

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи



САМСОН ИННА ФЕДОРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА
МЕТОДА РАСЧЕТА СОЛНЕЧНОЙ АДСОРБЦИОННОЙ
ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

*Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, системы кондиционирования и жизнеобеспечения*

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Гаряев Андрей Борисович

Москва – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ	
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ АДСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	12
1.1 Общие положения	12
1.2 Анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований	14
1.3 Модели адсорбционного равновесия	23
1.4 Выводы главе 1	30
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АДСОРБЦИОННОГО ТИПА	32
2.1 Расчет пропорций экспериментальной установки.....	32
2.2 Измерение солнечной радиации в г. Санто-Доминго.....	35
2.3 Описание экспериментальных установок.....	36
2.4 Результаты проведенных экспериментов	44
2.5 Построение зависимости, связывающей солнечную радиацию и температуру поверхности солнечного коллектора	52
2.6 Анализ экспериментальных результатов во время процесса адсорбции.....	57
2.7 Выводы к главе 2.....	67
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В СХАТ.....	68
3.1 Описание физических процессов в СХАТ.....	68
3.2 Построение математической модели	71
3.3 Выбор граничных условий, планирование численного эксперимента	74
3.4 Дискретизация дифференциальных уравнений и построение программы	78
3.5 Проверка адекватности математической модели.....	83
3.6 Выводы к главе 3.....	85
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СХАТ	87
4.1 Исследование влияния свойств адсорбента.....	87
4.2 Исследование влияния солнечной радиации, дневных и ночных температур на характеристики установки.....	96
4.3 Исследование влияния толщины угля, внутреннего и внешнего диаметров коллектора на работу установки	103
4.4 Исследование влияния условий теплообмена в конденсаторе на работу СХАТ.....	112
4.5 Выводы к главе 4.....	114
ГЛАВА 5. МЕТОД РАСЧЕТА СХАТ	115
5.1 Последовательность расчета	115
5.2 Пример расчета СХАТ.....	118
5.3 Выводы к главе 5.....	123
ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	124
Список литературы	126

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ε – порозность, объем пространства между гранулами угля по отношению к общему объему, занятому углем, $\text{м}^3/\text{м}^3$

C_g – концентрация газа, $\text{кг}/\text{м}^3$

ρ_c – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$

X – количество метанола, адсорбированного углем, $\text{кг}/\text{кг}$

Q_{fr} – суточная выработка холода, $\text{кДж}/\text{сут}$

v – скорость газа, $\text{м}/\text{с}$

u_g – внутренняя энергия газа, $\text{Дж}/\text{кг}$

T_g – температура газа, К

T_c – температура угля, К

K_g – коэффициент теплопроводности газа, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

K_c – коэффициент эффективной теплопроводности угля, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

P – давление газа, Па

P_s – давление газа в состоянии насыщения, Па

h_g – энтальпия газа, $\text{Дж}/\text{кг}$

u_c – внутренняя энергия угля, $\text{Дж}/\text{кг}$

u_{ga} – энергия адсорбции, $\text{Дж}/\text{кг}$

C_{pc} – удельная теплоемкость угля, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

C_{pg} – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

c – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

L_v – удельная теплота замерзания воды, $\text{Дж}/\text{кг}$

L_{met} – удельная теплота испарения метанола, $\text{Дж}/\text{кг}$

μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$

R_p – радиус частицы, м

D_0 – коэффициент диффузии, $\text{Па}\cdot\text{с}$

r_a – внутренний радиус цилиндра коллектора, м

r_b – внешний радиус цилиндра коллектора, м

Δt – шаг по времени, с

Δr – шаг по пространству, м

L – длина цилиндра, м

r_p – радиус контрольного объема, м

dV - контрольный объем, м³

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Постоянное повышение энергопотребления в мире и истощаемость имеющихся ископаемых природных ресурсов приводит к необходимости поиска новых источников энергии. Во многих странах мира проводятся научные исследования и разработки новых технологий, позволяющих использовать энергию ветра, геотермальных источников, морских приливов и солнца.

Следует заметить, что значительная часть всей вырабатываемой энергии в мире используется в целях охлаждения, как для хранения различного вида продуктов, так и для создания комфортных условий в закрытых пространствах. Кроме того, потребность в охлаждении повышается в местах с более жарким климатом и, особенно, в летнее время, иными словами, в местах с большей солнечной активностью.

