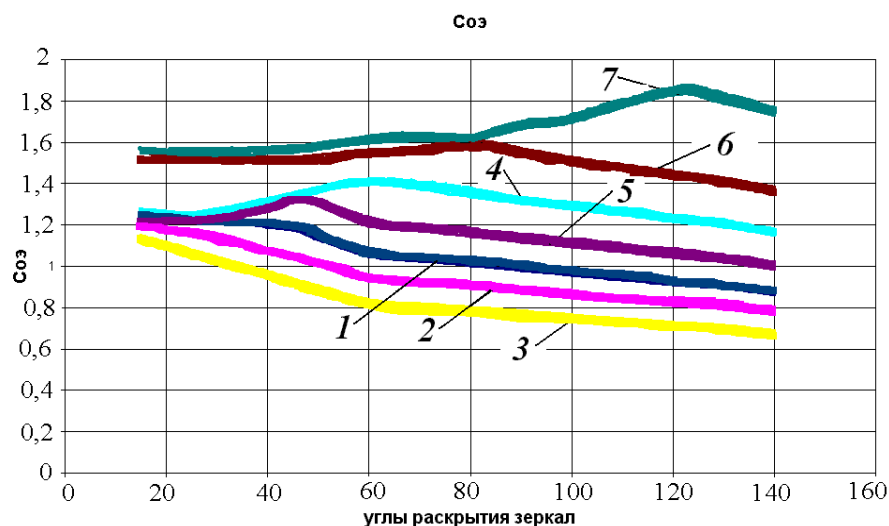


Рисунок 1.21 – Графики зависимости оптико-энергетических коэффициентов концентрации плоских концентраторов на круглую поверхность от углов раскрытия зеркал при перпендикулярном освещении солнцем для различных отношений:

1-для $W/2R=4$; 2-для $W/2R=4,5$; 3-для $W/2R=5$; 4-для $W/2R=3$; 5-для $W/2R=3,5$; 6-для $W/2R=2,5$; 7-для $W/2R=2$

Таким образом, увеличение интенсивности солнечного облучения теплонагревательной поверхности за счет прямой и диффузионной радиации позволят повысить К.П.Д. работы реакторов, что важно для снижения

себестоимости как самих аппаратов, так и в целом всей гелиоэнергетической установки.

По результатам проведенных аналитических исследований были получены расчетные оптограммы для расчета геометрических параметров данных концентраторов и номограммы для анализа концентрической способности методом оценки оптического и оптико-энергетического коэффициентов по методике [45].

Оптимальные углы раскрытия зеркал составляют 35° - 55° . В этом случае оптический коэффициент варьируется от 3,2 до 5 для круглой поверхности.

1.5 Выводы к первой главе

1. Расчеты теоретического потенциала солнечной энергии для условий внедрения гелиоэнергетической техники, в частности, адсорбционных термотрансформаторов в Республике Казахстан показали, что эффективное их применение возможно в таких регионах, как Кызылордынская, Шымкентская, Джамбульская, Мангистрауская, Атырауская областях.

2. Обзор российских и зарубежных исследований показал, что существуют работы, связанные с разработкой и исследованием адсорбционных гелиоэнергетических холодильных установок, работающих на таких сорбентах, как активированный уголь и сопутствующие ему материалы на основе использования активированного угля. Адсорбентами могут являться аммиак, метанол, этанол, метиламин, этиламин и другие вещества. В настоящее время активно применяются в холодильных установках на основе адсорбционных термотрансформаторов такие рабочие пары, как активированный уголь-аммиак и активированный уголь-метанол.

3. Работа гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа на таких хладагентах, как аммиак, несмотря на хорошие термодинамические свойства аммиака, имеет ряд недостатков, связанных с эксплуатационными характеристиками, прежде всего с большими рабочими давлениями в конденсаторах в режимах работы холодильных

установок и с большими давлениями в адсорберах при работе в режимах тепловых насосов. А это, в свою очередь, требует высокопрочного оборудования и связано с большими утечками адсорбата. Работа термотрансформаторов на рабочей паре активированный уголь-метанол связана с глубоким вакуумированием и трудностью удержания его (вакуума) в установках средней и крупной производительности. Поэтому поиск новых рабочих пар для гелиоэнергетических термотрансформаторов является важной задачей.

4. Анализ некоторых конструкций экспериментальных гелиоэнергетических холодильных установок и конструктивных элементов для них показал, что основным гелиоэнергетическим аппаратом является совмещенная конструкция генератора-адсорбера с реактором, установленным, как правило, в концентраторах; имеется ряд работ, связанных с определением оптимального размера диаметра реактора и ребер, с оптимизацией геометрических параметров концентраторов солнечной энергии, с исследованием эффективности работы термодинамических циклов.

Однако комплексных исследований генератора-адсорбера и его основных элементов (реактора, концентраторов, теплоизоляционных элементов, теплоэнергетических потоков и температурных градиентов внутри реактора) не проводились в различных рабочих режимах.

5. Применение новых рабочих хладагентов и адсорбентов требует создание оценивающего эффективность работы холодильной установки механизма, которым может быть расчетная математическая модель, позволяющая раскрыть особенности работы всей установки

6. При однократном облучении круглой поверхности плоскими зеркалами наиболее оптимальными значениями сочетания геометрических параметров концентраторов и реактора можно считать в диапазоне от $W/\pi \cdot R=3,5$ до $W/2R=3,5$.

Глава 2. РАЗРАБОТКА ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ГЕНЕРАТОРА-АДСОРБЕРА

2.1 Разработка и описание конструктивных решений разрабатываемой экспериментальной гелиоэнергетической холодильной установки

Разработана конструкция гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора циклического действия адсорбционного типа. Основной отличительной особенностью разработанной конструкции по сравнению с известными схемными решениями гелиоэнергетических термотрансформаторов является сильно развитая часть гелиоприемного устройства и применение теоретически обоснованных оптимально спроектированных плоских зеркальных концентраторов и реактора генератора-адсорбера совмещенной конструкции, выполненного двумя параллельными компоновками каждого аппарата в индивидуальных теплоизолирующих каркасах типа «горячий ящик». Это позволяет сократить объем воздушного пространства между прозрачной поверхностью и внутренними стенками каркаса, в котором могут формироваться нежелательные конвективные потоки, из-за которых снижается нагрузка на реактор; установка по оптимальным параметрам реактора и концентраторов в одном устройстве приводит к увеличению интенсивности нагрева за счет централизованного фокусирования солнечной энергии; снижение площади прозрачного покрытия, уменьшает потери теплоты через него, а установление вакуумного стеклопакета, может их значительно сократить.

На рисунке 2.1 представлена схема экспериментальной гелиоэнергетической холодильной установки. Она состоит из ряда известных аппаратов (описание аппаратов в главе 3) и работает по циклическому принципу: днем в реакторах генератора идет процесс десорбции с выделением из адсорбента паров хладагента; ночью в реакторах адсорбера идет процесс адсорбции с поглощением хладагента сорбентом, при этом в испарителе кипит хладагент, производя эффект охлаждения в изолированной камере. Охлажденный до температуры окружающей среды хладагент

из ресивера при помощи регулирующего вентиля подается в испаритель.

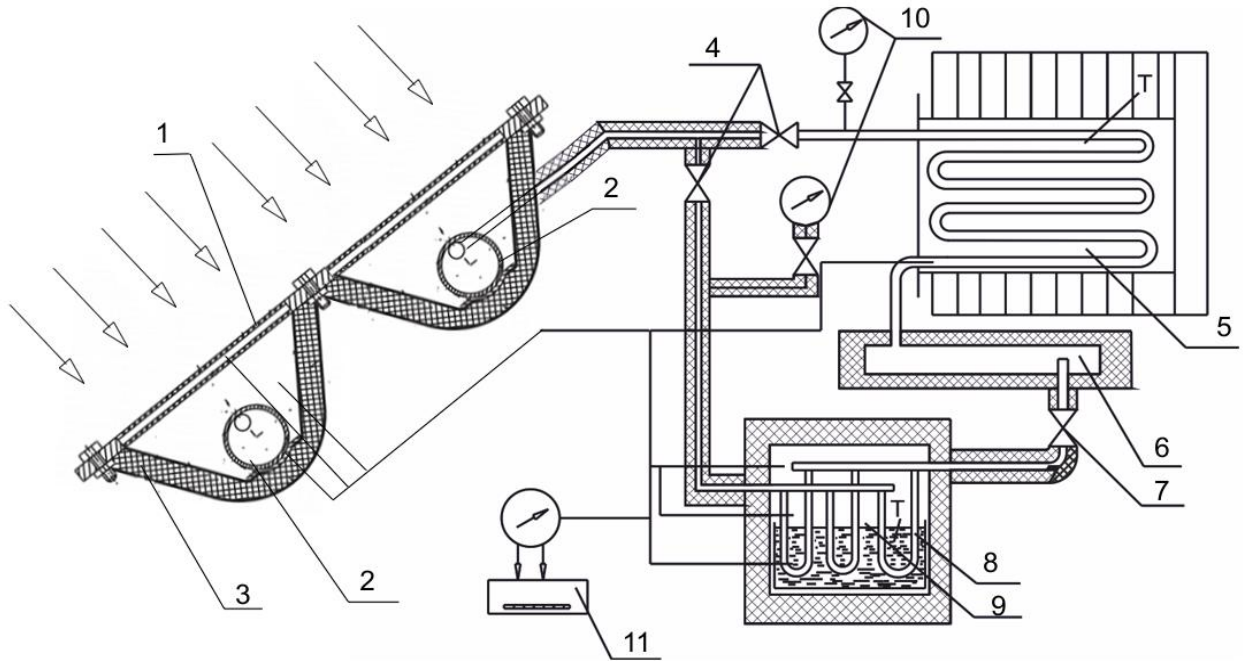


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной гелиоэнергетической холодильной установки:

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.

Анализ энергетических характеристик и конструктивных особенностей гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов циклического действия позволил выделить несколько задач, связанных с повышением эффективности их работы. Прежде всего, интенсификация процессов преобразования энергии солнечной радиации в гелиоприемных устройствах в полезную теплоту, идущую на реактор, в котором осуществляется изостерический процесс нагрева и десорбции хладагента из адсорбента. Далее, интенсификация теплофизических процессов адсорбции сорбентами хладагентов в реакторах генератора-адсорбера с целью полного использования объема адсорбционного пространства. Разработка эффективной конструкции реактора, способного интенсифицировать тепломассообменные процессы в них.

Совершенствование термодинамической эффективности работы гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов при нестационарных режимах протекания в установках процессов за счет поиска и применения новых рабочих пар (сорбента и хладагента).

2.2 Моделирование гелиоприемного устройства как элемента конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки по оптическим параметрам

Гелиоэнергетическая холодильная установка адсорбционного типа циклического автономного действия может устанавливаться на объектах, значительно удаленных от сетей электропередачи в засушливых районах пустыни Кара-Кум, на пастбищах скотоводов, в горных районах предгорья Алатау, стационарных островных и береговых объектах Каспийского и Аральского морей. Они могут быть использованы для получения охлажденной питьевой воды, кондиционирования и охлаждения помещений, замораживания скоропортящейся продукции, хранения медикаментов и других нужд.

В гелиоэнергетических холодильных установках адсорбционного типа [2, 5, 15] одним из важных аппаратов установки является генератор-адсорбер совмещенной конструкции, реакторы которых заключены в гелиоприемное устройство типа «горячий ящик». В реакторы засыпан твердый адсорбент, например, активированный уголь (АС). Днем под действием энергии солнечной радиации в «горячем ящике» наружные поверхности реакторов нагреваются, передается теплота насыщенному адсорбенту и, начиная с определенной критической температуры, происходит выделение адсорбата (хладагента), например, аммиака, из адсорбента: начинается физический процесс десорбции (отделение молекул аммиака от активированного угля и движение газообразной фазы в конденсатор для сжижения). Это время работы термотрансформатора называется периодом регенерации. В ночное время при охлаждении адсорбента АС в реакторах начинается поглощение аммиака из испарителя: обратный физический процесс адсорбции – период зарядки [75, 126].

Эффективность работы гелиоэнергетической холодильной установки циклического действия во многом зависит от работы именно этого аппарата – генератора-адсорбера. Анализ и исследование известных по иностранной литературе конструкций генераторов-адсорберов гелиоэнергетических термотрансформаторов выявил некоторые их недостатки при работе, особенно в северных широтах Земли: недостаток теплоты (в отдельные дни) для полного нагрева всей массы рабочего вещества в реакторах установки при суточном освещении солнцем и, как правило, достижения низких температур в отдельных точках объема насыпной массы адсорбента; большой объем воздуха между прозрачной оболочкой поверхности «горячего ящика» и наружными поверхностями стенок реакторов, способного формировать нежелательные конвективные потоки масс воздуха, снижая тепловую нагрузку на поверхность реакторов, чем больше элементов реакторов в одной конструкции «горячего ящика», тем хуже эффективность его работы; применение много стекольных покрытий и утолщение изоляции в целом увеличивает стоимость аппарата, но не всегда достигается оптимальный эффект; конструкции самих реакторов требуют совершенства для эффективного протекания физических процессов десорбции с подводом теплоты к насыщенному адсорбенту и выделения газообразного аммиака и процессов адсорбции с отводом теплоты при образовании насыщенного адсорбента, связанного с поглощением газообразного аммиака АС и реакцией выделения теплоты.

Сначала рассмотрим основы конструирования оптической части генератора-абсорбера гелиоэнергетической холодильной установки.

Методики расчета и анализ эффективности оптических характеристик гелиоприемных устройств с плоскими зеркальными концентраторами на различные формы адаптирующих поверхностей были рассмотрены авторами в работах [14, 65].

На рисунке 2.3 представлены соотношения оптического моделирования конструкции генератора-адсорбера. В основу моделирования оптической части положено два принципа: первый - угол падения солнечного луча на зеркальную

поверхность полностью отражается и угол падения равен углу отражения луча; второй – вся энергия солнечного луча (прямого и отраженного) падающая на адаптирующую поверхность целиком поглощается. Гелиоприемное устройство генератора-адсорбера представляет удлиненную конструкцию (на рисунке представлен профиль конструкции), состоящую из плоских зеркальных поверхностей, имеющих определенный угол раскрытия θ (град.) и расположенных симметрично относительно центральной плоскости.

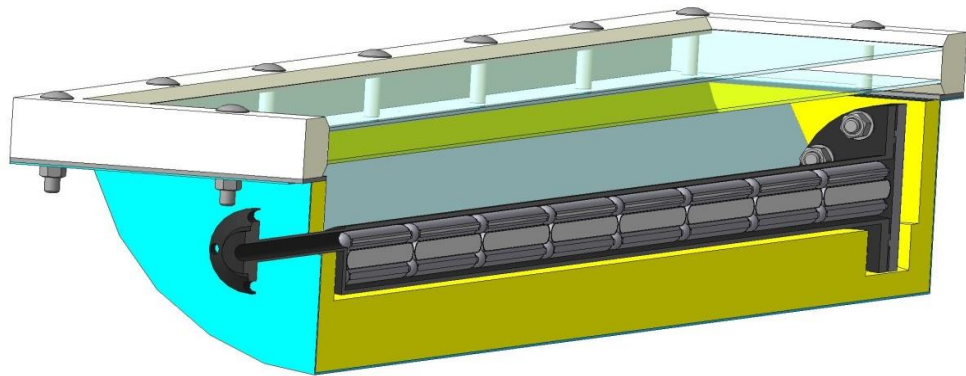


Рисунок 2.2 – Модель генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки

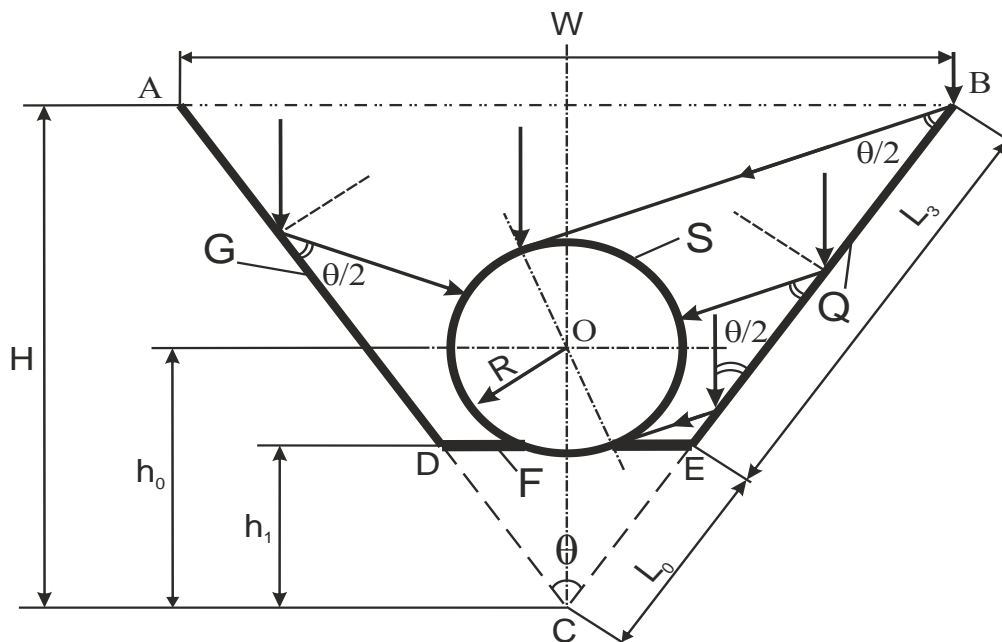


Рисунок 2.3 – Моделирование оптической части конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки.

В симметричной части зеркал устанавливается круглая трубка корпуса реактора с наружным радиусом R (мм). Ширина раскрытия зеркал W (мм). Полная длина конструкции аппарата l (мм). Q и G (мм²) – поверхности зеркал, отражающих солнечные лучи. S (мм²) – поверхность трубки цилиндрического реактора, адаптирующая солнечное излучение. F (мм²) – поверхность металлической подложки, адаптирующей солнечное излучение. На основании анализа концентрической эффективности солнечного облучения круглой поверхности в плоских зеркалах при соотношении $W/\pi \cdot 2 \cdot R = 3,5$ был выбран угол раскрытия зеркал θ град. Длина зеркал L_3 рассчитана таким образом, чтобы при перпендикулярном облучении концентраторов (вдоль оси симметрии аппарата) и при однократном отражении лучей от верхней до нижней кромки поверхностей G и Q солнечные лучи полностью попадали на внешнюю поверхность S реактора. При таких условиях и перпендикулярном освещении солнцем цилиндрическая конструкция корпуса реактора будет иметь трехкратное облучение энергией солнечной радиации. Кроме того, нижняя подложка DE с поверхностью F работает как прямое ребро и передает дополнительную теплоту на нижнюю часть реактора при хорошем контакте с корпусом. Тогда основные элементы конструкции аппарата можно выразить через соотношения радиуса реактора R и фиктивного угла раскрытия зеркал θ .

$$W = 3,5 \cdot \pi \cdot R \quad (2.1)$$

$$L_3 = 3 \cdot 3,5 \cdot \pi \cdot R \cdot [4 \sin(\theta/2)] \quad (2.2)$$

$$L_0 = 3,5 \cdot \pi \cdot R \cdot [8 \sin(\theta/2)] \quad (2.3)$$

$$H = 3,5 \cdot \pi \cdot R \cdot [2 \operatorname{tg}(\theta/2)] \quad (2.4)$$

$$h_1 = 3,5 \cdot \pi \cdot R \cdot [4 \operatorname{tg}(\theta/2)] \quad (2.5)$$

2.3 Моделирование генератора-адсорбера совмещенной конструкции с гелиоприемным устройством по способу теплоэнергетического баланса

На основании оптических параметров моделирования и баланса энергетических потоков разработана теплоэнергетическая модель конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора, профиль

конструкции которого представлен на рисунке 25. Конструкция трапецевидальной формы имеет прочный металлический корпус 1 и изоляцию 2 с пяти сторон (торцевые стороны конструкции не показаны), зеркальные отражатели 3, внутренний стальной корпус реактора 4 с заполненным внутри активированным углем 5, двухстекольное покрытие 6 со стороны облучения солнцем и металлическую подложку под реактором 7.

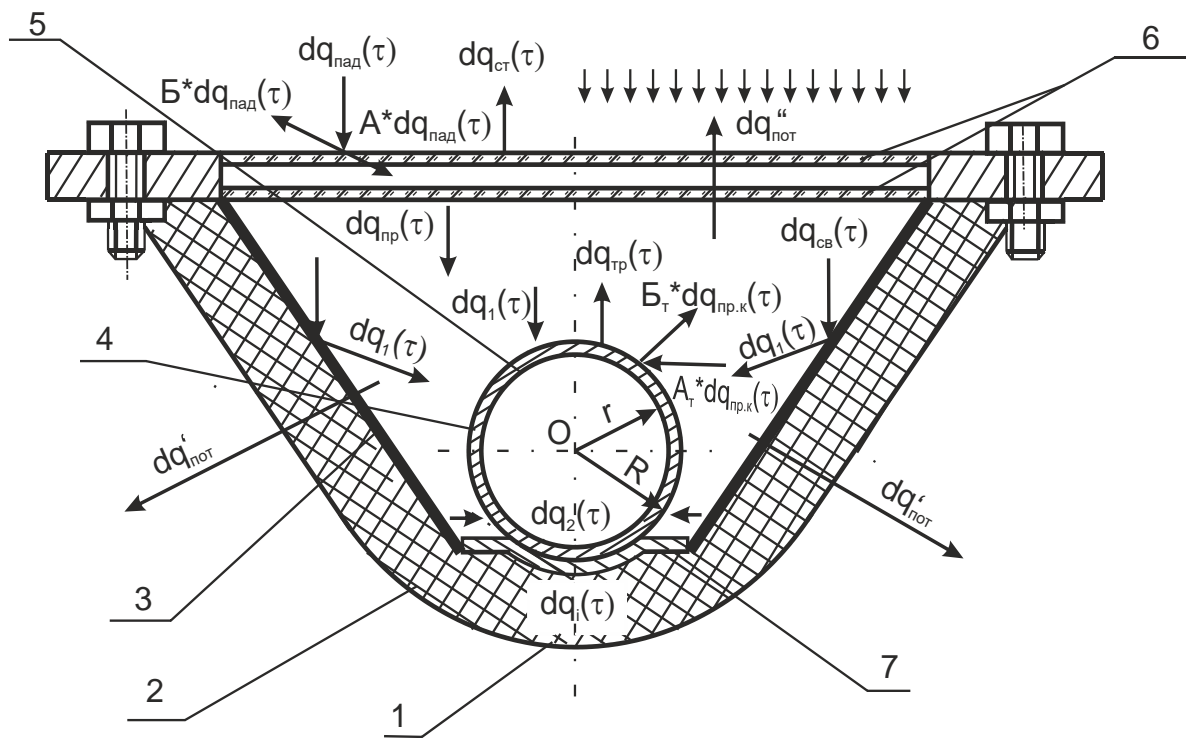


Рисунок 2.4 – Модель генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки

1 – корпус элемента гелиоприемника, 2 – изоляция корпуса, 3 – плоские зеркальные отражатели, 4 – наружный корпус реактора, 5 – адсорбент (активированный уголь), 6 – двухстекольное покрытие, 7 – металлическая подложка

Тепловой поток, падающий на остекленную оболочку генератора-адсорбера, выполненного по типу конструкции «горячего ящика», выражается следующим уравнением:

$$Q_{na\delta}(\tau) = \sum dq_{na\delta}(\tau) = \sum (dI_{\text{д}}(\tau) \cdot \cos i + dI_{\text{д}}(\tau)) \cdot W \cdot l \quad (2.6)$$

где $Q_{na\delta}$ – мощность полной падающей солнечной энергии на поверхность гелиоприемника за время облучения в течении светового дня (Вт), $dq_{na\delta}(\tau)$ – мощность падающей солнечной энергии за конкретный промежуток времени ($\tau = 1$ час); l – длина реактора генератора-адсорбера, м; $dI_{\text{д}}(\tau)$ – мощность потока прямого солнечного излучения, Вт/м²; $dI_{\text{д}}(\tau)$ – мощность потока диффузионной солнечной радиации, Вт/м²; $\cos i$ – коэффициент перевода потока солнечной энергии на перпендикулярную к гелиоприемнику поверхность [67].

$$\cos i = \cos(90 - \varphi + \mu) \cdot \sin \delta + \sin(90 - \varphi + \mu) \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau \quad (2.7)$$

где i – угол падения солнечных лучей на перпендикулярную поверхность гелиоприемника, град.; φ – угол широты местности, град.; μ – угол наклона поверхности гелиоприемника к горизонту земли, град.; δ – угол склонения солнца (функция времени года, по астрономическому календарю), град; τ – часовой угол движения солнца, град.

Тогда тепловой поток в единицу времени, проходящий через остекленную оболочку в «горячий ящик», будет выражаться уравнением

$$dq_{np}(\tau) = K_{nz} \cdot K_{nn} \cdot [dq_{na\delta}(\tau) - dq_{na\delta}(\tau) \cdot A - dq_{na\delta}(\tau) \cdot B - \varepsilon_{cm} \cdot c_0 \cdot (T_{cm}(\tau)/100)^4] \quad (2.8)$$

где K_{nz} , K_{nn} – соответственно коэффициент потери энергии при прохождении потока солнечной радиации от запыленности стекла и коэффициент потери энергии из за двух стекольного покрытия в конструкции «горячего ящика»; A , B – соответственно коэффициенты поглощения и отражения солнечной энергии от стекла; $\varepsilon_{cm} c_0 (T_{cm}(\tau)/100)^4$ – собственное излучение стекла по формуле Стефана-Больцмана, Вт; ε_{cm} – степень черноты стекла; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{cm}(\tau)$ – абсолютная температура стекла в единицу времени, К.

Количество солнечной энергии, падающей на поверхность трубки корпуса реактора, будет складываться из следующих составляющих: энергии от потока на видимую часть трубки; энергии отраженного потока от плоских зеркальных концентраторов; энергии от нижней подложки под цилиндрическим реактором.

Следует учесть, что проходящая в «горячий ящик» солнечная энергия расходуется также на подогрев элементов конструкции генератора-адсорбера (металлических частей, изоляционного материала конструкции «горячего ящика», зеркал и т.п.), воздуха в замкнутом объеме и потери через внешние стенки «горячего ящика» (как изолированные поверхности, так и верхнюю остекленную часть) за счет разности температур нагретых элементов аппарата и температуры внешней окружающей среды, причем эти потери сильно зависят от внешних условий: от скорости обдувания внешней поверхности корпуса ветром и направления ветра, от толщины и качества изоляции, от толщины и количества стекол гелиоприемного устройства, от влажности.

Энергию на подогрев элементов конструкции генератора-адсорбера можно определить так:

$$dq_i(\tau) = \sum m_i \cdot c_{ii} \cdot \Delta t_i \quad (2.9)$$

где m_i - масса соответствующего материала i – элемента конструкции (кг); c_{ii} – удельная тепловая инерция материала, равная $c_{ii} = c_i/\tau$, (Дж/кг·°С·с); c_i - теплоемкость материала i – элемента конструкции; Δt_i – темп роста температуры i – элемента конструкции за период времени τ .

Энергию на подогрев воздуха в замкнутом объеме гелиоприемника можно определить по следующей формуле:

$$dq_{np}(\tau) = 0,9 \cdot \left[4 \cdot \varepsilon_g \cdot c_0 \cdot V / H \cdot (dT_{cp.g}(\tau)/100)^4 \right] \quad (2.10)$$

где $dq_{cb}(\tau)$ – собственное поглощение энергии воздухом в единицу времени, Вт; $V = \left\{ 12,25 \cdot r^2 \cdot [tg(\theta/2)] - \pi \cdot r^2 - r^2/\sin(\theta/2) \cdot l \right\} \cdot l$ – объем воздуха в замкнутом пространстве «горячего ящика», м³; $H = 3,5 \cdot r \cdot tg(\theta/2)$ – толщина воздушного слоя, м; $dT_{cp.g}(\tau)$ – средняя абсолютная температура воздуха внутри «горячего ящика» в единицу времени, К; ε_g – степень поглощения (черноты) воздуха.

Определим энергию потерь из «горячего ящика» в окружающее пространство через изолированную поверхность и стекло. Условно считаем, что элемент конструкции гелиоприемника имеет:

верх площадью, $m^2(W \cdot l)$

дно площадью, $m^2 M_{\text{дна}} = l \cdot \{[3,5 \cdot r \cdot \text{tg}(\theta/2) - r/\text{tg}(\theta/2)] \cdot \pi \cdot [90 - (\theta/2)]/180\}$

две боковые стенки общей площадью, $m^2 2 \cdot L_s \cdot l$

два торца площадью, m^2

$$T_{\text{тор}} = 2 \cdot [(2 \cdot r + 2 \cdot \delta_{\text{уз}}) \cdot (H - h_1) + (2,5 \cdot r + \delta_{\text{уз}}) \cdot 2 \cdot (H - h_1) + \pi \cdot r^2 \cdot (1/2 - \theta/360) - r^2]$$

тогда

$$dq'_{\text{нр}}(\tau) = K' \cdot (M_{\text{дна}} + 2 \cdot L_s \cdot l + T_{\text{тор}}) \cdot [dT_{\text{ср.в.}}(\tau) - dT_{\text{нар}}(\tau)] \quad (2.11)$$

$$dq''_{\text{нр}}(\tau) = K'' \cdot W \cdot l \cdot [dT_{\text{ср.в.}}(\tau) - dT_{\text{нар}}(\tau)] \quad (2.12)$$

где $dq'_{\text{ном}}(\tau)$ – потери тепла через изолированные элементы конструкции генератора-адсорбера в единицу времени, Вт; $dq''_{\text{ном}}(\tau)$ – потери тепла через элемент остекления конструкции «горячего ящика» в единицу времени, Вт; K' , K'' – соответственно коэффициенты теплопередачи через элементы изолированной конструкции и стекло, Вт/м²К; $dT_{\text{нар}}(\tau)$ – изменение температуры наружного воздуха в единицу времени, К.

$$K' = 1 / [(1/\alpha_{\text{в}}) + (\delta_{\text{уз}}/\lambda_{\text{уз}}) + (1/\alpha_{\text{нар}})],$$

$$K'' = 1 / [(1/\alpha_{\text{в}}) + R_0 + (1/\alpha_{\text{нар}})],$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{нар}}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи от внутренней и наружной поверхности плоской конструкции «горячего ящика», (Вт/м²К); $\delta_{\text{уз}}$, $\lambda_{\text{уз}}$ – соответственно толщины (м) и коэффициенты теплопроводности (Вт/м·К) изоляции (м); R_0 – тепловое сопротивление стеклопакета из ПВХ конструкции (м²·°С/Вт); $\alpha_{\text{в}} = \text{const}$ – можно считать величиной постоянной; $\alpha_{\text{нар}}$ – зависит от условий внешней среды и ее можно рассчитать по уравнению [30].

При умеренном и сильном ветре

$$\alpha_{\text{нар}} = 0,0296 \cdot \lambda_{\text{нар}} \cdot \text{Re}_{\text{в}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{в}}^{0,43} \cdot (\text{Pr}_{\text{в}}/\text{Pr}_{\text{см}})^{0,25} / l',$$

где $\lambda_{нар}$ – коэффициент теплопроводности наружного воздуха, Вт/м К; l' – параметр конструкции «горячего ящика», обдуваемого ветром, м; $Re_{\epsilon} := (\omega_{\epsilon} \cdot l') / \nu_{\epsilon}$ – критерий Рейнольдса; ω_{ϵ} – скорость ветра, м/с; ν_{ϵ} – коэффициент кинематической вязкости наружного воздуха, м²/с; $Pr_{\epsilon} := \nu_{\epsilon} / a_{\epsilon}$ – критерий Прандтля для воздуха при наружной температуре, Pr_{cm} – критерий Прандтля для воздуха при температуре наружной поверхности «горячего ящика»; a_{ϵ} – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

Тогда доля полезного тепла, проходящего в «горячий ящик» и идущего на обогрев корпуса реактора, будет с одной стороны равна:

$$dq_{np.k}(\tau) = dq_{np}(\tau) - dq_{cv}(\tau) - dq'_{nom}(\tau) - dq''_{nom}(\tau) - dq_i(\tau) \quad (2.13)$$

С другой стороны, на корпус реактора, как отмечалось выше, подводится тепло 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.

$$dq_1(\tau) = [dq_{np.k}(\tau) - A_m \cdot dq_{np.k}(\tau) - B_m \cdot dq_{np.k}(\tau)] \quad (2.14)$$

где A_m , B_m – соответственно коэффициенты поглощения и отражения солнечной энергии от трубки.

$$dq_2(\tau) = \left[dq_{2p}(\tau) + K \cdot dq_{np.k}(\tau) \frac{R \cdot l}{w \cdot l} \right] \quad (2.15)$$

где $dq_{2p}(\tau)$ – теплота, передаваемая через подложку, как ребро и равную [30]:

$$dq_{2p}(\tau) = \lambda_m \cdot \delta_0 \cdot m \cdot dT_0(\tau) \cdot th(m \cdot b) \cdot F_{очн} \quad (2.16)$$

где λ_m , λ_0 , δ_m , δ_0 , R , r – соответственно коэффициент теплопроводности материала трубы и металлической подложки, (Вт/м·К), толщины трубы и соответственно подложки, внешний и внутренний радиусы трубы, (м); T_0 – температура у основания подложки (°C), $F_{очн}$ – площадь основания ребра (м²).

$m = [2 \cdot \alpha / (\lambda_0 \cdot \delta_0)]^{0.5}$ – комплекс теплофизических переменных, α – коэффициент теплоотдачи от металлической подложки конвекцией (Вт/м²·К); $b = 2 \cdot R$ – длина ребра, м.

$th(m \cdot b) = [e^{(m \cdot b)} + e^{-(mb)}] / [e^{(m \cdot b)} - e^{-(mb)}]$ - функция гиперболического тангенса, число $e=2,7183$.

$\left[K \cdot dq_{np.k}(\tau) \frac{R \cdot l}{w \cdot l} \right]$ - теплота передаваемая через подложку трубке из радиационного облучения теплопроводность, K – коэффициент корреляции неучтенного сопротивления контакта; $\left[\frac{R \cdot l}{w \cdot l} \right]$ - доля тепловой энергии поступающей на подложку.

При высоких температурах наружной стенки трубы следует учитывать собственное излучение ее поверхности, равное

$$dq_{cm}(\tau) = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l \cdot \varepsilon_m \cdot c_0 \cdot (dT_m(\tau)/100)^4 \quad (2.17)$$

Тогда суммарное полезное тепло, передаваемое насыщенному адсорбенту, будет равно

$$dq_{пол}(\tau) = dq_1(\tau) + dq_2(\tau) - dq_{cm}(\tau) \quad (2.18)$$

Полное полезное тепло, передаваемое реактору генератора-адсорбера за световой день от 6 часов утра до 18 часов вечера, будет равно

$$Q_{пол} = \sum Q_{пол}(\tau) / T \quad (2.19)$$

где T – время периода работы генератора-адсорбера .

Полезная тепловая нагрузка идет на процесс нагрева насыщенного адсорбентом адсорбата и на процесс десорбции.

Для расчета полезных тепловых нагрузок, воспринимаемых реактором генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора, на основании приведенных формул (2.1 – 2.18) была разработана расчетная программа в программе Mathcad. Программа расчета в приложении.

Исходные данные для программы были получены экспериментально и собраны из справочной литературы [61].

Замеры солнечной прямой и диффузионной радиации замерялись как непосредственно на полигоне около гелиоэнергетической холодильной установки приборами соответственно актинометром АТ-50 и пиранометром ПП-1 в блоке с гальванометром ГСА-1М ежечасно во время безоблачного солнечного дня по

методике [56] и сравнивались с показаниями полученными на АИК (Актинометрическом измерительном комплексе) «Тайфун» Астраханской гидрометеорологической станции, расположенной в городской черте, недалеко от полигона.

Замеры проводились с 06.00 до 18.00 солнечного времени (приложение К).

В качестве исходных данных: dI_d – 495; 506; 538; 546; 598; 602; 627; 614; 612; 598; 588; 548; 504 - значения прямой солнечной радиации, $Вт/м^2$; dI_d – 87; 89; 91; 93; 95; 97; 98; 96; 94; 92; 90; 87; 85 - замеры диффузионной радиации, $Вт/м^2$; $l = 1,6$ – длина трубы реактора, м; $b = 0,34$ – высота до остекления, м; $n = 1$ – количество труб; $h = 0,2$ – высота до центра трубы реактора, м; $d_{вн} = 0,07$ – внутренний диаметр, м; $d_{нар} = 0,076$ – наружный диаметр, м; W – ширина остекления горячего ящика, м; $t_{вн} = 30,2; 35,4; 40,8; 55,4; 60,4; 62,6; 62,8; 62,6; 60,4; 59,4; 58,9; 58,8; 58,6$ – внутренняя температура, $^{\circ}C$; $t_{нар} = 26,2; 27; 29,4; 31,3; 32,6; 33,8; 34,2; 34,2; 34,2; 34,1; 34; 34; 39,8$ – наружная температура, $^{\circ}C$; $t_{ст} = 32,4; 35,2; 44,6; 56,4; 66,2; 70,8; 71,6; 71,4; 70,6; 69,4; 68,0; 64,3; 63,8$ – температура стекла, $^{\circ}C$; $t_{тр} = 36,8; 43,4; 48,4; 54,8; 61,2; 63,3; 64,6; 64,8; 63,9; 62,6; 60,8; 59,0; 58,4$ – температура трубки реактора, $^{\circ}C$; $\theta = 55^{\circ}$ - угол раскрытия зеркал; $\Phi = 46^{\circ}$ - угол широты местности; $\mu = 30^{\circ}$ - угол наклона коллектора; $\delta = 20^{\circ}$ - угол склонения солнца; $\tau = 90^{\circ}; 75^{\circ}; 60^{\circ}; 45^{\circ}; 30^{\circ}; 15^{\circ}; 0^{\circ}; 15^{\circ}; 30^{\circ}; 45^{\circ}; 60^{\circ}; 75^{\circ}; 90^{\circ}$ - часовой угол солнца; $dI_{п} = 495; 506; 538; 546; 598; 602; 627; 612; 614; 598; 588; 548; 504$ - прямая радиация, $Вт/м^2$; $dI_d = 87; 89; 91; 93; 95; 97; 98; 96; 94; 92; 90; 87; 85$ – диффузионная радиация, $Вт/м^2$; $A_{ст} = 0,03$ – коэффициент отражения стекла; $\rho_{ст} = 2,5 \cdot 10^3$ – плотность стекла, $кг/м^3$; $c_{р.ст} = 0,83 \cdot 10^3$ – теплоемкость стекла, $Дж/(кг \cdot K)$; $V_{ст}$ – объем стекла, $м^3$; $\lambda_{ст} = 0,74$ – теплопроводность стекла, $Вт/(м \cdot K)$; $\delta_{ст} = 0,004$ – толщина стекла, м; $\rho_{зер} = 2,5 \cdot 10^3$ – плотность зеркала, $кг/м^3$; $c_{р.зеркала} = 0,83 \cdot 10^3$ – теплоемкость зеркала, $Дж/(кг \cdot K)$; $V_{зеркала} = 0,0064$ – объем зеркала, $м^3$; $\rho_{из} = 40$ – плотность изоляции, $кг/м^3$; $c_{р.из} = 1,34 \cdot 10^3$ – теплоемкость изоляции, $Дж/(кг \cdot K)$; $V_{из}$ – объем изоляции, $м^3$; $\Delta t_{ст} = 2,4; 9,4; 11,8; 9,8; 4,6; 0,8; 0,2; 0,8; 1,2$;

1,4; 3,7; 1,5; 2,4 – разность температуры стекла между часовым замером, °С; $\Delta t_{\text{зеркала}} = 0,8; 7,2; 10; 9,4; 6,7; 1,3; 0,1; 0,2; 0,9; 1,0; 3,9; 2,1; 1,9$ – разность температуры зеркал между часовым замером, °С; $\Delta t_{\text{изоляция}} = 5,8; 5,7; 6,1; 6,4; 3,2; 0,4; 0,2; 0,8; 1,4; 1,9; 2; 0,7; 1,1$ – разность температуры изоляции «горячего ящика» между часовым замером, °С; $\Delta t_{\text{труб}} = 6,6; 5,0; 6,4; 6,4; 2,1; 1,3; 0,2; 0,9; 1,3; 1,8; 1,8; 0,6; 1,2$ – разность температуры трубы реактора между часовым замером, °С; $\Delta t_{\text{подл}} = 5,8; 4,4; 7,2; 6,5; 2,1; 1,2; 0,7; 1,9; 0,4; 1,4; 1,4; 1,8; 0,4$ – разность температуры подложки реактора между часовым замером, °С; $B_{\text{ст}} = 0,02$ – коэффициент поглощения солнечной энергии; $R_0 = 0,45$ – тепловое сопротивление стеклопакета из ПВХ, $\text{м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$; $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,92$ – степень черноты стекла; $c_0 = 5,67 \cdot 10^8$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$; $K_{\text{пз}} = 0,94$ – коэффициент потери энергии при прохождении потока солнечной радиации от запыленности стекла; $K_{\text{пп}} = 0,604$ – коэффициент потери энергии при прохождении потока солнечной радиации от двухстекольного покрытия в конструкции «горячего ящика»; $\delta_{\text{из}} = 0,05$ – толщина изоляции, м.; $a_{\text{вз}} = 21,9 \cdot 10^6; 21,9 \cdot 10^6; 21,9 \cdot 10^6; 22,1 \cdot 10^6; 21,9 \cdot 10^6; 22,4 \cdot 10^6; 22,4 \cdot 10^6; 22,4 \cdot 10^6; 22,4 \cdot 10^6; 21,9 \cdot 10^6$; – температуропроводность воздуха, $\text{м}^2 / \text{с}$.

Расчетная программа приведена в приложении АБ.

На рисунке 2.5 показано изменение полезной тепловой нагрузки на реактор генератора-адсорбера в течении светового времени с 06.00 до 18.00 часов. Обработка графиков в Excel по полиномиальной зависимости линии тренда дает следующие выражения:

$$y_1 = - 0,0045x^6 + 0,1926x^5 - 2,9826x^4 + 19,698x^3 - 51,346x^2 + 81,498x - 16,101$$

$$R^2 = 0,9938 \text{ – величина достоверности и аппроксимации;}$$

$$y_2 = - 0,0042x^6 + 0,1789x^5 - 2,7645x^4 + 18,199x^3 - 47,155x^2 + 75,329x - 9,5227$$

$$R^2 = 0,994 \text{ – величина достоверности и аппроксимации.}$$

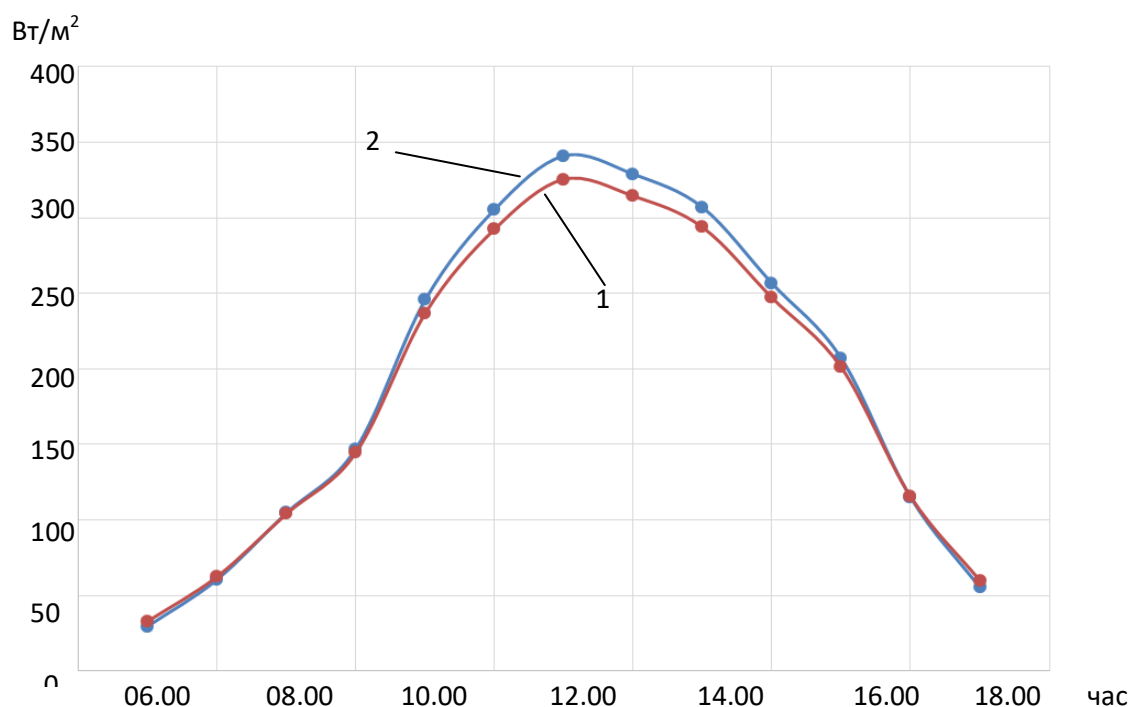


Рисунок 2.5 – Значения расчетных полезных нагрузок на реактор генератора-адсорбера: 1- по первому способу; 2- по второму способу.

Как видно из графиков совпадение результатов весьма удовлетворительное.

Расчетные значения полезной тепловой нагрузки по разработанной программе, были проверены экспериментально на собранном стенде, представляющем конструкцию генератора-адсорбера. Замеры солнечной радиации определялись по показаниям пиранометра и актинометра, температуры поверхностей корпуса реактора, стекол и других элементов – хромель-копелевыми термопарами с цифровым вольтметром, параметры теплоносителей термометрами (подробности в главе 3).

Полезная тепловая нагрузка в эксперименте за контрольный промежуток времени определялась по следующей формуле

$$dq'_{пол}(\tau) = G_{жс} \cdot c_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot (T_{вых} - T_{вх}) \cdot d\tau \quad (2.20)$$

где $G_{жс}$ - объемный расход жидкого теплоносителя, ($\text{м}^3/\text{с}$); $c_{жс}$ - теплоемкость жидкого теплоносителя, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho_{жс}$ - плотность жидкого теплоносителя,

кг/м³; ($T_{вых}, T_{вх}$) - температуры жидкого теплоносителя на входе и выходе в корпус реактора, °С .

Экспериментальные данные с учетом тепловой инерции конструкции хорошо совпадают с расчетными значениями.

2.4 Моделирование реактора генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора

Теперь рассмотрим картину распределения температурного поля и потоков тепловой энергии внутри конструкции реактора, ведь эффективность работы его зависит не только от теплофизических параметров адсорбента и адсорбата, физических процессов адсорбции и десорбции, но и от кинетики протекающих процессов, тепло-массообменных процессов подвода и отвода тепловой энергии к различным участкам насыщенного адсорбента, а это зависит в первую очередь от конструкции реактора.

Реактор – основной элемент генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки, в котором периодически с суточным циклом происходят физико-химические процессы поглощения и выделения адсорбата (хладагента) из адсорбента – процессы адсорбции и десорбции. Он представляет собой конструкцию цилиндрической формы, во внутрь которой засыпан твердый адсорбент (активированный уголь). Существует большое разнообразие конструкций реактора, но наиболее распространенными являются реакторы с круглой трубкой, в которых имеется полый перфорированный хладагент для отвода или подвода газообразного адсорбата. Процессы адсорбции и десорбции протекают неравномерно во времени и пространстве, и в каждой точке реактора сорбент в каждый момент времени может иметь различные температуры, так как насыщение адсорбента адсорбатом разное [43]. К тому же, энергия солнечной радиации изменяется во времени днем, да и ночью температуры окружающей среды изменяются во времени.

Вопросы распределения тепловых потоков, градиентов и полей температур внутри реактора являются важными, это вопросы нестационарного процесса

теплопроводности в трехмерном пространстве. Экспериментально решать такие задачи громоздко и неудобно, поэтому в данном разделе рассматривается математический подход.

При низкой температуре, непостоянных медленных скоростях реакций, слабо изменяющихся во времени коэффициентов теплопроводности и теплоемкости рабочей пары физическая реакция десорбции и адсорбции определяется только параметрами температурного поля и тепловой энергией, подводимой или отводимой. Для упрощения модели процессов в реакторе массоперенос в насыщенном адсорбенте будем считать постоянным на определенном промежутке времени, например, взяв за единицу один час.

Уравнение теплопроводности в пространстве можно описать следующим образом [30]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.21)$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ – коэффициент температуропроводности насыщенной массы рабочей пары; $\lambda = (\lambda_{ад} + \lambda_{сop})/2$ – коэффициент теплопроводности; $c_p = (c_{рад} + c_{рсop})/2$ – теплоемкость вещества; $\rho = (\rho_{ад} + \rho_{сop})/2$ – плотность вещества соответственно массы адсорбата и адсорбента.

тогда
$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2.22)$$

Воспользуемся формулой Остроградского [5], выражение

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.23)$$

может быть представлено дивергенцией векторной функции

$$\vec{T} = X \cdot i + Y \cdot j + Z \cdot k \text{ т.е.} \quad \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.24)$$

Для численного расчета нестационарной теплопроводности воспользуемся нелинейным гармоническим уравнением теплопроводности Фурье. Уравнение в векторной форме представлено следующей формулой:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}[\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)] \pm q^*, \quad (2.25)$$

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).

Рассмотрим двумерный поперечный разрез реактора (рисунок 2.6), пренебрегая краевыми эффектами в торцах конструкции реактора.

Адсорбция и десорбция адсорбата (аммиака) происходит относительно хладопровода, расположенного в середине корпуса реактора. Между внешней стенкой реактора и хладопроводом засыпан адсорбат (активированный уголь). Так как теплопроводность адсорбционной насыщенной массы сорбента обладает анизотропными характеристиками, то упростить уравнение (2.23) возможно устранением вдоль оси корпуса реактора, координаты Z и рассматривать двумерное пространство в живом сечении реактора.

Если ввести полярные координаты температурного поля, то получим:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_r}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda_r}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} + \frac{\lambda_\varphi}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \cdot \frac{1}{r^2} \pm \frac{q^*}{\rho \cdot c_p}. \quad (2.26)$$

Численный расчет выражения (2.26) возможно провести двумя различными способами: методом конечных элементов и методом конечных разностей.

Численный способ решения дифференциального уравнения возможен путем разбиения всего двумерного сечения температурного поля на малые дискретные составляющие элементы. Элемент будет иметь термодинамические и физические унифицированные свойства. Расчетная температура устанавливается в центре элемента и рассматривается как самостоятельный узел.

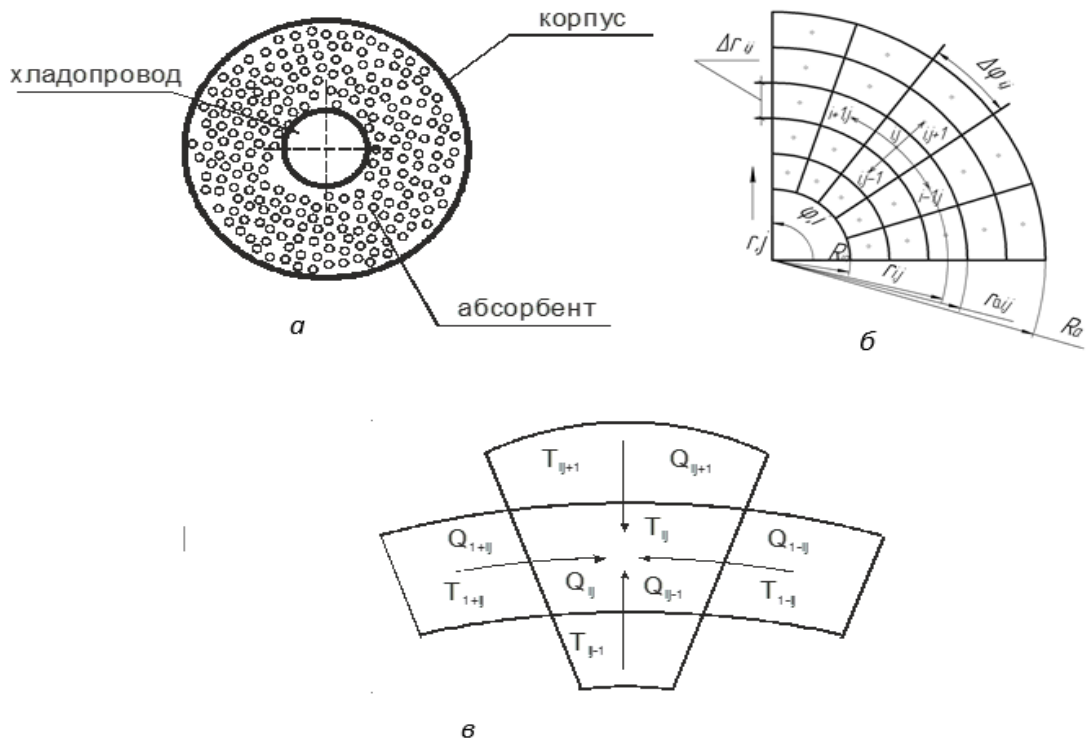


Рисунок 2.6 – Математическая модель реактора генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки:

a – двумерный поперечный разрез; *б* – поперечный разрез в полярных координатах; *в* – энергетический баланс элемента i, j

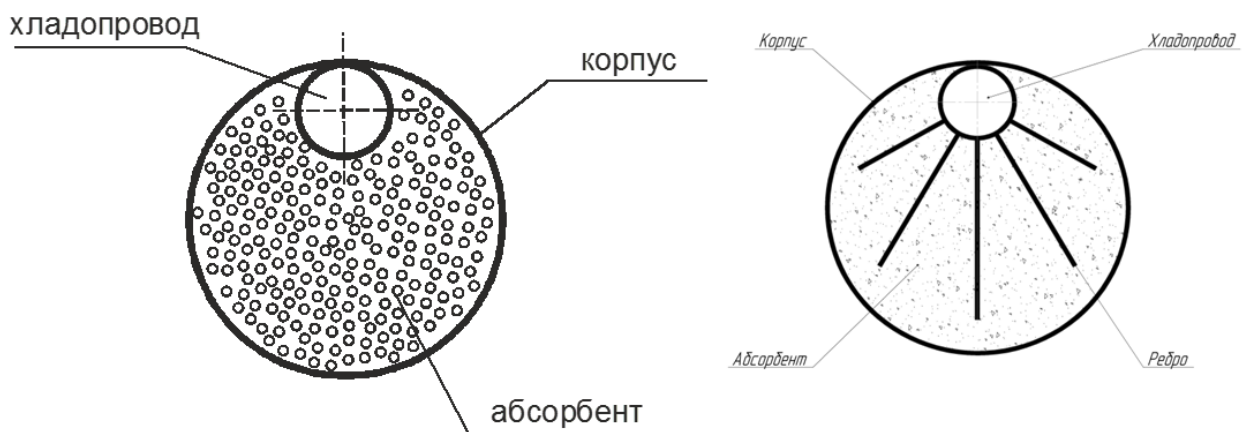


Рисунок 2.7 – Виды конструктивных моделей реактора: со смещенной трубкой хладопровода; со смещенной оребренной трубкой хладопровода

Площадь кольцеобразного сечения с внешним и внутренними радиусами R_a и R_{in} в каждом элементе N получает согласно уравнения (2.27) геометрический ряд, по которому определяется внешний радиус и средний радиус элемента (2.28).

$$r_{a,i,j} = \sqrt{j \cdot \frac{R_a^2 - R_{in}^2}{N} + R_{in}^2}, \quad (2.27)$$

$$r_{i,j} = \frac{r_{a,i,j-1} + r_{a,i,j}}{2}. \quad (2.28)$$

За каждый промежуток времени $\Delta\tau$, начиная с времени начала отсчета τ будем рассчитывать энергетический баланс. Этот тепловой баланс состоит из переноса теплоты из пограничных к стенке корпуса реактора элементов, внутренней теплоты процесса реакции и внутреннего источника поглощения или выделения теплоты до внешней стенки хладопровода (рисунке 2.6 в). При двухмерном способе решения энергетического баланса каждого узла можно определить так:

$$S_{i,j} \rho_{i,j} c_{p,i,j} \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{i,j} = Q_{i+1,j} + Q_{i-1,j} + Q_{i,j+1} + Q_{i,j-1} \pm q_{i,j}^* S_{i,j}. \quad (2.29)$$

Тепловой поток элемента можно определить так

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T \quad (2.30)$$

Узловая температура (с индексом i, j) за время протекания процесса τ_k определяется так:

$$T_{i,j}^k = T(r_j, \varphi_i, t_k).$$

Частную производную в уравнении (2.29) будем аппроксимировать производной первого порядка.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{i,j}^k \approx \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta\tau}. \quad (2.31)$$

Конкретный узел имеет следующие геометрические параметры:

– внешняя дуга:

$$\Delta b_{a,i,j} = \Delta\varphi_{i,j} \cdot r_{a,i,j}, \quad (2.32)$$

– внутренняя дуга:

$$\Delta b_{in_{i,j}} = \Delta \varphi_{i,j} \cdot r_{in_{i,j}} \quad (2.33)$$

– площадь элемента:

$$S_{i,j} = (\Delta \varphi_{i,j} \cdot r_{i,j}) \cdot \Delta r_{i,j} \quad (2.34)$$

Теперь представим уравнение (2.29) как сумму уравнений:

$$\begin{aligned} Q_{i+1,j} &= k_{i+1,j} \cdot \Delta r_{i,j} \cdot (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) \\ Q_{i-1,j} &= k_{i-1,j} \cdot \Delta r_{i,j} \cdot (T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k) \\ Q_{i,j-1} &= k_{i,j-1} \cdot \Delta r_{in_{i,j}} \cdot (T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k) \\ Q_{i,j+1} &= k_{i,j+1} \cdot \Delta r_{a_{i,j}} \cdot (T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Толщину элемента сечения примем за единицу (в уравнении ее не показываем) и допускаем идентичный эффект равномерного распределения по длине реактора в различных сечениях, то есть пренебрежем краевыми эффектами в торцах реактора.

Для упрощения и лучшего восприятия вводим коэффициенты $A_{i,j} \dots D_{i,j}$, содержащие всю геометрическую информацию (информацию о параметрах материала) при переносе теплоты в направлении одной координаты:

$$A_{i,j} = \frac{k_{i+1,j} \cdot (\Delta r_{i,j})}{S_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot c_{p_{i,j}}}; \quad (2.36)$$

$$B_{i,j} = \frac{k_{i-1,j} \cdot (\Delta r_{i,j})}{S_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot c_{p_{i,j}}}; \quad (2.37)$$

$$C_{i,j} = \frac{k_{i,j-1} \cdot (\Delta b_{in_{i,j}})}{S_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot c_{p_{i,j}}}; \quad (2.38)$$

$$D_{i,j} = \frac{k_{i,j+1} \cdot (\Delta b_{a_{i,j}})}{S_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot c_{p_{i,j}}}. \quad (2.39)$$

Уравнение теплового баланса (2.29) при этом выглядит так:

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta\tau} = A_{i,j} [T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k] + B_{i,j} [T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k] + C_{i,j} [T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k] + D_{i,j} [T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k] \pm \frac{q_{i,j}^*}{\rho_{i,j} \cdot c_{p,i,j}}. \quad (2.40)$$

Учитывая переменные геометрические размеры различных элементов, как по радиусу r -, так и по углам координат в φ -направлении, коэффициенты $A_{i,j} \dots D_{i,j}$ имеют различные значения соответствующие различным элементам и могут рассчитываться для каждого узла по разному отдельно. Для определенных геометрических условий необходимо устанавливать также различные пограничные условия элементов. Отдельным элементам для удобства присваиваем свой идентификатор, учитывающий при пересчете и распределении матрицы соответствующие свойства, параметры рабочих пар и пограничные условия для определенного элемента. Индивидуально, каждый идентификатор имеет специальную комбинацию значений и пограничные условия по своему контуру для элемента.

На границе контура каждого элемента могут возникать два пограничных условия: теплопроводность из одного материала между элементами; теплопередача между внешней средой и элементами различных материалов.

Значения коэффициентов ($A_{i,j} \dots D_{i,j}$) различаются в зависимости от геометрической конфигурации элементов, поэтому элементы с одинаковыми идентификаторами могут иметь различные коэффициенты.

Моделирование цилиндрических конструкций реакторов с различными геометрическими конфигурациями реактора внутри аппарата и различными параметрами внешней среды (температурой облучения солнцем поверхности и температурами охлаждения внешней среды) гелиоэнергетического термотрансформатора можно провести при помощи программы ELCUT, в которой используется метод конечных элементов.

Исследовались температурные поля и тепловые потоки внутри конструкции реактора. Температуры на поверхности корпуса реактора задавались исходя из

экспериментальных значений, полученных при испытании генератора-адсорбера, насыщенного сорбентом и облученного днем солнечной радиацией в установке гелиоэнергетического термотрансформатора (рисунок 3-10).

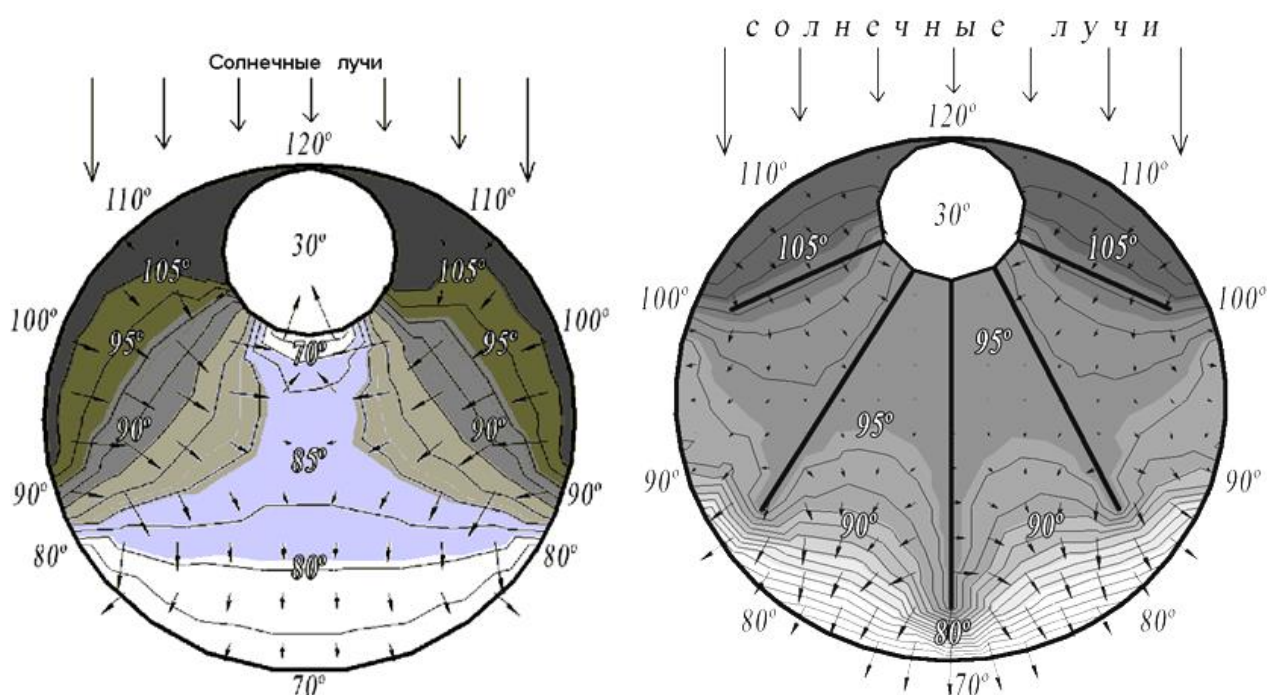
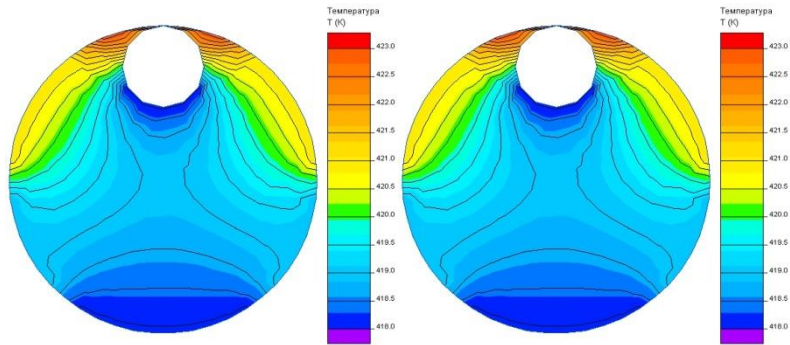


Рисунок 2.8 – Распределение температурных полей в поперечном сечении различных реакторов. Стрелками показаны векторы плотности тепловых потоков

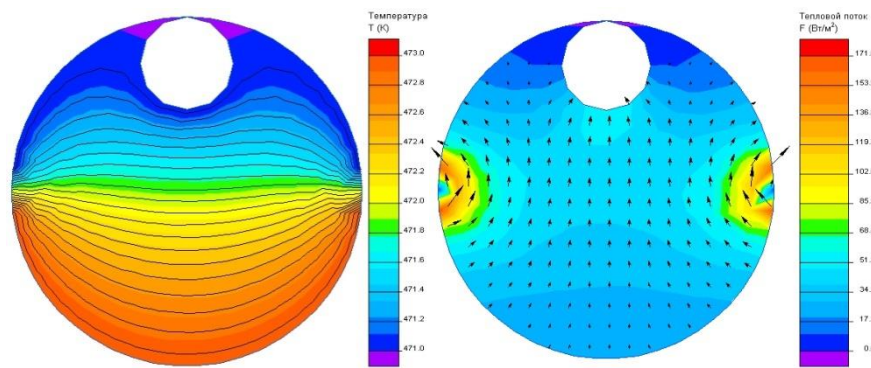
При моделировании были приняты следующие допущения: адсорбент считался однородной средой, то есть материалом с постоянной теплопроводностью, хотя известно, что сорбент с изменением температуры слабо изменяет свою теплопроводность, а с изменением насыщенности адсорбентом его теплофизические характеристики меняются; источниками температурного поля задавались без учета естественных потерь тепловой энергии; температура, заданная на модели, соответствовала только определенному углу падения солнечных лучей на поверхность концентратора; математическая модель позволяет отображать суточное изменение температуры и тепловых потоков в реакторе при различных температурах окружающей среды и различных углах падения солнечных лучей.

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.

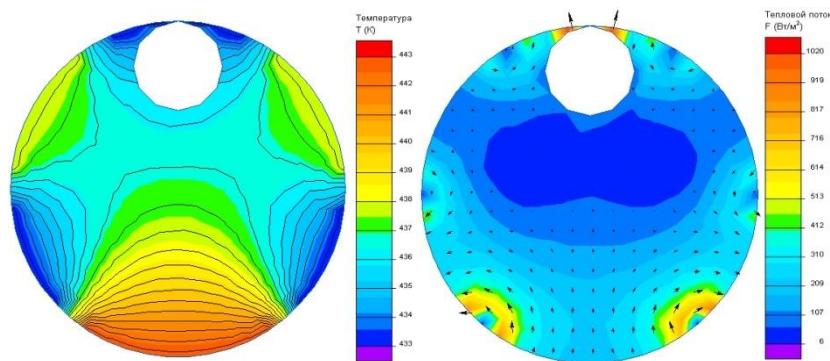
Распределение полей температур и тепловых потоков



для параметров при солнечном облучении с 6.00 до 7.00 часов



для параметров при солнечном облучении с 14.00 до 15.00 часов



для параметров при солнечном облучении с 16.00 до 17.00 часов

Рисунок 2.9 – Модели реактора гелиоэнергетического термотрансформатора по параметрам солнечного облучения в течении светового дня.

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

$$\zeta = \frac{S_{t_{dec}}}{S_{t_{наг}}} \quad (2.41)$$

где $S_{t_{dec}}$, $S_{t_{наг}}$ - соответственно площади полей по модели с температурами начала десорбции и выше и общая площадь реактора с адсорбентом.

Через ζ можно определить долю потери мощности гелиоэнергетического термотрансформатора, за счет нереализуемой массы рабочего вещества в реакторе генератора-адсорбера при протекании в нем физических процессов десорбции и адсорбции.

Тогда уравнение процесса десорбции в реакторе генератора-адсорбера будет выглядеть так:

$$Q_{dec}(\tau) = \left\{ r_0 + R \cdot T \cdot \ln(P_s/P) + [\alpha \cdot R \cdot T / (D \cdot n)] \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^{-1} \right\} \cdot \zeta \cdot \Delta a(\tau) \quad (2.42)$$

где $Q_{dec}(\tau)$ – теплота десорбции, r_0 – скрытая теплота парообразования адсорбата ; R – универсальная газовая постоянная; P_s – соответственно давление насыщения; P , T - давление и температура внутри реактора; α – коэффициент термического расширения адсорбционной фазы, D – коэффициент рабочей пары, $\Delta a(\tau)$ - частица адсорбата выделяемая при десорбции, ζ - коэффициент равномерности распределения тепловой энергии в реакторе генератора-адсорбера.

На рисунке 2.8 показаны две модели реакторов: простой конструкции с ассиметричной перфорированной трубкой по центру (экспериментальный реактор) и с орребренной перфорированной трубкой (теоретическая модель) вдоль длины реактора. При одинаковом облучении внешней оболочки корпуса реактора $\zeta_{эксп}=0,52$, а $\zeta_{теор}=0,81$. Применение внутреннего орребрения позволяет до 30% улучшить подвод, отвод и распределение полезной энергии в реакторе.

По данным исследования математической модели разработаны перспективные конструкции реакторов [15, 67]. 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.

2.5 Выводы ко второй главе

1. Анализ плоских отражающих зеркальных концентраторов солнечной энергии для гелиоприемных устройств малой мощности показал, что коэффициент концентрации солнечной энергии зависит от расположения зеркал и конструкции адаптирующей поверхности в пространстве, ориентации зеркал и формы адаптирующей поверхности. Основными параметрами, связывающими эти три условия, являются: угол раскрытия зеркал θ , линейные размеры зеркал L_3 , L_0 , размеры адаптирующей поверхности a . Форма адаптирующей поверхности может быть любая: круглая труба, плоская стенка трубы, треугольная труба, прямоугольная труба. Лучшей формой в плоских зеркальных отражателях является трубка формы равностороннего треугольника, на которой можно получить концентрацию до восьми раз.

2. Моделирование оптической части гелиоприемного устройства: генератора-адсорбера совмещенного типа целесообразно с точки зрения конструктивных параметров длины концентраторов и радиуса реактора осуществлять при однократном отражении солнечных лучей в плоских зеркалах, фиктивном угле раскрытия зеркал 55-65 градусов и подложкой оребрения реактора, равной диаметру его; при таком взаимном расположении элементов конструкции возможно наиболее эффективное проникновение световых лучей в «горячий ящик», максимальная адаптация солнечной энергии на реактор круглой формы и минимальная относительная удельная стоимость всего аппарата.

3. Моделирование конструкции генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки с позиции анализа теплоэнергетического баланса солнечной энергии лучше осуществлять отдельно

каждым реактором в гелиоприемном устройстве типа «горячий ящик»; допускается возможность наличия теплоизоляции из непроницаемого материала с пяти сторон и прозрачного материала в виде двух стекольной конструкции из стекла белого излома и расстояния между ними не более 10-15 мм.; подложка ребра реактора должна иметь хороший тепловой контакт и размеры не более радиуса реактора с каждой стороны.

4. Моделирование температурных полей и тепловых потоков в реакторах генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки позволяет не только анализировать эффективность протекания физических реакций (адсорбции и десорбции) в элементе аппарата, но и вести поиск наиболее эффективных конструкций реакторов, оптимизировать их геометрические размеры и энергетические параметры.

5. На основе моделирования реактора предложена оценка учета доли потери мощности гелиоэнергетической холодильной установки от неравномерного нагрева внутри реактора массы насыщенного сорбента путем введения в уравнение процесса десорбции коэффициента ζ .

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ И РАБОТЫ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1 Определение сорбционных свойств активированных углей для адсорбционных гелиоэнергетических холодильных установок

В гелиоэнергетических холодильных установках адсорбционного типа широко используется адсорбент–(уголь) и хладагент [2, 112, 116, 127]. При определении технических параметров работы установки необходимо знать сорбционные свойства адсорбентов и их физические характеристики. Основными физическими показателями являются: истинная и кажущаяся удельные массы, пористость, суммарный объем пор. Эти параметры необходимы для правильного выбора адсорбента, расчета его количества, необходимого для поглощения какого-нибудь адсорбата [40]. По методике предложенной в работе [41] определили физические показатели активированных углей казахстанского производства в виде кусочков неправильной формы (образец №1 – производства ТОО «Технологические инновационные системы» Алматы), в виде зерен цилиндрической формы полученных различными методами обработки (образец №2 – ТОО «СП Партнер» усть-каменогорского производства, образец № 6 – ТОО «Транскомир» карагандинского производства, образец №5 – ТОО «Хим Карьер Плюс» производства Алматы) и российского производства (Образец №3-казанского производства), (образец №4 – краснодарского производства. Физические параметры активированных углей представлены в таблице 1.

Определение характеристик активированных углей. По методике [41] определим физические характеристики активированных углей. Активированные угли представлены в виде кусочков неправильной формы (образец № 1), полученных из древесины; (образец № 2) гранулированный марки типа ФАС; (образец № 3) гранулированный, в виде хлопьев неправильной формы, типа марки БАУ; (образец № 4) гранулированный [2, 16].



Рисунок 3.1 – Активированный уголь (АС) алматинского производства
(образец № 1)

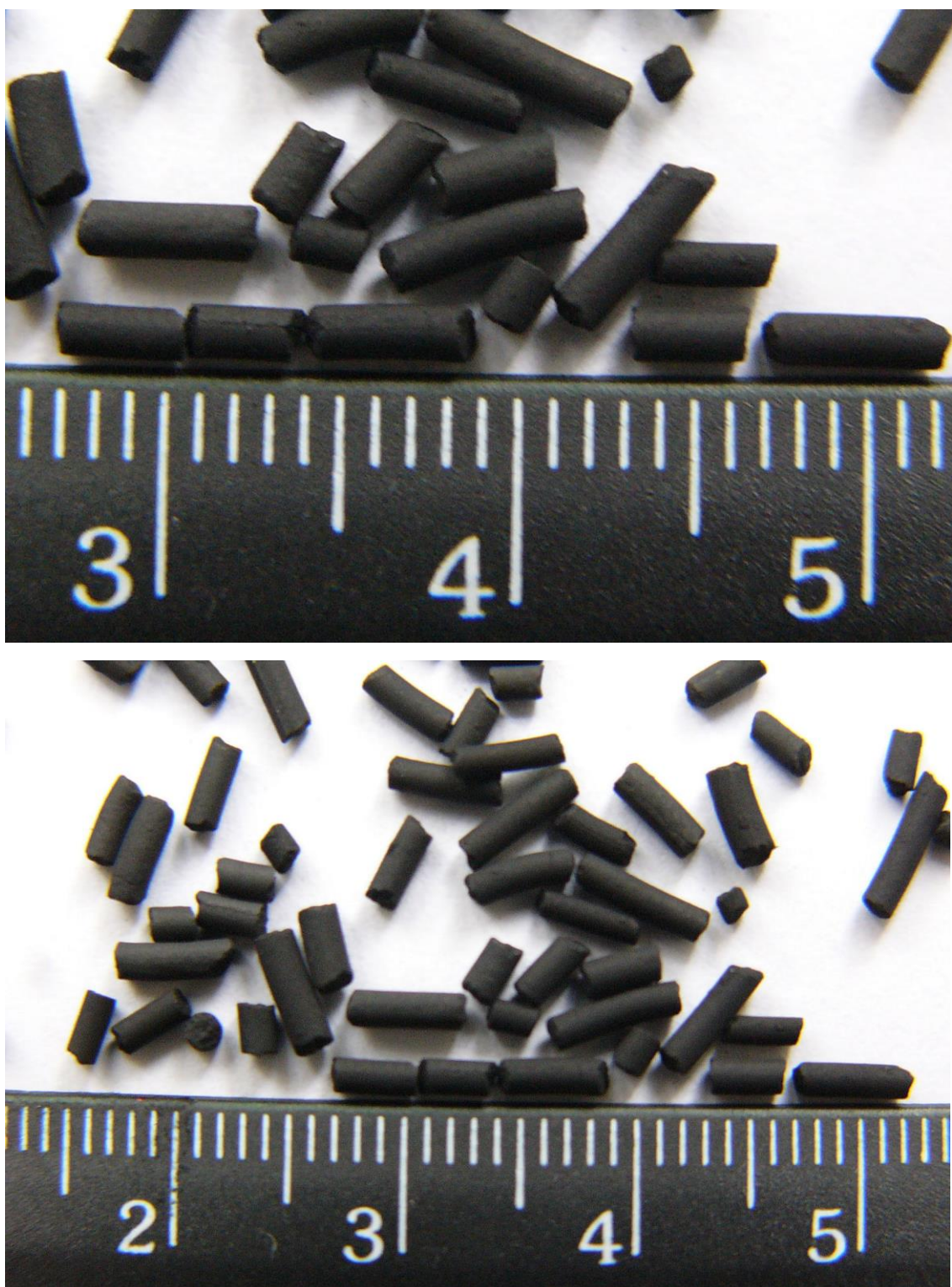


Рисунок 3.2 – Активированный уголь (АС) усть-каменогорского производства (образец № 2)

Активированный гранулированный уголь (образец № 1). Имеет характерный черный цвет. Изготовлен из древесных пород, отожженных в водной среде,

очищен и применяется для технического пользования. Его применение в качестве сорбента имеет устойчивые формы и практически не снижает поглотительной способности. Внутри реактора (генератора-адсорбера) такой гранулированный активированный уголь незначительно изменяет объем. При этом насыпная масса активного угля увеличивается. Подвод адсорбата (хладагента) к насыпному активированному углю, практически не меняется. Уголь имеет характер щелочной среды.

Активированный уголь (образец № 2) усть-каменогорского производства (уголь древесный, дробленый) марки БАУ. Изготовленный в виде гранул цилиндрической формы, размеры которого составляют: диаметр 3,2 – 4,4 мм, длина до 6,5-7,3 мм. черного цвета. Этот активированный уголь изготавливается из древесных пород деревьев, в водяной среде, при высоких температурах и используется для осушения воздуха. Цилиндрические гранулы твердые, но при сильной деформации рассыпаются. Его применение, как сорбента, при больших количествах циклов адсорбции и десорбции сохраняет первоначальную форму. Внутри реактора генератора-адсорбера он практически не разрушается и может выдерживать длительное время эксплуатации. Применение в гелиоэнергетических холодильных установках также возможно, как и первого образца. Этот уголь имеет характер щелочной среды.

Активированный уголь (образец № 3), изготовленный на казанском производстве марки ФАС, выполнен в виде гранул цилиндрической неправильной формы размером по эквивалентному диаметру до 2,8 -3,3 мм. Характерный цвет - черный. Изготовлен из древесных пород, в водяной бане. Для сушки применялись высокие температуры. В качестве адсорбентов используется в химических машинах, при этом сохраняет форму и качество работы больших количествах циклов. Количество и качество пор в таких углях больше, чем в образце № 2, и уголь имеет характер кислотной среды.

Активированный уголь (образец № 4) краснодарского производства выполнен в виде гранул цилиндрической формы диаметром 1,4-2,5 мм, длиной до 4,5 – 5,2 мм, черного цвета с темно-синим отливом. Такой активированный уголь

изготавливается из косточек фруктовых плодов (абрикос, персиков, слив), которые выдерживают при высокой температуре в отожженных в атмосфере углекислого газа. Гранулы твердые, раскалываются только при сильном сжатии или ударе. При нескольких периодических циклах поглощения или выделения адсорбата уголь сохраняет свою первоначальную форму. В реакторе генератора-адсорбера практически не разрушается и длительное время пригоден для процесса эксплуатации в термотрансформаторах. Краснодарский уголь имеет характер щелочной среды.

Пористая структура угля определяется как материалом из которого изготавливается активированный уголь, методикой получения структурной формы канала, чередованием, длительностью и скоростью выжигания смоляных веществ в углеродной основе и параметрами выдерживания технологии (температурой, видом среды, влажностью и т.п.).

В результате таких манипуляций возникает пористость таких образований с различными размерами и диаметром каналов как мезо, микро и макро поры, имеющие сплошной канал, замкнутый или проходной, равномерный или диффузно-конфузорного профиля по длине, в виде круглых, псевдоквадратных, треугольных и других форм каналов по живому сечению. Поскольку такие изменения и формирования структуры происходят на микро и макро – и нано уровне, то сочетание различных технологий могут привести структуру активированного угля к ожидаемой структуре имеющей определенные среднестатистические получаемые параметры с заданными свойствами.

При расчетах кажущейся удельной массы (δ) по методике [40] обнаружено всплывание парафина при кипячении навески адсорбента. Решено было провести эксперимент с кипячением и без кипячения, когда парафин закрывает все поры. Результаты - в таблицах 1-2 [16].

Таблица 1 - Определение истинной удельной массы

Физические активированных углей параметры	Образец			
	№1	№6	№5	№2
Масса пустого пикнометра m_1 , (г)	31,8866	29,1548	28,3461	33,2484
Масса пикнометра с водой, m_2 , (г)	83,0331	79,4026	79,3105	83,8310
Масса пикнометра с адсорбентом m_3 , (г)	33,2417	32,5275	32,6911	35,1884
Масса пикнометра с водой и адсорб. m_4 , (г)	83,3648	80,6469	81,0193	84,6462
Объем адсорбента V_1 , (см ³)	1,0234	2,1284	2,6362	1,1248
Истинная удельная масса d , (г/см ³)	1,3241	1,5846	1,6482	1,7245

Таблица 2 - Определение кажущейся удельной массы

Физические активированных углей параметры	Образец			
	№1	№2	№3	№4
Масса пустого пикнометра m_1 , (г)	29,8546	32,5268	29,1430	33,6908
Масса пикнометра с водой, m_2 , (г)	79,5484	82,4254	81,2426	82,6484
Масса адсорбента m_5 , (г)	2,3241	2,6848	3,0286	3,8278
Масса пикном. с адсорб. в парафине m_6 , (г)	31,3484	34,2826	30,8944	34,9962
Масса пикном. с водой и адсорб. в парафине (без кипячения в течении 1 часа), m_4 , (г)	77,2546	81,7956	80,3034	77,4942
Масса пикном. с водой и адсорб. в парафине (кипячение в течении 1 часа) m'_4 , (г)	78,6308	82,0814	80,7401	79,3730
Кажущаяся удельная масса, (г): $b = m_5 / [(m_2 - m_1) - (m_4 - m_6)]$ (без кипячения)	0,6136	1,1254	1,1248	0,5926
$b' = m_5 / [(m_2 - m_1) - (m'_4 - m_6)]$ (при кипячении)	0,9638	1,2786	1,3425	0,6326

Суммарный объем пор, см ³ /г:				
$V_{\text{сум}} = (d - b)/(d \cdot b)$ (без кипячения)	0,8745	0,2575	0,2823	1,1076
$V'_{\text{сум}} = (d - b')/(d \cdot b')$ (при кипячении в течение 1 ч)	0,2823	0,1510	0,1382	1,0009
Пористость, %				
$P_{\text{адс}} = (d - b)100/d$ (без кипячения)	53,62	28,98	31,76	65,63
$P'_{\text{адс}} = (d - b')100/d$ (при кипячении в течение 1 ч)	27,21	19,31	18,55	63,32

Параметры для активированных углей образца №3 и образца №4 в для дальнейших расчетов были взяты из литературы [41, 42].

Истинная удельная масса d адсорбента понимается как масса единицы объема плотного материала, из которого состоит адсорбент. При этом поры материала не учитываются.

Кажущаяся удельная масса адсорбента b – представляет массу единицы объема пористого вещества, из которого состоит адсорбент. Чтобы определить b навеску адсорбента массой m_5 помещают в сетку и опускают в расплавленный парафин. Для удаления избытка парафина с внешней поверхности сетку вынимают из парафина и помещают в воронку для горячего фильтрования. Затем адсорбент с парафином охлаждают, помещают в пиктометр и взвешивают (масса m_6). Оставшийся парафин полностью закупоривает поры адсорбента. Считается, что объем зерен адсорбента при этом остается практически неизменным.

Степень развития пористости адсорбента характеризуется суммарным объемом пор $V_{\text{сум}}$ – разностью между объемом, который занимает 1 г адсорбент с порами ($1/b$), и объемом адсорбента без них ($1/d$).

В результате проведенных экспериментов получены физические характеристики активированных углей, выпускаемых промышленными предприятиями Республики Казахстан, для использования их в холодильных установках на основе адсорбционных термотрансформаторов. Как видно из таблиц 1 лучшими характеристиками обладает активированный уголь образец №4.

3.2 Экспериментальные исследования изотерм адсорбции активированных углей с различными адсорбатами: аммиаком, метиламином и этиламином

Экспериментальная установка для определения изотерм адсорбции

Для изучения изотерм абсорбции, был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Схема стенда изображена на рисунке 3.3.

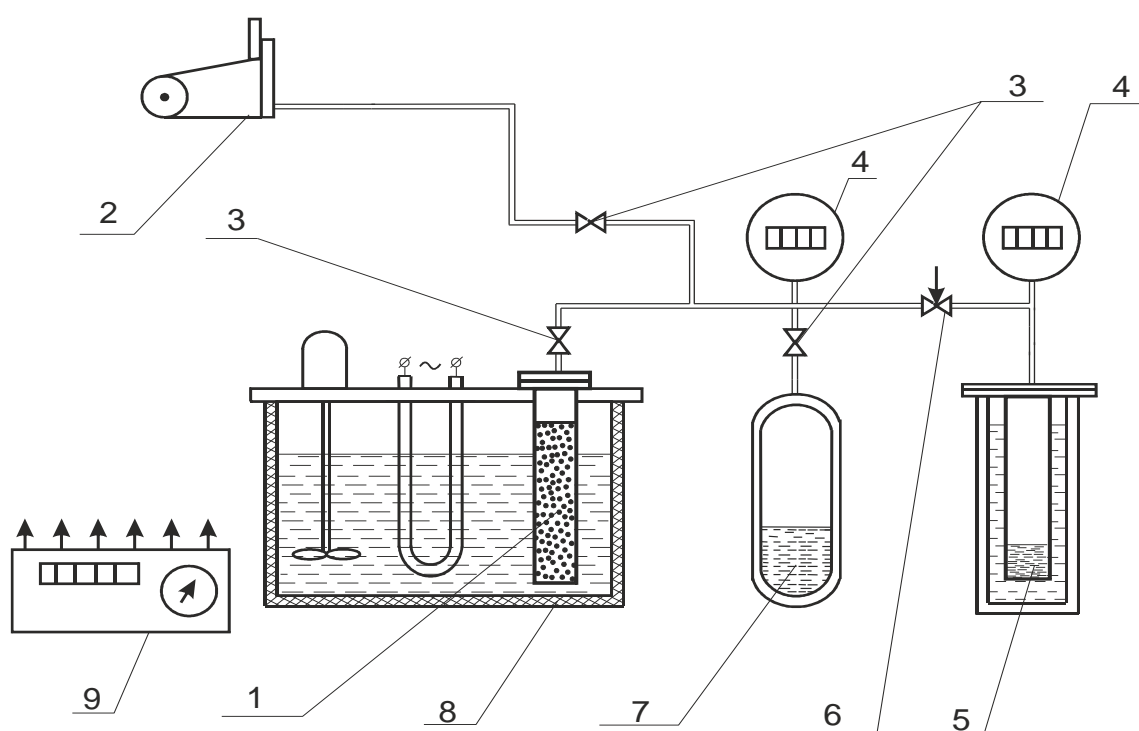


Рисунок 3.3 – Экспериментальный стенд для исследования изотерм адсорбции

Экспериментальный стенд состоит из следующих элементов: гильзы реактора генератора-адсорбера 1, в которую засыпается сухой адсорбент (активированный уголь) определенной массы; вакуумного насоса 2, который отсасывает воздух из системы; запорных вентилей 3, обеспечивающих переключение узлов установки; цифровых электрических манометров (ДМ5002) 4 с блоками питания (БП-24); регулирующего вентиля 6; гильзы конденсатора-испарителя 5, охлаждаемого проточной водой; ресивера 7, в котором хранится исследуемый адсорбат (аммиак); термостата 8, с системой поддержания и контроля температуры водоглицериновой смеси; цифрового вольтметра (В7-40) 9, с комплектом

переключателя и стандартными хромель-копелевыми термопарами, контролирующими температуру стенок гильз реактора 1 и конденсатора-испарителя 6, а также температуру сорбента и адсорбата внутри них [17].