Во многих странах мира существуют регионы, не подключенные к сети электроснабжения из-за экономических факторов или топографических особенностей местности. В этих условиях актуальной является разработка автономных холодильных установок, использующих источники возобновляемой энергии. Например, в Доминиканской Республике, стране с жарким тропическим климатом, ввиду недостаточного экономического развития, значительная часть населения в сельской местности не имеет доступа к электрообеспечению, а во многих местах, подключенных к сети энергоснабжения, электрообеспечение отличается нестабильностью. И в Аргентине, стране, имеющей сеть энергоснабжения гораздо более развитую и более стабильную, чем в Доминиканской Республике, также существуют районы, не подключенные к сети электрообеспечения.

Примером является небольшое поселение в провинции Кордоба, где живут примерно 600 семей, и источником существования является содержание коз и продажа козьего молока. Если производитель не имеет возможности охладить и

хранить молоко, то вынужден продавать его посреднику на месте по цене, эквивалентной 10 рублям за литр, в то время как в 50-ти километрах от селения цена козьего молока возрастает до 70-ти рублей за литр, а в 200-х километрах от селения это же молоко продается за 150 рублей за литр. Для этих 600 семей трудно переоценить значение необходимости владения автономной холодильной установкой, которая позволила бы охлаждать и хранить производимую продукцию и, благодаря этому, получать более высокую цену при продаже, что означает повышение уровня жизни для жителей этого небольшого селения.

Можно упомянуть различные виды автономных холодильных установок, как например, газовые адсорбционные холодильники, компрессионные холодильники, питающиеся от солнечных батарей или холодильники адсорбционного типа.

В последние десятилетия активно разрабатываются автономные холодильные установки адсорбционного типа, которые обладают рядом преимуществ, таких как простота, низкая стоимость, экологическая безопасность, возможность использования в качестве источника теплоты солнечной энергии.

Среди научных групп, занимающихся исследованиями в области генерации холода на основе адсорбционных процессов, можно выделить коллективы, возглавляемые такими учеными, как Meunier F., Leite A.P., Luo L. и Tondeur D.

На сегодняшний день физические процессы, происходящие в элементах таких установок, не являются достаточно изученными. Также недостаточно исследовано влияние климатических факторов, конструктивных параметров установок, характеристик применяемых сорбентов на эффективность их работы. Расчетно-экспериментальные исследования и разработка метода расчета СХАТ позволят предсказывать и совершенствовать технические характеристики таких установок, а также повысить их экономическую эффективность.

Объектом исследования является автономный солнечный холодильник адсорбционного типа (СХАТ) периодического действия, использующий рабочую пару «активированный уголь-метанол».

Целью работы является совершенствование характеристик и разработка метода расчета СХАТ периодического действия, использующего рабочую пару «активированный уголь–метанол».

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **научно-технические задачи**:

- Проведен анализ состояния исследований в данной области, изучены подходы к описанию и существующие математические модели физических процессов, происходящих в установках данного типа.
- Произведено экспериментальное исследование солнечной почасовой радиации в г. Санто-Доминго, необходимое для проектирования СХАТ, предназначенных для работы в данном регионе.
- Проведена серия испытаний адсорбционной способности различных марок активированного угля относительно метанола, и определены их параметры в уравнении Дубинина–Астахова.
- Разработан ряд действующих образцов СХАТ, и проведено экспериментальное исследование их работы с различными типами углей в различных климатических условиях.
- Разработана математическая модель процессов тепло- и массообмена, протекающих в адсорбере СХАТ, и проведена проверка ее адекватности.
- Проведены численные исследования работы солнечной адсорбционной холодильной установки с различными конструктивными параметрами при различных характеристиках активированного угля для разных климатических условий.
- Разработан метод расчета СХАТ периодического действия, использующего рабочую пару «активированный уголь–метанол».

Научная новизна

1. Получены экспериментальные результаты, показывающие влияние характеристик активированного угля и климатических условий на холодопроизводительность установки.
2. Экспериментально показано, что адсорбционная способность всех испытанных в экспериментах семи марок активированного угля относительно метанола подчиняется уравнению Дубинина–Астахова на большей части изотермы адсорбции.
3. Разработана математическая модель адсорбера СХАТ, позволяющая учитывать геометрию адсорбера и сорбционные свойства пары «сорбент–поглощаемое вещество» при расчете количества адсорбированного метанола.
4. Впервые получены численные результаты, показывающие влияние толщины слоя активированного угля на удельную холодопроизводительность установки.
5. Впервые получены характеристики почасовой солнечной радиации в г. Санто-Доминго.

Практическая ценность

1. Результаты экспериментальных исследований СХАТ могут быть использованы для разработки и верификации новых математических моделей подобных установок.
2. Разработанный метод расчета СХАТ позволяет определять ее конструктивные характеристики и массу активированного угля для заданной холодопроизводительности при известных климатических условиях.
3. Полученные экспериментальным путем свойства семи марок активированных углей относительно метанола могут быть использованы для расчета и проектирования сорбционных установок.