Экспериментальный стенд является имитацией термотрансформатора циклического действия при работе в фазе поглощения, то есть позволяет исследовать процесс адсорбции различных адсорбатов и твердых адсорбентов. Данная конструкция стенда позволяет проводить на нем определение изотерм адсорбции различных рабочих пар, используемых в термотрансформаторах, адсорбентов и адсорбатов при различных температурах и давлениях до 2 МПа.

Эксперименты проводились в диапазоне давлений от 0,1 МПа до 0,9 МПа; при температуре 293 К; насыпная масса активированного угля 100 гр.; масса чистой гильзы 2538 гр.

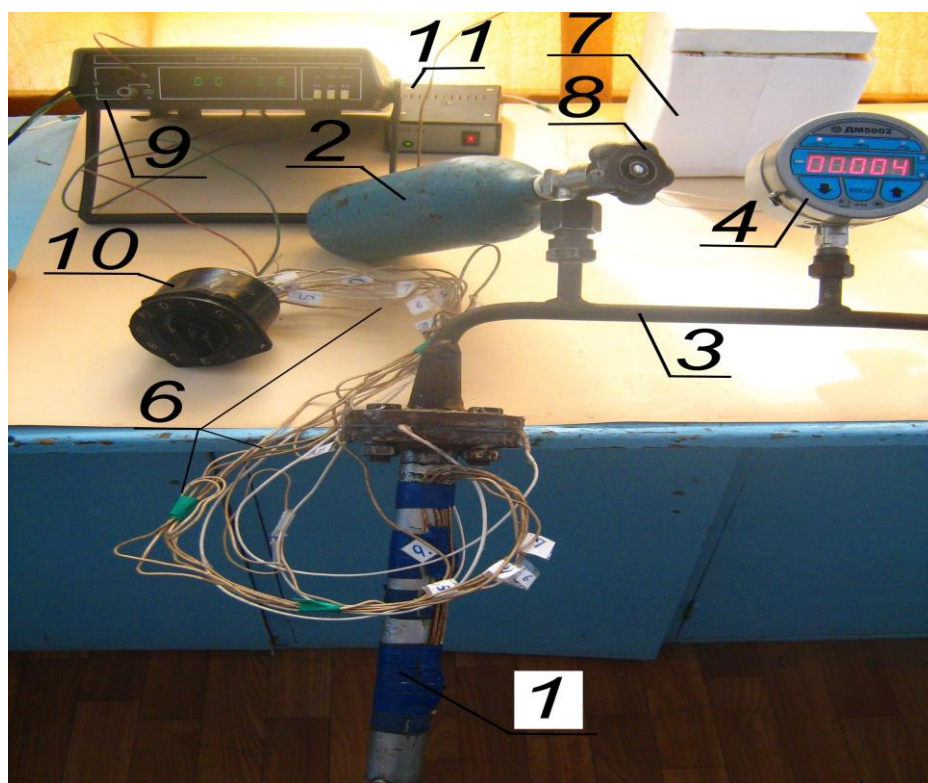


Рисунок 3.4 – Фрагмент экспериментального стенда

Экспериментальный стенд работает следующим образом.

Перед засыпкой активированного угля его просушивают в электропечи, перед началом эксперимента по адсорбции систему вакуумируют и проверяют давление

в ресивере. Взвешивание сухого и насыщенного угля производим на электронных цифровых весах. Применялись электронные цифровые весы типа MWP-3000H (до $G=3000\text{г}$) и типа ET-200B (до 200г) (лабораторные электронные) тензометрические со светодиодным дисплеем. Температура в гильзе реактора адсорбера-десорбера поддерживалась в термостате автоматически. Давление в системе поддерживается охлаждением ресивера или гильзы конденсатора-испарителя.

Измерение температуры термогильзы с сорбентом.

Применялись термопары. Температура сорбента, стенки реактора измерялись с помощью стандартных хромель-копелевых термоэлектрических термометров (термопар). Использовался цифровой прибор милливольтметры В7-40.

Давление в реакторе контролировалось цифровым манометром.

Цифровой манометр типа ДМ5002А предназначен для измерения избыточного давления и разрежения жидкостей и газов с отображением текущего значения давления на цифровом табло, для нужд народного хозяйства, для эксплуатации на объектах атомной энергетики (ОАЭ), а также для выполнения точных измерений давления в лабораторных установках, класса точности 0,1.

Эксперимент проводился в хорошо проветриваемой лаборатории с принудительной вентиляцией. Перед опытами были проведены испытания давлением стенда на плотность (определения утечек) и прочность всех элементов, находящихся под высоким давлением.

3.3 Обработка экспериментальных данных по структурным уравнениям

Определение изотерм адсорбции. Значения замеров насыщения аммиака на активированных углях различных марок представлены в приложение Г, приложении Д, приложении Е и изображены на графике в соответствии с рисунками 3.5 и 3.6. Здесь нанесены экспериментальные значения адсорбционной способности всех образцов исследованного активированного угля в диапазоне заданных значений параметров на экспериментальном стенде. Здесь же даны экспериментальные графики адсорбции аммиака на АС, полученные в [125]

(линия 1). Значения насыщения АС аммиаком удовлетворительно совпадают с характеристиками, полученными другими исследователями при аналогичных параметрах, что указывает на правильность выбранной методики эксперимента.

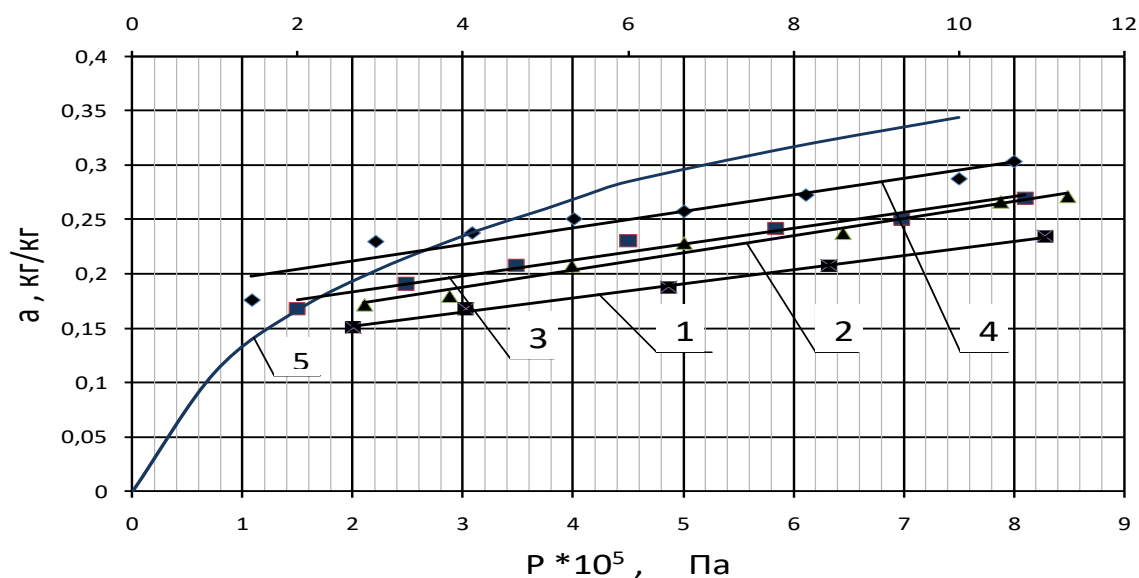


Рисунок 3.5 – График изотерм адсорбции рабочей пары активированный уголь–аммиак при $T=293\text{ К}$ для исследуемых образцов при $T = 293\text{ К}$,
1 – изотерма (по данным других авторов [125]).

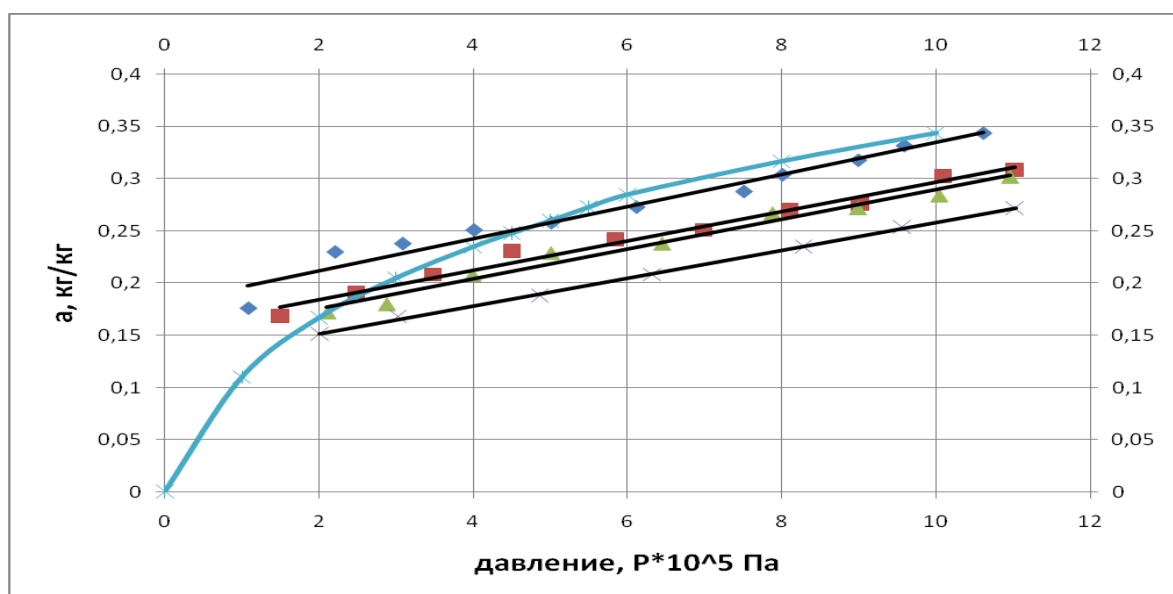


Рисунок 3.6 – График изотерм адсорбции рабочей пары активированный уголь – аммиак для исследуемых образцов при $T = 303\text{ К}$,
1 – изотерма (по данным других авторов [125]).

На всех активированных углях наблюдается небольшой разброс значений, однако при внимательном наблюдении проявляется небольшая закономерность в зависимости от марки угля. АС образца № 3 имеет несколько лучшие характеристики по сравнению с АС образца № 2 или образца № 4 [17].

Образец № 4 активированного угля обладает лучшими параметрами насыщенности, чем образцы № 1 - № 3, однако все исследуемые образцы имеют хорошие эксплуатационные свойства и можно прогнозировать длительное время их эксплуатации в реакторах генератора-адсорбера.

В последующем проводилась обработка экспериментальных данных по экспериментальным уравнениям, предложенным М.М.Дубининым [15, 17]:

$$a = (Z_0 \cdot 1000 \cdot \rho) / M \cdot \exp\{-B \cdot (T^2 / \beta^2) \cdot [\lg(P_s / P)]^2\}, \quad (3.1)$$

Значение константы находилось как среднее арифметическое полученных значений. Коэффициент аффинности β для аммиака принимаем равным 0,28; плотность $\rho = 610 \text{ кг/м}^3$; $P_s = 0,8578 \text{ МПа}$ (при $T=293 \text{ К}$); $M = 17,03 \text{ ммоль/кг}$. Результаты расчетов графически изображены на рисунке 3.7(приложение Е).

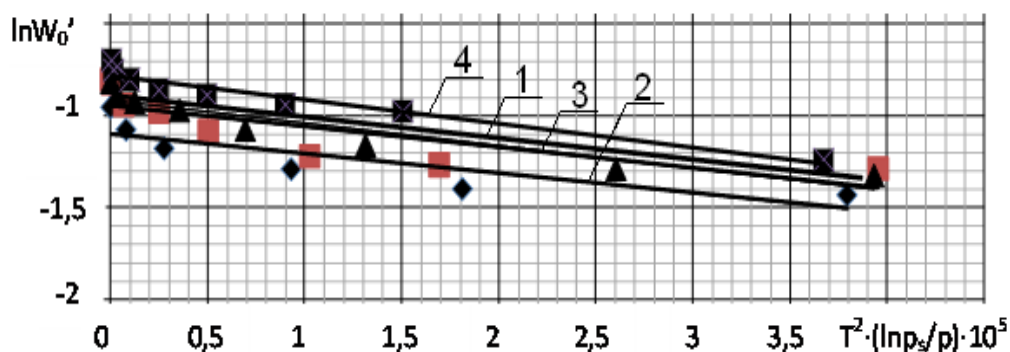


Рисунок 3.7 – Зависимость $\ln W_0'$ от $T^2 (\ln P_s / P)^2$ для рабочей пары активный уголь – аммиак

Представленные уравнения получены методом наименьших квадратов в сетке логарифмической анаморфозы (приложение Е):

для образца № 1 $\lg a = - 0,0323 \cdot (\lg P_s / P)^2 + 0,5610$ при $R^2=0,5164$;

для образца № 2 $\lg a = - 0,0345 \cdot (\lg P_s / P)^2 + 0,5354$ при $R^2=0,3842$;

для образца № 3 $\lg a = -0,0345 \cdot (\lg Ps/P)^2 + 0,6256$ при $R^2=0,6959$;

для образца № 4 $\lg a = -0,0326 \cdot (\lg Ps/P)^2 + 0,5378$ при $R^2=0,4473$.

$$B_{\text{амм}} = (0,0335 \cdot 0,61 \cdot 0,61) / (285 \cdot 285) = 1,53 \cdot 10^{-7}$$

Тогда усредненное значение коэффициента $B_0 = 1,53 \cdot 10^{-7}$

$$a = (Z_0 \cdot 1000 \cdot \rho) / 17 \cdot \exp\{-1,53 \cdot 10^{-7} \cdot (T^2 / 0,28^2) \cdot [\lg(Ps/P)^2]\} \quad (3.2)$$

Была проведена обработка экспериментальных данных по уравнению Дубинина-Радушкевича (Д-Р) (3.3)

$$a(P, T) = \rho(T) \cdot W_0 \cdot \exp\{-D \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^n\}, \quad (3.3)$$

Были получены в результате обработки в логарифмической анаморфозе изотерм адсорбции четырех образцов активированных углей (казанского, усть-каменогорского, краснодарского, алматинского производства) и аммиака, характерные коэффициенты для этого уравнения: $W_0^{\text{обр1}} = 385,1 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_0^{\text{обр2}} = 446 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_0^{\text{обр3}} = 442 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_0^{\text{обр4}} = 498 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D = 12,17 \cdot 10^{-7}$; $n=2$.

Уравнения прямых получены методом наименьших квадратов в сетке логарифмической анаморфозы (для рабочих пар АС-аммиак) :

для образца № 1 $\ln W_0' = -10,77E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln Ps/P)^2 - 1,594$ при $R^2=0,717$;

для образца № 2 $\ln W_0' = -12,55E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln Ps/P)^2 - 1,434$ при $R^2=0,714$;

для образца № 3 $\ln W_0' = -12,31E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln Ps/P)^2 - 1,411$ при $R^2=0,87$;

для образца № 4 $\ln W_0' = -13,05E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln Ps/P)^2 - 1,276$ при $R^2=0,9265$.

Тогда усредненное значение коэффициента $D_0 = 12,17 \cdot 10^{-7}$, а общее уравнение для рабочей пары АС - аммиак при $n=2$

$$a = W_0 \cdot \rho_s \cdot \exp\{-12,17 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \cdot [\ln(Ps/P)]^2\} \quad (3.4)$$

Проводились аналогичные эксперименты исследуемыми образцами активированных углей (адсорбентами) и хладагентом (адсорбатом) - метиламином.

Плотность $\rho = 638$ кг/м³ ; $Ps = 0,371$ МПа (при $T=293$ К).

Результаты замеров и расчетов сведены в приложение Д.

Обработка экспериментальных данных по уравнению Д-Р представлена на рисунке 3.8.

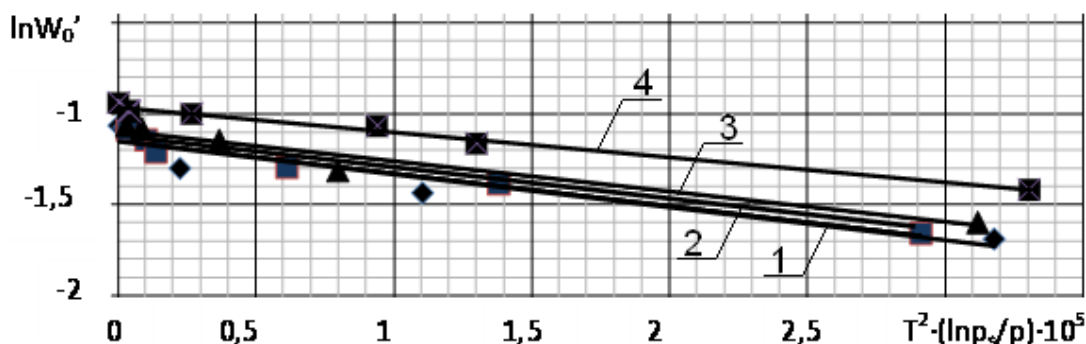


Рисунок 3.8 – Зависимость $\ln W_0'$ от $T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2$ для рабочей пары активный уголь – метиламин

Уравнения прямых получены методом наименьших квадратов в логарифмической сетке координат (АС- метиламин):

для образца № 1 $\ln W_0' = -18,16E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,148$ при $R^2 = 0,8758$;

для образца № 2 $\ln W_0' = -13,28E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,038$ при $R^2 = 0,8846$;

для образца № 3 $\ln W_0' = -13,65E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,0912$ при $R^2 = 0,9512$;

для образца № 4 $\ln W_0' = -21,25E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 0,9611$ при $R^2 = 0,9869$.

В результате обработки расчетных данных определено общее уравнение прямой и получено усредненное значение коэффициента $D_M = 16,58 \cdot 10^{-7}$ для рабочей пары АС - метиламин при $n = 2$:

$$a = W_0 \cdot \rho_M \cdot \exp\{-16,58 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \cdot [\ln(P_s/P)^2]\} . \quad (3.5)$$

Проведена обработка экспериментальных данных по уравнению Дубинина-Радужкевича (3.3) и определен методом наименьших квадратов коэффициент D для каждого исследуемого образца и общий усредненный коэффициент D_M . (приложение Ж).

Уравнения прямых получены методом наименьших квадратов в логарифмической сетке координат (АС- этиламин).

Плотность $\rho = 678,2 \text{ кг/м}^3$; $P_s = 0,1134 \text{ МПа}$ (при $T=293 \text{ К}$).

для образца № 1 $\ln W_0' = -21,94E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,7021$ при $R^2 = 0,8436$;

для образца № 2 $\ln W_0' = -17,88E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,6822$ при $R^2 = 0,7722$;

для образца № 3 $\ln W_0' = -18,89E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,7326$ при $R^2 = 0,8844$;

для образца № 4 $\ln W_0' = -25,97E-07 \cdot T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2 - 1,4955$ при $R^2 = 0,6986$.

В результате расчетов определено общее уравнение прямой и получено усредненное значение коэффициента $D_m = 21,17 \cdot 10^{-7}$ для рабочей пары АС - этиламин при $n = 2$:

$$Z = W_o \cdot \rho_{\text{этил}} \cdot \exp\{-21,17 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \cdot [\ln(P_s/P)^2]\} . \quad (3.6)$$

Результаты замеров и расчетов по рабочей паре АС-этилам сведены в приложении 3.

Обработка экспериментальных данных по уравнению Д-Р представлена на рисунке 3.9.

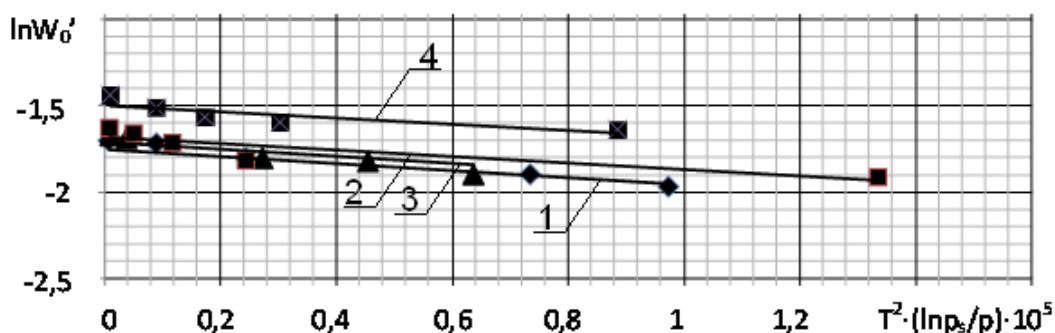


Рисунок 3.9 – Зависимость $\ln W_o'$ от $T^2 \cdot (\ln P_s/P)^2$ для рабочей пары активный уголь – этиламин

На поверхности твёрдого тела при прочих равных условиях, как правило, лучше адсорбируются те газы, которые легче конденсируются в жидкость [4]. Адсорбционная способность в ряду аммиак – метиламин – этиламин должна при этом увеличиваться. Экспериментальные данные показали обратную зависимость, поэтому можно сделать вывод, что определяющую роль играет пространственная структура и пространственная затруднённость молекул, их полярность. Поверхность активированного угля может содержать полярные центры (рН среды), т.е. основные свойства аммиака и аминов также будут влиять на адсорбцию этих соединений. Уменьшение дипольного момента молекул в ряду аммиак – метиламин – этиламин (1,47; 1,31; 1,22 D) свидетельствует об уменьшении их полярности и ослаблении межмолекулярных взаимодействий между молекулами, а значит, и способности к адсорбции. В отличие от аммиака амины содержат малополярные заместители, что также ухудшает адсорбцию этих

соединений. Кроме того, увеличение размеров молекул за счёт увеличения длины углеводородного радикала препятствует их проникновению в узкие поры адсорбента. При этом будет возможна только абсорбция на его поверхности и в макропорах, а капиллярная конденсация в мезопорах и микропорах будет затруднена. Поэтому, несмотря на усиление основных свойств в ряду аммиак–метиламин – этиламин (pK_b 4,75; 3,36; 3,19), количество адсорбированного соединения уменьшается.

Таблица 3 - Показатели различных рабочих веществ (адсорбатов) для гелиоэнергетических термотрансформаторов

Показатели	Значения для показателя			
	Метиламин	Этиламин	Аммиак	Метанол
Молекулярная масса	31,06	45,06	17,03	32,04
Критическая температура, °С	156,9	183,4	133,0	240,0
Температура кипения, °С	-6,7	+16,5	-33,4	+64,7
Температура замерзания, °С	-92,5	-81,0	-77,8	-98,0
Плотность жидкости при 20°С, кг/м ³	660	680	610	780
Удельная теплоемкость жидкости при 20°С, кДж/кг °С	3,310	2,891	4,777	2,514
Абсолютное давление паров при 40 °С, МПа	0,5827	0,2423	1,5549	0,03434
Давление паров при -10°С, МПа	0,0873	0,0304	0,2914	0,00196
Теплота испарения при 10°С, кДж/кг	843,5	641,9	1297,2	1206,0

Однако, определенный интерес вызывает использование в гелиоэнергетических холодильных установках для рабочей пары АС-метиламин, так как достижение низких температур в адсорбционных установках на этой рабочей паре возможно при значительно меньших давлениях в аппаратах чем на рабочей паре АС-аммиак.

Измерения рН осуществляли на приборе рН-150 МИ. Уголь высушивали до постоянной массы при 105 °С в сушильном шкафу, а затем выдерживали в эксикаторе с безводным сульфатом натрия Na_2SO_4 1 сутки. 1 г угля выдерживали в течение 1 часа в 100 мл дистиллированной воды, затем суспензию профильтровывали и измеряли рН. Полученные данные (уголь древесный БАУ-А рН 9,80; уголь активный АГ-3 рН 7,85) могут свидетельствовать об основности углей. Это может быть связано как с адсорбцией на них ионов водорода, так и с диссоциацией гидроксид-ионов. Таким образом, на поверхности этих углей будут лучше адсорбироваться вещества, проявляющие кислотные свойства. Поскольку амины проявляют основные свойства, лучше всего на поверхности этих углей.

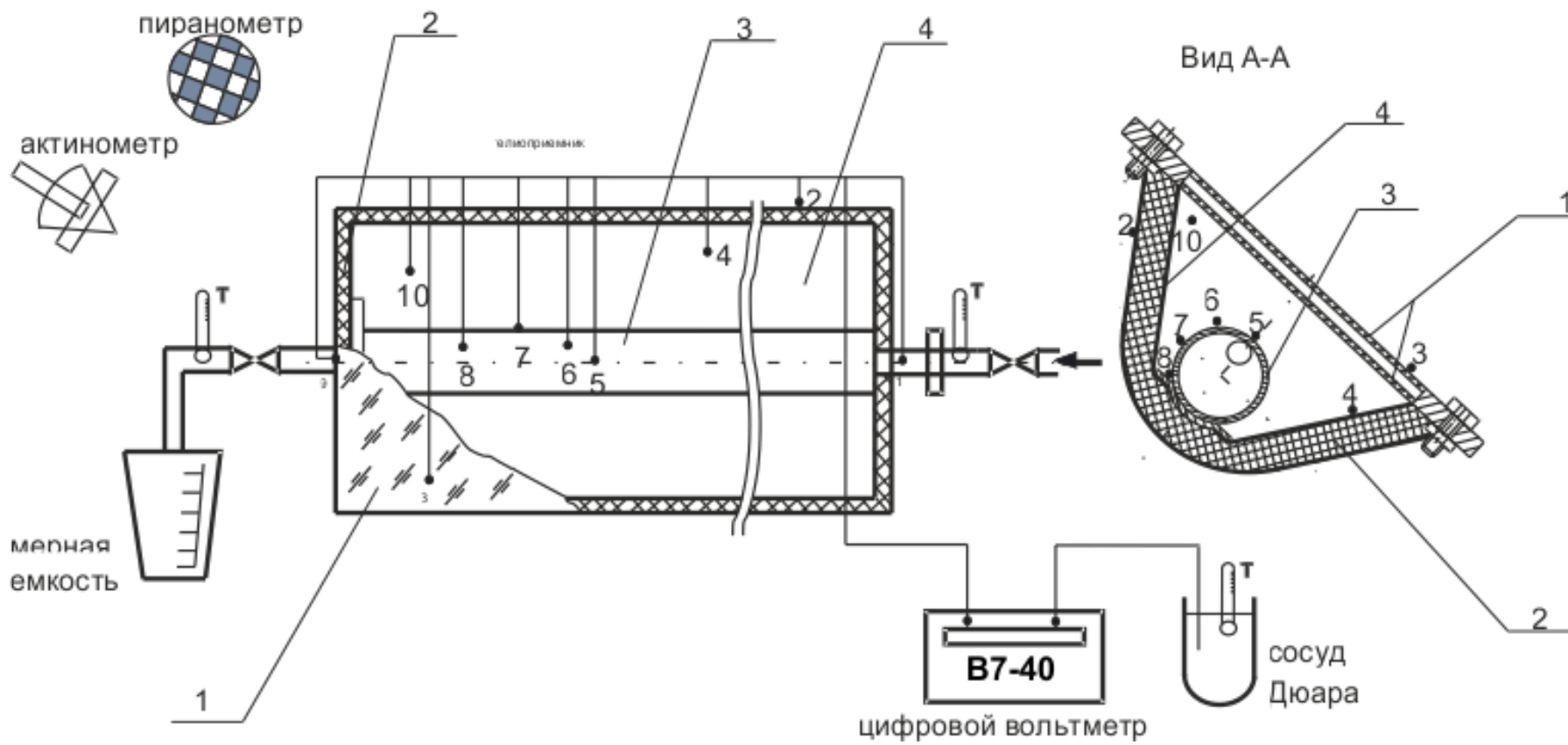


Рисунок 3.10 – Экспериментальный стенд для исследования тепловых нагрузок на реактор генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки

3.4 Экспериментальные исследования гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа и гелиоприемного устройства генератора-адсорбера

3.4.1 Исследование тепловых нагрузок гелиоприемного устройства генератора-адсорбера

Общая схема экспериментального стенда по исследованию тепловых нагрузок показана на рисунке 3.10, а конструкция реактора показана на рисунке 3.11.

На данном стенде проведена проверка методики расчета и получения полезной тепловой энергии, получаемой путем преобразования энергии солнечной радиации в гелиоприемном устройстве. Расчетная модель описана в главе 2.



Рисунок 3.11 – Экспериментальная конструкция генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки

Исследования проводились в следующих диапазонах измеряемых параметров: солнечная активность прямого излучения ежедневно от 400 Вт/м^2 до 800 Вт/м^2 ; солнечная активность рассеянного излучения ежедневно от 60 Вт/м^2 до 110 Вт/м^2 ;

данные солнечного излучения сверялись с показаниями Астраханского метеорологического центра, проводившего замеры солнечной активности АИК-актинометрическим измерительным комплексом, разработанным НПО «Тайфун»; температуры замерялись от -10°C до $+140^{\circ}\text{C}$; давление в системе от 0,1 МПа до 2,3 МПа. ; расход теплоносителя – мерной литровой емкостью 10 л. и секундомером СОПр 2а-2-010.

Световая энергия проходит двух стекольное покрытие, прежде чем попасть в «горячий ящик», часть солнечной энергии отражается, часть поглощается стеклами. Поэтому степень нагрева наружного стекла определяется термопарой 3. Прошедшая энергия падает на реактор и зеркала, частично теряет свою энергию. Нагрев реактора определяется в середине длины четырьмя термопарами 5 – 8, а нагрев зеркал – термопарой 4, температура воздуха в «горячем ящике» - термопарой 10. Наружная температура металлического корпуса аппарата замерялась термопарой 2.

В реактор подавалась вода из водопроводной сети, которая нагревалась в аппарате посредством полезной солнечной энергии. На входе и выходе реактора.

Измерение температур поверхностей реактора генератора-адсорбера производится хромель-копелевыми термопарами 1 и 9 и электронно-цифрового милливольтметра В7-40. Температура воздуха и нагреваемого теплоносителя, в контрольных точках дублировалась стеклянными термометрами с ц.д. $0,1^{\circ}\text{C}$. Термопары для экспериментального стенда применялись стандартные из проволоки 2мм.

На рисунке 3.12 представлены экспериментальные значения температур проведенных измерений термопарами в генераторе-адсорбере гелиоэнергетического термотрансформатора, при излучении полезной тепловой нагрузки приходящейся на реактор аппарата при облучении его энергией солнечной радиации на открытом полигоне в городе Астрахани в июле месяце.

Экспериментальные значения на воде и водоглицериновой смеси приведены в приложении И, приложении К, приложении Ю, приложении Я.

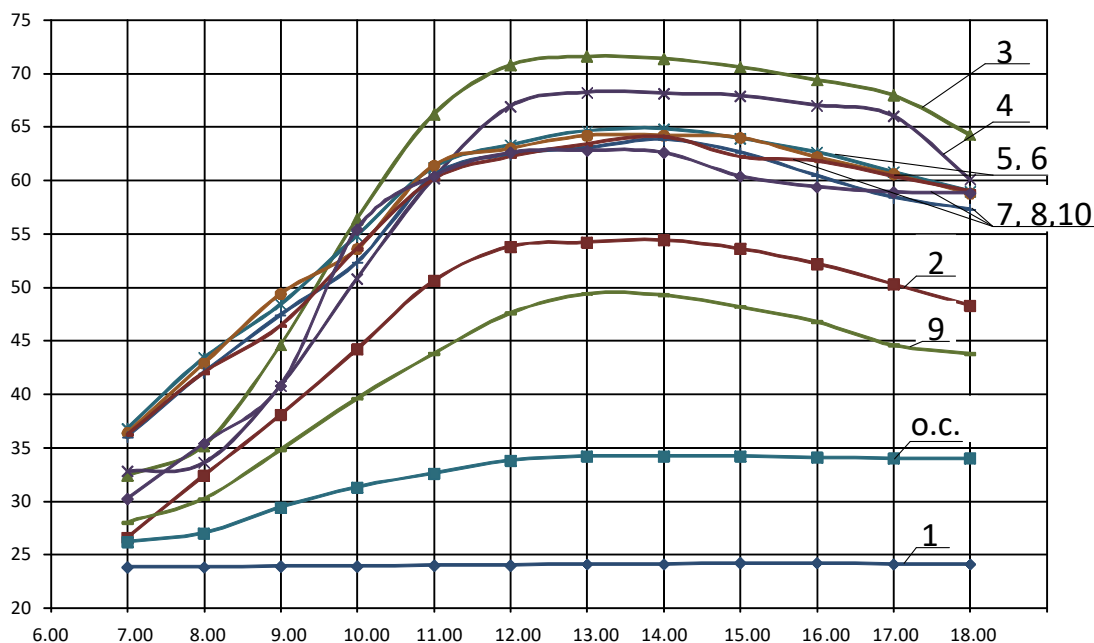


Рисунок 3.12 – Зависимости показаний изменения температур в гелиоприемном устройстве генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора (значения зависимостей температур соответствуют соответствующим точкам показаний на стенде, рисунок 3.10).

(Значения замеров температур в приложении И). В реактор подавалась проточная водопроводная вода, практически постоянной температуры и практически с постоянным объемным расходом. При прохождении через корпус реактора вода нагревалась. Среднестатистические данные трех июльских дней, примерно с постоянными значениями радиационных нагрузок солнечной энергии и законом изменения их в течение дня, дают реальные значения температур для расчета полезной тепловой нагрузки на аппарат генератора-адсорбера согласно модели (глава 2, рисунок 2.3). Из рисунка видно, что с увеличением интенсивности облучения энергией солнечной радиации растут и значения температур на элементах гелиоэнергетического устройства генератора-адсорбера и его реактора. При нагреве воды температура в четырех точках (т.5, т.6, т.7, т.8) реактора практически постоянная. Это можно объяснить тем, что даже при ламинарном течении жидкого теплоносителя в круглом канале реактора (число

Рейнольдса не более 2320) распределение температуры по нагреваемой поверхности незначительное при высоком коэффициенте теплоемкости воды и высоком коэффициенте теплопроводности стального корпуса реактора. Контрольные замеры температур установки проводились и при циркуляции через реактор и термостат водоглицеринового раствора (максимальная температура раствора составляла 131 °С).

Сильно изменяются в течение времени температуры нагрева стекол и зеркал, которые сильно влияют на теплотери при расчете полезной нагрузки. Температуры корпуса реактора изменяются в течение дня по мере интенсивности облучения солнечной энергией, но перепад температур между температурой наружной стенки и нагреваемого теплоносителя остается значительным. Это в целом удовлетворительно сказывается на работе гелиоприемного устройства генератора-адсорбера.

Значения замеров тепловых нагрузок на реактор по расчетной модели и экспериментальным данным представлены в приложении К. При анализе теоретической расчетной кривой солнечной нагрузки в течении суток и экспериментальных значений тепловых нагрузок, рассчитанных по формулам (Глава 2), наблюдается тепловая инерционность экспериментальных значений от теоретических, вызванная, очевидно, массой элементов и частей гелиоэнергетического устройства, которая сначала берет часть энергии на нагрев элементов конструкции, создавая аккумуляцию тепловой энергии, а затем после падения инсолируемой солнечной радиации, отдает запас тепловой энергии теплоносителю. Максимальное значение тепловой энергии соответствует 12 часам солнечного времени. С учетом местных условий проведения эксперимента и декретного утверждения времени это соответствовало 14 часам местного Астраханского времени.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают правильность разработанной модели гелиоэнергетического устройства генератора-адсорбера и дают возможность определить расчетом и графиками тепловую нагрузку на реактор.

3.4.2 Описание конструктивных решений аппаратов гелиоэнергетической холодильной установки

Генератор-абсорбер гелиоэнергетического термотрансформатора в гелиоприёмном устройстве типа «горячий ящик» имеет плоские зеркальные концентраторы, в фокусной части которых установлены горизонтально расположенные реакторы цилиндрической формы (рисунок 2.2). Реактор выполнен из цельнотянутой трубы диаметром $\varnothing 76 \times 4$ мм. Один фланец разъёмный, второй – подсоединён к перфорированному хладопроводу, расположенному в верхней части внутри реактора и имеющего тоже форму цилиндра $\varnothing 24 \times 2$ мм. Хладопровод через запорные вентили подключается или к конденсатору, или к испарителю в зависимости от режима работы аппарата. Для исключения теплового контакта выходной конец хладопровода из реактора проходит через текстолитовую трубку.

Внутренняя полость реактора, до перфорированного хладопровода, заправлена рабочим адсорбентом, состоящая из гранул активированного угля (АС). Реакторы снаружи корпуса имеют селективное покрытие, выполненное по патенту РФ №2365676, и располагаются на металлической подложке, которая для улучшения теплового контакта с нижней частью реактора была обработана теплопроводящей пастой КПТ-8.

Два гелиоприёмных устройства типа «горячий ящик» площадью остеклённой поверхности $0,64 \text{ м}^2$ ориентированы строго на юг под углом 45° к поверхности земли и имели изоляцию из напыленного рипора. С торцевой стороны каждого гелиоприёмного устройства имеется съёмная изолированная пробка для улучшения охлаждения реактора ночью. Сверху гелиоприемники были закрыты стеклопакетом в раме металлопластмассового профиля.

Крепление прозрачной рамы и корпуса гелиоприемника осуществлялось специальными болтами и гайками через резиновые прижимные прокладки. Для достижения необходимой герметичности применялись жидкая резина и автомобильный герметик ВГО-2. (Методика расчета генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки в главе 2).

Испаритель гелиоэнергетического термотрансформатора состоит из жидкостного и парового коллекторов и соединён между ними собой пятью U-образными трубками. Коллекторы были изготовлены из стальных цельнотянутых труб $\varnothing 1''$, а U-образные элементы – из трубы $\varnothing 18 \times 2,5$. Коллекторы имели фланцы, с помощью которых крепились в систему установки. Нижняя часть поверхности испарителя была погружена в ванночку с водой, находящуюся в охлаждаемой камере. Глубина погружения испарителя в воду составляла 0,3 м. (рисунок 3.13).

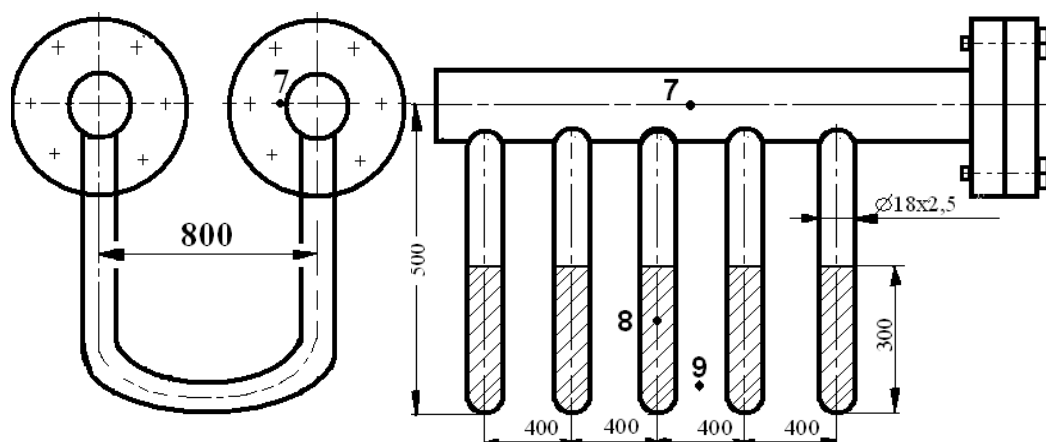


Рисунок 3.13 – Схема испарителя экспериментального гелиоэнергетического термотрансформатора:

7 – термопар в камере; 8 – термопар на стенке испарителя; 9 – термопар в ванне с водой

Охлаждаемая камера гелиоэнергетического термотрансформатора представляла собой холодильный шкаф типового холодильника типа «Морозко» размерами $580 \times 420 \times 450$ мм. Внутри камеры около задней стенки был установлен испаритель. Образовавшиеся пустоты и щели были залиты изоляционным материалом пенополиуретаном. Внутри камеры устанавливался ванночка с водой и U-образные элементы испарителя. Ванночка с водой является аккумулятором холода (рисунок 3.14).

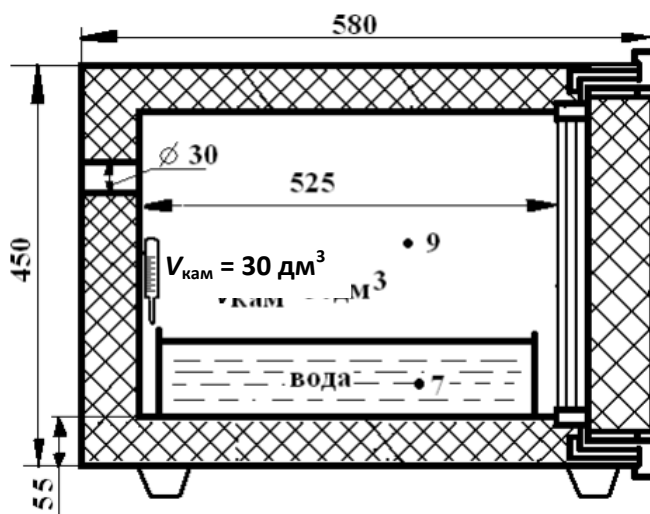


Рисунок 3.14 – Схема охлаждаемой камеры гелиоэнергетического термотрансформатора: 7, 9 – номера соответствующих термопар

Конденсатор гелиоэнергетического термотрансформатора имел трубчатую змеевиковую поверхность из цельнотянутой трубы диаметром $\text{Ø}^{3/8}$ ", длиной 9 300 мм. Конденсатор изготовлен таким образом, что в зависимости от схемного решения позволял работать от проточного и непроточного водяного охлаждения (рисунок 3.15).

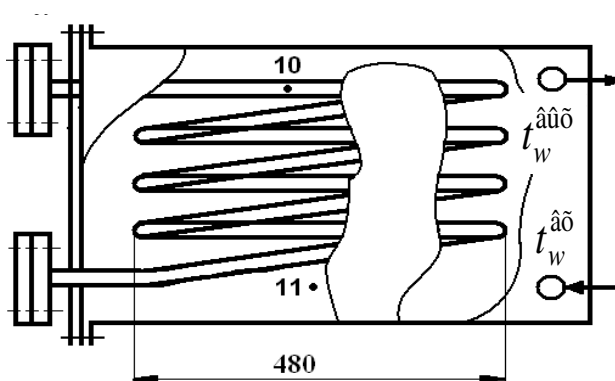


Рисунок 3.15 – Схема конденсатора гелиоэнергетического термотрансформатора с водяным охлаждением (змеевик расположенный в корпусе): 10, 11 – номера соответствующих термопар.

В стальном корпусе, ёмкостью 70 л размещался змеевик. Корпус конденсатора имеет патрубки для подвода и отвода охлаждающей воды. Предусмотрена

возможность использования конденсатора с постоянной заливкой воды без циркуляции.

Соединялся конденсатор непосредственно через фланцевые соединения.

В схеме установки между конденсатором и ресивером имелась уравнивательная паровая линия связи для обеспечения свободного стекания жидкого хладагента в ресивер.

Для замера температур применялись хромель-копелевые термопары и термометры с ценой деления 0,1. Давление замерялось образцовыми манометрами с ценой деления 2,5 кПа.

При эксплуатации данного конденсатора определялась эффективность его работы при разных способах охлаждения: охлаждение в большом объеме водой и проточное водяное охлаждение.

Тепловая нагрузка на конденсатор, предположительно, оставалась неизменной около 800 Вт, а температурный напор составлял $\Theta = 5^\circ$. Площадь теплообменной поверхности конденсатора составит $F = 0,397 \text{ м}^2$, а длина труб без оребрения – 70 м.