Личный вклад соискателя

Соискателем лично:

1. Создано несколько экспериментальных прототипов СХАТ, продемонстрирована их устойчивая работа в течение длительного периода и проведены экспериментальные исследования их работы.
2. Разработана математическая модель физических процессов, происходящих в коллекторе СХАТ, и осуществлена ее верификация.
3. Проведены численные исследования влияния параметров активированного угля, климатических параметров и толщины слоя активированного угля на холодопроизводительность СХАТ.
4. Экспериментально определены адсорбционные свойства семи марок активированного угля по отношению к метанолу.
5. Разработан метод расчета СХАТ.

Методология и метод исследования

В диссертационной работе использовалось сочетание экспериментального и расчетно-теоретического методов исследования процессов переноса теплоты и массы в СХАТ. Экспериментальный метод применен на этапах:

- доказательства работоспособности СХАТ, подтверждения ее устойчивой работы в течение длительного времени и повторяемости ее характеристик;
- построения математической модели и определения ряда ее параметров;
- подтверждения адекватности модели.

Метод численно-теоретических исследований применялся для анализа влияния различных факторов на холодопроизводительность СХАТ и разработки метода ее расчета.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований характеристик СХАТ, проведенных на установках, отличающихся размерами, параметрами сорбентов и работающих в различных климатических условиях.
2. Полученные в результате экспериментов сорбционные свойства семи марок активированного угля относительно метанола.
3. Математическую модель физических процессов, происходящих в адсорбере солнечной холодильной установки адсорбционного типа.
4. Полученные в результате численного эксперимента данные о влиянии геометрических параметров, свойств угля и климатических условий на характеристики установки.
5. Разработанный метод расчета СХАТ.
6. Полученные на солориметрической установке нового типа данные о солнечной радиации в г. Санто-Доминго.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается многократной воспроизводимостью экспериментальных данных, корректным применением фундаментальных физических законов, положенных в основу математической модели, удовлетворительными результатами сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных автором.

Апробация работы

Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: IV, VII, VIII, X, XI Congreso Multidisciplinario de Investigación Científica, Santo Domingo, 2008, 2011, 2012, 2014, 2015; XXXIII Reunión de Trabajo de la Asociación de Energías Renovables y Ambiente (ASADES-2010), Cafayate, Salta, Argentina, 2010; V Российская Национальная конференция по теплообмену,

Москва, 2010; 14 Convención científica de ingeniería y arquitectura Cujae, Habana, Cuba, 2008; II Congreso Internacional de Física Santo Domingo, 2007; VI Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика», Москва, 2012; Международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014), Иваново, 2014.

Публикации

По результатам работы были опубликованы тринадцать научных трудов, два из которых в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, и один зарубежный журнал, индексируемый в базе данных WEB of Science.

Объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 79 наименований. Общий объем диссертации составляет 132 страницы машинописного текста, включая рисунки, таблицы.

Работа выполнена на кафедре «Тепломассообменные процессы и установки» Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Исследования, послужившие основой для диссертационной работы, были проведены в рамках грантов Fondocyt 2008-2-E1-010 и Fondocyt INNOVACION 2012-0013-2E1-28.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессору, д.т.н. Гаряеву Андрею Борисовичу и всему коллективу кафедры ТМПУ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за помощь и поддержку, оказанные при написании кандидатской диссертации.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ АДСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

1.1 Общие положения

Разработка и первые применения холодильных абсорбционных установок датируются началом 19-го века. Именно в 19-м веке был произведен заметный скачок в области производства холода. В 1834 г. в Британии Якоб Перкинс [1] сконструировал первую парокомпрессионную холодильную установку и получил патент на «Аппарат для производства холода и охлаждения жидкостей», в качестве теплоносителя был использован этиловый эфир. В 1850 г. впервые был получен искусственный лед с использованием технологии компрессионного цикла, холодильный аппарат был создан и запатентован Твинингом [2].

Использование феномена сорбции в целях охлаждения вызывал интерес таких ученых и изобретателей как Уильям Каллен, Джон Лесли [3], Оливер Эванс, Фердинанд Карре, Лео Силард и Альберт Эйнштейн. Еще в 1858 году Фердинандом Карре и Эдмондом Карре была изобретена аммиачная абсорбционная холодильная машина, но только в начале 20 века в Москве было организовано производство холодильных агрегатов «Эскимо», изготовленных по принципу предложенному Ф. Карре.