Ресивер гелиоэнергетического термотрансформатора был выполнен из баллона ёмкостью 16 л и предназначался для накопления жидкого хладагента и охлаждения его до температуры окружающей среды в вечернее время суток (рисунок 3.16).

Ресивер по конструкции представлял цилиндрический сосуд: $l = 0,9 \text{ м}$ – длина сосуда; $d = 0,2 \text{ м}$ – наружный диаметр; $\delta = 0,01 \text{ м}$ – толщина стенки; ёмкость $V = \pi (d - 2\delta)^2 \cdot l / 4 = 0,0229 \text{ м}^3$; $m = V \cdot \rho_{\text{аммиака}} = 16 \text{ кг}$. Количество аммиака для работы установки составляло около 6,4 кг, расход хладагента – 0,0008 кг/с.

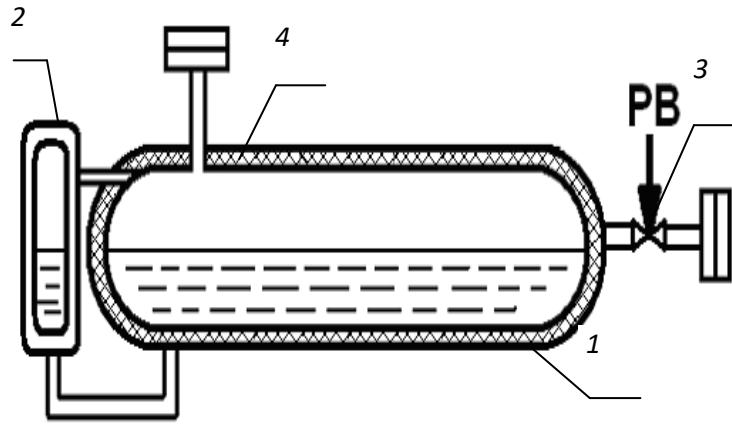


Рисунок 3.16 – Схема ресивера гелиоэнергетического термотрансформатора:
 1 – ёмкость ресивера; 2 – стекло «Клингера»; 3 – регулирующий вентиль;
 4 – изоляция

Ресивер устанавливался на одной раме под конденсатором и имел стекло «Клингера» со шкалой для замеров количества аммиака, циркулирующего в установке. Также ресивер снабжался предохранительным клапаном для сброса избыточного аварийного давления в воздух, заправочным и запорным вентилями.

Экспериментальная установка была собрана на специально сконструированной раме тройного уровня. Количество загруженного адсорбента в реакторы составляло 24 кг.

3.4.3 Экспериментальные исследования гелиоэнергетической холодильной установки повышенной эффективности на основе термотрансформатора адсорбционного типа

Количество загруженного адсорбента (активированного угля) в каждый реактор составляло 12 кг. Перед загрузкой сорбента осуществлялось просушивание его для выпаривания влаги. Затем осуществлялась загрузка сорбента равномерно по длине реактора. Реактор на всех стадиях засыпки взвешивался на весах (цена деления 10 г.). Затем проводился дополнительный

прогрев адсорбента внутри аппарата. После тщательной герметизации осуществлялось насыщение адсорбента аммиаком в самом реакторе.

Насыщение проходило в следующем порядке. Реактор устанавливался на весах и через приспособление с металлической трубкой крепился к баллону с аммиаком. Процесс насыщения адсорбента парами аммиака происходило при установке баллона вентилем вверх и давлении 3 атм. Реактор обливался холодной водой, при этом температура реакции была около 100°C. Длительность насыщения составляло более 3 ч.

После сборки всех аппаратов их проверяли на плотность избыточным давлением сухим воздухом и вакуумированием (реакторы с насыщенным адсорбентом были перекрыты вентилями). Затем производилась заправка жидким аммиаком в ресивер установки по мерному стеклу.

Замеры параметров экспериментальной установки производились круглосуточно в течение ряда контрольных дней. В ночное время осуществлялась подсветка установки.

Измерялись температуры поверхностей и давление в аппаратах гелиоэнергетического термотрансформатора, а также солнечная радиация, температуры окружающего воздуха и проточной воды в конденсаторе, количества хладагента в ресивере.

На рисунке 3.17 представлены графики изменения температур нагрева частей генератора-адсорбера термотрансформатора (по данным на 16 июля 2013г.). Показания термопар носят аналогичный характер изменения температуры в обоих реакторах. Следует предположить, что характер протекания процессов в реакторах идентичен. Показания термопар, закрепленных в нижней части реактора ниже, чем в верхней части, но характер изменения температуры аналогичен, сказывается также тепловая инерционность. Экспериментальные значения приведены в приложении Л.

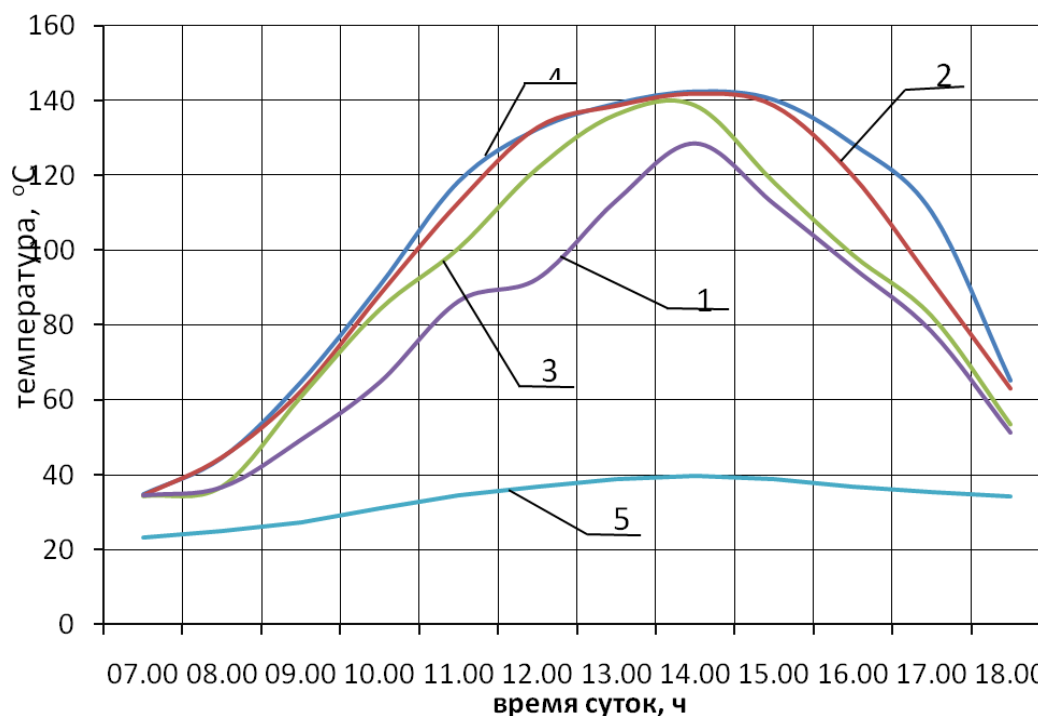


Рисунок 3.17 – Показания температур реактора генератора-адсорбера в период регенерации термотрансформатора:

1-4 показания температур в различных точках на поверхности реактора, 5- температура окружающей среды.

На рисунке 3.18 приведены значения температур реактора при работе в режиме адсорбции в ночное время. Повышение температуры поверхности реактора начинается после открытия регулирующего вентиля (20:00), что показывают замеры термопарами. В первоначальный момент интенсивное протекание реакции адсорбции при большом количестве выделяемой теплоты и повышением температуры. Затем процесс замедляется, уменьшается теплота реакции и наблюдается снижение температуры до значений близких к температуре окружающей среды. Экспериментальные значения в приложении М.

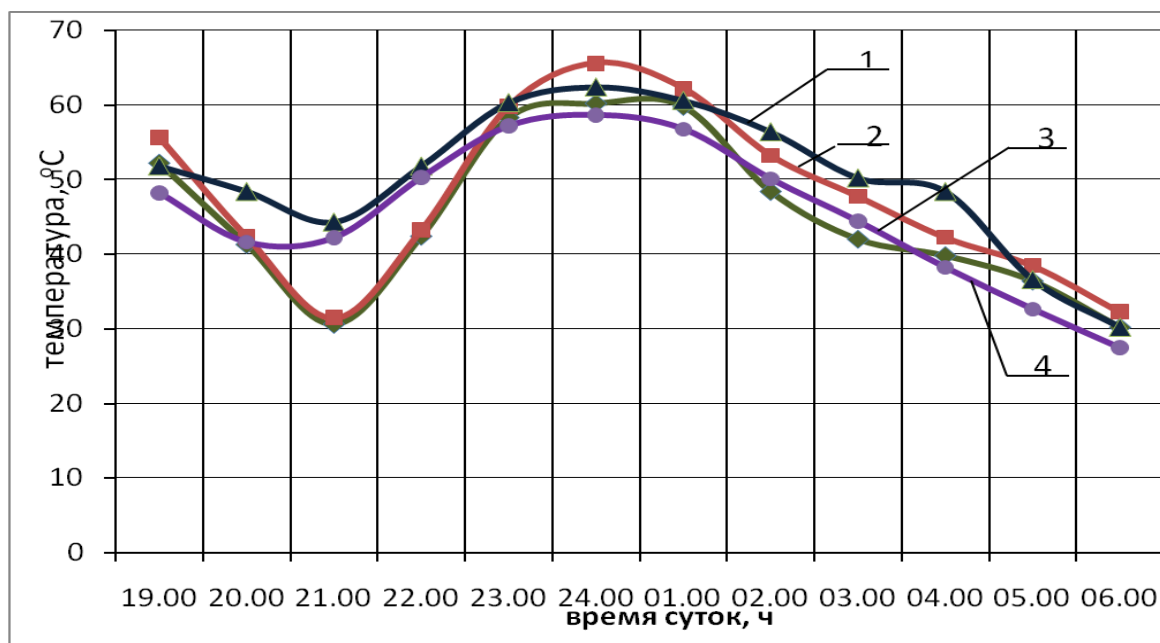


Рисунок 3.18 – Графики зависимости изменения температур на стенках реактора в процессе адсорбции в ночное время.

На рисунке 3.19 представлены зависимости изменения температур в охлаждаемой камере 2. Температуры на поверхности трубки испарителя (термопары 4 и 6) и температуры в ёмкости охлаждаемой воды (термопара 3). Из зависимостей видно, что при открытии регулирующего вентиля интенсивно протекает процесс адсорбции и происходит падение температуры на поверхности испарителя 1 в части аппарата где кипит аммиак и в паровой части 3. Постепенно начинает охлаждаться вода в емкости 3 и температуры воздуха в камере 2. Отличие значений температур указывает на наличие тепловой инерции и перераспределением воздушных потоков в охлаждаемой камере. Температурная линия насыщения 5, построенная по показаниям манометра доказывает возможность кипения хладагента в испарителе. Экспериментальные значения приведены в приложении Н.

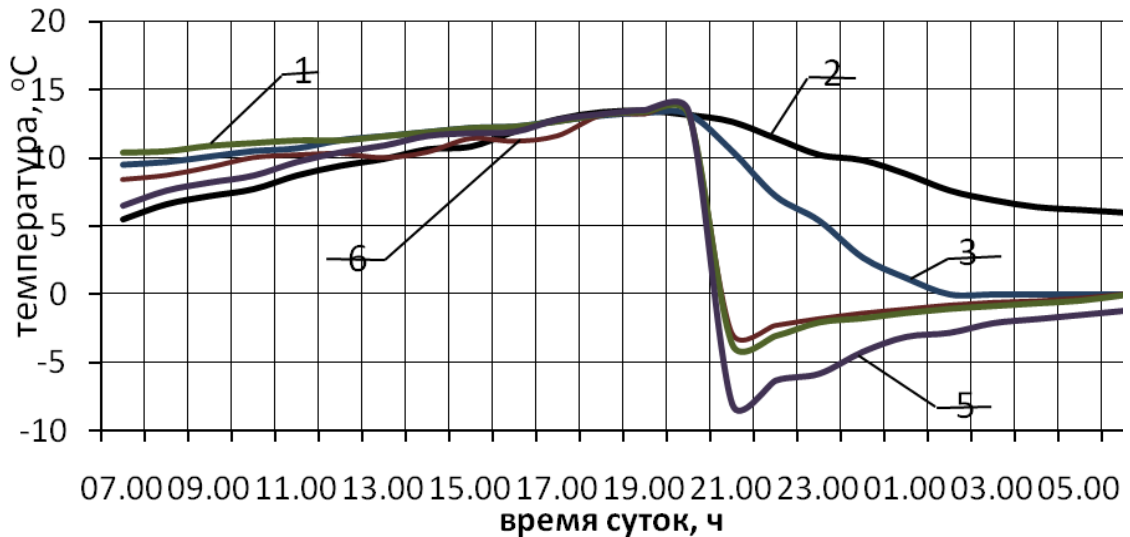


Рисунок 3.19 – Графики зависимости измеряемых температур в различных точках охлаждающей камеры, поверхности испарителя и охлаждающей воды

В установке использовался водяной конденсатор. Охлаждающая вода снижает давление в установке и улучшает процесс конденсации аммиака.

В дневное время наличие воды в конденсаторе приводит к тепловой инерционности установки при работе в вечернее время.

На рисунке (рисунке 3.20) представлена зависимость массы холодильного агента в ресивере гелиоэнергетического термотрансформатора, изменяемой в течении суток. Из графика можно судить о неравномерности по скорости протекания десорбционного и адсорбционного процессов.

Применение конденсатора с водяным охлаждением резко понижает давление в установке, но температурная инерционность возрастает.

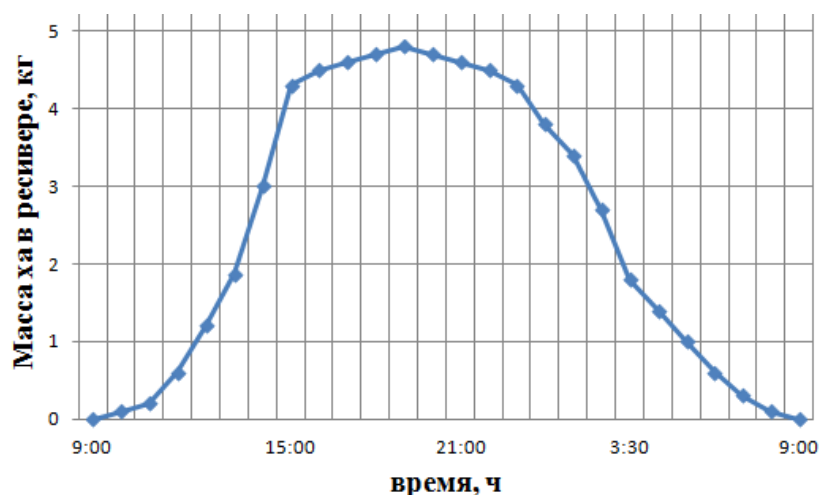


Рисунок 3.20 – Зависимость изменения массы хладагента в ресивере в течение суток

На рисунке 3.21 представлены усреднённые значения температур, полученных при исследовании гелиоэнергетической установки в летний период времени (июнь- август 2013 г.). Утром с увеличением интенсивности облучения реакторов генератора-адсорбера в гелиоприемных устройствах начинается рост температур. Полезная теплота поступающая на реакторы идет на осуществления процессов изостерического нагрева и десорбции. В процессе десорбции адсорбат в парообразном состоянии направляется в конденсатор, где сжижается и накапливается в ресивере.

После 15 часов местного времени наблюдается падение температур в гелиоприемнике и на поверхности реактора. До 20.00 жидкий хладагент-адсорбат остывает в ресивере, достигая температуры окружающего воздуха. В 20.00 часов, когда давление в установке снижается открывается регулирующий вентиль за ресивером и жидкий хладагент поступает в испаритель, где кипит, отбирая теплоту из изолируемой камеры.

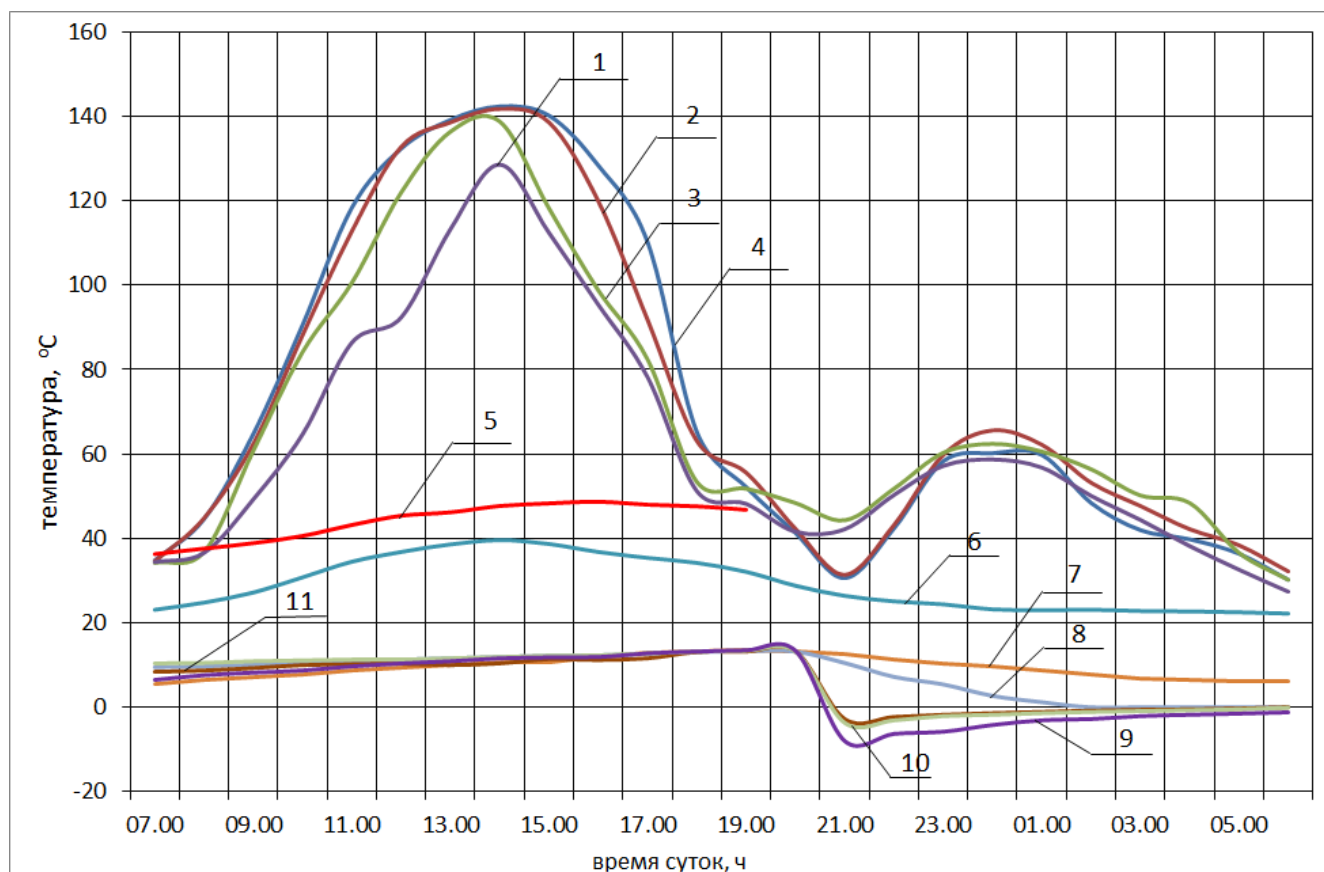


Рисунок 3.21 – Графики зависимости усреднённых измеряемых температур гелиоустановки (июнь–август, 2013 г.):

1-4 – температуры нагрева поверхности реактора генератора-абсорбера 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 – температуры поверхности испарителя (приложение О)

Отбор паров адсорбата из испарителя осуществляется в результате адсорбции адсорбентом. Температура в реакторах при адсорбции начинает расти, теплоту адсорбции можно отводить из термотрансформатора в ночное время и использовать для нагрева воды или воздуха. После часа ночи процесс десорбции замедляется и к 06.00 часов в термотрансформаторе устанавливаются самые низкие температуры. Экспериментальные значения приведены в приложении О.

Получены следующие результаты испытаний: максимальная температура нагрева на поверхностях реактора генератора днем 142⁰С; минимальная

температура охлаждения поверхности испарителя ночью $-8,2^{\circ}\text{C}$; максимальная температура поверхности реактора адсорбера ночью $65,3^{\circ}\text{C}$; неравномерность нагрева поверхности реактора днем в среднем 9°C ; средняя скорость роста температуры нагрева поверхности реактора днем $0,8^{\circ}\text{C}/\text{мин}$; суточные колебания давления в установке при охлаждении водой составляли: днем до $2,53$ МПа, ночью до $0,14$ МПа. Температура воздуха в охлаждаемой камере в течение суток изменялась в пределах $+4\dots+12$ $^{\circ}\text{C}$. Средняя холодопроизводительность установки около $Q_o=100$ Вт. Значения изменения давления в установке приведено в приложении Щ.

Повышение эффективности разработанного нами гелиоэнергетического термотрансформатора происходит за счёт применения развитой конструкции гелиоприемного устройства генератора-абсорбера с отдельно изолированными горизонтальным расположенными горизонтально реакторами, использования новых солнцепоглощающих покрытий, плоских концентраторов энергии с оптимальными геометрическими параметрами и применения новых конструкций реакторов.

3.4.4 Оценка погрешности измерений проведенных исследований

Достоверность полученных результатов оценивалась погрешностью измерений, при расчете которых использовались методы статистической обработки информации. Полученная на этапе измерений информация, являлась входной и интерпретировалась с использованием регуляризирующих алгоритмов, чтобы дать оценку возможной неопределенности входных данных, необходимых для корректного применения этих алгоритмов и оценки неопределенности регуляризованного решения [31].

Измерительная аппаратура и инструменты, перед проведением экспериментов калибровалась, выверялись режимы измерений, устанавливались необходимые значения температуры, давления, массы, объема. После проведения эксперимента показатели солнечной активности сравнивались с показаниями полученными на астраханской метеорологической станции. Исследования проводились на основе

метода статистической обработки многократных отсчетов и определением погрешности прямых и косвенных равноточных измерений:

- по результатам измерений величин x определялось среднее арифметическое значение из n измерений по формуле

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- вычислялось среднеквадратичное отклонение результатов измерений от среднего арифметического

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$$

- для доверительной вероятности $a=0,95$ при количестве измерений n определяем коэффициент Стюдента $t_{ст}$.

- рассчитываем границы доверительного интервала (случайную погрешность) для многократных измерений $\Delta\tilde{x}_{сл} = t_{ст} \cdot \tilde{\sigma}$

- оцениваем доверительный интервал (погрешность) однократных измерений $\Delta\tilde{x}_{ио} = a \cdot d$

где d – параметр равномерного распределения, связанный с ценой деления или классом точности прибора

- общая погрешность серии измерений (доверительный интервал) $\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{сл}^2 + \Delta\tilde{x}_{ио}^2}$

- результаты измерений $x = \tilde{x} \pm \Delta\tilde{x}$

Результаты расчетов приведены в приложении Э.

3.5 Выводы к третьей главе

1. Определение характеристик активированных углей (кажущаяся удельная масса, суммарный объем пор, пористость) различных марок российского и казахстанского производства позволили оценить качество сорбционных свойств их при работе в реакторе генератора-адсорбера гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа.

2. Экспериментальные исследования адсорбционной способности активированных углей с такими адсорбентами как аммиак, метиламин и этиламин позволили построить изотермы адсорбции рабочих пар и доказать способность использования этих веществ в холодильных установках.

3. Обработка в логарифмической анаморфозе экспериментальных данных по изотермам адсорбции исследуемых рабочих пар позволили получить характерные коэффициенты (предельный объем адсорбционного пространства, энергетический коэффициент адсорбции, показатель распределения размерности пор) для структурных уравнений Дубинина М.М. и Дубинина-Радушкевича.

4. Экспериментальные исследования тепловых нагрузок на воде и водоглицериновом растворе новой конструкции генератора-адсорбера подтвердили адекватность теоретической расчетной модели полезной тепловой нагрузки на реактор аппарата.

5. Испытания гелиоэнергетической холодильной установки и ее аппаратов на рабочей паре активированный уголь и аммиак доказали работоспособность данной установки в условиях жаркого климата. Получены суточные изменения температур на аппаратах установки, доказывающих получение охлаждающего эффекта.

Глава 4 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА АДСОРБЦИОННОГО ТИПА

4.1 Разработка расчетной модели для определения термодинамической и эксергетической эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки

Цикл работы установки циклического действия представлен на рисунке 52 и состоит из четырех процессов: **АБ** – изостерический процесс нагрева насыщенного активированного угля в реакторе генератора-адсорбера; **БВ** – изобарный процесс десорбции, выделения из активированного угля парообразного аммиака, который сжижается в конденсаторе при изобарном процессе **Г**; **ВД** – изостерический процесс охлаждения активированного угля без изменения его состояния; **ДА** – изобарный процесс адсорбции – поглощения аммиака активированным углем до состояния полного насыщения, при этом в испарителе начинается изобарический процесс кипения аммиака **Ж**. Процессы **АБ** и **БВ** протекают при подводе теплоты солнечной энергии, процессы **ВД** и **ДА** – при охлаждении реактора охлаждаемым воздухом или водой. **ГЖ** – процесс регулирования работы холодильной установки посредством соленоидного вентиля.

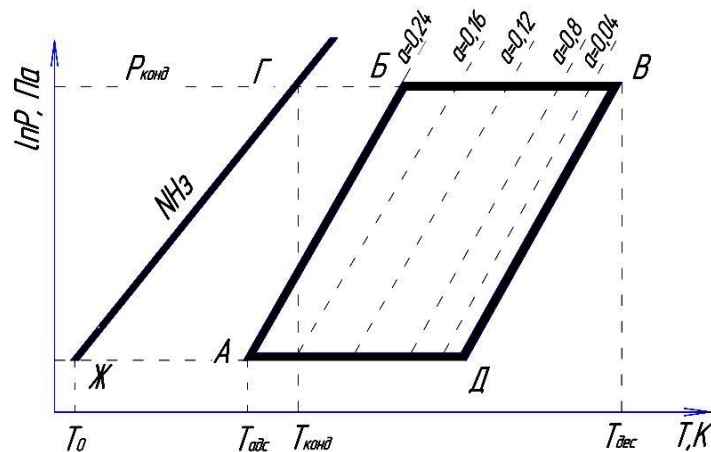


Рисунок 4.1 – Цикл работы холодильной установки адсорбционного типа

Для исследования эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на различных рабочих парах была разработана математическая модель в программе MATLAB. Общая схема программной модели представлена на рисунке 4.2. В основе модели лежит уравнение Дубинина-Радускевича (1.40). Отличительной особенностью разработанной модели [18, 19] от ранее известных моделей [2, 80, 98] является то, что новая более универсальная, способная в автоматическом режиме показать полную картину изменения заданных параметров, свободно переключается на дополнительные подстрочные вспомогательные операции.

Модель построена на следующих логических рассуждениях. В процессе изостерического нагрева АБ, величина адсорбции не изменяется $a(T_{адс}, P_s) = const$; несмотря на то, что в этом процессе возрастает температура и давление. Этот процесс АБ заканчивается при температуре, при которой давление насыщения станет равным давлению при температуре конденсации (т.Б). При дальнейшем возрастании температуры давление остается неизменным $P_s = P(T_k)$, и процесс переходит в процесс десорбции БВ. В процессе десорбции, в результате выделения из сорбента адсорбата, доля насыщения адсорбентом активированного угля уменьшается $a_0 - a_{0I} = \Delta a$. Процесс десорбции идет до температуры, равной заданной $T_{дес}(max)$.

Для определения термодинамической эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на конкретной рабочей паре определяли теплоту, идущую с одной стороны на обогрев реактора генератора-адсорбера в процессе изостерического нагрева $Q_{АБ}$ и в процессе изобарической десорбции $Q_{БВ}$, с другой стороны рассматриваем полезную теплоту, отводимую из охлажденного в процессе изобарического кипения хладагента в испарителе Q_0 .

$Q_{АБ} = c_i \cdot m_i \cdot \Delta T$; где c_i , m_i – соответственно, теплоемкость и масса i -их элементов реактора генератора-адсорбера: металла, сорбента и адсорбата; ΔT – температура разности нагрева элементов реактора от температуры адсорбции до начала десорбции.

$Q_{БВ} = Q'_{БВ} + Q_{дес}$, где $Q'_{БВ}$ – теплота, идущая на нагрев i -их элементов

реактора генератора-адсорбера в процессе десорбции, $Q_{дес}$ – теплота физико-химических процессов, идущая на выход молекул аммиака из микро-, макро-, мезопор сорбента и определялась из работы [44].

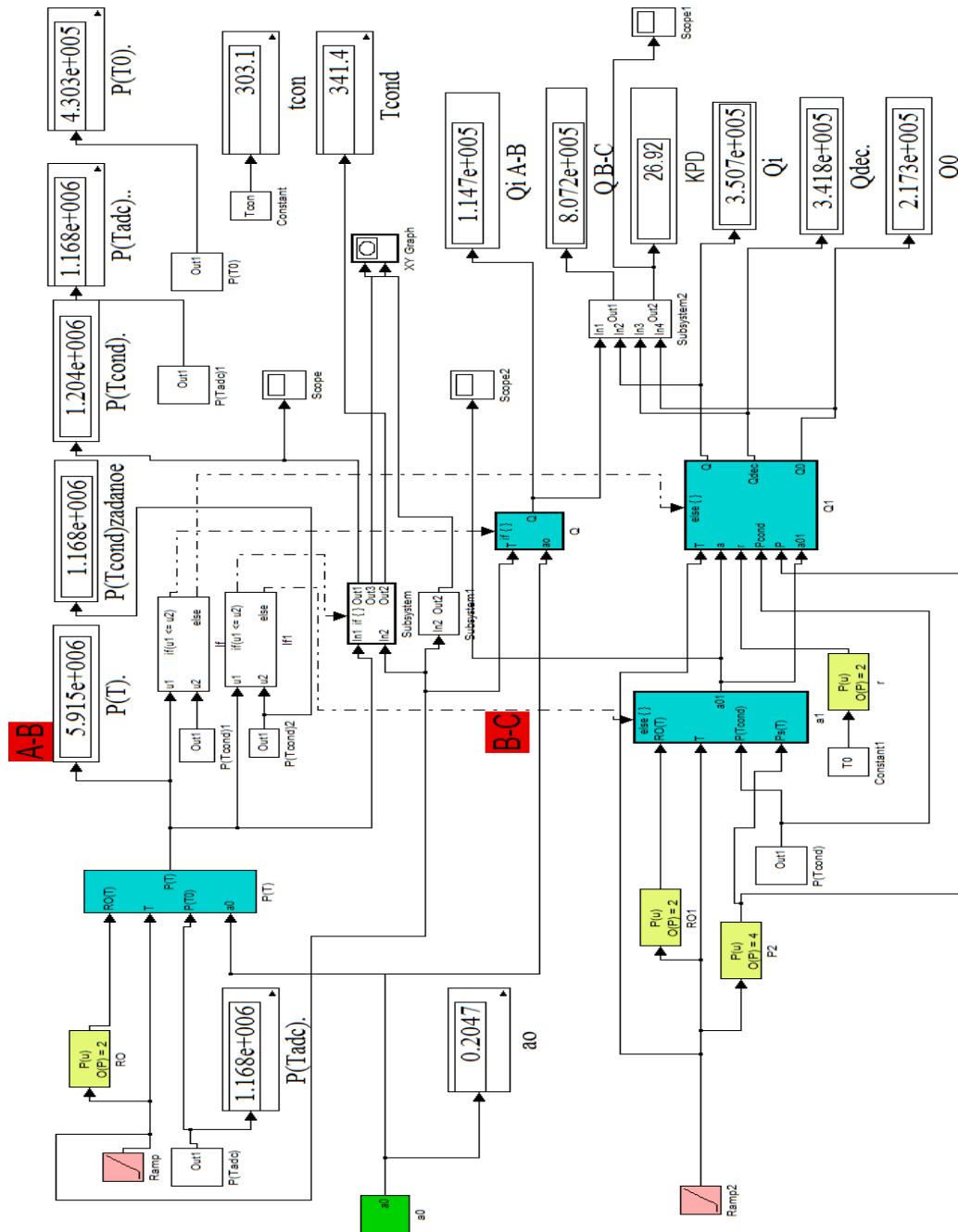


Рисунок 4.2 – Схема программной модели

$$Q_{дес} = \{r_0 + R \cdot T \cdot \ln(P_s/P) + [\alpha \cdot R \cdot T / (D \cdot n)] \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^{-1}\} \cdot \Delta a, \quad (4.1)$$

где r_0 – скрытая теплота парообразования адсорбата; R – универсальная газовая постоянная; P_s – соответственно давление насыщения; P , T - давление и

температура; α – коэффициент термического расширения адсорбционной фазы.

$$Q_o = r_o \cdot \Delta a \quad (4.2)$$

Термодинамический коэффициент полезного действия адсорбционного термотрансформатора определялась как отношение полезной теплоты при получении охлаждающего эффекта к затраченной теплоте на ее работу

$$\eta_{\text{терм}} = Q_o / (Q_{\text{АБ}} + Q_{\text{БВ}}) \quad (4.2)$$

Степень термодинамического совершенства системы определяется через эксергетический КПД термотрансформатора $\eta_{\text{экс}}$, как отношение полезной эксергии $\mathcal{E}_{\text{пол}}$ к затраченной $\mathcal{E}_{\text{зат}}$.

Для определения степени термодинамического совершенства термотрансформатора вводим температурные соотношения, связывающие температурные параметры окружающей среды $T_{\text{ос}}$, минимальную температуру кипения хладагента (адсорбата) в испарителе T_o и максимальную температуру десорбции $T_{\text{дес}}$ в реакторе генератора-адсорбера.

Тогда полезная эксергия, отведенная в испарителе термотрансформатора при температуре T_o будет равна

$$\mathcal{E}_{\text{пол}} = Q_o [(T_{\text{ос}} - T_o)/T_o], \quad (4.3)$$

а затраченная эксергия, подведенная к реактору генератора-адсорбера при температуре $T_{\text{дес}}$ будет равна

$$\mathcal{E}_{\text{зат}} = (Q_{\text{АБ}} + Q_{\text{БВ}})[(T_{\text{дес}} - T_{\text{ос}})/T_{\text{дес}}] \quad (4.4)$$

$$\eta_{\text{экс}} = \mathcal{E}_{\text{пол}}/\mathcal{E}_{\text{зат}} \quad (4.5)$$

4.2 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на рабочей паре активированный уголь-аммиак

Были получены в результате обработки в логарифмической анаморфозе изотерм адсорбции четырех образцов активированных углей (казанского, усть-каменогорского, краснодарского, алматинского производства) характерные коэффициенты для уравнения (Д-Р): для пары АС-аммиак $W_{o(\text{амм})}^{\text{обр1}} = 385,1 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{o(\text{амм})}^{\text{обр2}} = 446 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{o(\text{амм})}^{\text{обр3}} = 442 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{o(\text{амм})}^{\text{обр4}} = 498 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{(\text{амм})} = 12,17 \cdot 10^{-7}$; $n=2$ (глава 3) [18].

Для расчетной модели были использованы следующие зависимости, взятые из литературы [4, 21, 38, 61]:

Зависимость давления насыщения от температуры

$$P_s(T) \text{ (Па)} = +0,0038397 T^4 - 2,6562135 T^3 + 691,2656339 T^2 - 7992,0392243 T + 3,4629427 \cdot 10^6 \quad (4.6)$$

Зависимость плотности аммиака от температуры

$$\rho(T) = -0,0024808 T^2 - 0,0436556 T + 835,5729371 \quad (4.7)$$

Зависимость скрытой теплоты парообразования от температуры

$$q_0(T) = -10,939136 T^2 + 2297,5076456 T + 1,4504727 \cdot 10^6 \quad (4.8)$$

На разработанной модели проводили разные исследования по определению термодинамической эффективности работы адсорбционного термотрансформатора при различных параметрах (расчетные значения в приложении П – приложении Т).

На рисунке 4.3 представлены зависимости термодинамических КПД от температуры десорбции для исследуемых активированных углей при постоянных температурах конца адсорбции $T_{\text{адс}}$ или начала процесса изостерического нагрева реактора т.А (см. по рисунку 4.1 цикла работы адсорбционного термотрансформатора); температуры кипения T_0 в испарителе т.Ж; температуры $T_{\text{конд}}$ конденсации т.Г.

Из графиков зависимостей (рисунок 4.3, приложение П) видно, что в процессе изостерического нагрева КПД равен «нулю», затем начиная с некоторой температуры, равной около 330 К при переходе из изостерического в процесс десорбции т.Б, резко возрастает КПД, затем рост его замедляется и в некотором диапазоне температур $T_{\text{дес}}$ от 400К до 430К наблюдается стабилизация значения $\eta_{\text{терм}} = 0,32 - 0,34$. При дальнейшем увеличении температуры десорбции КПД начинает снижаться и при $T_{\text{дес}} = 470\text{К}$ (около 200°C) падает на 5 - 8 %.

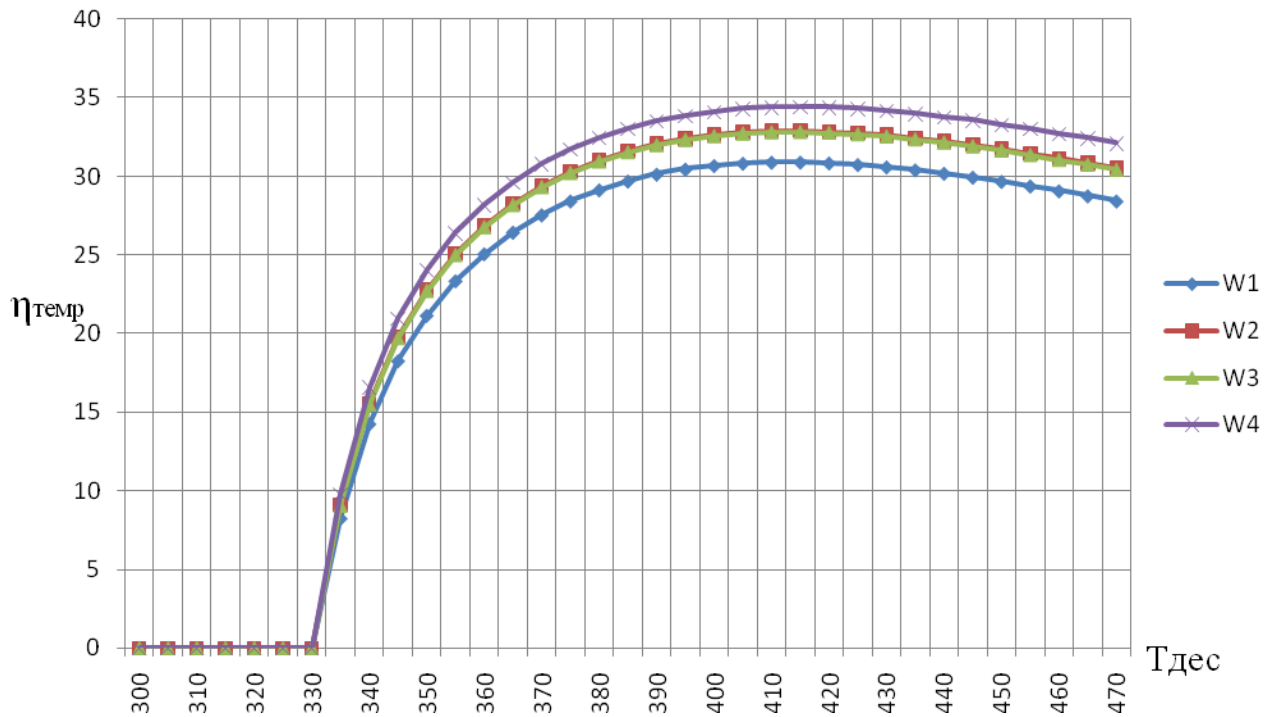


Рисунок 4.3 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии $T_0=273\text{K}$

$$T_{\text{конд}}=298\text{K} \quad T_{\text{адс}}=298\text{K}$$

На рисунке 4.4 показаны графики (приложение Р) аналогичные предыдущим зависимостям термодинамического КПД от температуры десорбции, при постоянных значениях $T_{\text{конд}} = T_{\text{адс}}$, они имеют более высокие значения, чем в предыдущих графиках, но температура $T_0 = \text{const}$ остается такой же, как и на рисунке 4.3

Из рисунка 4.4 видно, что процесс десорбции, при котором начинается отсчет КПД начинается с более высокой температуры, порядка 360 К. $\eta_{\text{терм}}$ сначала резко возрастает до значений чуть ниже предыдущих и в диапазоне температур десорбции от 420 К до 460 К имеет максимальные значения порядка $\eta_{\text{терм}}=0,268 - 0,298$. Дальнейшее увеличение температуры десорбции приводит к снижению термодинамического коэффициента.

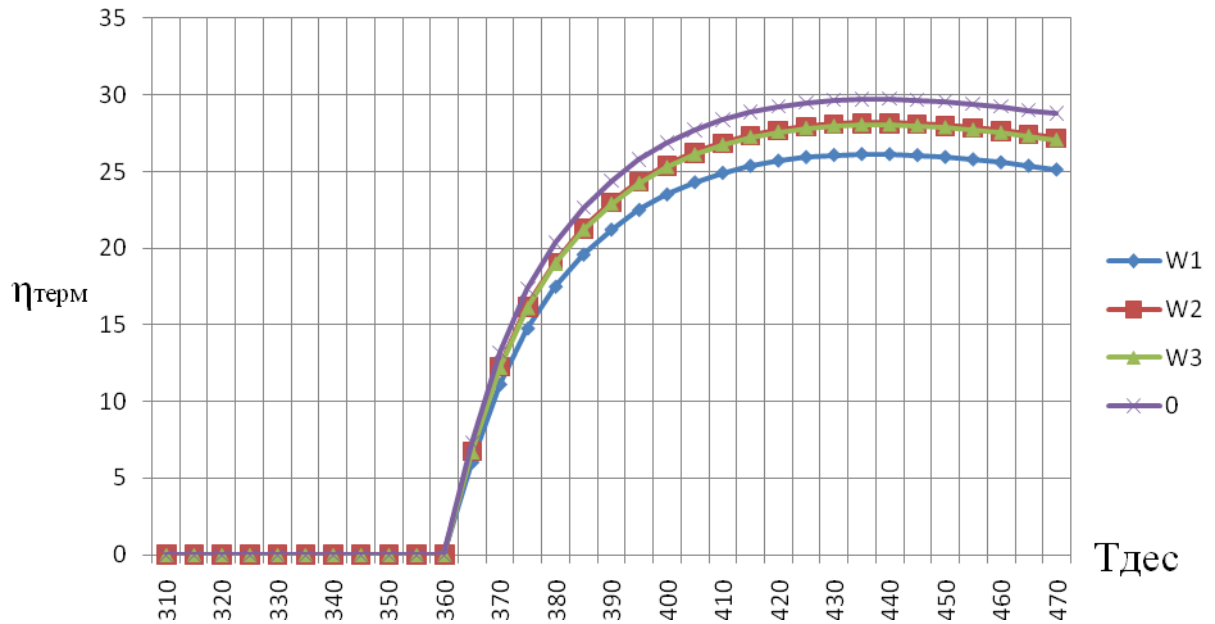


Рисунок 4.4 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов углей при условии $T_0=273\text{K}$; $T_{\text{конд}}=308\text{K}$; $T_{\text{адс}}=308\text{K}$.

На рисунке 4.5 (приложение С), когда $T_0=\text{const}$ не изменяется, $T_{\text{адс}}=T_{\text{конд}}$ постоянные, но значения их выше чем на предыдущих графиках (рисунок 4.3 и рисунок 4.4) процесс десорбции начинается с температуры порядка 390 К, с дальнейшим увеличением температуры десорбции КПД резко возрастает и достигает максимальных значений в диапазоне температур десорбции от 445 К до 470 К, при этом $\eta_{\text{терм}} = 0,208 - 0,243$. Из этого следует сделать вывод о том, что температура десорбции имеет некоторый диапазон значений, при котором удерживаются максимальные значения коэффициентов термодинамической эффективности. Температура конденсации и температура начала изостерического нагрева влияют на диапазон рабочих температур десорбции и КПД работы адсорбционных холодильных установок на основе термотрансформаторов.

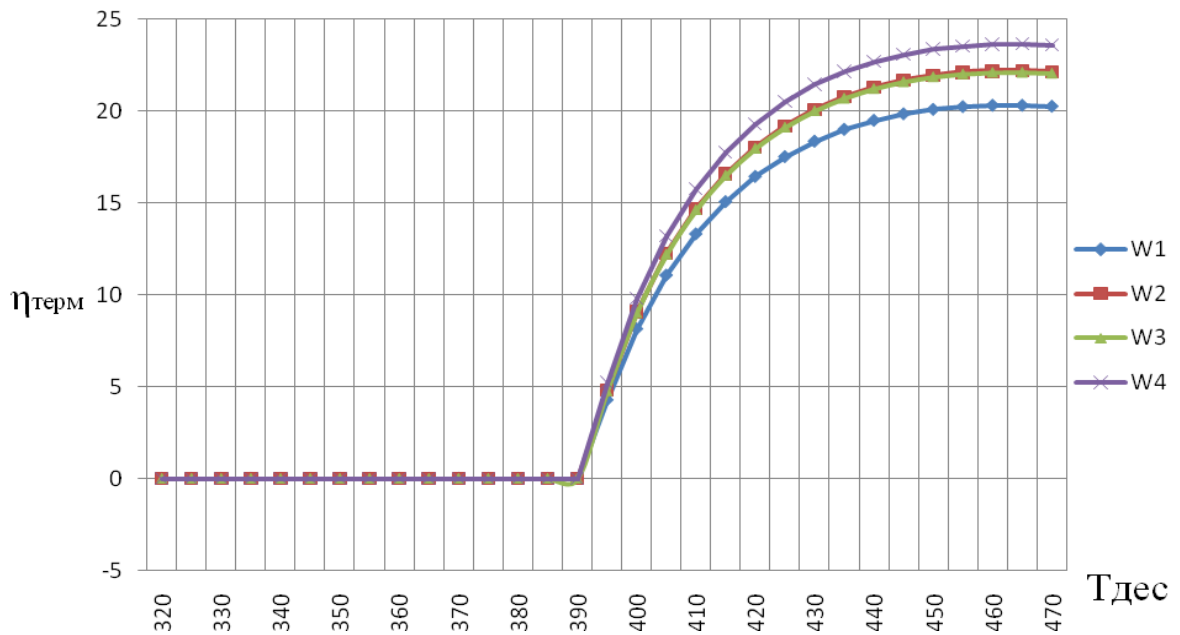


Рисунок 4.5 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов углей при условии $T_0=273\text{К}$; $T_{\text{конд}}=318\text{К}$; $T_{\text{адс}}=318\text{К}$.

Анализируя, аналитические зависимости термодинамического КПД от изменения температуры десорбции, следует рассмотреть характер изменения адсорбционной доли адсорбата в адсорбенте от $T_{\text{дес}}$, представленной на рисунке 4.6 (приложение II) для четырех исследуемых образцов активированных углей.

На участке **АБ** изостерического процесса нагрева величина a (доля адсорбата в адсорбенте) не меняется, затем при переходе в процесс десорбции a изменяется, сначала идет быстрое убывание, а затем убывание замедляется.

Если взять одинаковые разности температуры по оси абсцисс, получается следующие результаты: при $\Delta T=320-380\text{К}$ изменение $\Delta a = 0,12 - 0,16$; при $\Delta T = 380 - 440 \text{ К}$ изменение $\Delta a = 0,07 - 0,08$; дальнейшее увеличение температуры десорбции приводит к лишь незначительному изменению адсорбционной массы адсорбата в адсорбенте. Поэтому в таких установках, при применении в режимах охлаждения и кондиционирования, следует экономно регулировать тепловую энергию, ограничением температуры десорбции в реакторе.

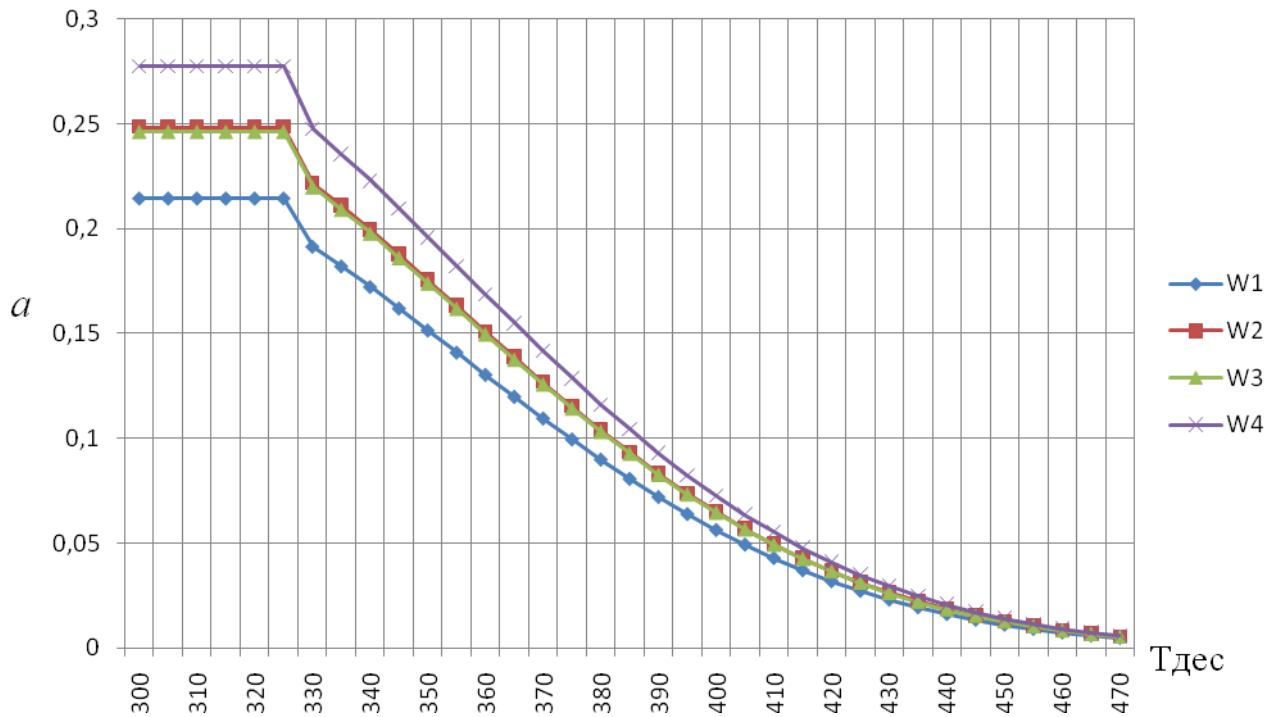


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента a установки от температуры десорбции для разных типов углей при условии $T_0=273\text{K}$ $T_{конд}=298\text{K}$ $T_{адс}=298\text{K}$ $T_{ос}=293\text{K}$

На рисунке 4.7 показаны графики зависимости термодинамического КПД от $T_{адс}$ и $T_{конд}$ для исследуемых типов активированных углей при следующих параметрах $T_0=273\text{K}$, $T_{дес}=420\text{K}$. Из графиков видно, что термодинамический КПД термотрансформатора снижается от увеличения температура адсорбции и конденсации. Значения КПД при $T_{адс}=283\text{K}$ составляет порядка $\eta_{терм}=0,335-0,362$, а при $T_{адс}=318\text{K}$ $\eta_{терм}=0,168-0,192$. Влияние температуры адсорбции и конденсации сильно влияет на термодинамическую эффективность работы термотрансформатора.

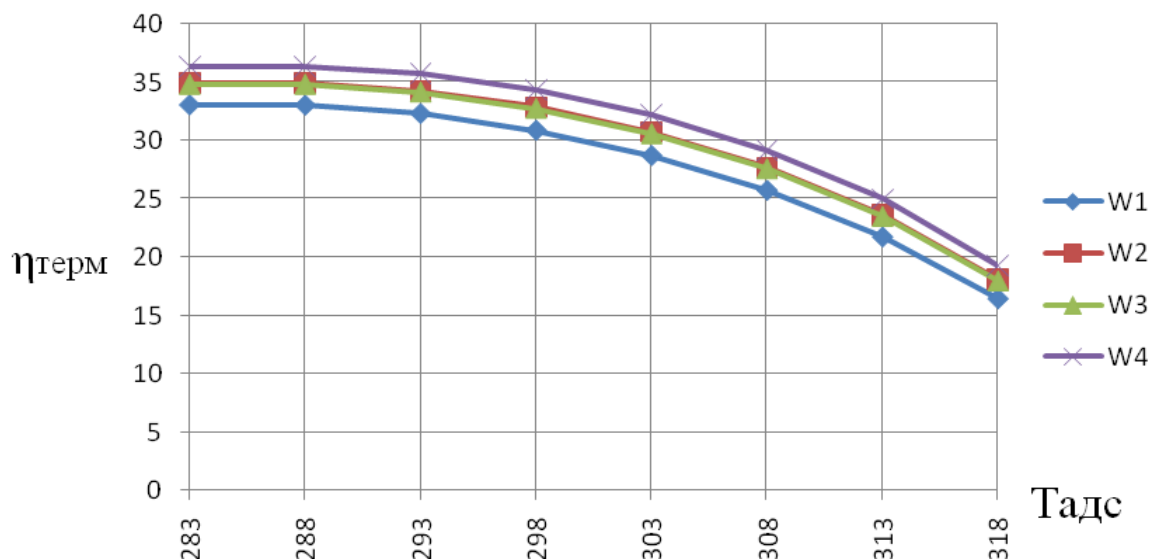


Рисунок 4.7 – Зависимость термодинамического КПД от $T_{\text{адс}}$ и $T_{\text{кон}}$ для разных типов углей при условии $T_0=273\text{K}$, $T_{\text{дес}}=420\text{K}$

На рисунке 4.8 представлены графики зависимостей термодинамического КПД от температур кипения адсорбата (хладагента) в испарителе холодильной установки.

Исследовались несколько температур кипения в диапазоне от температур замораживания, когда термотрансформатор работает в режиме холодильной машины и морозильника (-20°C , -15°C , -10°C), в режимах охлаждения (0°C , $+5^{\circ}\text{C}$), в режимах кондиционирования ($+10^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$). Термодинамический КПД, как показано на рисунке 59 с увеличением температуры кипения возрастает: если при $T_0=253\text{K}$ он составлял $\eta_{\text{терм}} = 0,282 - 0,322$, то при $T_0=263\text{K}$ $\eta_{\text{терм}} = 0,328 - 0,363$; при $T_0=273\text{K}$ $\eta_{\text{терм}} = 0,331 - 0,364$; при $T_0=283\text{K}$ $\eta_{\text{терм}} = 0,168 - 0,192$.

Затем наблюдается некоторая стабилизация значений КПД и далее небольшое снижение.

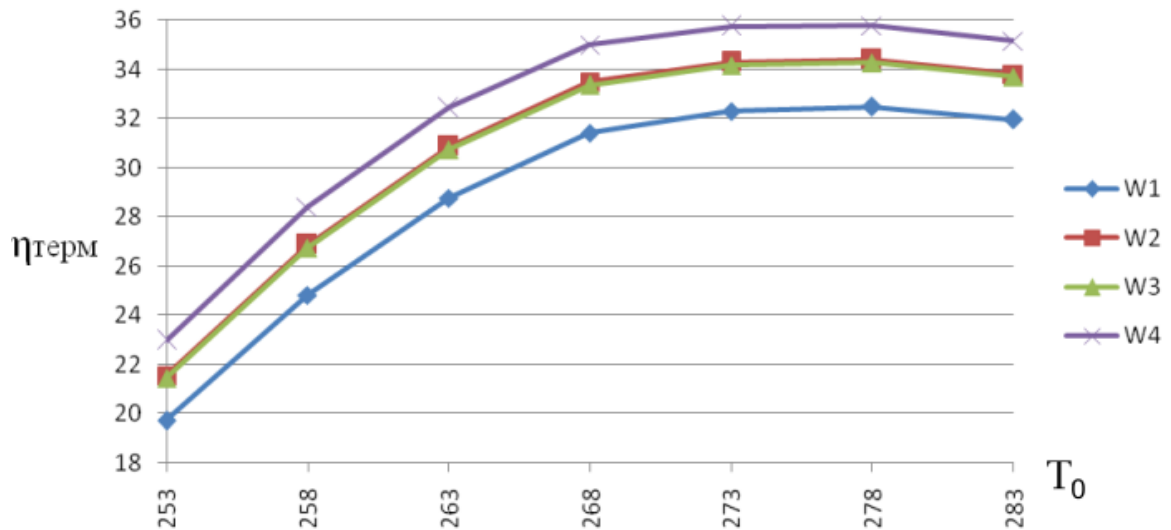


Рисунок 4.8 – Зависимость термодинамического КПД от T_0 для разных типов углей при условии $T_{\text{адс}}=283$ К , $T_{\text{дес}}=420$ К

На рисунке 4.9 изображены расчетные зависимости эксергетического КПД для рабочей пары АС-аммиак при постоянных температурах конденсации, адсорбции, температуре охлаждающей среды и изменяющейся температуре десорбции и кипения. Характер кривых повторяется и все зависимости имеют явный экстремум. Если через точки максимальных значений $\eta_{\text{экс}}$ провести кривую, то можно определить оптимальное значение эксергетического КПД, которое имеет максимальное значение равное 7,85%. Это значение соответствует режимам охлаждения составляющем минус 10°C .

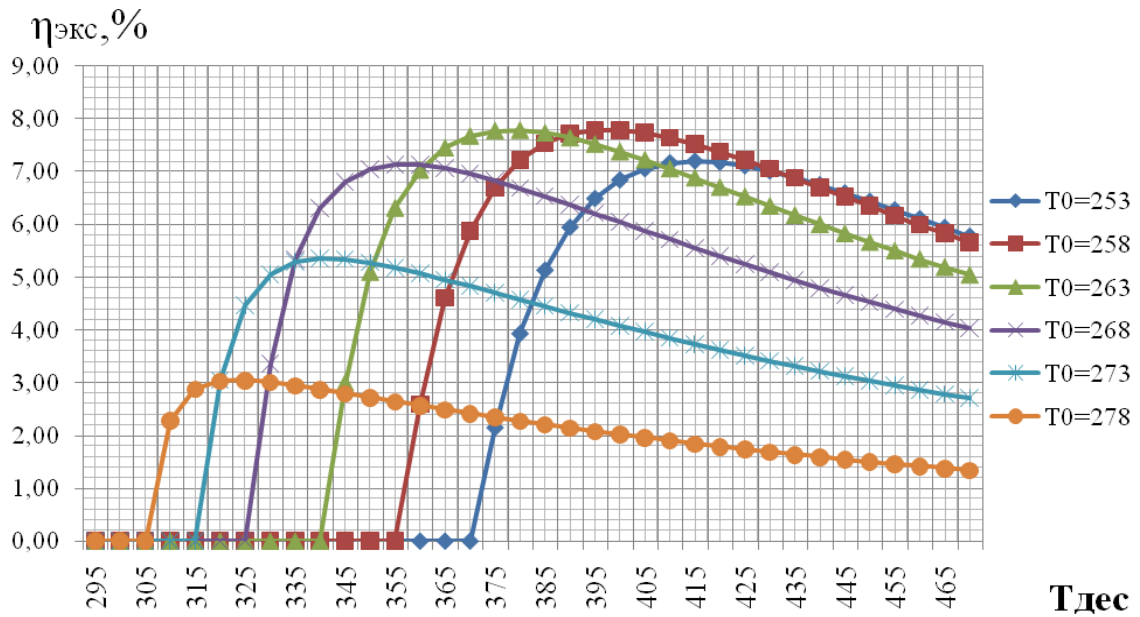


Рисунок 4.9 – Зависимости эксергетического КПД (АС-аммиак) от различных температур десорбции при постоянных температурах конденсации $T_{\text{конд}}=293\text{К}$, адсорбции $T_{\text{адс}}=293\text{ К}$, $T_{\text{ос}}=283\text{ К}$, но различных температурах кипения в испарителе (приложение Т) [15].

4.3 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установке на рабочей паре активированный уголь-метиламин

Были получены в результате обработки в логарифмической анаморфозе изотерм адсорбции четырех образцов активированных углей (казанского, усть-каменогорского, краснодарского, алматинского производства) характерные коэффициенты для уравнения (Д-Р): для пары АС-метиламин: $W_{\text{о(мет)}}^{\text{обр1}} = 332 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$; $W_{\text{о(мет)}}^{\text{обр2}} = 344,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$; $W_{\text{о(мет)}}^{\text{обр3}} = 352,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$; $W_{\text{о(мет)}}^{\text{обр4}} = 391,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$; $D_{\text{(мет)}} = 16,58 \cdot 10^{-7}$; $n=2$ (глава 3) [19].

Для расчетной модели были использованы следующие зависимости, данные которых взяты из справочников и обработаны.

Зависимость давления насыщения метиламина от температуры

$$P_s(T) \text{ (Па)} = 0,002577T^4 - 1,9583559T^3 + 550,8670367T^2 - 67112,3361806T + 2,9302284 \cdot 10^6 \quad (4.9)$$

Зависимость плотности от температуры

$$\rho(T) = -0,0024491 T^2 - 0,0625281 T + 888,2268644 \quad (4.10)$$

Зависимость скрытой теплоты парообразования от температуры

$$q_0(T) = -10,5539533 T^2 + 2076,3706696 T + 1,0281637 \cdot 10^6 \quad (4.11)$$

Результаты исследований на модели с рабочей парой АС-метиламин представлены на нижеприведенных рисунках и в таблицах приложения.

На рисунке 4.10 показана зависимость термодинамического КПД от температуры десорбции для рабочей пары при $T_0=273\text{К}$, $T_{\text{конд}}=283\text{К}$, $T_{\text{адс}}=283\text{К}$.

На рисунке 4.10 показаны зависимости термодинамических КПД от температуры десорбции для исследуемых активированных углей при постоянных температурах конца адсорбции $T_{\text{адс}}$ или начала процесса изостерического нагрева реактора т. А (см. по рисунку 4.1 цикла работы адсорбционной холодильной установки); температуры кипения T_0 в испарителе т. Ж; температуры $T_{\text{конд}}$ Оконденсации т. Г. Из графиков зависимостей (рисунок 4.10) видно, что в процессе изостерического нагрева КПД равен «нулю», затем начиная с некоторой температуры, равной около 290К при переходе из изостерического в процесс десорбции т. Б, резко возрастает КПД, затем рост его замедляется и в некотором диапазоне температур $T_{\text{дес}}$ от 350 К до 390 К наблюдается стабилизация значения $\eta_{\text{терм}} = 0,275 - 0,284$. При дальнейшем увеличении температуры десорбции КПД начинает снижаться и при $T_{\text{дес}} = 470\text{К}$ (около 200°C) падает на 10 – 12 %.

На рисунке 4.11 (приложение У) с увеличением $T_{\text{конд}}$ и $T_{\text{адс}}$ при $T_0 = \text{const}$ видно, что процесс десорбции, при котором начинается отсчет КПД начинается с более высокой температуры, порядка 353К. $\eta_{\text{терм}}$ сначала резко возрастает до значений чуть ниже предыдущих и в диапазоне температур десорбции от 388К до 423К имеет максимальные значения порядка $\eta_{\text{терм}}=0,182 - 0,202$. Дальнейшее увеличение температуры десорбции приводит к снижению термодинамического коэффициента.

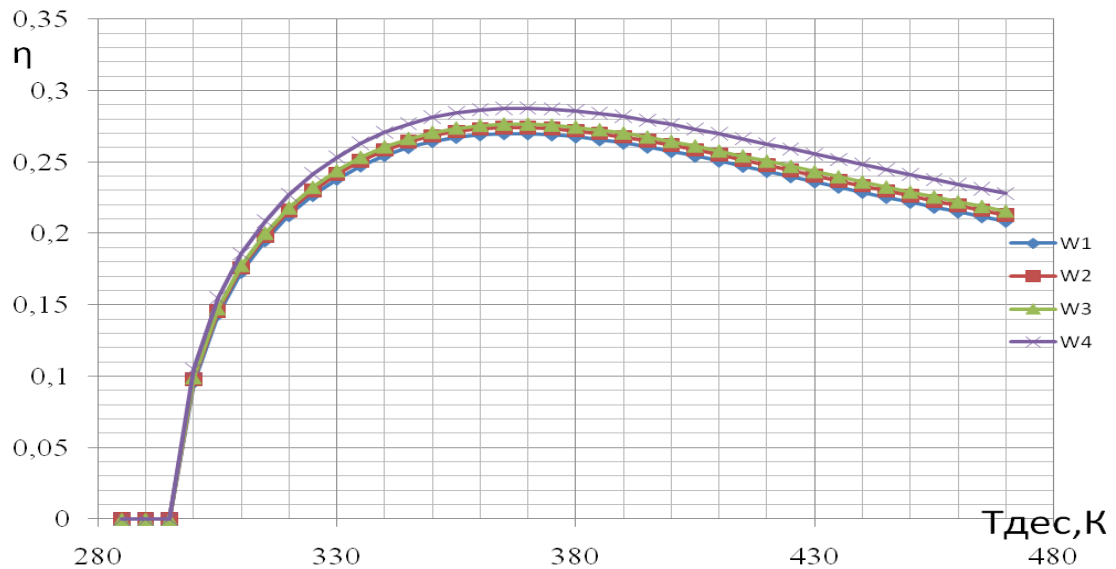


Рисунок 4.10 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии $T_0=273\text{К}$, $T_{конд}=283\text{К}$, $T_{адс}=283\text{К}$

На рисунке 4.12 (приложение Ф) показана зависимость термодинамического КПД от температуры десорбции для рабочей пары АС-метиламин при $T_0=273\text{К}$, $T_{конд}=308\text{К}$, $T_{адс}=308\text{К}$. Из рисунка видно, что только при температуре десорбции равной около 398 К начинает проявляться процесс десорбции метиламина и в диапазоне температур десорбции от 435К до 465К термодинамический КПД составляет всего 0,074-0,087, а при дальнейшем увеличении температуры $T_{адс}$ и $T_{конд}$, равной 318К работа установки совсем прекращается, несмотря на высокие температуры десорбции. Отсюда следует сделать вывод о пределах и диапазоне работы холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа на рабочих парах АС-метиламин.

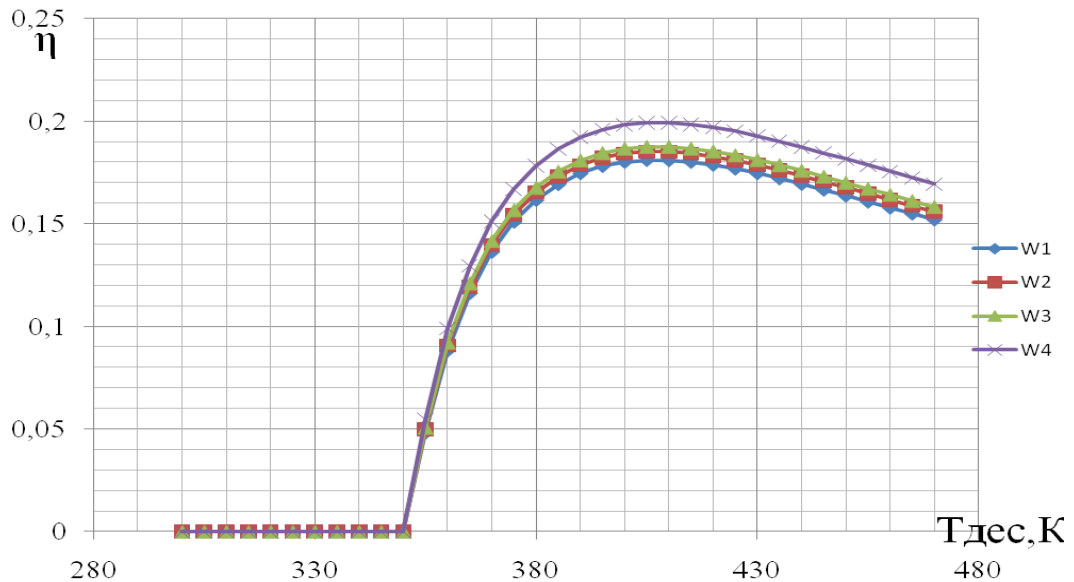


Рисунок 4.11 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии $T_0=273\text{K}$, $T_{конд}=298\text{K}$, $T_{адс}=298\text{K}$.

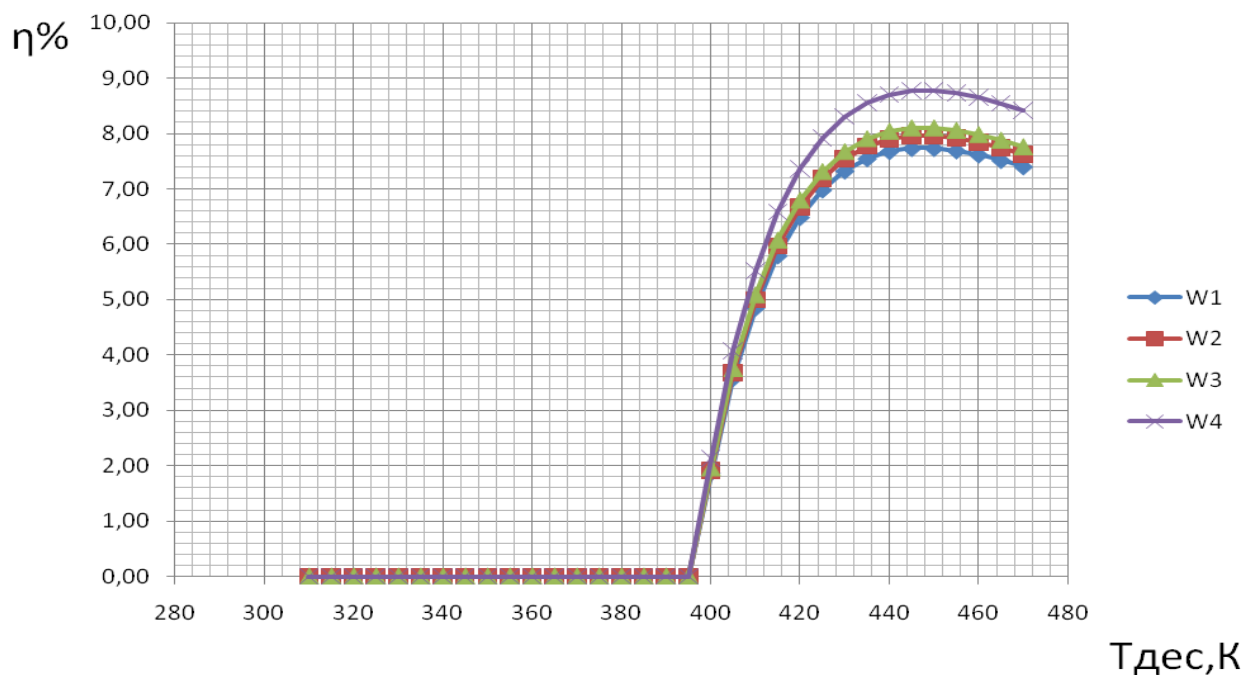


Рисунок 4.12 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии $T_0=273\text{K}$, $T_{конд}=308\text{K}$, $T_{адс}=308\text{K}$.

На рисунке 4.13 видно, что при таких параметрах (указаны на зависимостях) эффективной работы на рабочей паре АС-метиламин в холодильной установке

адсорбционного типа не следует ожидать.

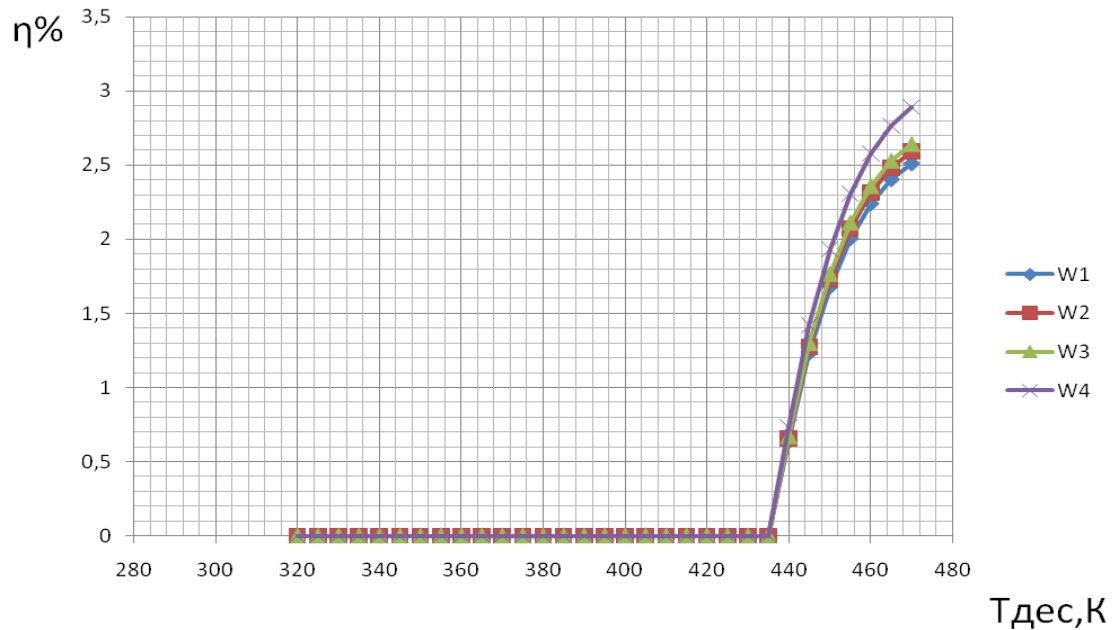


Рисунок 4.13 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии

$$T_0=273K, T_{конд}=318K, T_{адс}=318 K.$$

На рисунке 4.14, когда $T_0=273 K$ (const) и $T_{дес}=423 K$ (const), изменяется только $T_{адс}$ и $T_{конд}$ видно, что при увеличении температур зависимость термодинамического КПД холодильной установке резко снижается: при $T_{адс}=T_{конд}=285 K$ $\eta_{терм}=0,242 - 0,254$; а при $T_{адс}=T_{конд}=300 K$ $\eta_{терм}=0,152 - 0,172$. Дальнейшее увеличение температуры конденсации и адсорбции для таких холодильных установок не целесообразно. Этот факт говорит о том, что в северных широтах, где вода охлаждения довольно холодная, эффективность использования таких холодильных установок с конденсаторами водяного охлаждения более выгодно.

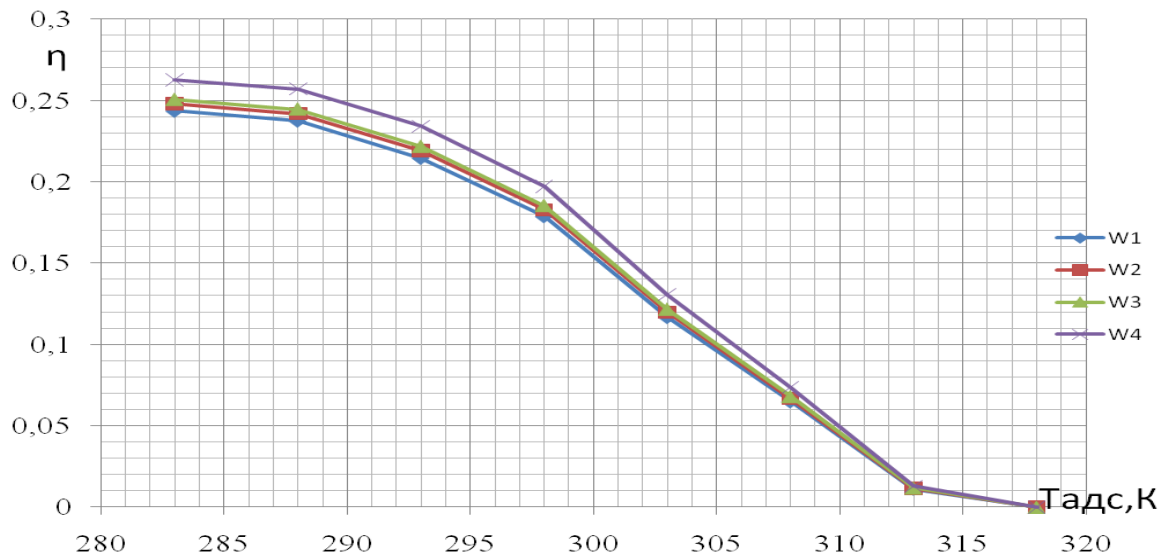


Рисунок 4.14 – Зависимость термодинамического КПД от $T_{адс}$ для разных типов углей при условии $T_0=273\text{К}$, $T_{дес}=423\text{К}$.

На рисунке 4.15, показано влияние температуры кипения, когда она изменяется T_0 от 253 К до 280 К (от -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$), а $T_{дес}=420\text{ К}$, $T_{конд}=T_{адс}=283\text{ К}$ термодинамический КПД возрастает. Если при $T_0 = 253\text{ К}$ $\eta_{терм}=0,05$; то при $T_0 = 273\text{ К}$ $\eta_{терм}=0,22-0,235$, а при $T_0 = 280\text{ К}$ $\eta_{терм}=0,25-0,258$. Этот факт говорит о том, что холодильные установки на рабочей паре АС-метиламин можно использовать только для систем охлаждения и кондиционирования.

Анализ зависимостей на рисунке 4.13, рисунке 4.14, рисунке 4.15 показывает, что температура десорбции имеет некоторый диапазон значений, при котором удерживаются максимальные значения коэффициентов термодинамической эффективности. Эти значения могут считаться оптимальным диапазоном работы холодильных установок при постоянных температурах охлаждения, конденсации и адсорбции. Несмотря на то, что коэффициент термодинамической эффективности у холодильных установок на рабочих парах активированный уголь-аммиак несколько выше, холодильные установки на рабочей паре активированный уголь-метиламин имеют рабочее давление в аппаратах в три раза ниже.

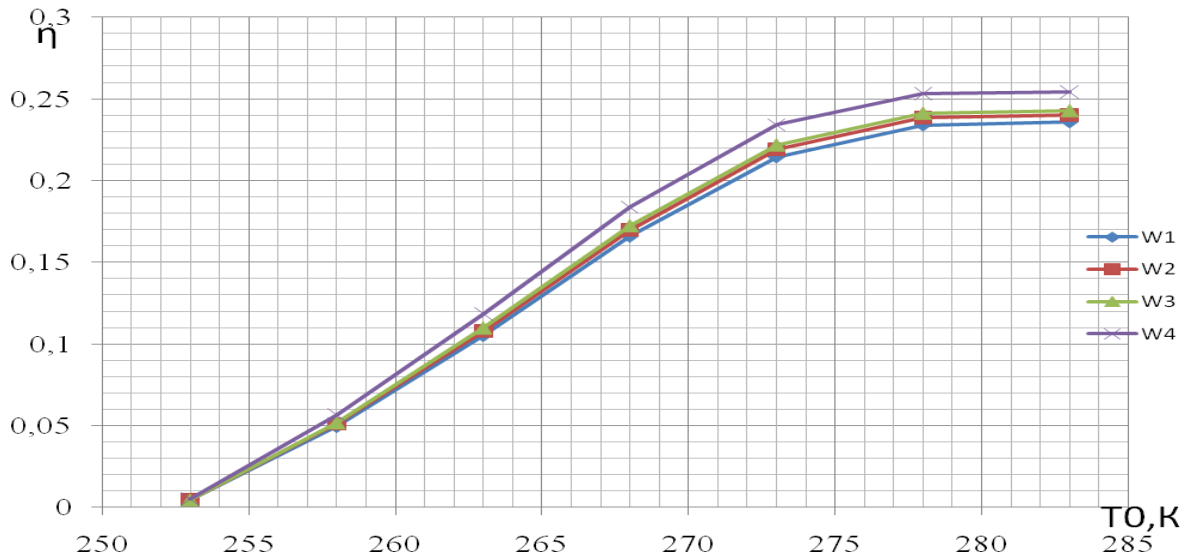


Рисунок 4.15 – Зависимость термодинамического КПД от T_0 для разных типов углей при условии $T_{адс}=283$ К , $T_{дес}=420$ К

Таким образом, проведенные аналитические исследования, дают обнадеживающие результаты по использованию тепловой энергии газов от работы судовых дизельных установок. Средний термический КПД на параметрах близких к рабочим установок в термотрансформаторах на рабочих парах активированный уголь-метиламин могут составлять в среднем $\eta_{терм} = 0,18-0,25$.

На рисунке 4.16 изображены расчетные зависимости эксергетического КПД для рабочей пары АС-метиламин при постоянных температурах конденсации, адсорбции и охлаждающей среды и изменяющейся температуре десорбции и кипения. Характер кривых повторяется и все зависимости имеют явный экстремум. Если через точки максимальных значений $\eta_{экс}$ провести кривую, то можно определить оптимальное значение эксергетического КПД, которое имеет максимальное значение равное 8,55%. Это соответствует режимам кондиционирования составляющему около плюс 10^0C .

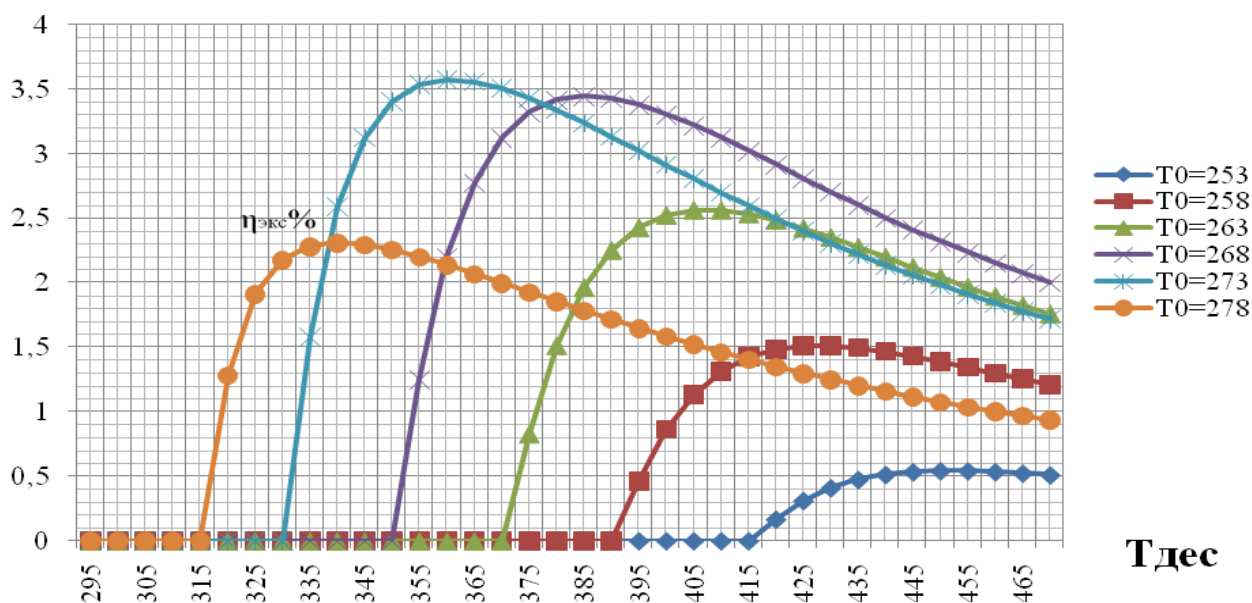


Рисунок 4.16 – Зависимости эксергетического КПД рабочей пары АС-метиламин от различных температур десорбции в генераторе и температур кипения адсорбата в испарителе при постоянных температурах адсорбции $T_{\text{адс}}=293$ К, конденсации $T_{\text{конд}}=293$ К и окружающей среды $T_{\text{ос}}=283$ К. (приложение X) [15].

4.4 Анализ эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки на рабочей паре активированный уголь-этиламин

Были получены в результате обработки в логарифмической анаморфозе изотерм адсорбции четырех образцов активированных углей (казанского, усть-каменогорского, краснодарского, алматинского производства) характерные коэффициенты для уравнения (Д-Р): для пары АС-этиламин $W_{\text{о(эТМ)}}^{\text{обр1}} = 182,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{\text{о(эТМ)}}^{\text{обр2}} = 196,1 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{\text{о(эТМ)}}^{\text{обр3}} = 188,7 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $W_{\text{о(эТМ)}}^{\text{обр4}} = 237 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{\text{(эТМ)}} = 21,17 \cdot 10^{-7}$; $n=2$ (глава3) [2].

Для расчетной модели были использованы следующие зависимости взятые из справочников:

Зависимость давления насыщения этиламина от температуры

$$P_s(T) \text{ (Па)} = 0,4548298 T^3 - 323,5612252 T^2 + 77070,4322105 T - 6,1355098 \cdot 10^6 \quad (4.12)$$

На рисунке 4.17 (приложение Ц) показаны зависимости термодинамических КПД от температуры десорбции для исследуемых активированных углей при

постоянных температурах конца адсорбции $T_{\text{адс}}$ или начала процесса изостерического нагрева реактора т.А (см. по рисунку 4.1 цикла работы адсорбционного термотрансформатора); температуры кипения T_0 в испарителе т.Ж; температуры $T_{\text{конд}}$ конденсации т.Г. Из графиков зависимостей (рисунок 68) видно, что в процессе изостерического нагрева КПД равен «нулю», затем начиная с некоторой температуры, равной около $T_{\text{дес}}=385$ К при переходе из изостерического в процесс десорбции т.Б, резко возрастает КПД, затем рост его замедляется и в некотором диапазоне температур $T_{\text{дес}}$ от 415 К до 438 К наблюдается стабилизация значения $\eta_{\text{терм}} = 0,034 - 0,042$. При дальнейшем увеличении температуры десорбции КПД начинает снижаться и при $T_{\text{дес}} = 470$ К (около 200°C) падает на 12–16 %.

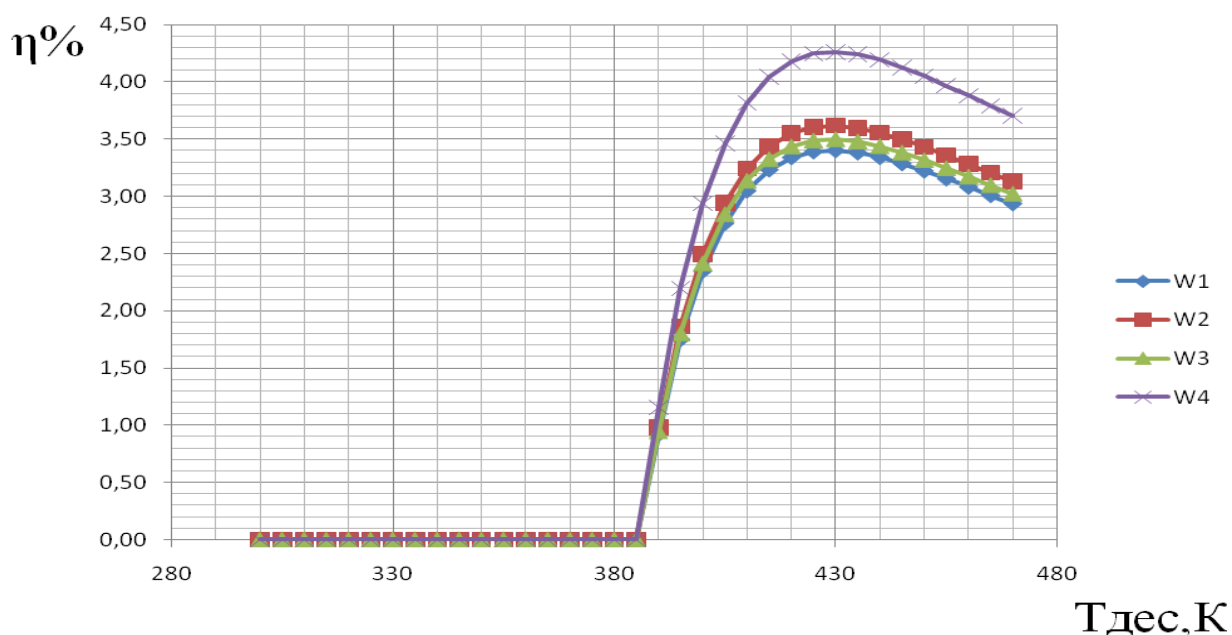


Рисунок 4.17 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей и этиламина при условии

$$T_0=273\text{K}, T_{\text{конд}}=298\text{K}, T_{\text{адс}}=298\text{K}$$

На рисунке 4.18 (приложение Ч) с увеличением $T_{\text{конд}}$ и $T_{\text{адс}}$ при $T_0 = \text{const}$ видно, что процесс десорбции, при котором начинается отсчет КПД совсем практически не начинается, что обуславливается диапазоном работы холодильной

установки на рабочей паре АС-этиламин.