Фердинанд Карре пропагандировал холодильные машины для хранения пищевых продуктов и получил ряд патентов на свои изобретения [4], [5]. Большой вклад в практическое применение холодильной техники внес Карл фон Линде, профессор Мюнхенского технического института, создав большое количество холодильных машин и проведя исследования по криогенным аппаратам и ожижению газов [6].

В 1926 году Альберт Эйнштейн и Лео Силард [7-9], предложили вариант конструкции абсорбционного холодильника, именуемого эйнштейновским, который был запатентован в 1930 г. [10], но начавшийся в начале 20-го века промышленный выпуск компрессионных холодильников, рост которого происходит и по настоящее время, затормозил развитие систем охлаждения,

использующих явления сорбции. В середине 20-го века в разных странах было налажено производство абсорбционных холодильников, работающих на энергии сжигания газа с рабочей парой аммиак-вода, но они используются гораздо реже, чем бытовые холодильники компрессионного цикла.

Уже в 80-е годы прошлого века активно велись разработки холодильных установок адсорбционного типа, и на сегодняшний день эта тема по-прежнему интересует ученых многих исследовательских центров.

В связи с проблемой истощаемости ископаемых природных ресурсов во второй половине 20-го века ведущие научные центры мира стали посвящать свои исследовательские изыскания разработке холодильных установок, действующих на основе явлений сорбции и альтернативных источников энергии.

Эта тема интересует ученых многих исследовательских центров. На Рисунке 1.1 представлено число публикаций в научных журналах издательства El Sevier по годам в течение последних лет. Поиск был организован, используя ключевые слова «solar refrigeration». Анализируя представленный график, можно заметить растущий интерес к указанной теме.



Рисунок 1.1. Динамика роста числа публикаций, посвященных солнечным холодильным установкам (El Sevier)

1.2 Анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований

В существующих абсорбционных холодильных установках, как правило, используются в качестве рабочей пары бромистый литий-вода или аммиак-вода. В настоящее время абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины выпускаются ведущими производителями климатического оборудования, такими как Carrier, LG, Termax, World Energy и другими. Эти установки используют смешанные источники энергии (электричество, вторичное тепло, солнечную энергию), предназначены в основном для отбора и удаления избыточного тепла в системах кондиционирования воздуха, и поэтому не являются автономными. К тому же сами установки и бромистый литий отличаются высокой стоимостью.

Аммиачные холодильные установки, такие как упомянутый выше газовый холодильник, более экономны и могут работать в автономном режиме при полной независимости от электроэнергии. Однако аммиачные холодильные установки работают при высоких давлениях, что может привести к утечке аммиака в окружающую среду и вызвать ее загрязнение, из-за токсичности аммиака.

С 80-х годов прошлого века растет интерес к применению явления адсорбции в процессах генерации холода. Производство холодильных установок адсорбционного типа не требует высоких технологий: в них нет движущихся частей, не используется электричество, в большинстве своем они автономны. Источником энергии могут быть солнце, вторичное тепло или энергия сжигания газа. Разработка эффективных солнечных холодильников адсорбционного типа (СХАТ) привлекает внимание многих исследователей в связи с перспективностью практического применения, прежде всего, у потребителей, не подключенных к системе централизованного электроснабжения.

Принцип действия СХАТ

Солнечный холодильник адсорбционного типа состоит из трех составных частей: солнечный адсорбер (генератор), конденсатор, испаритель (Рисунок 1.2).