Зависимость плотности от температуры

$$\rho(T) = -0,0024491 T^2 - 0,0625281 T + 958,2268644 \quad (4.13)$$

Зависимость скрытой теплоты парообразования от температуры

$$q_0(T) = -10,9336711 T^2 + 2291,3185948 T + 796187,7299335 \quad (4.14)$$

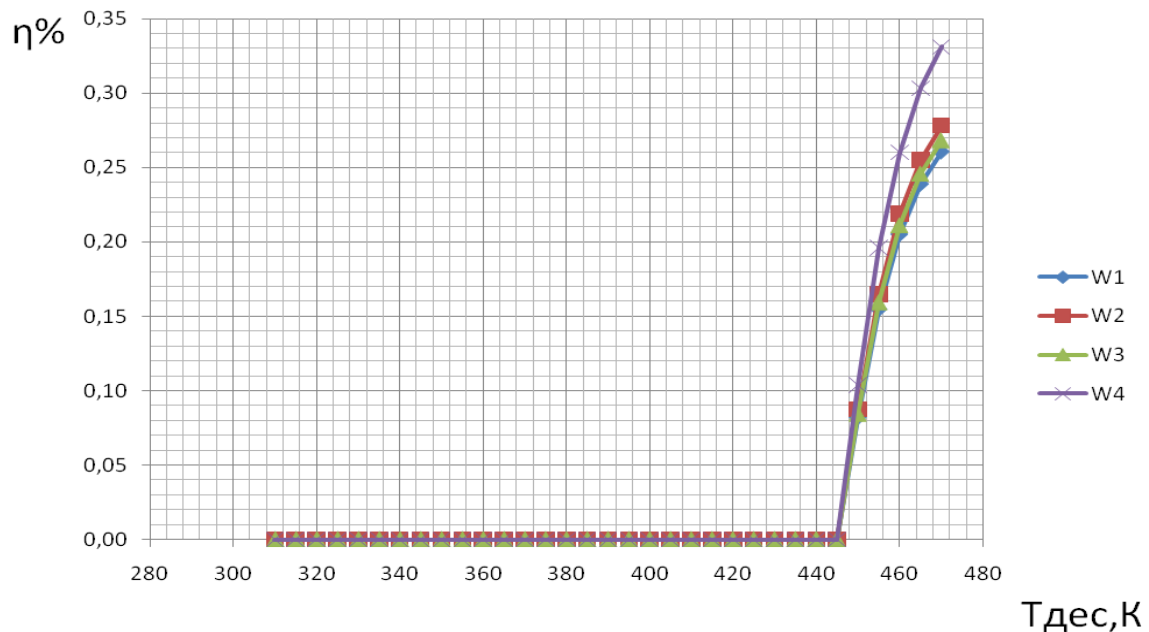


Рисунок 4.18 – Зависимость термодинамического КПД установки от температуры десорбции для разных типов активированных углей при условии $T_0=273\text{К}$, $T_{\text{конд}}=308\text{К}$, $T_{\text{адс}}=308\text{К}$

На рисунке 4.19 представлены зависимости, показывающие влияние параметров $T_{\text{адс}}$ и $T_{\text{кон}}$ на эффективность работы установки при постоянных температурах кипения $T_0=273\text{К}$ и $T_{\text{дес}}=420\text{К}$. Как видно из графиков термодинамический коэффициент резко падает от 0,2 при температуре $T_{\text{адс}}=285\text{К}$ до 0,04 при $T_{\text{адс}}=298\text{К}$.

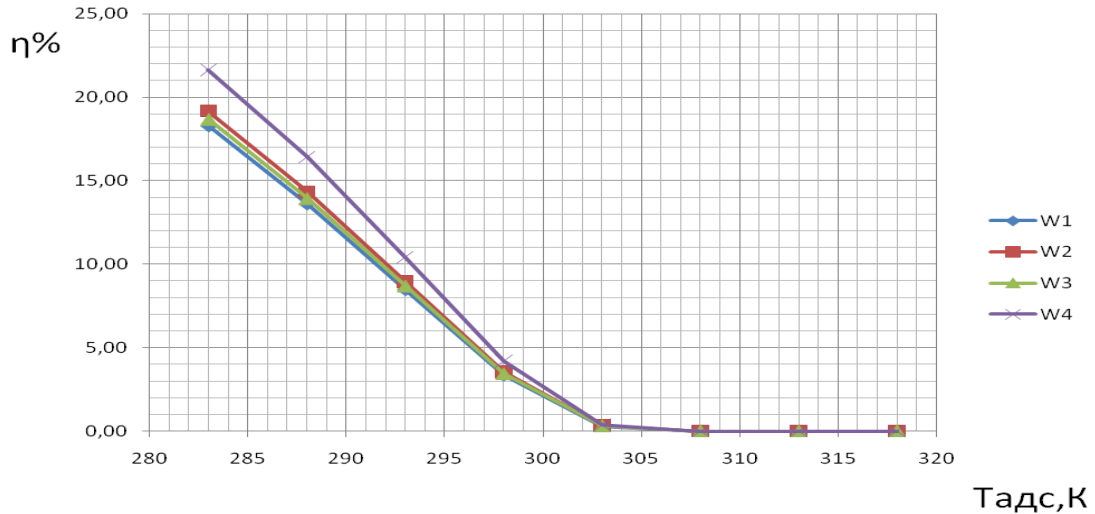


Рисунок 4.19 – Зависимость термодинамического КПД от $T_{адс}$ для разных типов углей при условии $T_0=273K$, $T_{дес}=420K$

На рисунке 4.20 показаны зависимости термодинамического коэффициента при постоянных температурах адсорбции, конденсации и десорбции.

Если при $T_0=273K$ термодинамических КПД составляет 0,083, то при $T_0=283K$ КПД составляет 0,184.

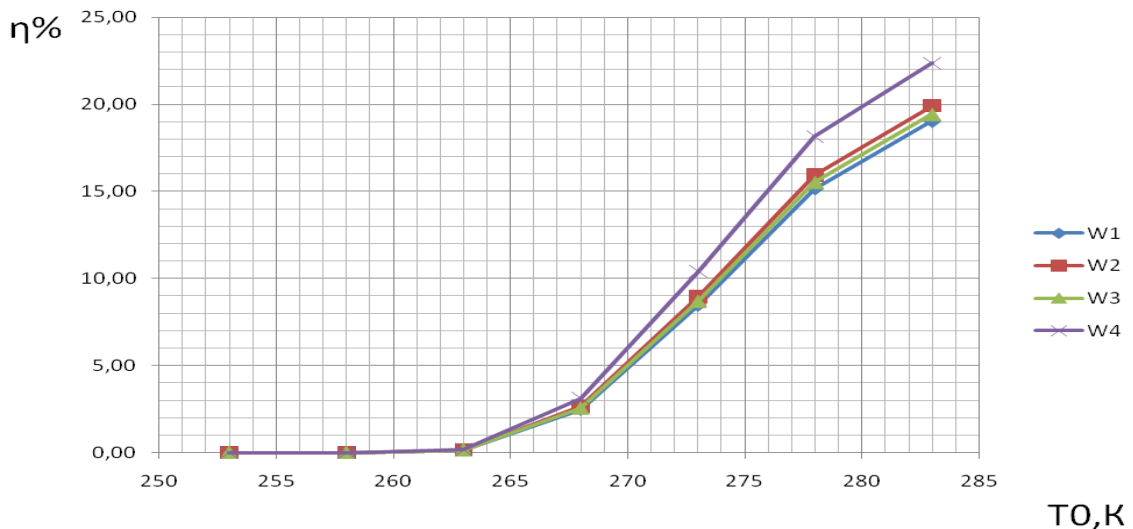


Рисунок 4.20 – Зависимость термодинамического КПД от T_0 для разных типов углей при условии $T_{адс}=293 K$, $T_{дес}=420 K$

На рисунке 4.21 изображены расчетные зависимости эксергетического КПД для рабочей пары АС-этиламин при постоянных температурах конденсации,

адсорбции, температуре охлаждающей среды и изменяющейся температуре генерации и кипения. Характер кривых повторяется и первые зависимости имеют явный экстремальный характер, но затем наблюдается пологость. Максимальное значение эксергетического КПД равно 0,97% . Это для режимов комфортного кондиционирования составляет около плюс 5⁰С.

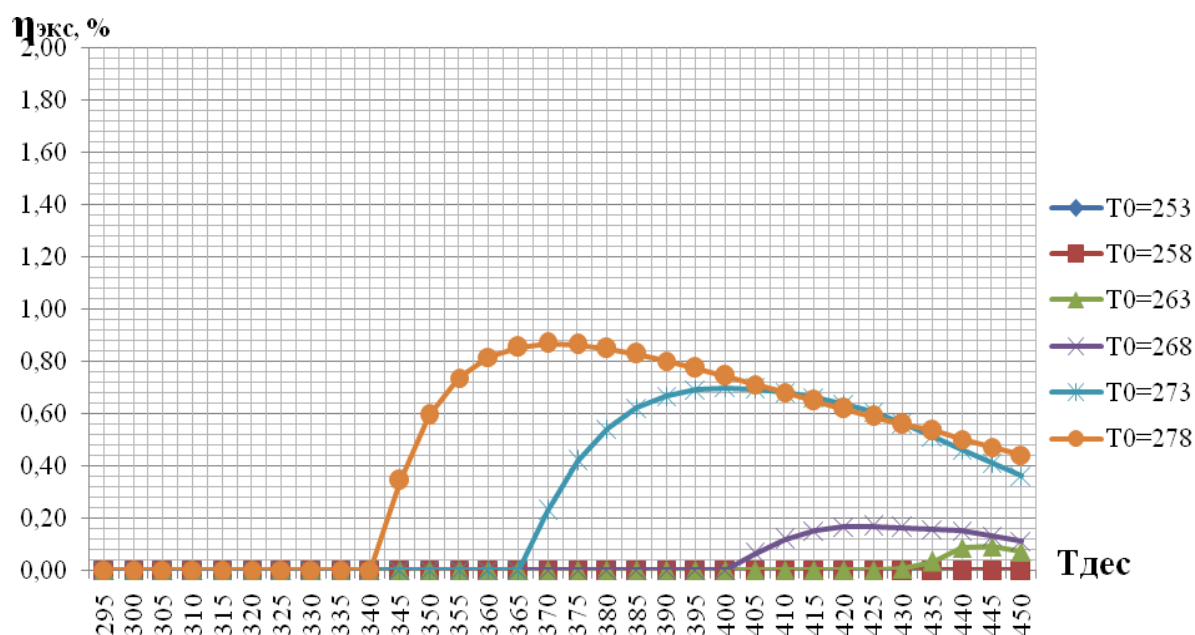


Рисунок 4.21 – Зависимости эксергетического КПД (АС-этиламин) от различных температурах десорбции в генераторе и температурах кипения адсорбата в испарителе при постоянных температурах адсорбции, конденсации и окружающей среды (приложение III).

4.5 Мощностные характеристики гелиоэнергетической холодильной установки на основе адсорбционного термотрансформатора по усредненным показателям

Исходя из термоэнергетической методики, основанной на тепловых энергетических балансах: днем – между падающей энергией солнечной радиации на поверхность гелиоприемного устройства генератора-адсорбера и энергией, отводимой в конденсаторе; ночью – между теплом, отводимым в испарителе и теплотой отводимой адсорбцией можно записать следующие зависимости:

днем $dq(\tau) = dq(\tau) + dq(\tau) + dq(\tau) = dq(\tau)$

ночью $dq(\tau) = dq(\tau) + dq(\tau)$

Усредненная полезная нагрузка за время облучения солнцем поверхности генератора-адсорбера (глава 2) составляет (программа расчета) $Q_{\text{пол}} = 350$ Вт на всю поверхность (м^2) (от двух реакторов). Нагрузка на конденсатор (как теплообменный аппарат) берется в два раза большей, исходя из максимальной дневной нагрузки $Q_{\text{кд}} = 700$ Вт/ м^2 .

В каждый реактор засыпается по 12 кг активированного угля. При средней адсорбционной способности активированного угля $a=0,2$ кг/кг, количество поглощаемого хладагента (аммиак) составит около $A=2,4$ кг на один реактор.

$$Q_{\text{дес}} = r_o + R T \ln(P_s/P) + (\beta R)/D \ln(P_s/P)]^{-1} 2A/\tau_{\text{дес}} < 350 \text{ (Вт)}$$

При средней скрытой теплоты парообразования аммиака $r_o=1600$ (кДж/кг) количество тепловой энергии достаточно, чтобы произошла полная десорбция аммиака из сорбента, при среднем дневном времени десорбции равном около 6 часов.

С другой стороны, термодинамический коэффициент преобразования затраченной энергии в полезную при работе на рабочей паре активированный уголь-аммиак в режиме низкотемпературного охлаждения составляет $\eta_{(\text{амм})}=0,22$. Тогда средняя холодопроизводительность термотрансформатора при пониженных давлениях в ночное время за 10 часов работы составит

$$Q_0 = Q_{\text{пол}} \cdot \eta_{(\text{амм})} \cdot 10 = 106 \text{ Вт}$$

4.6 Области применения гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа

Данные разработанные и исследуемые гелиоэнергетические термотрансформаторы с улучшенной конструкцией генератора-адсорбера можно применять не только для охлаждения и кондиционирования. Области внедрения их могут быть самые разнообразные. Нами разработана полезная модель на установку по термоподготовке воды для содержания и выращивания

гидробионтов, схема которой приведена на рисунке 73, и формула изобретения описана ниже.

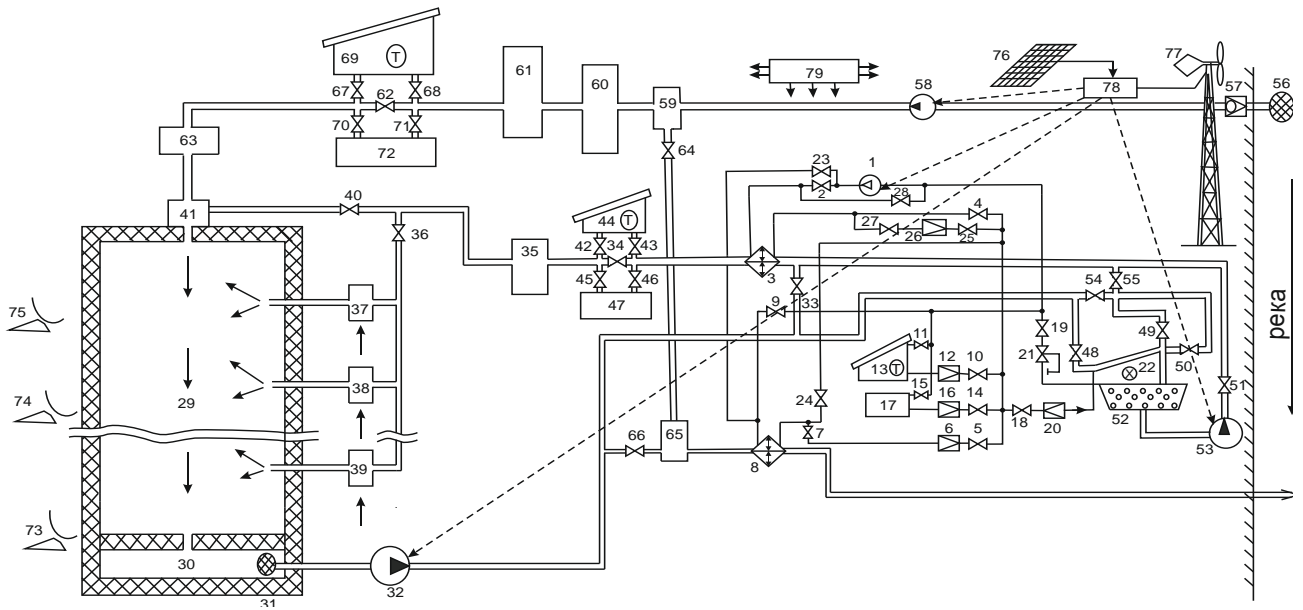


Рисунок 4.22 – Установка по термоподготовке воды для содержания и выращивания гидробиотов

На рисунке 4.22 позицией 22 указан разработанный гелиоэнергетический термотрансформатор. Ф о р м у л а п о л е з н о й м о д е л и № 126894. Установка по термоподготовке воды для содержания и выращивания гидробионтов, содержащая фотобатареи, ветрогенератор, аккумулятор электрической энергии, логический блок управления температурными параметрами воды и работой теплового насоса, водяной циркуляционный контур, холодильный контур, состоящий из последовательно подключенные через соленоидные вентили испаритель, компрессор, конденсатор, регулирующий вентиль и дополнительно подключенный одной стороной к линии связи испарителя с конденсатором через соленоидные и терморегулирующие вентили, а другой к компрессору через соленоидные вентили к всасывающей линии гелиоэнергетического аккумулятора тепловой энергии и биогенератора, а также дополнительно подключенная одной стороной к линии связи испарителя с конденсатором через соленоидный и терморегулирующий вентили одной стороной, а другой стороной через

барорегулирующий клапан «после себя» и соленоидный клапан к всасывающей линии компрессора, гелиоэнергетический термотрансформатор, в водяной циркуляционный контур через электромеханические задвижки введено термоизолирующее устройство, биофильтр, льдонакопительная и нагревательная часть абсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора, устройство для обработки воды кварцевой лампой, аэраторы, гелиоэнергетический аккумулятор тепловой энергии и биогенератор, отличающаяся тем, что дополнительно в холодильном контуре на нагнетательной линии за компрессором установлен соленоидный клапан, соединяющий испаритель с компрессором, а на всасывающей линии перед компрессором - соленоидный клапан, соединяющий конденсатор с компрессором, между конденсатором и испарителем установлен терморегулирующий клапан, а термоизолирующее устройство с гидробионтами вынесено за акваторию водоема и имеет линию подпитки, содержащую биологические и физические устройства очистки и обеззараживания воды, дополнительно введена линия частичного сброса воды, соединенная с линией подпитки через смесители, электромеханическую задвижку, испаритель и водяным циркуляционным контуром через электромеханическую задвижку. Предлагаемая установка обеспечивает следующие преимущества: удобное обслуживание термоизолирующего устройства, в которых находятся гидробионты (простота удаления остатков корма, гумуса, осмотр и ремонт изолирующего контура, простота регулирования температурных градиентов и тепловых потоков водной среды); лучшая очистка воды от загрязнений, от биологических отходов, от болезнетворных микробов; меньшие капитальные затраты (возможность применения тепличных комплексов, один циркуляционный контур, реверсивная система термотрансформации теплоты); на основании расчетов энергетических тепловых балансов в контролируемой среде при нагреве или охлаждении возможно исключить потребление тепловой и электрической энергии извне; суточные колебания пиковых температурных параметров контролируемой среды на основании расчетов по среднестатистическим и экспериментальным данным в предполагаемых периодах эксплуатации системы незначительны; установка

может создавать биологически активную водную среду в изолированном объеме с наличием природных микроэлементов и микрофлоры. При расчетах автономной работы установки принимались среднестатистические данные солнечной радиации, скорости ветра по Астраханской области, в качестве биотоплива использовались данные по пиролизу кизяка скотины. При этом КПД гелиоустановок для преобразования солнечной энергии в тепло принимался 40%, в электричество – 15%, в энергию холода – 10%, абсорбционное тепло – 15%. Средняя скорость ветра принималась 8м/с. Барорегулирующий вентиль «после себя» позволяет компрессору теплового насоса работать в одноступенчатом цикле на две температуры кипения. Отдельные элементы установки были изготовлены и испытаны в условиях Астраханского климата на прудах Волжского экспериментального рыбзавода (п.Икрязное), Александровском рыбоводном заводе (п.Труд-Фронт), КаспНИИРХ (лаборатория аквариумных рыб), открытый испытательный полигон ФГОУ ВО АГТУ.

4.7 Выводы к четвертой главе

1. Разработанная расчетная математическая модель по определению эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установке на основе термодинамического цикла позволяет определить динамику работы установки, области применения и максимальные значения термодинамического КПД ($\eta_{\text{терм}}$) и эксергетического КПД ($\eta_{\text{экс}}$) при различных задаваемых температурных параметрах.

2. Получены оптимальные значения термодинамического КПД равного $\eta_{\text{терм}} = 22,4\%$ и эксергетического КПД равного $\eta_{\text{экс}} = 7,5 \%$ для рабочей пары активированный уголь-аммиак в режимах охлаждения; и $\eta_{\text{терм}} = 34,2\%$ и $\eta_{\text{экс}} = 3,02 \%$ для режимов кондиционирования, что доказывает возможность эффективного применения таких установок.

3. Получены оптимальные значения термодинамического КПД равного $\eta_{\text{терм}} = 5,8\%$ и эксергетического КПД равного $\eta_{\text{экс}} = 1,5\%$ для рабочей пары

активированный уголь-метиламин в режимах охлаждения; и $\eta_{\text{терм}} = 25,4\%$ и $\eta_{\text{экс}} = 2,3\%$ для режимов кондиционирования, что доказывает возможность эффективного применения таких установок. Следует подчеркнуть, что давление в аппаратах (АС-метиламин) ниже в 1,5 раза чем при рабочей паре (АС-аммиак), что существенно улучшает эксплуатационные свойства.

4. Получены оптимальные значения термодинамического КПД равного $\eta_{\text{терм}} = 20\%$ и эксергетического КПД равного $\eta_{\text{экс}} = 0,92\%$ для рабочей пары активированный уголь-этиламин для режимов кондиционирования, что доказывает возможность эффективного применения таких установок.

5. Предлагается использовать гелиоэнергетическую холодильную установку на основе термотрансформатора адсорбционного типа разработанной конструкции в системах охлаждения параметров воды, на что получен патент на полезную модель № 126894.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные разработки и исследования доказали возможность использования гелиоэнергетической техники в Западных, Юго-Западных и Южных частях и регионах Республики Казахстан.

Особенностью данной работы является разработка и исследование эффективной солнцеексплуатирующей техники, в частности, гелиоэнергетических холодильных установок на основе термотрансформаторов адсорбционного типа циклического действия за счет совершенствования оптических систем зеркальных концентраторов солнечной энергии, рациональной компоновки теплоэнергетических элементов гелиоприемных устройств генератора-адсорбера и реактора.

Впервые были исследованы адсорбционные свойства новых рабочих пар на сорбентах казахстанского производства и адсорбатах, таких как аммиак, метиламин, этиламин. Получены изотермы адсорбции на исследуемых рабочих парах и расчетные коэффициенты для структурных уравнений Дубинина-Радужкевича.

Разработаны теоретические модели и проведены экспериментальные исследования на открытом полигоне новой компоновки элемента гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа – гелиоприемной части для обогрева реактора генератора-адсорбера. Создана расчетная методика определения полезных тепловых нагрузок на гелиоэнергетическую холодильную установку в программном пакете MatCad. Экспериментальные исследования модернизированной конструкции генератора-адсорбера подтвердили адекватность полученных теоретических расчетов. Разработаны основы теоретического моделирования оптимальных конструкций реакторов генератора-адсорбера в программном пакете ElCad.

Расчетная математическая модель в программном пакете Matlab для исследования и определения термодинамической эффективности и степени термодинамического совершенства гелиоэнергетической холодильной установки на основе термотрансформатора адсорбционного типа на исследуемых рабочих

парах определила области использования и применения такой техники с новой конструкцией генератора-адсорбера.

Проведены экспериментальные исследования новой конструкции гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа на рабочей паре активированный уголь – аммиак. Получены суточные изменения температур в аппаратах экспериментальной установки, подтверждающие положительный эффект охлаждения.

Получены основные параметры термодинамического КПД и эксергетического КПД гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа на исследуемых рабочих парах. Определены тенденции и аспекты внедрения новых рабочих пар в технике охлаждения, замораживания, кондиционирования.

Предложено применение гелиоэнергетических холодильных термотрансформаторов в установках термоподготовки воды для использования в системах нагрева и охлаждения, защищенное патентом Российской Федерации № 126894 на полезную модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов, Р.А. Тепловые насосы / Р.А. Амерханов. – М.: Энергоатомиздат., 2005.- 160с.
2. Анихуви, Ж.А. Разработка адсорбционной гелиоохладительной установки: автореф. дис. спец. № 05.04.03-машины, аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения: защита 29.05.2000 / Ж.А.Анихуви. - М., 2000. - 18с.
3. Архаров, А.М. Криогенные системы. В.2т. Т.1. Основы теории и расчета / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. 2-е изд., перераб. и доп. - М: Машиностроение, 1996. - 576 с.
4. Айвазов, Б.В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции: учеб. пособие для ин-тов / Б.В.Айвазов. - М.: Высш. шк., 1973. - 208 с.
5. Ачилов, Б.М. Холодильная гелиоустановка с твердым сорбентом / Б.М. Ачилов, Ч. Мангалжадав // Холодильная техника. - 1990. - № 2. - С.5-7.
6. Баймиров, М.Е. Ресурсы гелиоветробιοгазовых источников энергии в Казахстане и перспективы их использования / М.Е.Баймиров. - Алматы: Эверо , 2005. - 277с.
7. Буданов, В.В. Химическая термодинамика / В.В.Буданов. - 2-е изд. испр. – СПб; М; Краснодар: Лань, 2016. - 318с.
8. Бутузов, В.А. Гелиоустановки отелей: мировой опыт разработки и сооружения / В.А. Бутузов, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. - 2014. - №12. – С.112-117.
9. Галимова, Л.В. Энергосберегающие технологии в холодильной технике. Энергоаудит. учебное пособие. /Л.В.Галимова, Р.Ю.Гавлович. – Астрахан. гос.тех.ун-т.-Астрахань: из-во АГТУ.- 2015. – 136 с.
10. Галимова, Л.В. Эксергетический анализ технических систем. / Л.В.Галимова, Т.Г.Клотильде, А.И.Веденева. // Из-во LAP LAMBERT Academic Publising. Saarbrucken.- 2013.- 77с.
11. Гельфман, М.И. Коллоидная химия / И.М.Гельфман, О.В.Ковалевич, В.П. Юстрахов.- 5-е изд. стер. – СПб: Лань, 2008. – 336 с.

12. Государственная программа «Стратегия развития Республики Казахстан до 2030 года». Астана, 2005. -16с.

13. Даффи, Дж.А. Солнечная энергетика. Физико-технические основы разработки / Дж.А. Даффи, У.А. Беркман; пер. с англ. - М.: ИД «Интеллект», 2012. - 1200 с.

14. Ильин, А.К. Оценка эффективности концентраторов солнечной энергии / А.К. Ильин, М.Ф. Руденко, Ю.В.Коноплева // Известия вузов. Сер. Машиностроение. - 2002. - № 9.- С.33-36.

15. 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

16. Каримов, М.Ш. Определение сорбционных свойств некоторых активированных углей для адсорбционных термотрансформаторов / М.Ш. Каримов // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. 7 сентября 2012 г. Астрахань: Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа. – Астрахань, - 2012. - С.15-17.

17. Каримов, М.Ш. Исследование рабочих пар для гелиоэнергетических термотрансформаторов адсорбционного типа / М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Актуальные вопросы науки: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (10.07.2012). – М., 2012. - С.49 – 56.

18. Каримов, М.Ш. Аналитические исследования термодинамической эффективности адсорбционного термотрансформатора на рабочей паре активированный уголь-аммиак / М.Ш.Каримов, [и др.] // Всерос. науч.-практ. конф. «Наука, образование, инновации: пути развития» 23-25 апреля 2013, - Петропавловск-Камчатский. - 2013. – С. 60-67.

19. Каримов, М.Ш. Термодинамическая эффективность адсорбционного термотрансформатора на рабочей паре активированный уголь-метиламин /М.Ш.Каримов, [и др.] // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Наука и образование - 2013» 4-10 марта 2013 года. – Мурманск.- 2013. – 846-850.

20. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин . - 5-е изд. - СПб: Лань, 2012.- 752 с.
21. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники. / Н.В. Кельцев. - 2-е изд, перераб. и доп. - М.: Химия, 1984. - 346 с.
22. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С.Кравченко, О.Г.Ревинская, Томск. политех. ун-т. – Томск., изд-во Томск. политех. ун-та, 2011.- 86 с.
23. Кныш, Л.И. Метод учета тепловой проводимости абсорбера в плоском солнечном коллекторе / Л.И.Кныш // Альтернативная энергетика и экология. - 2014. - №15. - С.16-19.
24. Кругляков , П.М. Физическая и коллоидная химия / П.М.Кругляков, Т.Н.Хаскова.- СПб: Лань, 2010.- 320 с.
25. Майоров, В.А. Исследование конструктивных и энергетических параметров приемников излучения солнечных модулей с концентраторами / В.А.Майоров, Д.С.Стребков, С.Н.Трушевский // Альтернативная энергетика и экология.- 2015.- №6.- С.24-30.
26. Майоров, В.А. Тепловые характеристики модуля с параболоцилиндрическим концентратором солнечного излучения / В.А.Майоров, Л.Д.Сагинов, С.Н.Трушевский // Альтернативная энергетика и экология. - 2016.- №19-20.- С.12-20.
27. Метрологические указания по регистрации составляющих радиационного баланса. -Л.: Гидрометиздат, 1986.- 196 с.
28. Мирзаев, Ш.М. Абсорбционная гелиохолодильная установка / Ш.М. Мирзаев, О.Х. Узаков // Гелиотехника. - 2000. - №2. - С.74-78.
29. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, Многолетние данные. Ч. 1-6, Вып. 18. Казахская ССР. Кн. 1-2. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 488с.
30. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В.Нащокин - СПб: Лань, - 2012. – 496 с.

31. Новицкий, В.П. Оценка погрешностей результатов измерений / В.П.Новицкий, И.А.Зоргграф.-2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 303 с.
32. Никифоров, Ю.В. Актуальные проблемы адсорбционных процессов / Ю.В. Никифоров, [и др.] // Материалы 1V – Всерос. симпозиума. - М. 1998. - С.67-69.
33. Обухов, С.Г. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно ориентированную поверхность для любого региона России / С.Г.Обухов, И.А.Плотников // Альтернативная энергетика и экология. - 2017.- №16-18. - С.43-56.
34. Освальд, В.Ф. Краткое практическое руководство по коллоидной химии / В.Ф.Освальд. - М.: Либроком, 2010. - 176с.
35. Пат. 126894 Российская Федерация, F 25 В 29/00. Установка по термopодготовке воды для содержания и выращивания гидробионтов / Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В., Третьяк Л.П., Руденко А.М., Нургалиев Р.И., Каримов М.Ш. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – 2012149716; заявл. 21.11.2012; опубл.20.04.2013, Бюл.№11.
36. Петров,В.М. Оценка поступления солнечной энергии на поверхность активно-фасадно-интегрированных солнечных систем энергоснабжения / В.М.Петров// Альтернативная энергетика и экология. - 2014.- №11.- С.85-91.
37. Равдель, А.А. Краткий справочник физико-химических величин / А.А.Равдель, А.М.Пономарева. - Л.: Химия, 1983. - 233 с.
38. Резцов, В.Ф. Методика и результаты расчета температурного поля на поверхности фотоэлектрических и фототермических модулей методом конечных элементов / В.Ф.Резцов, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. - 2014.- №23.- С.25-29.
39. Руденко, М.Ф. Эффективные поверхности гелиоприемных устройств //М.Ф.Руденко, Е.Е. Кравцов, С.А. Идиатулин / Химическое и нефтегазовое машиностроение.1998.№7.С.33–35.

40. Руденко, М.Ф. Адсорбционные свойства активного угля для гелиохолодильных установок / М.Ф.Руденко, [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение.- 1999.- № 12. - С. 22 - 23.

41. Руденко, М.Ф. Определение физических характеристик активного угля для адсорбционных холодильных машин / М.Ф.Руденко, [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000 - № 8. - С. 39-40.

42. Руденко, М.Ф. Влияние свойств активированного угля и хладагентов на адсорбцию в холодильных установках / М.Ф.Руденко, И.А.Палагина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2002.- № 4.- С.29-31.

43. Руденко, М.Ф. Разработка и исследование эффективности адсорбционной гелиохолодильной установки / М.Ф. Руденко // Вестник международной академии холода. - 2003. - № 1. - С.34 – 37.

44. Руденко, М.Ф. Разработка и исследование эффективности экологически безопасной адсорбционной гелиохолодильной установки / М.Ф.Руденко, Ю.В.Чивиленко, В.И.Черкасов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2006. - №8. - С.26-28.

45. Руденко, М.Ф. Эффективность гелиоприемных устройств с концентраторами для систем тепло- и хладоснабжения / М.Ф.Руденко. Саратов: Лаб. нетрадиционной энергетики ОЭП СНЦ РАН, 2001.- 64 с.

46. Руденко, М.Ф. Теоретические основы проектирования экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства теплоты / М.Ф.Руденко, Б.Ж.Туркпенбаева, Ю.В.Чивиленко. – Актау: Изд-во АктГУ, - 2008.- 165 с.

47. Руденко, М.Ф. Определение изотерм адсорбции рабочей пары активированный уголь – аммиак для гелиоэнергетических термотрансформаторов / М.Ф.Руденко, М.Ш. Каримов // Проблемы теплоэнергетики: сб.науч.тр. СГТУ.- Саратов, 2012. - Вып.2.- С.270-275.

48. Руденко, М.Ф. Математическое моделирование и анализ концентраторов солнечной энергии для гелиоприемных устройств / М.Ф.Руденко, Б.Ж.Туркпенбаева // Вестник АГТУ. - 2006.- №6(35).- С.136-142.

49. Руденко, М.Ф. Гелиоэнергетические установки для получения тепла и холода в рыбоводных хозяйствах /М.Ф.Руденко, [и др.] // Рыбное хозяйство.- 2004.- № 6.- С.19.

50. Руденко, М.Ф. Анализ оценки термодинамической эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора / М.Ф.Руденко, Ю.В.Чивиленко, Т.А.Янченкова // Вестник АГТУ. Приложение.- 2005.- №4(27).- С.92-96.

51. Руденко, М.Ф. Повышение энергетической эффективности экологически безопасных гелиохолодильных установок / М.Ф.Руденко, Ю.В. Чивиленко, А.Е.Антипов // Вестник международной академии холода. - 2006.- №3.- С.3-8.

52. Руденко, М.Ф. Концепция развития экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства тепла и холода / М.Ф.Руденко// Безопасность жизнедеятельности.- 2006. - №10. - С.46-50.

53. Руденко, М.Ф. Моделирование энергетического баланса и расчет гелиоприемных устройств для водоподогрева / М.Ф.Руденко, Б.Ж.Туркпенбаева // Вестник АГТУ. 2008. - № 6(42) - С.31-35.

54.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.-172с.

55. Рыльков, А.В. Изучение адсорбции аммиака термохимически активированными сорбентами / А.В.Рыльков, В.П.Торшунова // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций», 19 апр. 2013 / Воронеж. ин-т ГСП МЧС России.- 2013. – С.146-152.

56. РД52.04.562.96 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Актинометрические наблюдения. Ч. 1. Актинометрические наблюдения на станциях - <http://docs.cntd.ru/document/1200035186>

57. Солнечная радиация и ее составляющие. Астраханская область. Астрахань – https://atlas-yakutia.ru/weather/spravochnik/ss/climate_sprav_ss_3488002217.php

58. Туркпенбаева, Б.Ж. Математическое моделирование энергетической эффективности плоских концентраторов солнечной энергии на поверхность плоской формы / Б.Ж.Туркпенбаева. - Вестник АГТУ. - 2008.- №1(42).- С.36-39.

59. Усюкин, И.П. Техника низких температур / И.П.Усюкин. - М.: Пищ. пром-сть, 1977. - 255с.

60. Физико-химические основы преобразования солнечной энергии: доклады Междунар. науч.-практ. семинара / Под.ред.Н.К.Надирова. - Алматы, 2006.- 156с.

61. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: справ./ С.Н.Богданов, [и др.]; под.ред.С.Н.Богданова. -4-е изд.,перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. - 486с.

62. Хоменко, И.М. Определение оптимальных углов наклона гелиоприемных поверхностей на основе решения тригонометрических уравнений первой степени / И.М.Хоменко// Альтернативная энергетика и экология. - 2014. - №15. - С.25-30.

63. 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.

64. Шабаров, Ю.С. Органическая химия: учеб. для вузов /Ю.С. Шабаров, В 2-х ч.- 5-е изд.- СПб.: Лань, 2011. - 848 с.

65. Шипулина, Ю.В. 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 АГТУ. Сер. Морская техника и технологии. - 2012.- №1. - С.135-140.

66. Шипулина, Ю.В. Методика расчета генератора адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора / Ю.В. Шипулина, М.Ф.Руденко, М.Ш.Каримов // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология.- 2013.- №1.- С.148-154.

67. Шипулина, Ю.В. Моделирование и разработка конструкции генератора-адсорбера экологически безопасной гелиоэнергетической холодильной установки

/ Ю.В. Шипулина, М.Ф.Руденко, М.Ш.Каримов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2013.- №2.- С.36-41.

68. Шипулина, Ю.В. Моделирование термодинамического цикла работы адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора /Ю.В.Шипулина, М.Ф.Руденко // Вестник АГТУ. Сер.Морские технологии. -2011.- № 3.- С.136-140.

69. Шипулина, Ю.В. Фотоконцентраторы судовых энергетических комплексов / Ю.В.Шипулина, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Сер. Морские технологии. - 2010.- № 2.- С.109-113.

70. Шишкин, Н.Д. Эффективное использование возобновляемых источников энергии для автономного теплоснабжения различных объектов / Н.Д.Шишкин ; Астрахан.гос.техн.ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2012. - 208 с.

71. Щеклеин, С.Е. К проблеме верификации эффективности гелиоэнергетических систем с учетом стохастичности климатических факторов / С.Е.Щеклеин, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология.- 2015.- № 8-9.- С.19-26.

72. Abdel Aziz, A.A. Experimental study on the Effect of adsorber with three shapes of conductive material on Performance of Adsorption Refrigeration Tube using Activated Carbon/ethanol pair / A.A.Abdel Aziz, S.I.Hatab, M.Moawed, A.E.Zohir, N.M.Berbish// Appl Therm Eng.-2017.-Vol.19.- P.1246-1254.

73. Abu-Hamdeh, N.H. Design and performance characteristics of solar adsorption refrigeration system using parabolic trough collector: Experimental and statistical optimization technique / N.H. Abu-Hamdeh, K.A. Alnefaie, K.H. Almitani // Energy Conversion and Management, - 2013.- Vol.74.- P.162-170.

74. Abdulateef, J.M. Sulaiman Review on solar-driven ejector refrigeration technologies / J.M. Abdulateef, K. Sopian, M.A. Alghoul, M.Y. // Renewable Sustainable Energy. – 2009.- N13- P.1338-1349.

75. Aghbalou, F. Heat and mass transfer during adsorption of ammonia in a cylindrical adsorbent bed: thermal performance study of a combined parabolic solar collector, water heat pipe and adsorber generator assembly / F. Aghbalou, A. Mimet, F. Badia, J. Ilia, A. El Bouardi, J. Bougard //Appl Therm Eng.-2004.-N24- P.2537-2555.

76. Al Mers, A. Optimal design study of cylindrical finned reactor for solar adsorption cooling machine working with activated carbon-ammonia pair/ A. Al Mers, A. Azzabakh, A. Mimet, II. El Kalkha // *Appl Therm Eng.*- 2006.-N26-P. 1866-1875.
77. Alahmer, A. Performance evaluation of solar adsorption chiller under different climatic conditions / A. Alahmer, X. Wang, R. Al-Rbaihat, B.B.Amanualam.// *Appl. Energy.*-2016.-Vol.175.-P.293-304.
78. Allouhi, A. Modeling of a thermal adsorber powered by solar energy for refrigeration applications / A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli // *Energy.*- 2014. –Vol.75.- P.589-59641.
79. Allouhi, A. Performance evaluation of solar adsorption cooling systems for vaccine preservation in Sub-Saharan Africa / A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Agrouaz, A. Benbassou// *Applied Energy.*- 2016. –Vol.170.- P.232-241.
80. Anyanwu, E.E. Transient analysis and performance prediction of a solid adsorption solar refrigerator / E.E. Anyanwu, N.V. Ogueke // *Applied Thermal Engineering.*- 2007.- Vol.27. – P.2514-2523.
81. Berdja, M. Design and Realization of Solar Adsorption Refrigeration Machine Powered by Solar Energy / M.Berdja, B.Abbad, F. Yahi, F.Bouzeffour, M. Ouali // *Research article. Energy Procedia.*- 2014.- Vol.48. –P.1226-1235.
82. Boubakri, A. Performance of an adsorptive solar ice maker operating with a single double function heat exchanger (evaporator/condenser) / A. Boubakri // *Renewable Energy.* - 2006.-N 31 -P.1799-1812.
83. Boubakri, A. A new conception of an adsorptive solar powered ice maker / A.Boubakri // *Renewable Energy*– 2003. .- Vol.28. - P. 831-842.
84. Bouzeffour, F. Experimental investigation of a solar adsorption refrigeration system working with silicagel/water pair: A case study for Bou-Ismaïl solar data / F.Bouzeffour, B.Khelidj, M.Tahar // *Research article/ Solar Energy.*-Volume 131.- June 2016.- Pages 165-175.
85. 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

86. Buchter, F. An experimental solar-powered absorptive refrigeration tested in Burkina-Faso / F.Buchter, P.H.Dind, M.Pons // *Int. J Refrigeration*.- 2003.-N 26. –P. 79-86.
87. Chekirou,W. Heat recovery process in an adsorption refrigeration machine / W.Chekirou, N.Bouekheit, A.Kaarli // *Intern. J. of Hydrogen Energy*.-2016.- Vol.41.- P.7146-7157.
88. Cherrad, N Transient numerical model for predicting operating temperatures of solar adsorption refrigeration cycle / N.Cherrad, A.Benchabane, L.Sedira, A.Rouag // *Applied Thermal Engineering*.– 2017. – Vol.130.- P.1163-1174
89. Cerkvnik, B. Influence of adsorption cycle limitations on the system performance // B.Cerkwenik, A.Poredos, F.Zigler / *In/Jour.of Ref* 24.- 2001.- N 1-4.- P.475 – 485.
90. Critoph, R.E. Compact plate adsorbers for car air conditioning applications / R.E. Critoph, S.J. Vercalf, Z. Tamainot-Telto // *International Heat Powered Cycles Conference*. - 2006. Paper 06137. Newcastle. - P.502-508.
91. Desideri, U. Solar-powered cooling systems: technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications / U. Desideri, S. Proietti, P. Sdringola // *Appl Energy*. - 2009.- N 86.- P. 1376-1386.
92. Dupont, M. Etude de glaciers solaires utilisant le cycle intermittent jour-nuit zeolithe 13x-eau en climat tempere et en climat tropical / M. Dupont, J.J. Guillemot, F.Meunier // *Proceedings IIR. Jerusalem*. - 1982.- N 58.- P.193-200.
93. Du, S.W. Performance of solar adsorption refrigeration in system of SAPO-34 and ZSM-5 zeolite / S.W. Du, X.M. Li, Z.X. Yuan, C.X.Du, Z.B.Liu // *Solar Energy*. – 2016.- Vol.138.-P.98-104.
94. Elechon, J. Les refrigerateurs solaires pour la conservation des vaccins / J.Elechon // *Dossier scientifique. Rev. Gen. Froid* octobre. - 1991. - N 63.- P. 56 – 63.
95. El Fadar, A. Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector / A. El Fadar, A. Mimet, M Percz-Garcia // *Sol Energy*. - 2009.- N 83. - P. 850-861.

96. El Fadar, A. Study of a new solar adsorption refrigerator powered by a parabolic trough Collector //A. El Fadar, A. Mimet, A. A. Zabakh, M. Percz-Garcia, J. Castaing // *Appl Therm Eng.* - 2009.- N29.- P. 1267-1270.
97. Follin, S. Adsorption cycles for refrigeration based on activated carbon – ammonia pair: physical characteristics of adsorbents and performances / S.Follin, V.Goetz, V. Guiliot // CNRS – IMP. LEA – SIMAP. FRANCE.- 1997.- P.45-53.
98. Gampp, P. Accelerated aging tests of chromium containing amorphous hydrogenated carbon coatings for solar collectors / P. Gampp, P. Oelhafen, P.Gantenbein, S. Brunold, U.Frei // *Sol. Energy Mater and Sol. Cells.*- 1998.- Vol. 54.- P.369 -377.
99. Goyal, P. Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and its solar energy applications / P.Goyal, P.Baredar, A.Mittal, A.R. Siddiqui // *Review article. Renewable and Sustainable Energy Reviews.* - 2016. – Vol. 53. – P. 1389-1410.
100. Hadj Ammar, M.A. Thermodynamic analysis and performance of an adsorption refrigeration system driven by solar collector / M.A. Hadj Ammar, B. Benhaoua, F. Bouras // *Research article. Applied Thermal Engineering.* – 2017.- Vol.112.– P. 1289-1296.
101. Hadj Ammar, M.A. Simulation of tubular adsorber for adsorption refrigeration system powered by solar energy in sub-Sahara region of Algeria / M.A. Hadj Ammar, B. Benhaoua, M. Balghouthi // *Energy Conversion and Management.*- 2015.- Vol.106.- P. 31-40.
102. Hassan, H.Z. Simulation of an adsorption solar cooling system / H.Z.Hassan, A.A.Mohamad, R.Bennacer//*Energy.*-2011.-Vol.36.-P.530-537.
103. Headley, O.S. Charcoal - Methanol Adsorption Refrigerator Powered by a Compound Parabolic Concentrating Solar Collector / O.S.Headley, A.F.Kothdiwala, I.A. Mc Doom // *Solar Energy.* - 1994. -Vol.53.- N 2. - P.191-197.
104. Huizhong, Z. Thermal conductivities study of new types of compound adsorbents used in solar adsorption refrigeration / Z.Huizhong, Z.Min, L.Jing, Y.Guoding, Z.Zhijun // *Energy Convers Manage.* – 2009. - Vol.50.- P. 1244-1248.

105. Jiang, L. Experimental study on a resorption system for power and refrigeration cogeneration // L. Jiang, L.W.Wang, C.Z.Liu, R.Z.Wang // Energy.- 2016.-Vol.97.- P.182-190.
106. Laidi, M. Optimal solar COP prediction of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs using direct and inverse artificial neural network // M.Laidi, S.Hanini// International Journal of Refrigeration.- 2013.- Vol.36.- P.247-257.
107. Lemmini, F. Experimentation of a solar adsorption refrigerator in Morocco/ F.Lemmini, A.Errougani // Renewable Energy - 2007. - Vol.32.- P. 2629-2641.
108. Li, M. Experiments of a solar at plate hybrid system with heating and cooling / M.Li, R.Z.Wang, H.L.Luo, L.L.Wang, H.B.Huang // Applied Thermal Engineering. - 2002.-Vol. 22. - P. 1445-1454.
109. Ma, L. Performance evaluation of shaped MIL-101-ethanol working pair for adsorption refrigeration / L. Ma, Z. Rui, Q. Wu, H. Yang, H. Wang // Applied Thermal Engineering. - 2016.-Vol. 95. - P. 223-228.
110. Mateus, T. Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates/ T. Mateus, A.C. Oliveira // Appl Energy.- 2009. N 86. – P.949-957
111. Ogueke, N.V. Design improvements for a collector/generator/adsorber of a solid adsorption solar refrigerator // N.V. Ogueke, E. Anyanwu / Renewable Energy.- 2008.- N 33. – P. 2428-2440.
112. Pan, Q.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, R.Z. Wang, Z.S. Lu, L.W.Wang // Applied Thermal Engineering. - 2014.-Vol.72. - P. 275-282.
113. Pan, Q.W. Comparison of different kinds of heat recoveries applied in adsorption refrigeration system /Q.W. Pan, R.Z.Wang, L.W.Wang // Inter. Jour. of Refrigeration.- 2015.-Vol.55.-P.37-48.
114. Qadir, N. Modeling the performance of a two-bed solar absorption chiller using a multi-walled carbon nanotube/MIL-100(Fe) composite adsorbent / N. Qadir, A.M.Syed, B.M. Rached // Renewable Energy.-2017.-Vol.109.-P.602-612.

115. Rane, M.V. Solar Refrigerator cum Water Heater / M.V. Rane, S.T.Teferi // Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology,- Powai, Mumbai.- Presentation.- 2007.- P.15.
116. Reda, A.M. Design optimization of a residential scale solar driven adsorption cooling system in upper Egypt based Research article // A.M.Red, A.N.Ali, M.G.Morsy, I.S.Taha // Energy and Buildings.- 2016.- Vol.130.-P.843-856.
117. Sana, B.B. Study on an activated carbon fiber-ethanol adsorption chilltu: Part I – system description and modeling / B.B.Sana, I.I.El-Sharkawy, A.Chakraborty, S.Koyama / International Journal of Refrigeration. - 2007. N30.- P. 86 – 95.
118. Santori,G. A stand-alone solar adsorption refrigerator for humanitarian aid / G.Santori, S.Santamaria, A.Sapienza, S.Brandani, A.Freni // Solar Energy. - 2014.- Vol.100. - P.172-178.
119. Shmroukh, A. N. Adsorption working pairs for adsorption cooling chilltrs: A review based on adsorption capacity and environmental impact // A.N. Shmroukh, A.H.Ali, S.O.Orawara // Renewable Energy.-2015.-Vol.50.-P.445-456.
120. Solmus,I Adsorption properties of a natural zeolite—water pair for use in adsorption cooling cycles // I. Solmus, C. Yamah, B. Kaftanoglu, D. Baker // Appl Energy.-2010.-N87.- P.2062-2067.
121. Tamainot-Telto, Z. Carbon-Ammonia paius for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping // Z.Tamainot-Telto, S.J. Metcalf, R.E.Critoph, Y.Zhong, R.Thorpe // Unt. J Refrig. – 2009. N32. - P.1212-1229.
122. Zhai, X.O. Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage/ X.Q. Zhai, R.Z. Wang// Appl Energy. - 2010. - N 87. - P. 824-835.
123. Wang, L.W. A review on adsorption working pairs for refrigeration // L.W. Wang, R.Z. Wang, R.G. Oliveira// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. Vol. 13. - P. 518-534.
124. Wang, L.W. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // L.W. Wang, Z.Y.Xu, Q.W.Pan, S.Du, Z.Z.Xia. // Appl Energy. – 2016.Vol. 169 - P. 846-856.

125. Vasiliev, L.L. Solar/gas sorption heat pumps and refrigerators-nature friendly heat transport systems // L.L.Vasiliev, D.A.Mishkinis, A.A.Antukh, Jr.L.L.Vasiliev / International Journal of Energy Research. - 2002. – N26 (9). - P.825-835.

126. Xua,S. Experiment on a New Adsorption Bed bout Adsorption Refrigeration Driven by Solar Energy/ S. Xua // Research article Energy Procedia. - 2012.- Vol.14. – P. 1542-1547.

127. Xu,S.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon–ammonia working pair / S.Z. Xu, L.W. Wang, R.Z. Wang // Energy Conversion and Management. - 2016.- Vol.117.- P. 31-42.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Среднесуточные значения суммарной солнечной радиации $E(\text{МДж}/\text{м}^2)$ и продолжительности солнечного сияния
(час) t_c**

Актинометрические Станции	Вели- чины	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Западно-Казахстанская область (Орал)	E	5,53	10,03	16,98	22,95	28,23	30,12	28,78	23,55	18,49	12,47	6,87	4,55
	t_c	4,5	5,9	6,2	8,4	10,5	10,6	10,8	9,7	7,8	5,3	4,4	4,0
Мангистрауская область (Форт-Шевченко, Актау)	E	9,06	13,22	18,85	24,31	28,43	29,74	28,43	24,89	20,36	15,12	9,73	7,75
	t_c	4,4	5,6	6,4	8,2	10,1	11,1	10,9	10,2	9,0	6,8	4,9	3,8
Кызылордынская область (Кызылорды)	E	8,35	13,11	19,53	25,42	29,56	31,44	29,82	26,05	20,62	14,95	9,22	6,83
	t_c	5,5	6,5	7,1	9,0	11,2	12,1	12,0	11,6	9,7	7,2	5,7	4,9
Южно-Казахстанская область (Шимкент, Тараз)	E	8,95	13,16	19,73	26,26	30,08	32,26	30,95	27,05	21,87	15,01	9,46	7,02
	t_c	5,6	6,7	7,3	9,2	11,6	12,4	12,2	11,9	9,9	8,0	5,9	5,1
Алматинская область (Алматы)	E	8,23	11,77	18,58	24,99	29,73	31,16	29,41	25,92	20,81	15,05	9,47	6,96
	t_c	4,8	5,5	5,9	7,4	8,3	9,3	10,0	9,4	8,5	7,0	5,5	4,6
Актюбинская область (Актюбе)	E	7,36	11,88	19,25	24,33	29,09	31,48	29,87	25,19	19,76	13,97	8,38	5,94
	t_c	4,9	6,3	6,6	8,9	10,7	10,9	11,1	10,3	8,9	6,3	4,8	4,4
Карагандинская область (Джезказган)	E	7,69	12,58	18,79	24,94	29,62	31,74	29,89	25,76	20,36	14,33	8,59	6,38
	t_c	5,3	6,6	7,0	8,9	10,8	11,3	11,2	10,8	9,4	6,6	5,2	4,8
Костанайская област (Костанай)	E	4,83	9,14	15,38	22,11	27,52	30,44	28,52	23,68	17,76	11,52	6,17	3,91
	t_c	4,6	6,2	7,2	9,2	10,5	10,8	10,5	9,7	7,5	5,5	4,4	4,2
Акмолинская область	E	5,88	10,58	17,67	23,55	28,82	30,92	29,68	24,66	18,54	12,82	6,94	4,77

(Астана)	tc	4,6	6,1	6,7	8,2	10,0	11,0	10,5	9,4	8,1	5,5	4,6	4,2
Восточно-Казахстанская область (Семипалатинск)	Е	6,16	10,83	17,31	24,14	28,82	30,95	29,51	24,70	18,52	13,22	6,99	4,73
	tc	4,5	5,6	6,8	8,4	10,2	10,9	10,8	9,6	8,6	5,5	4,7	4,2

Среднесуточные значения суммарной солнечной радиации t (МДж/м²), рассчитанный по формулам [48]

Актинометрическая станция	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Акмолинская	5,89	10,58	17,66	23,54	28,81	30,92	29,69	24,65	18,53	12,82	6,93	4,76
Актюбинская	7,35	11,87	19,24	24,33	29,08	31,49	29,88	25,18	19,75	13,96	8,39	5,93
Алматинская	8,22	11,76	18,57	24,98	29,72	3,17	29,40	25,91	20,82	15,00	9,48	6,97
Атырауская	8,28	13,02	19,38	25,35	29,87	31,68	30,45	25,34	20,79	15,08	9,06	9,68
Восточно-Казахстанская	6,42	11,06	17,87	24,74	29,20	31,04	29,35	25,43	19,27	13,29	8,29	4,79
Жамбылская	9,51	14,01	20,84	26,27	30,50	32,19	30,83	27,11	21,86	18,13	10,55	8,20
Западно-Казахстанская	5,62	10,04	16,96	22,94	28,20	30,11	28,79	23,54	18,48	12,46	6,88	4,54
Карагандинская	6,15	10,82	17,32	24,13	28,81	30,94	29,50	24,71	18,50	18,21	6,98	4,72
Костанайская	4,83	9,13	15,37	22,10	27,50	30,43	28,51	23,69	17,75	11,51	6,16	3,90
Кзылординская	8,34	13,09	19,52	25,40	29,55	31,43	29,81	26,03	20,63	14,94	9,21	6,82
Мангистауская	9,08	13,20	18,85	24,30	28,42	29,72	28,42	24,86	20,38	15,13	9,74	7,74
Павлодарская	5,68	10,32	16,82	22,91	27,61	29,95	28,98	25,23	17,62	12,67	6,91	4,92
Северо-Казахстанская	4,72	8,15	14,9	21,15	25,91	27,85	28,05	22,72	18,65	10,97	6,05	4,05
Южно-Казахстанская	9,54	14,01	20,84	26,27	30,50	32,19	30,83	27,11	21,86	16,13	10,55	8,20

Продолжительность времени (T_0) между восходом заходом солнца (ч,мин)

Актинометрическая станция	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Костанайская область (Рудней)	8,22	9,44	11,44	13,54	15,48	16,14	16,08	14,30	12,24	10,22	8,22	7,38
Акмолинская область (Астана)	8,22	9,58	11,48	13,46	15,32	16,27	16,50	14,40	12,46	10,55	8,51	7,56
Западно-Казахстанская область (Уральск)	8,22	9,58	11,48	13,46	15,32	16,27	16,50	14,40	12,46	12,55	8,51	7,56
Мангистауская область (Форт-Шевченко)	9,10	10,26	11,50	13,26	14,48	15,32	14,14	14,06	12,38	11,04	9,34	8,52
Актюбинская область (Теректы)	8,40	10,08	11,48	13,40	15,16	16,10	15,48	14,28	12,40	10,54	9,10	8,16
Карагандинская область (Джезказган)	8,48	10,12	11,48	13,36	15,08	15,58	15,38	14,12	12,38	10,56	9,18	8,26
Восточно-Казахстанская область (Селезневка)	8,36	10,02	11,46	13,42	15,20	16,08	15,54	14,32	12,42	10,52	9,06	8,12
Кызылординская область (Аральское море)	8,56	10,14	11,48	13,32	15,00	15,50	15,30	14,18	12,38	10,58	9,24	8,36
Восточно-Казахстанская область (Семипалатинск)	8,28	10,02	11,48	13,44	15,26	16,24	16,02	14,36	12,42	10,52	9,00	8,04
Алматинская область (Алматы)	9,20	10,32	11,48	13,20	14,40	15,22	15,06	14,00	12,34	11,06	9,42	9,00

Значения теплофизических параметров для аммиака

t, °C	T, К	P, кг/см ²	P, МПа	ρ', кг/м ³	P'', кг/м ³	r, кДж/кг
-70	203,15	0,1119	0,01098	724,9	0,1112	1469
-60	213,15	0,2239	0,02196	713,5	0,2130	1443
-50	223,15	0,4177	0,04098	701,9	0,3814	1416
-40	234,15	0,7332	0,07193	689,9	0,6449	1389
-30	243,15	1,221	0,11978	677,6	1,039	1360
-20	253,15	1,943	0,19061	665,0	1,605	1329
-10	263,15	2,969	0,29125	651,9	2,392	1297
0	273,15	4,384	0,43007	638,4	3,457	1262
+10	283,15	6,278	0,61509	624,5	4,868	1225
+20	293,15	8,750	0,85838	610,0	6,702	1186
+30	303,15	11,91	1,16837	594,8	9,054	1144
+40	315,15	15,87	1,55685	579,9	12,04	1099
+50	325,15	20,75	2,03558	562,3	15,79	1051
+60	335,15	26,70	2,61927	544,6	20,51	998

**Расчетные значения для определения объема абсорбционного пространства
рабочих пар аммиак-активированный уголь (для четырех образцов) при
температуре абсорбции 20⁰С**

Образец №1	АС+NH ₃	при T=293 К	P _s =8,5777 10 ⁵ Па	ρ, 610,2 кг/м ³	
a, кг/кг	P, 10 ⁵ Па	W ₀ , м ³ /кг	P _s /P	ln W ₀	T ² (ln P _s /P) ²
0,235	8,286	0,3851	1,035	-0,9542	101,6
0,208	6,324	0,341	1,356	-1,0759	7962
0,188	4,867	0,308	1,762	-1,1777	27546
0,168	3,028	0,2753	2,833	-1,29	93093
0,151	2,006	0,2474	4,276	-1,397	181249,7
Образец № 2					
0,272	8,487	0,446	1,011	-0,8074	10,27
0,267	7,878	0,4376	1,089	-0,8265	624,06
0,238	6,447	0,39	1,33	-0,9416	6981,8
0,229	5,006	0,3753	1,7135	-0,98	24898
0,206	3,986	0,3376	2,152	-1,086	50424,7
0,180	2,877	0,295	2,981	-1,221	102420,4
0,172	2,106	0,282	4,073	-1,266	169318,5
0,16	1,003	0,2761	8,552	-1,2868	395424,5
Образец №3					
0,162	1,008		8,5096	-1,3262	393594,3
0,270	8,104	0,442	1,058	-0,8164	272,9
0,251	6,988	0,4113	1,227	-0,8884	3592,8
0,242	5,843	0,3966	1,468	-0,9248	12652,4
0,231	4,504	0,3786	1,9045	-,09712	35628,95
0,208	3,486	0,3409	2,461	-1,0761	69625,5
0,191	2,488	0,313	3,448	-1,1616	131532,2
0,168	1,502	0,2753	5,711	-1,29	260632,2
Образец № 4					
0,304	8,004	0,498	1,0716	-0,6972	410,5
0,288	7,505	0,4719	1,1429	-0,751	1531,6

0,273	6,114	0,447	1,403	-0,8052	9843,3
0,258	5,009	0,4228	1,712	-0,8608	24817,3
0,251	4,008	0,4113	2,14	-0,8884	49691,6
0,238	3,084	0,39	2,781	-0,9416	89810,2
0,230	2,208	0,377	3,7621	-0,9755	150713,5
0,176	1,084	0,2884	7,913	-1,2417	367323,9

**Расчетные значения для определения объема абсорбционного пространства
рабочих пар аммиак-активированный уголь (для четырех образцов) при
температуре абсорбции 20⁰С для формулы М.М.Дубинина (1.39)**

<i>Образец №1</i>	<i>АС+NH₃</i>				
<i>a</i> , кг/кг	<i>P</i> , 10 ⁵ Па	<i>log a</i>	<i>Ps/P</i>	<i>ln a</i>	<i>T²(ln Ps/P)²</i>
0,272	11,029	-0,5654	1,0586	-1,302	0,00297 10 ⁵
0,254	9,564	-0,5952	1,2207	-1,3704	0,03651 10 ⁵
0,235	8,286	-0,6289	1,4018	-1,4482	0,10793 10 ⁵
0,208	6,324	-0,6819	1,846	-1,5702	0,3451 10 ⁵
0,188	4,867	-0,7258	2,399	-1,6713	0,7029 10 ⁵
0,168	3,028	-0,7747	3,8557	-1,784	1,6721 10 ⁵
0,151	2,006	-0,8210	5,82	-1,8905	2,8481 10 ⁵
<i>Образец № 2</i>					
0,284	10,042	-0,5467	1,1626	-1,259	0,0023 10 ⁵
0,272	8,987	-0,5654	1,2991	-1,302	0,063 10 ⁵
0,266	7,878	-0,575	1,482	-1,324	0,1421 10 ⁵
0,238	6,447	-0,6242	1,811	-1,436	0,3238 10 ⁵
0,229	5,006	-0,6402	2,332	-1,474	0,7170 10 ⁵
0,208	3,986	-0,682	2,929	-1,570	1,0603 10 ⁵
0,180	2,877	-0,7447	4,058	-1,715	1,8013 10 ⁵
0,172	2,106	-0,7545	5,5436	-1,76	2,6929 10 ⁵
<i>Образец №3</i>					
0,303	10,088	-0,52	1,1573	-1,194	0,268286 10 ⁵
0,276	9,012	-0,559	1,2955	-1,2874	0,47537 10 ⁵
0,270	8,104	-0,5686	1,434	-1,309	0,662216 10 ⁵
0,251	6,988	-0,6	1,671	-1,3823	0,942426 10 ⁵
0,242	5,843	-0,6162	1,998	-1,4188	1,270905 10 ⁵
0,231	4,504	-0,636	2,592	-1,4653	1,748933 10 ⁵
0,208	3,486	-0,682	3,3491	-1,5702	2,219378 10 ⁵
0,191	2,488	-0,719	4,6925	-1,6555	2,838689 10 ⁵

0,168	1,502	-0,7747	7,773	-1,7838	3,765366 10 ⁵
Образец № 4					
0,344	10,608	-0,4634	1,1005	-1,0671	0,175765 10 ⁵
0,332	9,584	-0,4789	1,218	-1,1026	0,362408 10 ⁵
0,318	8,987	-0,4976	1,299	-1,1457	0,480443 10 ⁵
0,304	8,004	-0,517	1,4586	-1,1907	0,693153 10 ⁵
0,288	7,505	-0,541	1,5556	-1,2448	0,811378 10 ⁵
0,273	6,114	-0,564	1,91	-1,2983	1,18777 10 ⁵
0,258	5,009	-0,5883	2,331	-1,355	1,553792 10 ⁵
0,251	4,008	-0,6	2,913	-1,3823	1,963152 10 ⁵
0,238	3,084	-0,6234	3,786	-1,4355	2,444346 10 ⁵
0,230	2,208	-0,6383	5,121	-1,4697	2,998997 10 ⁵

**Расчетные значения для определения объема абсорбционного пространства
рабочих пар метиламин-активированный уголь (для четырех образцов) при
постоянной температуре абсорбции 30⁰С**

Образец №1	АС+Метиламин				
a , кг/кг	P, 10 ⁵ Па	W ₀ , м ³ /кг	Ps/P	ln W ₀	T ² (ln Ps/P) ²
0,212	3,64	0,332	1,016	-1,0996	22,95
0,22	3,52	0,3446	1,051	-1,0654	213,52
0,218	3,18	0,3415	1,164	-1,0744	1969,2
0,174	2,22	0,2725	1,67	-1,300	22401,68
0,152	1,19	0,238	3,109	-1,435	110471,9
0,118	0,54	0,1848	6,85	-1,6885	317965,2
Образец № 2					
0,22	3,624	0,3446		-1,0654	
0,215	3,006	0,3368	1,231	-1,0883	3704,3
0,204	2,604	0,3195	1,421	-1,141	10593,8
0,19	2,467	0,2976	1,50	-1,212	14104,4
0,175	1,588	0,2741	2,33	-1,2943	61422,8
0,16	1,04	0,2506	3,558	-1,3839	138291,2
0,11	0,586	0,1723	6,314	-1,65	291525,6
Образец №3					
0,225	3,452	0,3524		-1,043	
0,22	3,041	0,3446	1,217	-1,0654	3302,9
0,217	2,69	0,3399	1,375	-1,079	8724,67
0,203	1,92	0,318	1,927	-1,1457	36944,78
0,172	1,41	0,2694	2,624	-1,3116	79902,2
0,129	0,55	0,2029	6,727	-1,5951	311930,9
Образец № 4					
0,25	3,51	0,3916	1,054	-0,9375	237,5
0,24	3,00	0,3759	1,233	-0,9784	3766,1

0,238	2,98	0,3728	1,242	-0,9867	4032,2
0,236	2,12	0,3696	1,745	-0,9953	26611,1
0,22	1,3	0,3446	2,846	-1,0654	93913,4
0,155	0,52	0,2428	7,115	-1,4155	330558,3
0,2	1,08	0,3133	3,426	-1,1606	130170,8

**Расчетные значения для определения объема абсорбционного пространства
рабочих пар этиламин-активированный уголь (для четырех образцов) при
постоянной температуре абсорбции 30 °С**

Образец №1	АС+Этиламин				
a , кг/кг	P, 10 ⁵ Па	W ₀ , м ³ /кг	Ps/P	ln W ₀	T ² (ln Ps/P) ²
0,124	1,06	0,1828	1,094	-1,699	697,7
0,122	0,84	0,1799	1,381	-1,715	8943,98
0,112	0,68	0,1651	1,71	-1,8012	24487,9
0,102	0,46	0,1507	2,522	-1,8944	73446,4
0,095	0,4	0,1400	2,9	-1,966	97319,2
Образец № 2					
0,133	1,06	0,1961	1,1038	-1,6291	836,9
0,129	0,92	0,1902	1,272	-1,6597	4960,8
0,122	0,808	0,1799	1,448	-1,7154	11765,24
0,11	0,687	0,1622	1,703	-1,8189	24336,14
0,1	0,336	0,1474	3,482	-1,915	133634,7
Образец №3					
0,128	1,04	0,1887	1,115	-1,6675	1023,7
0,126	0,94	0,1858	1,234	-1,6830	3796,6
0,112	0,66	0,1651	1,758	-1,801	27301,97
0,11	0,56	0,1622	2,071	-1,819	45528,4
0,1	0,49	0,1474	2,367	-1,894	63755,5
Образец № 4					
0,161	1,04	0,237	1,1154	-1,4397	1023,7
0,15	0,84	0,221	1,381	-1,51	8943,98
0,142	0,74	0,209	1,568	-1,565	17369
0,138	0,64	0,203	1,8125	-1,595	30362,8
0,132	0,42	0,1946	2,762	-1,637	88604,3

Приложение И

**Экспериментальные значения температур гелиоприемного устройства генератора –адсорбера
гелиоэнергетического термотрансформатора (цифрами указана нумерация термопар)**

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Окр.среда
час	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С
06.00	23,8	26,6	32,4	32,8	36,8	36,4	36,0	36,2	28,0	30,2	26,2
07.00	23,8	32,4	35,2	33,6	43,4	42,9	42,0	42,0	30,2	35,4	27,0
08.00	23,9	38,1	44,6	40,8	48,4	49,4	47,4	46,4	34,8	40,8	29,4
09.00	23,9	44,2	56,4	50,8	54,8	53,6	52,3	53,6	39,6	55,4	31,3
10.00	24,0	50,6	66,2	60,2	61,2	61,4	60,4	60,1	43,8	60,4	32,6
11.00	24,0	53,8	70,8	66,9	63,3	63,0	62,4	62,2	47,6	62,6	33,8
12.00	24,1	54,2	71,6	68,2	64,6	64,2	63,0	63,4	49,4	62,8	34,2
13.00	24,1	54,4	71,4	68,1	64,8	64,2	63,8	64,1	49,3	62,6	34,2
14.00	24,2	53,6	70,6	67,9	63,9	64,0	62,6	62,2	48,2	60,4	34,2
15.00	24,2	52,2	69,4	67,0	62,6	62,2	60,4	61,8	46,8	59,4	34,1
16.00	24,1	50,3	68,0	68,0	60,8	60,6	58,4	60,4	44,6	58,9	34,0
17.00	24,1	48,3	64,3	60,1	59,0	58,8	57,3	59,0	43,8	58,8	34,0
18.00	24,0	47,6	62,8	62,0	58,4	58,2	57,0	57,2	43,2	58,6	33,8
19.00	24,0	46,5	60,1	60,1	57,2	57,8	56,8	56,8	42,8	58,1	33,8

Значения тепловых нагрузок на реактор генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора в течение светового дня (время солнечное)

Время	Id (диффузионная)	I _д (прямая)	Q _{пол} (расчетная)	Q'пол (эксперимент)	$\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$	G	τ
час	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	⁰ С	м ³ /с·10 ⁻⁶	с
06.00	87	495	32.9	33.6	4.2	1.8	525
07.00	89	506	62.48	53.8	6.4	2.1	476
08.00	91	538	104.01	96.14	10.9	2.1	477
09.00	93	546	144.34	138.5	15.7	2.1	476
10.00	95	598	236.63	216.2	19.8	2.6	384
11.00	97	602	292.43	287.5	23.6	2.9	345
12.00	98	627	325.56	334.2	25.3	3.0	328
13.00	96	612	314.5	317.5	25.2	3.0	332
14.00	94	614	293.78	292.3	24.0	2.9	344
15.00	92	598	247.17	246.8	22.6	2.6	382
16.00	90	588	201.05	206.6	20.5	2.4	417
17.00	87	548	115.47	161.3	19.2	2.0	501
18.00	85	504	59.77	63.2	18.8	1.8	524

Значение температур в процессе десорбции на реакторах генератора-адсорбера

время	Термопара 5, °C	Термопара 6, °C	Термопара 7, °C	Термопара 8, °C	Температура окруж.среды воздуха, °C
07.00	34,8	34,6	34,2	34,4	23,1
08.00	44,6	44,8	36,8	36,6	24,8
09.00	64,8	62,4	60,8	49,3	27,2
10.00	90,6	88,2	84,2	64,7	30,8
11.00	118,4	112,8	100,6	86,4	34,5
12.00	132,4	132,8	122	92,4	36,8
13.00	139,2	138,6	136,4	113,3	38,6
14.00	142,4	141,8	138,8	128,6	39,6
15.00	140,2	138,6	118,2	112,4	38,7
16.00	128,4	119,9	98,8	95,4	36,8
17.00	110,2	91,8	82,4	78,2	35,4
18.00	65,2	63,1	53,4	51,2	34,2

**Значение температур в процессе адсорбции на реакторах
генератора-адсорбера(ночное время)**

время	Термопара 4, °С	Тер-пара 2, °С	Тер-пара 3, °С	Тер-пара 1, °С	Тем. окр.ср. °С
19.00	52,2	55,6	51,8	48,2	32,1
20.00	41,3	42,3	48,4	41,6	28,8
21.00	30,6	31,4	44,3	42,2	26,4
22.00	42,4	43,2	51,8	50,3	25,1
23.00	58,3	59,8	60,3	57,2	24,4
24.00	60,2	65,6	62,4	58,7	23,2
01.00	59,8	62,2	60,6	56,8	23
02.00	48,4	53,2	56,4	50,1	23,1
03.00	42	47,7	50,2	44,4	22,8
04.00	39,8	42,2	48,4	38,2	22,7
05.00	36,4	38,4	36,6	32,6	22,5
06.00	30,2	32,2	30,2	27,4	22,2

Значение температур в камере-испарителе

время	Термопара 7, °C	Тер-пара 8, °C	Тер-пара 11, °C	Тер-пара 10, °C	Тер-пара 9, °C
07.00	5,5	9,5	8,4	10,4	6,5
08.00	6,6	9,7	8,7	10,5	7,6
09.00	7,2	10,1	9,3	10,9	8,2
10.00	7,7	10,5	10	11,1	8,7
11.00	8,7	10,7	10,2	11,3	9,7
12.00	9,4	11,3	10,3	11,3	10,4
13.00	9,9	11,6	10	11,6	10,9
14.00	10,6	11,9	10,4	11,9	11,6
15.00	10,8	12,2	11,4	12,2	11,8
16.00	11,9	12,3	11,2	12,3	11,9
17.00	12,8	12,7	11,6	12,7	12,8
18.00	13,3	13,1	13,1	13,2	13,2
19.00	13,4	13,3	13,2	13,4	13,5
20.00	13,1	13,2	13,3	13,2	13,4
21.00	12,6	10,5	-2,8	-3,7	-8
22.00	11,4	7,2	-2,3	-3,1	-6,3
23.00	10,2	5,4	-1,8	-2,1	-5,8
24.00	9,8	2,7	-1,4	-1,8	-4,2
01.00	8,8	1,2	-1,1	-1,4	-3,1
02.00	7,6	0	-0,8	-1,1	-2,8
03.00	6,9	0	-0,6	-0,9	-2,1
04.00	6,4	0	-0,5	-0,7	-1,8
05.00	6,2	0	-0,3	-0,5	-1,5
06.00	6	0	0	-0,1	-1,2

Значение экспериментальных температур на гелиоэнергетической холодильной установке

время	Термопара 4, °C	Тер-пара 2, °C	Тер-пара 3, °C	Тер-пара 1, °C	Тер-пара 6, °C,	Тер- пара 7, °C,	Тер- пара 8, °C,	Тер- пара 11, °C,	Тер- пара 10, °C,	Тер- пара 9, °C,	Тер-пара 5, °C,
07.00	34,8	34,6	34,2	34,4	23,1	5,5	9,5	8,4	10,4	6,5	36,3
08.00	44,6	44,8	36,8	36,6	24,8	6,6	9,7	8,7	10,5	7,6	37,6
09.00	64,8	62,4	60,8	49,3	27,2	7,2	10,1	9,3	10,9	8,2	38,9
10.00	90,6	88,2	84,2	64,7	30,8	7,7	10,5	10	11,1	8,7	40,6
11.00	118,4	112,8	100,6	86,4	34,5	8,7	10,7	10,2	11,3	9,7	43,2
12.00	132,4	132,8	122	92,4	36,8	9,4	11,3	10,3	11,3	10,4	45,4
13.00	139,2	138,6	136,4	113,3	38,6	9,9	11,6	10	11,6	10,9	46,2
14.00	142,4	141,8	138,8	128,6	39,6	10,6	11,9	10,4	11,9	11,6	47,7
15.00	140,2	138,6	118,2	112,4	38,7	10,8	12,2	11,4	12,2	11,8	48,3
16.00	128,4	119,9	98,8	95,4	36,8	11,9	12,3	11,2	12,3	11,9	48,7
17.00	110,2	91,8	82,4	78,2	35,4	12,8	12,7	11,6	12,7	12,8	48
18.00	65,2	63,1	53,4	51,2	34,2	13,3	13,1	13,1	13,2	13,2	47,6
19.00	52,2	55,6	51,8	48,2	32,1	13,4	13,3	13,2	13,4	13,5	46,8
20.00	41,3	42,3	48,4	41,6	28,8	13,1	13,2	13,3	13,2	13,4	
21.00	30,6	31,4	44,3	42,2	26,4	12,6	10,5	-2,8	-3,7	-8	
22.00	42,4	43,2	51,8	50,3	25,1	11,4	7,2	-2,3	-3,1	-6,3	
23.00	58,3	59,8	60,3	57,2	24,4	10,2	5,4	-1,8	-2,1	-5,8	
24.00	60,2	65,6	62,4	58,7	23,2	9,8	2,7	-1,4	-1,8	-4,2	

01.00	59,8	62,2	60,6	56,8	23	8,8	1,2	-1,1	-1,4	-3,1	
02.00	48,4	53,2	56,4	50,1	23,1	7,6	0	-0,8	-1,1	-2,8	
03.00	42	47,7	50,2	44,4	22,8	6,9	0	-0,6	-0,9	-2,1	
04.00	39,8	42,2	48,4	38,2	22,7	6,4	0	-0,5	-0,7	-1,8	
05.00	36,4	38,4	36,6	32,6	22,5	6,2	0	-0,3	-0,5	-1,5	
06.00	30,2	32,2	30,2	27,4	22,2	6	0	0	-0,1	-1,2	

Приложение II

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического, эксергетического КПД, степени десорбции адсорбата
для рабочей пары активированный уголь - аммиак**

$T_0=273\text{K}$ $T_{\text{конд}}=298\text{K}$ $T_{\text{адс}}=298\text{K}$

T, K	КПД1, %	КПД2, %	КПД3, %	КПД4, %	эксер1, %	эксер2, %	эксер3, %	эксер4, %	a1	a2	a3	a4
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
305	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
310	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
320	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
325	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214497	0,248474	0,246246	0,277437
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,191461	0,221788	0,219799	0,247641
335	8,236	9,112	9,057	9,799	4,827	5,341	5,309	5,743	0,182083	0,210925	0,209034	0,235512
340	14,257	15,576	15,494	16,588	7,576	8,277	8,233	8,815	0,172208	0,199486	0,197697	0,222739
345	18,263	19,799	19,705	20,962	8,898	9,646	9,600	10,212	0,161963	0,187618	0,185935	0,209487
350	21,158	22,818	22,717	24,063	9,538	10,286	10,240	10,847	0,151472	0,175466	0,173892	0,195919
355	23,356	25,096	24,990	26,392	9,816	10,547	10,502	11,091	0,14086	0,163172	0,161709	0,182192
360	25,077	26,872	26,763	28,203	9,888	10,596	10,553	11,120	0,130242	0,150873	0,14952	0,168459
365	26,448	28,284	28,172	29,640	9,837	10,520	10,479	11,025	0,11973	0,138695	0,137451	0,154862
370	27,549	29,418	29,304	30,794	9,712	10,370	10,330	10,856	0,109423	0,126756	0,125619	0,141531
375	28,436	30,331	30,216	31,724	9,539	10,175	10,136	10,642	0,099413	0,11516	0,114128	0,128584
380	29,146	31,063	30,946	32,470	9,337	9,951	9,914	10,402	0,089779	0,104	0,103067	0,116123

385	29,707	31,643	31,526	33,064	9,117	9,712	9,676	10,148	0,080587	0,093352	0,092515	0,104234
390	30,141	32,095	31,976	33,527	8,887	9,463	9,428	9,885	0,071892	0,08328	0,082533	0,092987
395	30,464	32,434	32,315	33,878	8,651	9,210	9,176	9,620	0,063736	0,073832	0,07317	0,082438
400	30,692	32,677	32,557	34,132	8,413	8,957	8,924	9,356	0,056149	0,065043	0,06446	0,072624
405	30,836	32,834	32,713	34,300	8,175	8,705	8,673	9,094	0,049147	0,056932	0,056422	0,063569
410	30,906	32,917	32,795	34,392	7,940	8,457	8,425	8,836	0,042739	0,049509	0,049065	0,05528
415	30,910	32,933	32,810	34,418	7,708	8,213	8,182	8,583	0,03692	0,042768	0,042385	0,047754
420	30,856	32,891	32,767	34,385	7,481	7,974	7,944	8,336	0,031679	0,036697	0,036368	0,040975
425	30,752	32,797	32,673	34,301	7,258	7,741	7,711	8,095	0,026996	0,031272	0,030992	0,034917
430	30,604	32,659	32,534	34,171	7,041	7,514	7,485	7,862	0,022844	0,026463	0,026226	0,029548
435	30,418	32,481	32,356	34,002	6,830	7,293	7,265	7,635	0,019194	0,022234	0,022035	0,024826
440	30,198	32,270	32,144	33,798	6,625	7,080	7,052	7,415	0,01601	0,018546	0,01838	0,020708
445	29,951	32,030	31,903	33,565	6,427	6,873	6,846	7,202	0,013255	0,015355	0,015217	0,017144
450	29,680	31,765	31,638	33,307	6,235	6,673	6,646	6,997	0,010891	0,012616	0,012503	0,014087
455	29,389	31,480	31,353	33,029	6,049	6,480	6,454	6,799	0,008879	0,010286	0,010193	0,011485
460	29,083	31,178	31,051	32,733	5,871	6,294	6,268	6,608	0,007181	0,008319	0,008244	0,009288
465	28,764	30,863	30,735	32,423	5,699	6,115	6,089	6,424	0,005761	0,006673	0,006613	0,007451
470	28,436	30,538	30,410	32,102	5,533	5,942	5,918	6,247	0,004582	0,005308	0,00526	0,005926

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического, эксергетического КПД, степени десорбции
адсорбата для рабочей пары активированный уголь – аммиак**

$T_0=273K$; $T_{конд}=308K$; $T_{адс}=308K$

Т,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	эксер1,%	эксер2,%	эксер3,%	эксер4,%	a1	a2	a3	a4
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0,194135	0,224886	0,222869	0,2511
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0,148765	0,172329	0,170784	0,192417
365	6,045	6,744	6,700	7,300	2,249	2,508	2,492	2,715	0,13865	0,160612	0,159172	0,179334
370	11,125	12,287	12,214	13,195	3,922	4,331	4,306	4,652	0,128512	0,148869	0,147534	0,166222
375	14,771	16,201	16,112	17,305	4,955	5,435	5,405	5,805	0,118454	0,137218	0,135987	0,153212
380	17,496	19,095	18,996	20,319	5,605	6,117	6,086	6,509	0,108569	0,125766	0,124639	0,140426
385	19,587	21,299	21,194	22,601	6,012	6,537	6,505	6,937	0,098941	0,114613	0,113586	0,127973

390	21,219	23,010	22,900	24,366	6,256	6,784	6,752	7,184	0,089646	0,103846	0,102914	0,11595
395	22,502	24,351	24,237	25,745	6,390	6,915	6,883	7,311	0,080747	0,093537	0,092699	0,104441
400	23,512	25,405	25,289	26,829	6,445	6,964	6,932	7,354	0,072299	0,083751	0,083	0,093514
405	24,304	26,231	26,113	27,677	6,444	6,954	6,923	7,338	0,064343	0,074535	0,073867	0,083223
410	24,916	26,870	26,750	28,335	6,401	6,903	6,872	7,280	0,056911	0,065926	0,065334	0,07361
415	25,379	27,355	27,234	28,835	6,329	6,822	6,791	7,191	0,050023	0,057946	0,057427	0,064701
420	25,716	27,710	27,588	29,202	6,234	6,718	6,688	7,080	0,043689	0,050609	0,050155	0,056508
425	25,946	27,955	27,832	29,458	6,124	6,598	6,569	6,952	0,037909	0,043914	0,043521	0,049033
430	26,085	28,106	27,982	29,618	6,001	6,466	6,438	6,814	0,032678	0,037854	0,037514	0,042266
435	26,145	28,176	28,051	29,696	5,870	6,326	6,299	6,668	0,027978	0,03241	0,032119	0,036188
440	26,137	28,176	28,051	29,704	5,734	6,181	6,154	6,517	0,02379	0,027558	0,027311	0,030771
445	26,071	28,117	27,992	29,651	5,594	6,033	6,006	6,362	0,020086	0,023268	0,023059	0,02598
450	25,956	28,007	27,881	29,546	5,453	5,883	5,857	6,207	0,016837	0,019504	0,019329	0,021778
455	25,799	27,854	27,728	29,397	5,310	5,733	5,707	6,051	0,01401	0,016229	0,016083	0,018121
460	25,606	27,663	27,537	29,210	5,169	5,584	5,559	5,896	0,011569	0,013401	0,013281	0,014963
465	25,384	27,442	27,316	28,992	5,029	5,437	5,412	5,744	0,009478	0,01098	0,010881	0,01226
470	25,137	27,196	27,069	28,747	4,891	5,292	5,267	5,594	0,007703	0,008924	0,008844	0,009964

Приложение С

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического, эксергетического КПД, степени десорбции адсорбата
для рабочей пары активированный уголь - аммиак**

$T_0=273K$; $T_{конд}=318K$; $T_{адс}=318K$

Т,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	эксер 1,%	эксер2, %	эксер3, %	эксер4, %	a1	a2	a3	a4
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
365	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
370	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
375	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
385	0	0	0	0	0	0	0	0	0,171271	0,1984	0,196621	0,221527
390	0	0	0	0	0	0	0	0	0,106962	0,123905	0,122794	0,138348
395	4,275	4,800	4,766	5,222	1,214	1,363	1,353	1,483	0,097709	0,113186	0,112171	0,126379

400	8,147	9,078	9,019	9,818	2,233	2,488	2,472	2,691	0,088754	0,102812	0,10189	0,114797
405	11,069	12,267	12,192	13,209	2,935	3,252	3,232	3,502	0,080159	0,092856	0,092023	0,10368
410	13,319	14,700	14,614	15,779	3,422	3,777	3,754	4,054	0,071975	0,083376	0,082629	0,093095
415	15,074	16,585	16,491	17,758	3,759	4,136	4,112	4,428	0,064245	0,074422	0,073754	0,083097
420	16,450	18,056	17,956	19,298	3,988	4,377	4,353	4,679	0,057	0,066029	0,065437	0,073725
425	17,529	19,206	19,102	20,499	4,137	4,533	4,508	4,838	0,050261	0,058223	0,057701	0,065009
430	18,370	20,102	19,994	21,433	4,226	4,625	4,600	4,931	0,044042	0,051018	0,050561	0,056965
435	19,018	20,791	20,681	22,152	4,270	4,668	4,644	4,974	0,038345	0,044419	0,044021	0,049597
440	19,505	21,310	21,198	22,695	4,279	4,675	4,651	4,979	0,033168	0,038421	0,038077	0,0429
445	19,860	21,690	21,576	23,092	4,261	4,654	4,630	4,955	0,028497	0,033011	0,032715	0,036859
450	20,103	21,951	21,837	23,367	4,223	4,611	4,587	4,909	0,024317	0,028169	0,027916	0,031452
455	20,253	22,114	21,999	23,541	4,169	4,552	4,528	4,846	0,020604	0,023868	0,023654	0,02665
460	20,322	22,194	22,078	23,628	4,102	4,480	4,457	4,770	0,017332	0,020077	0,019897	0,022418
465	20,326	22,203	22,087	23,643	4,027	4,399	4,376	4,684	0,014471	0,016763	0,016613	0,018717
470	20,272	22,154	22,037	23,597	3,945	4,311	4,288	4,592	0,011989	0,013888	0,013764	0,015507

Расчетные значения эксергетического КПД для рабочей пары АС-аммиак

Аммиак для W1 $T_{конд}=293K$ $T_{адс}=293K$ $T_{ос}=283K$

Тдес	T0=253	T0=258	T0=263	T0=268	T0=273	T0=278
295	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
305	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
310	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,89
320	0,00	0,00	0,00	0,00	3,05	3,04
325	0,00	0,00	0,00	0,00	4,47	3,05
330	0,00	0,00	0,00	3,36	5,05	3,01
335	0,00	0,00	0,00	5,33	5,29	2,95
340	0,00	0,00	0,00	6,31	5,36	2,88
345	0,00	0,00	3,00	6,81	5,35	2,80
350	0,00	0,00	5,10	7,05	5,28	2,72
355	0,00	0,00	6,32	7,13	5,19	2,64
360	0,00	2,60	7,04	7,13	5,08	2,57
365	0,00	4,60	7,46	7,06	4,96	2,49
370	0,00	5,88	7,68	6,96	4,84	2,42
375	2,15	6,70	7,78	6,83	4,71	2,35
380	3,93	7,22	7,79	6,69	4,58	2,28
385	5,13	7,54	7,74	6,53	4,46	2,21
390	5,94	7,71	7,65	6,37	4,33	2,15
395	6,49	7,79	7,53	6,21	4,21	2,08
400	6,84	7,79	7,39	6,04	4,09	2,02
405	7,05	7,73	7,23	5,88	3,97	1,96
410	7,17	7,64	7,06	5,71	3,85	1,90
415	7,20	7,52	6,89	5,55	3,74	1,85
420	7,18	7,38	6,71	5,39	3,63	1,79
425	7,11	7,22	6,53	5,24	3,52	1,74
430	7,01	7,06	6,36	5,09	3,42	1,69

435	6,89	6,88	6,18	4,94	3,32	1,64
440	6,75	6,70	6,01	4,80	3,22	1,59
445	6,60	6,53	5,84	4,66	3,13	1,55
450	6,44	6,35	5,67	4,52	3,04	1,50
455	6,27	6,17	5,51	4,39	2,95	1,46
460	6,11	6,00	5,35	4,27	2,87	1,42
465	5,94	5,83	5,20	4,15	2,79	1,38
470	5,78	5,66	5,05	4,03	2,71	1,34

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического и эксергетического КПД, степени десорбции
адсорбата для рабочей пары активированный уголь - метиламин**

T ₀ =273K T _{конд} =298K T _{адс} =298K T _{ос} =293K T _{ос} =273 K												
T,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	экс1,%	экс2,%	экс3,%	экс.4,%	a1	a2	a3	a4
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
305	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2274
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1888	0,1960	0,2004	0,2227
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1161	0,1205	0,1233	0,1370
355	4,829	4,969	5,054	5,469	2,029	2,088	2,124	2,298	0,1038	0,1077	0,1102	0,1224
360	8,8312	9,066	9,210	9,902	3,482	3,575	3,631	3,904	0,0919	0,0954	0,0976	0,1084
365	11,624	11,916	12,094	12,947	4,323	4,432	4,498	4,815	0,0806	0,0837	0,0856	0,0951
370	13,632	13,961	14,160	15,114	4,805	4,921	4,991	5,328	0,0701	0,0728	0,0744	0,0827
375	15,095	15,448	15,662	16,683	5,063	5,182	5,254	5,596	0,0604	0,0627	0,0641	0,0712
380	16,160	16,531	16,755	17,823	5,177	5,296	5,367	5,709	0,0515	0,0535	0,0547	0,0608

385	16,926	17,309	17,540	18,641	5,194	5,312	5,383	5,721	0,0435	0,0452	0,0462	0,0514
390	17,460	17,851	18,087	19,213	5,148	5,263	5,333	5,664	0,0365	0,0378	0,0387	0,0430
395	17,810	18,208	18,448	19,591	5,057	5,170	5,238	5,563	0,0302	0,0314	0,0321	0,0357
400	18,014	18,416	18,659	19,815	4,937	5,048	5,114	5,431	0,0248	0,0258	0,0264	0,0293
405	18,102	18,507	18,751	19,916	4,799	4,906	4,971	5,280	0,0202	0,0210	0,0214	0,0238
410	18,095	18,501	18,747	19,917	4,648	4,753	4,816	5,117	0,0163	0,0169	0,0173	0,0192
415	18,013	18,420	18,667	19,840	4,492	4,593	4,655	4,947	0,0130	0,0134	0,0138	0,0153
420	17,871	18,279	18,525	19,699	4,332	4,431	4,491	4,775	0,0102	0,0106	0,0109	0,0121
425	17,683	18,090	18,336	19,509	4,173	4,269	4,327	4,604	0,0080	0,0083	0,0085	0,0094
430	17,459	17,865	18,110	19,281	4,016	4,110	4,166	4,436	0,0062	0,0064	0,0065	0,0073
435	17,209	17,613	17,857	19,024	3,864	3,954	4,009	4,271	0,0047	0,0049	0,0050	0,0056
440	16,940	17,341	17,584	18,747	3,716	3,804	3,857	4,112	0,0036	0,0037	0,0038	0,0042
445	16,658	17,057	17,298	18,455	3,574	3,660	3,711	3,959	0,0027	0,0028	0,0028	0,0031
450	16,368	16,764	17,004	18,154	3,438	3,521	3,572	3,813	0,0020	0,0020	0,0021	0,0023
455	16,075	16,468	16,706	17,848	3,308	3,389	3,438	3,673	0,0014	0,0015	0,0015	0,0017
460	15,782	16,172	16,408	17,542	3,185	3,264	3,312	3,541	0,0010	0,0011	0,0011	0,0012
465	15,491	15,877	16,111	17,237	3,069	3,145	3,192	3,415	0,0007	0,0007	0,0008	0,0009
470	15,204	15,587	15,819	16,936	2,958	3,033	3,078	3,295	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006

Приложение Ф

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического и эксергетического КПД, степени десорбции
адсорбата для рабочей пары активированный уголь - метиламин**

T ₀ =273K T _{конд} =308K T _{адс} =308K T _{ос} =293K T _{ос} =273 K												
T,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	экс1,%	экс2,%	экс3,%	экс4,%	a1	a2	a3	a4
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
365	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
370	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
375	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
385	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190
390	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161	0,167	0,171	0,190

395	0	0	0	0	0	0	0	0	0,045	0,047	0,048	0,054
400	1,860	1,919	1,955	2,132	0,510	0,526	0,536	0,584	0,038	0,040	0,041	0,045
405	3,573	3,682	3,750	4,078	0,947	0,976	0,994	1,081	0,032	0,033	0,034	0,038
410	4,848	4,994	5,083	5,519	1,245	1,283	1,305	1,417	0,026	0,027	0,028	0,031
415	5,794	5,965	6,070	6,582	1,444	1,487	1,513	1,641	0,022	0,022	0,023	0,026
420	6,487	6,677	6,793	7,360	1,572	1,618	1,647	1,784	0,018	0,018	0,019	0,021
425	6,983	7,187	7,311	7,918	1,648	1,696	1,725	1,868	0,014	0,015	0,015	0,017
430	7,326	7,540	7,670	8,304	1,685	1,734	1,764	1,910	0,011	0,012	0,012	0,013
435	7,550	7,769	7,903	8,556	1,695	1,744	1,774	1,921	0,009	0,009	0,009	0,010
440	7,679	7,902	8,039	8,703	1,684	1,733	1,763	1,909	0,007	0,007	0,007	0,008
445	7,735	7,961	8,099	8,770	1,659	1,708	1,737	1,881	0,005	0,005	0,005	0,006
450	7,735	7,961	8,100	8,773	1,624	1,672	1,701	1,843	0,004	0,004	0,004	0,005
455	7,692	7,918	8,056	8,729	1,583	1,629	1,658	1,796	0,003	0,003	0,003	0,003
460	7,617	7,842	7,979	8,649	1,537	1,583	1,610	1,746	0,002	0,002	0,002	0,002
465	7,518	7,741	7,878	8,543	1,489	1,533	1,560	1,692	0,001	0,001	0,001	0,002
470	7,403	7,624	7,759	8,418	1,440	1,483	1,509	1,638	0,001	0,001	0,001	0,001

Расчетные значения эксергетического КПД для рабочей пары АС-метиламин

Метиламин для $W1$ $T_{конд}=293K$ $T_{адс}=293K$ $T_{ос}=283K$

Тдес	T0=253	T0=258	T0=263	T0=268	T0=273	T0=278
295	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
305	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
310	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28
325	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,91
330	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,17
335	0,00	0,00	0,00	0,00	1,58	2,28
340	0,00	0,00	0,00	0,00	2,59	2,31
345	0,00	0,00	0,00	0,00	3,12	2,29
350	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40	2,25
355	0,00	0,00	0,00	1,25	3,53	2,20
360	0,00	0,00	0,00	2,20	3,57	2,14
365	0,00	0,00	0,00	2,77	3,56	2,07
370	0,00	0,00	0,00	3,12	3,50	2,00
375	0,00	0,00	0,83	3,32	3,43	1,93
380	0,00	0,00	1,51	3,41	3,34	1,85
385	0,00	0,00	1,96	3,44	3,24	1,78
390	0,00	0,00	2,25	3,42	3,13	1,71
395	0,00	0,46	2,43	3,37	3,02	1,65
400	0,00	0,86	2,52	3,30	2,91	1,58
405	0,00	1,13	2,56	3,21	2,80	1,52
410	0,00	1,31	2,56	3,12	2,70	1,46
415	0,00	1,42	2,53	3,02	2,59	1,40
420	0,17	1,48	2,48	2,91	2,49	1,35
425	0,31	1,51	2,42	2,81	2,40	1,30
430	0,41	1,51	2,35	2,70	2,31	1,25

435	0,47	1,49	2,27	2,60	2,22	1,20
440	0,51	1,46	2,20	2,50	2,13	1,16
445	0,53	1,43	2,12	2,41	2,06	1,12
450	0,54	1,39	2,04	2,32	1,98	1,08
455	0,54	1,34	1,97	2,23	1,91	1,04
460	0,53	1,30	1,89	2,15	1,84	1,00
465	0,52	1,25	1,82	2,07	1,78	0,97
470	0,51	1,21	1,76	2,00	1,72	0,94

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического, эксегетического КПД, десорбции адсорбата для
рабочей пары АС – этиламин**

T ₀ =273K T _{конд} =298K T _{адс} =298K T _{ос} =293K T _{ос} =273 K												
T,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	экс1,%	экс2,%	экс3,%	экс4,%	a1	a2	a3	a4
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
305	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
365	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
370	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
375	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1045	0,1122	0,1079	0,1356

385	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0164	0,0176	0,0169	0,0212
390	0,919	0,978	0,945	1,155	0,271	0,288	0,278	0,340	0,0131	0,0141	0,0136	0,0170
395	1,750	1,862	1,800	2,195	0,497	0,528	0,511	0,623	0,0104	0,0112	0,0108	0,0135
400	2,346	2,495	2,412	2,939	0,643	0,684	0,661	0,805	0,0082	0,0088	0,0084	0,0106
405	2,764	2,939	2,842	3,460	0,732	0,779	0,753	0,917	0,0063	0,0068	0,0066	0,0082
410	3,049	3,242	3,135	3,815	0,783	0,832	0,805	0,980	0,0049	0,0052	0,0050	0,0063
415	3,232	3,437	3,323	4,044	0,806	0,857	0,828	1,008	0,0037	0,0040	0,0038	0,0048
420	3,340	3,551	3,434	4,180	0,809	0,861	0,832	1,013	0,0028	0,0030	0,0029	0,0036
425	3,391	3,606	3,487	4,246	0,800	0,851	0,823	1,002	0,0021	0,0022	0,0021	0,0027
430	3,401	3,618	3,498	4,261	0,782	0,832	0,804	0,980	0,0015	0,0016	0,0016	0,0020
435	3,382	3,598	3,478	4,240	0,759	0,807	0,781	0,952	0,0011	0,0012	0,0011	0,0014
440	3,341	3,555	3,437	4,192	0,733	0,780	0,754	0,919	0,0008	0,0008	0,0008	0,0010
445	3,287	3,498	3,381	4,127	0,705	0,750	0,725	0,885	0,0005	0,0006	0,0006	0,0007
450	3,223	3,431	3,316	4,050	0,677	0,720	0,696	0,850	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005
455	3,154	3,358	3,245	3,966	0,649	0,691	0,667	0,816	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003
460	3,082	3,282	3,171	3,879	0,622	0,662	0,640	0,783	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
465	3,009	3,205	3,096	3,790	0,596	0,635	0,613	0,750	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
470	2,936	3,128	3,022	3,701	0,571	0,608	0,588	0,720		0,0001		0,0001

**Расчетные значения для зависимостей термодинамического, эксергетического КПД, степени десорбции адсорбата
для рабочей пары АС-этиламин**

T ₀ =273K T _{конд} =308K T _{адс} =308K T _{ос} =293K T _{ос} =273 K												
T,К	КПД1,%	КПД2,%	КПД3,%	КПД4,%	экс1,%	экс2,%	экс3,%	экс4,%	a1	a2	a3	a4
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
335	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
365	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
370	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
375	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
385	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
390	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068

395	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
405	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
410	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
415	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
420	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
425	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
430	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
435	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
440	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0824	0,0884	0,0851	0,1068
445	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0016	0,0017	0,0017	0,0021
450	0,081	0,087	0,084	0,103	0,017	0,018	0,017	0,021	0,0012	0,0013	0,0012	0,0016
455	0,154	0,165	0,159	0,196	0,031	0,033	0,032	0,040	0,0009	0,0009	0,0009	0,0011
460	0,205	0,218	0,211	0,260	0,041	0,044	0,042	0,052	0,0006	0,0007	0,0006	0,0008
465	0,238	0,254	0,245	0,303	0,047	0,050	0,048	0,060	0,0004	0,0005	0,0004	0,0006
470	0,260	0,278	0,268	0,331	0,050	0,054	0,052	0,064	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004

Приложение III

Расчетные значения эксергетического КПД для рабочей пары АС-этиламин

Этиламин для W1 $T_{конд}=293K$ $T_{адс}=293K$ $T_{ос}=283K$

Тдес	T0=253	T0=258	T0=263	T0=268	T0=273	T0=278
295	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
305	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
310	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
325	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
330	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
335	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
340	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
345	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
350	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59
355	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74
360	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82
365	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85
370	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,87
375	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,86
380	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,85
385	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,83
390	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,80
395	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,77
400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,74
405	0,00	0,00	0,00	0,06	0,69	0,71
410	0,00	0,00	0,00	0,12	0,68	0,68
415	0,00	0,00	0,00	0,15	0,66	0,65
420	0,00	0,00	0,00	0,17	0,64	0,62
425	0,00	0,00	0,00	0,17	0,61	0,59
430	0,00	0,00	0,01	0,16	0,56	0,56

435	0,00	0,00	0,03	0,16	0,51	0,53
440	0,00	0,00	0,09	0,15	0,46	0,50
445	0,00	0,00	0,09	0,13	0,41	0,47
450	0,00	0,00	0,07	0,11	0,36	0,44

**Экспериментальные значения давлений в гелиоэнергетической холодильной
установке**

№ п/п	Время , час	Давление в манометре 1, кгс/см ²	Давление в манометре 2 , кгс/см ²
1	07.00	8.22	
2	08.00	12.14	
3	09.00	15.43	
4	10.00	19.29	
5	11.00	21.17	
6	12.00	22.12	
7	13.00	22.14	
8	14.00	22.19	
9	15.00	21.22	
10	16.00	18.62	
11	17.00	16.33	
12	18.00	13.24	
13	19.00	10.13	
14	20.00	10.01	2.95
15	21.00		3.02
16	22.00		3.24
17	23.00		3.39
18	24.00		3.51
19	01.00		3.58
20	02.00		3.72
21	03.00		3.82
22	04.00		3.92
23	05.00		4.23
24	06.00		4.46

Расчет погрешностей измерений

Температура: от $t_{\min} = -6,3 \pm 0,05$ °C до $t_{\max} = +142,4 \pm 0,05$ °C при измерении ХК – термопарами и цифровым вольтметром В7-40;

от $t_{\min} = +4,2 \pm 0,1$ °C до $t_{\max} = +25,2 \pm 0,1$ °C при измерении термометрами;

давление: от $P_{\min} = 2,95 \pm 0,15$ кГс/см² до $P_{\max} = 22,19 \pm 0,15$ кГс/см² при измерении цифровым манометром DM5002A;

масса: от $G_{\min} = 28,3461 \pm 0,005$ г до $G_{\max} = 100,324 \pm 0,01$ г при измерении на электронных весах ЕТ-200 В;

от $G_{\min} = 2538,1 \pm 0,3$ г до $G_{\max} = 2663,4 \pm 0,3$ г при измерении на электронных весах MWP-3000H;

отсчет времени: от $\tau_{\min} = 328,2 \pm 0,2$ с до $\tau_{\max} = 525,4 \pm 0,2$ с при измерении секундомером СОПр 2а-2-010;

мерная емкость: $V = 0,001 \pm 0,00005$ дм³

погрешность косвенного измерения тепловой нагрузки:

$$\Delta Q = Q \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{V}\right)^2 \cdot \Delta V^2 + \left(\frac{1}{t}\right)^2 \cdot \Delta t^2 + \left(-\frac{1}{\tau}\right)^2 \cdot \Delta \tau^2}$$

значения от $Q_{\min} = 33,6 \pm 1,68$ Вт до $Q_{\max} = 334 \pm 16,7$ Вт с доверительной вероятностью 0,95;

- относительная погрешность измерения

$\delta_t = (0,03 - 0,1) \%$; $\delta_p = (0,7 - 5) \%$; $\delta_G = (0,01 - 0,04) \%$; $\delta_v = 5 \%$; $\delta_\tau = 0,04 \%$.

$\delta_Q = 5 \%$

**Температура нагрева генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установке при испытаниях
с водоглицериновым раствором при обогреве энергией солнечной радиации (прямой и диффузионной)**

Время, час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	dJ _D	dJ _{Диф}
	Глице- рин на входе	Кор- пус сна- ружи	Стекло, сна- ружи пакета	Зер- кало	Корпус реак- тора	Корпус реак- тора	Корпус реак- тора	Корпус реактора у под- ложки	Глице- рин на выходе	Воздух в коллек- торе	Темп. изоляц.	прямая радиация Вт/м ²	диффуз онная радиация Вт/м ²
6:00	25,2	26,6	27,4	27,7	38,4	38,3	38,1	38,0	25,7	26,8	27,2	508	92
7:00	38,6	31,2	31,8	35,6	51,2	51,6	56,4	51,2	39,4	34,2	33,4	534	98
8:00	58,3	48,9	49,4	52,7	72,4	72,4	72,1	72,0	59,8	46,1	50,8	583	102
9:00	71,2	49,6	58,6	66,8	88,2	88,3	88,1	88,1	73,8	58,6	58,2	624	106
10:00	83,2	52,4	74,6	79,4	98,2	98,5	98,3	98,2	86,8	65,2	65,9	646	108
11:00	100,7	55,6	83,8	88,8	113,7	113,3	113,2	113,1	105,1	68,4	72,2	652	112
12:00	114,4	56,2	87,7	94,4	129,4	129,1	129,0	128,9	119,6	70,1	75,3	668	112
13:00	122,3	56,4	88,8	96,8	144,1	144,0	143,9	143,8	128,7	70,2	76,6	654	114
14:00	124,6	56,0	89,6	97,4	138,6	138,2	138,0	137,9	131,0	70,2	76,7	642	112
15:00	112,3	54,1	90,1	97,5	126,4	126,2	126,0	125,8	118,1	69,9	75,8	626	110
16:00	95,4	50,4	89,4	97,6	112,8	112,4	112,1	112,1	101,2	69,6	74	608	106
17:00	75,6	48,6	89,0	95,4	88,4	88,2	87,9	87,8	79,2	68,1	72	584	98
18:00	68,2	46,3	88,2	94,8	78,6	78,2	76,4	77,2	71,1	67,2	70,6	542	95

**Таблица замеров тепловой нагрузки генератора-адсорбера с теплоносителем
глицерин-вода**

T, с	t _{вх} , °C	t _{вых} , °C	Δt, °C	C _p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$	ρ, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	G, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ 10 ⁻⁵	Q ₁ Вт/м ²	Q ₂ Вт/м ²	Q _{экс} Вт/м ²
6:00	25,2	25,7	0,5	2,316	1269,76	1,79	18,64	26,14	25,84
7:00	38,6	39,4	0,8	2,310	1270,42	1,92	39,21	49,32	45,51
8:00	58,6	59,8	1,2	2,314	1270,0	1,98	72,70	70,81	70,62
9:00	71,2	73,8	2,6	2,326	1268,85	1,86	144,45	147,10	144,96
10:00	83,2	86,8	3,6	2,316	1269,76	1,85	196,50	202,22	200,92
11:00	100,7	105,1	4,2	2,306	1270,78	1,98	245,70	255,01	247,54
12:00	114,4	119,6	5,2	2,321	1269,28	1,91	282,80	294,87	287,53
13:00	122,3	128,7	6,4	2,361	1265,62	1,86	358,38	376,38	370,28
14:00	124,6	131,0	6,4	2,312	1270,24	1,92	353,33	371,24	363,88
15:00	112,3	118,1	5,8	2,316	1269,82	1,88	310,78	325,36	319,36
16:00	95,4	101,2	5,8	2,333	1268,18	1,78	295,78	309,39	303,56
17:00	75,6	79,2	3,6	2,306	1270,84	1,82	158,94	231,86	186,88
18:00	68,2	71,1	2,9	2,299	1271,56	1,83	121,63	161,85	155,73

Программа расчета тепловых нагрузок на реактор
генератора-адсорбера гелиоэнергетической
холодильной установки

$$L := 1.6$$

$$b := 0.34$$

$$n := 1$$

$$h := 0.2$$

$$d_{вн} := 0.07$$

$$d_{нар} := 0.076$$

$$W := \frac{(3.5 \cdot \pi \cdot d_{нар})}{2} \quad W = 0.418$$

$$j := 1..13$$

$$ORIGIN := 1$$

$$t_{внj} :=$$

30.2
35.4
40.8
55.4
60.4
62.6
62.8
62.6
60.4
59.4
58.9
58.8
58.6

$$t_{нарj} :=$$

26.2
27
29.4
31.3
32.6
33.8
34.2
34.2
34.2
34.1
34
34
33.8

$$t_{стj} :=$$

32.4
35.2
44.6
56.4
66.2
70.8
71.6
71.4
70.6
69.4
68.0
64.3
63.8

$$t_{ггj} :=$$

36.8
43.4
48.4
54.8
61.2
63.3
64.6
64.8
63.9
62.6
60.8
59.0
58.4

Угол раскрытия
зеркал:

$$\theta := 55 \quad \theta := \frac{\theta \cdot \pi}{180}$$

$$\theta = 0.96$$

$$t_{подj} :=$$

36.2
42.0
46.4
53.6
60.1
62.2
63.4
64.1
62.2
61.8
60.4
59.0
57.2

$$\phi := \frac{\pi \cdot 46}{180}$$

$$\phi = 0.803$$

$$\mu := \frac{\pi \cdot 30}{180}$$

$$\mu = 0.524$$

$$\delta := \frac{20 \cdot \pi}{180}$$

$$\delta = 0.349$$

$$\tau_j :=$$

90
75
60
45
30
15
0
15
30
45
60
75
90

$$\tau_j := \frac{\tau_j \cdot \pi}{180}$$

	1
1	1.571
2	1.309
3	1.047
4	0.785
5	0.524
6	0.262
7	0
8	0.262
9	0.524
10	0.785
11	1.047
12	1.309
13	1.571

$$\tau =$$

рад

$$i := \frac{\pi}{4}$$

$$\cos(i) := \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi + \mu\right) \cdot \sin(\delta) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi + \mu\right) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\tau)$$

	1
1	0.094
2	0.328
3	0.546
4	0.733
5	0.877
6	0.967
7	0.998
8	0.967
9	0.877
10	0.733
11	0.546
12	0.328
13	0.094

$$\cos(i) =$$

$$dln_j :=$$

495
506
538
546
598
602
627
612
614
598
588
548
504

$$dlq_j :=$$

87
89
91
93
95
97
98
96
94
92
90
87
85

$$dq_{maxj} := dln_j \cdot \cos(i)_j + dlq_j$$

$d_{\text{max}j} =$

133.665
255
384.704
493.216
619.175
679.005
723.473
687.673
632.199
530.332
411
266.778
132.514

Суммарный тепловой поток, падающий на остекленную оболочку генератора-адсорбера, выполненного по типу конструкции "горячего ящика", выражается уравнением:

$$Q_{\text{пад}j} = (d_{\text{из}j} \cdot \cos(i)_j + d_{\text{из}j}) \cdot W \cdot t$$

 $Q_{\text{пад}j} =$

89.359
170.475
257.187
329.73
413.937
453.936
483.664
459.73
422.645
354.543
274.766
178.349
88.59

$\Lambda_{\text{ст}} = 0,03$ коэффициент отражения стекла

$\rho_{ст} := 2.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность стекла

$c_{р_ст} := 0.83 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{К)}$, теплоемкость стекла

$V_{ст} := 0.64 \cdot 2 \cdot 0.002 \text{ м}^3$, объем стекла

$V_{ст} = 2.56 \times 10^{-3}$

$\lambda_{ст} := 0.74 \text{ Вт/м}^\circ\text{К}$, теплопроводность стекла

$\delta_{ст} := 0.004 \text{ м}$, толщина стекла

$m_{ст} := \rho_{ст} \cdot \delta_{ст} \text{ кг/м}^2$, удельная масса стекла

$$\Delta t_{стj} := \begin{cases} t_{стj+1} - t_{стj} & \text{if } j < 13 \\ (t_{ст13} - t_{ст1}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\Delta t_{стj} =$

2.8
9.4
11.8
9.8
4.6
0.8
-0.2
-0.8
-1.2
-1.4
-3.7
-0.5
31.4

$\Delta t_{стстаклаj} :=$

2.4
9.4
11.8
9.8
4.6
0.8
-0.2
-0.8
-1.2
-1.4
-3.7
-1.5
-2.4

$$\phi_{стстаклаj} := c_{р_ст} \cdot \rho_{ст} \cdot \Delta t_{стстаклаj} \cdot V_{ст} \cdot \frac{1}{3600}$$

$\phi_{стстаклаj} =$

3.541
13.87
17.412
14.46
6.788
1.18
-0.295
-1.18
-1.771
-2.066
-5.46
-2.213
-3.541

$\rho_{зер} := 2.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность зеркала

$c_{р_зеркала} := 0.83 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{К)}$, теплоемкость зеркала

$V_{зеркала} := 0.0064 \text{ м}^3$, объем зеркала

$\Delta t_{\text{серкала}_j} :=$

0.8
7.2
10
9.4
6.7
1.3
-0.1
-0.2
-0.9
-1.0
-3.9
-2.1
-1.9

$$\phi_{\text{серкала}_j} := \text{ср_серкала} \cdot \rho_{\text{сер}} \cdot \Delta t_{\text{серкала}_j} \cdot V_{\text{серкала}} \frac{1}{3600}$$

 $\phi_{\text{серкала}_j} =$

2.951
26.56
36.889
34.676
24.716
4.796
-0.369
-0.738
-3.32
-3.689
-14.387
-7.747
-7.009

 $\rho_{\text{изол}} := 40 \text{ кг/м}^3$, плотность изоляции $\text{ср_изол} := 1.34 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, теплоемкость изоляции $V_{\text{изол}} := 1 \cdot 1.6 \cdot 0.004 \text{ м}^3$, объем изоляции

$$V_{\text{изол}} = 6.4 \times 10^{-3}$$

 $\Delta t_{\text{изол}_j} :=$

5.8
5.7
6.1
6.4
3.2
0.4
0.2
-0.8
-1.4
-1.9
-2
-0.7
-1.1

$$\phi_{\text{изол}_j} := \text{ср_изол} \cdot \rho_{\text{изол}} \cdot \Delta t_{\text{изол}_j} \cdot V_{\text{изол}} \frac{1}{3600}$$

 $\phi_{\text{изол}_j} =$

0.553
0.543
0.581
0.61
0.305
0.038
0.019
-0.076
-0.133
-0.181
-0.191
-0.067

-0.105]

$\rho_{\text{ст}} := 7.2 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность металлической трубы

$c_{p, \text{ст}} := 0.48 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), теплоемкость металлической трубы

$$V_{\text{труб}} := \left[\frac{[\pi \cdot (d_{\text{вн}})]^2}{4} - \frac{[\pi \cdot (d_{\text{вн}})]^2}{4} \right] \cdot l$$

$V_{\text{труб}} = 3.458 \times 10^{-3}$ м³, объем металлической трубы

$\Delta t_{\text{труб}j} :=$

6.6
5.0
6.4
6.4
2.1
1.3
0.2
-0.9
-1.3
-1.8
-1.8
-0.6
-1.2

$$dq_{\text{труб}j} := c_{p, \text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot \Delta t_{\text{труб}j} \cdot V_{\text{труб}} \cdot \frac{1}{3600}$$

$dq_{\text{труб}j} =$

21.912
16.6
21.248
21.248
6.972
4.316
0.664
-2.988
-4.316
-5.976
-5.976
-1.992
-3.984

$V_{\text{подт}} := 0.00048$

$\Delta t_{\text{подт}j} :=$

5.8
4.4
7.2
6.5
2.1
1.2
0.7
-1.9
-0.4
-1.4
-1.4
-1.8
-0.4

$$dq_{\text{подт}j} := c_{p, \text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot \Delta t_{\text{подт}j} \cdot V_{\text{подт}} \cdot \frac{1}{3600}$$

$dq_{\text{подт}j} =$

2.673
2.028
3.318
2.995
0.968
0.553
0.323
-0.876
-0.184
-0.645
-0.645

-0.829
-0.184

$$V_{\text{фланца}} := \left(\pi \frac{0.14^2}{4} - \pi \frac{0.076^2}{4} \right) \cdot 0.06$$

$$V_{\text{фланца}} = 6.514 \times 10^{-4}$$

$$\alpha_{\text{фланца}_j} := \text{ср_ме_раге} \cdot \Delta t_{\text{труб}_j} \cdot V_{\text{фланца}} \cdot \frac{1}{3600}$$

$$\alpha_{\text{фланца}_j} =$$

4.128
3.127
4.002
4.002
1.313
0.813
0.125
-0.563
-0.813
-1.126
-1.126
-0.375

$$\alpha_{\text{потери}_j} := \alpha_{\text{подл}_j} + \alpha_{\text{труб}_j} + \alpha_{\text{изол}_j} + \alpha_{\text{зеркала}_j} + \alpha_{\text{стекла}_j} + \alpha_{\text{фланца}_j}$$

$$\alpha_{\text{потери}_j} =$$

35.757
62.728
83.45
77.991
41.061
11.696
0.467
-6.421
-10.537

$B_{\text{ст}} := 0.02$ коэффициент поглощения солнечной энергии

$\epsilon_{\text{ст}} := 0.92$ степень черноты стекла

$c_0 := 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), коэффициент излучения абсолютно черного тела

$K_{\text{ст}} := 0.94$ коэффициент потери энергии при прохождении потока солнечной радиации от запыленности стекла

-13.682
-27.784
-13.223
-15.574

$K_{\text{ст}} := 0.604$ коэффициент потери энергии при прохождении потока солнечной радиации от двухстекляльного покрытия в конструкции "горячего ящика"

Тепловой поток, проходящий через стеклянную оболочку в "горячий ящик":

$$\dot{q}_{\text{ст}j} := K_{\text{ст}} K_{\text{ст}} \left[\dot{q}_{\text{ст}j} - \dot{q}_{\text{ст}j} \cdot A_{\text{ст}} - \dot{q}_{\text{ст}j} \cdot B_{\text{ст}} - \text{ст} \cdot c_0 \left(\frac{t_{\text{ст}j} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$\dot{q}_{\text{ст}j} =$

72.095
137.54
207.499
266.027
333.965
366.236
390.221
370.911
340.991
286.046
221.682
143.893
71.474

Объем воздуха в замкнутом объеме гелиоприемника:

$$V = \left[12.25 \left(\frac{d_{\text{ст}j}}{2} \right)^2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - \pi \left(\frac{d_{\text{ст}j}}{2} \right)^2 \cdot \frac{\left(\frac{d_{\text{ст}j}}{2} \right)^2}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - 1} \right] \cdot 1$$

$$V = 4.348 \times 10^{-3}$$

Толщина воздушного слоя, м:

$$H = \frac{3.5 \left(\frac{d_{\text{ст}j}}{2} \right)}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$H = 0.255$$

Энергия на подогрев воздуха в замкнутом объеме гелиоприемника:

$$\dot{q}_{\text{ст}j} := 0.94 \cdot V \cdot \text{ст} \cdot \frac{c_0}{H} \left(\frac{t_{\text{ст}j} + 273}{100} \right)^4$$

$d_{\text{гел}} =$

$7.339 \cdot 10^{-8}$
$7.855 \cdot 10^{-8}$
$8.42 \cdot 10^{-8}$
$1.01 \cdot 10^{-7}$
$1.073 \cdot 10^{-7}$
$1.102 \cdot 10^{-7}$
$1.104 \cdot 10^{-7}$
$1.102 \cdot 10^{-7}$
$1.073 \cdot 10^{-7}$
$1.05 \cdot 10^{-7}$
$1.054 \cdot 10^{-7}$
$1.052 \cdot 10^{-7}$
$1.05 \cdot 10^{-7}$

Площадь дна элемента конструкции гелиоприемника:

$$L3 := 2.5 \cdot \frac{\left(\frac{d_{\text{гел}}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$L3 = 0.206$$

$$h1 := \frac{\left(\frac{d_{\text{гел}}}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$h1 = 0.067$$

$$h0 := h1 + \frac{d_{\text{гел}}}{2}$$

$$h0 = 0.105$$

$d_{\text{из}} := 0.05$ толщина изоляции, м

Элемент конструкции гелиоприемника имеет дно площадью:

$$M_{\text{дна}} := 1 \cdot h0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{135}{360}$$

$$M_{\text{дна}} = 0.397$$

Площадь боковых стенок элемента конструкции гелиоприемника:

$$M_{\text{бок}} := 2 \cdot L3$$

$$M_{\text{бок}} = 0.658$$

$$\theta = 0.96$$

Площадь торцов элемента конструкции гелиоприемника:

$$W_{\text{торца}} := b \cdot \frac{H}{2}$$

$$W_{\text{торца}} = 0.043$$

$$M_{\text{тор}} := 2 \cdot W_{\text{торца}}$$

$$M_{\text{тор}} = 0.087$$

Параметры наружного воздуха:
Температура, Влажность, Теплопроводность

$\lambda_{\text{воз}} :=$	$\mu_{\text{воз}} :=$	$\lambda_{\text{ст}} :=$	$\mu_{\text{ст}} := 3$	$R_{\text{ст}} := \frac{\mu_{\text{ст}} \cdot l}{\lambda_{\text{ст}}}$	$P_{\text{ст}} := \frac{\mu_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}$
$21.9 \cdot 10^{-6}$	$15.3 \cdot 10^{-6}$	0.0261			
$21.9 \cdot 10^{-6}$	$15.4 \cdot 10^{-6}$	0.0261			
$21.9 \cdot 10^{-6}$	$15.4 \cdot 10^{-6}$	0.0262			
$21.9 \cdot 10^{-6}$	$15.3 \cdot 10^{-6}$	0.0261			
$22.1 \cdot 10^{-6}$	$15.4 \cdot 10^{-6}$	0.0262			
$21.9 \cdot 10^{-6}$	$15.3 \cdot 10^{-6}$	0.0261			
$22.1 \cdot 10^{-6}$	$15.4 \cdot 10^{-6}$	0.0262			
$22.4 \cdot 10^{-6}$	$15.4 \cdot 10^{-6}$	0.0264			
$22.4 \cdot 10^{-6}$	$15.7 \cdot 10^{-6}$	0.0264			
$22.4 \cdot 10^{-6}$	$15.7 \cdot 10^{-6}$	0.0263			
$22.3 \cdot 10^{-6}$	$15.7 \cdot 10^{-6}$	0.0263			
$22.3 \cdot 10^{-6}$	$15.6 \cdot 10^{-6}$	0.0263			
$22.3 \cdot 10^{-6}$	$15.6 \cdot 10^{-6}$	0.0263			
				$R_{\text{ст}} :=$	$P_{\text{ст}} :=$
				$3.137 \cdot 10^5$	0.699
				$3.117 \cdot 10^5$	0.703
				$3.117 \cdot 10^5$	0.703
				$3.137 \cdot 10^5$	0.699
				$3.117 \cdot 10^5$	0.697
				$3.137 \cdot 10^5$	0.699
				$3.117 \cdot 10^5$	0.697
				$3.057 \cdot 10^5$	0.701
				$3.057 \cdot 10^5$	0.701
				$3.057 \cdot 10^5$	0.701
				$3.077 \cdot 10^5$	0.7
				$3.077 \cdot 10^5$	0.7
				$3.077 \cdot 10^5$	0.7

$P_{\text{ст}} := 0.701$

$$\alpha_{\text{окрj}} := \frac{0.0296}{1} \cdot \lambda_{\text{окрj}} \cdot (R_{\text{окрj}})^{0.8} \cdot (P_{\text{окрj}})^{0.43} \cdot \left(\frac{P_{\text{окрj}}}{P_{\text{окр}}} \right)^{0.25}$$

$\alpha_{\text{окрj}} =$

10.321
10.313
10.352
10.321
10.288
10.321
10.288
10.249
10.249
10.249
10.249
10.249

$\alpha_{\text{окр}} := 8$ $\lambda_{\text{окр}} := 0.025$ $\delta_{\text{окр}} := 0.06$

$$k_{\text{окрj}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{окр}}} + \frac{\delta_{\text{окр}}}{\lambda_{\text{окр}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{окрj}}}}$$

коэффициент теплопередачи через элементы изолированной конструкции

$R0 := 0.34$ коэффициент теплопроводности стеклопакета с двумя стеклами

$$k_{\text{стj}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{окр}}} + R0 + \frac{1}{\alpha_{\text{окрj}}}}$$

коэффициент теплопередачи через стекло конструкции

$k_{\text{окрj}} =$

0.45
0.45
0.45
0.45
0.45
0.45
0.45
0.45
0.45
0.45

$k_{\text{стj}} =$

	1
1	1.78
2	1.779
3	1.781
4	1.78
5	1.779
6	1.78
7	1.779
8	1.778
9	1.778
10	1.778

0.45

11	1.778
12	1.778
13	1.778

Теплопотери через изолированные элементы конструкции:

$$dq_{пот_изj} := k_{изj} \cdot (M_{диз} + 2 \cdot L_{3-1} + M_{гор}) \cdot (t_{внj} - t_{нарj})$$

	1
1	2.056
2	4.317
3	5.86
4	12.386
5	14.286
6	14.802
7	14.697
8	14.592
9	13.462
10	12.999
11	12.794
12	12.742
13	12.742

Теплопотери через элемент остекления конструкции:

$$dq_{пот_стj} := k_{стj} \cdot W \cdot (t_{внj} - t_{нарj})$$

масса металла, кг

$$M_{мет} := 12$$

масса изоляции, кг

$$M_{из} := 2$$

масса стекла и зеркала, кг

$$M_{ст_гор} := 8$$

теплоемкость металла

$$c_{р_мет} := 425$$

нагрев металла

$$\Delta t := 0.4$$

теплоемкость изоляции

	1
1	4.759
2	9.993
3	13.571
4	28.674
5	33.058
6	34.266
7	34.009
8	33.749
9	31.135
10	30.065

$c_{p,ст} := 1.34$
 теплоемкость стекла
 $c_{p,ст,экв} := 0.84$

11	29.59
12	29.471
13	29.471

энергия на подогрев элементов конструкции генератора-абсорбера

$$Q_{расм} := (W_{мет} \cdot c_{p,мет} + W_{ст,экв} \cdot c_{p,мет} + W_{ва} \cdot c_{p,ва}) \cdot \Delta t$$

$$Q_{расм} = 3.401 \times 10^3$$

Для полезного тепла, проходящего в "горячий ящик" и идущего на обогрев корпуса реактора, будет с одной стороны, равно, Вт:

$$Q_{гр,к} := Q_{гр,г} - Q_{р,к} - Q_{пот,ва} - Q_{пот,ст} - Q_{пот,р,к}$$

Тепло в виде потока лучистой энергии на видимую часть поглощающей поверхности всех труб коллектора, Вт:

$$A_{гр} := 0.25$$

$$B_{гр} := 0.144$$

$$dq_{1j} := Q_{гр,к} - A_{гр} \cdot Q_{гр,к} - B_{гр} \cdot Q_{гр,к}$$

$$\lambda_0 := 86.5 \quad \delta_0 := 0.003$$

$$m := \left(\frac{2 \cdot \sin \alpha}{\lambda_0 \cdot \delta_0} \right)^{0.5} \quad \text{комплекс термофизических переменных}$$

$$m = 7.832$$

$$k := 2 \cdot \left(\frac{\delta_{гр}}{2} \right)^2 \quad \text{длина ребра}$$

$$\text{th}_{mb} := \frac{e^{(m \cdot b)} + e^{-(m \cdot b)}}{e^{(m \cdot b)} - e^{-(m \cdot b)}} \quad \text{гиперболический тангенс}$$

$$\text{th}_{mb} = 44.105$$

$$dq_{1j} =$$

17.891
36.664
63.399
89.067
148.81
185.116
206.675
199.369
186.001

$$F_{пл} := 0.2$$

$$dq_{2j} := \lambda_{ст} \cdot \delta_0 \cdot m \cdot \cos \alpha_j \cdot \text{th}_{mb} \cdot F_{пл}$$

$$dq_{2j} =$$

	1
1	29.523
2	60.502
3	104.618
4	146.975
5	246.56
6	305.472
7	341.048
8	328.991
9	306.932
10	256.664
11	207.062
12	114.903
13	44.835

155.539
125.492
69.631
27.17

$k := 1.6$

$(dq3)_j := dq_{reg_kj} \cdot Fin \cdot k$

$(dq3)_j =$

9.497
19.261
33.478
47.032
70.579
97.731
109.133
103.277
98.218
82.133
66.266
56.789
14.247

Собственное излучение поверхности трубки $\epsilon_{tr} := 0.56$

$dq_{trj} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{outj}}{2} \right)^2 \cdot \epsilon_{tr} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{t_{outj} + 273}{100} \right)^4$

$dq_{trj} =$

$3.895 \cdot 10^{-8}$
$4.17 \cdot 10^{-8}$
$4.469 \cdot 10^{-8}$
$5.361 \cdot 10^{-8}$
$5.695 \cdot 10^{-8}$
$5.847 \cdot 10^{-8}$
$5.861 \cdot 10^{-8}$
$5.847 \cdot 10^{-8}$
$5.695 \cdot 10^{-8}$
$5.627 \cdot 10^{-8}$
$5.593 \cdot 10^{-8}$
$5.587 \cdot 10^{-8}$
$5.573 \cdot 10^{-8}$

Суммарное полезное тепло, передаваемое насыщенному гидробенту:

$dq_{totalj} := dq1_j + dq2_j + (dq3)_j - dq_{trj}$

$dq_{totalj} =$

32.905
62.483
104.011
144.341
236.63
292.432
325.559
314.502
222.783

293.783
247.174
201.046
115.472
50.313