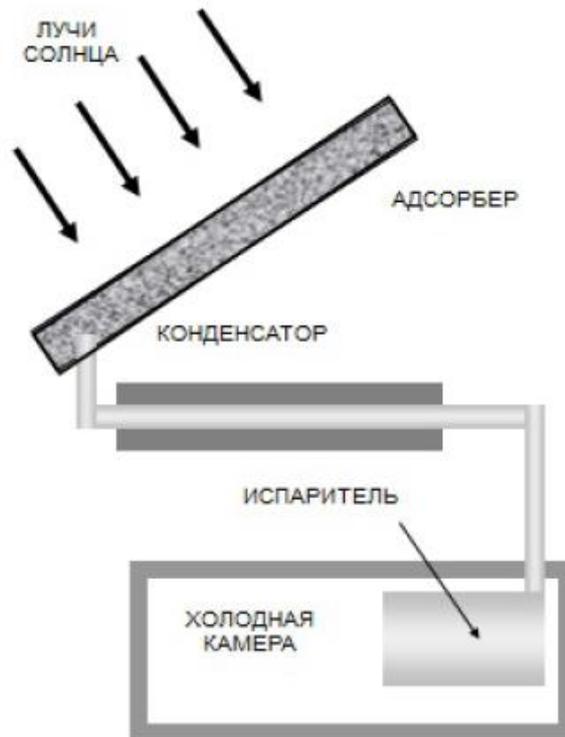


Рисунок 1.2. Схема СХАТ

Испаритель помещен в изолированную холодильную камеру. Работа СХАТ является периодической, и принцип его действия основан на зависимости адсорбционных свойств адсорбента от температуры. В течение светового дня адсорбент нагревается, уменьшая свои адсорбционные свойства, адсорбат десорбируется, поступая в газовом состоянии в конденсатор. Во время десорбции давление пара адсорбата растет до тех пор, пока не достигнет давления насыщения, соответствующего температуре конденсатора. После этого происходит смена фазы: адсорбат переходит из газообразного состояния в жидкое при постоянном давлении. Теплота конденсации отдается окружающей среде, а сконденсированный адсорбат под действием силы тяжести поступает в испаритель. На этом этапе происходит регенерация адсорбента.

При снижении солнечной активности температура солнечного коллектора, а с ним и адсорбента, начинает снижаться, одновременно снижается давление во всей системе. Адсорбент восстанавливает свои адсорбционные качества и начинается процесс адсорбции, в течение которого пар адсорбата поступает в

охлаждаемый наружным воздухом адсорбер, где поглощается твердым сорбентом. Процесс генерации холода происходит за счет испарения сорбата в холодильной камере и продолжается до тех пор, пока давление насыщенных паров сорбата в испарителе не сравняется с равновесным давлением его паров над сорбентом, зависящим от их температуры и количества поглощенного сорбата. Процессы генерации холода и регенерации сорбента циклически повторяются.

Выбор рабочей пары

В установках адсорбционного типа могут быть использованы различные пары адсорбентов и адсорбатов, такие как цеолит-вода, силикагель-вода, активированный уголь-метанол, активированный уголь-аммиак [11], [12]. Рабочие пары должны отвечать определенным требованиям, таким как:

- 1) высокая адсорбционная способность,
- 2) значительная изменяемость адсорбционной способности с изменением температуры,
- 3) высокая теплота фазового перехода.

Tchernev [13] анализировал цеолиты природного происхождения, способные адсорбировать и десорбировать значительные количества водяных паров при изменении их температуры, и изготовил экспериментальную солнечную холодильную установку [14], в которой помещается 50 кг цеолита на каждый квадратный метр площади адсорбера. Во время экспериментов холодильный коэффициент установки достигал значения 0.15. Авторы [15] в экспериментах с солнечной адсорбционной установкой, использующей синтетический цеолит, получили значения холодильного коэффициента в диапазоне 0.04 — 0.14, в то время как Grenier P. и др. [16] при работе подобной экспериментальной установки приводят холодильный коэффициент 0.086 при минимальной температуре в испарителе 2.5°C. В системах с рабочей парой цеолит-вода температура адсорбера во время процесса десорбции должна быть выше 200°C, а температура адсорбции должна быть ниже 80°C, что приводит к необходимости использования более сложных технологий при разработке и изготовлении адсорбера [12]. Низкое давление паров воды делает процесс адсорбции

медленным. Адсорбционные характеристики пары силикагель-вода были изучены авторами [17]. Адсорбционные холодильные установки с парами цеолит-вода и силикагель-вода используются преимущественно в системах кондиционирования воздуха, так как в этих системах вода является адсорбатом, и поэтому температура испарения является относительно высокой, например, 4°C [18] и 4-7°C [19].

При использовании системы с рабочей парой активированный уголь-аммиак при процессе десорбции поддерживается давление порядка 1.6 МПа. С другой стороны, высокое давление увеличивает массообмен и укорачивает время процесса адсорбции. В прошлом адсорбционные установки с парой активированный уголь-аммиак не находили широкого практического применения в основном из-за токсичности аммиака и его коррозионных свойств по отношению к медным материалам [12]. В последнее время системы с использованием активированного угля и аммиака привлекают внимание исследователей благодаря высокой охлаждающей способности аммиака. Более детально упомянутые системы рассматриваются в работах [20 - 31].

Пара активированный уголь-метанол используется в адсорбционных системах наиболее широко благодаря большой циклической адсорбционной способности, низкой температуре десорбции, низкой энергии адсорбции и высокой теплоте фазового перехода метанола из жидкого состояния в газообразное. Авторы [32], [11] утверждают, что холодильный коэффициент (COP) повышается при использовании активированного угля-метанола в качестве рабочей пары, а авторы [33] замечают, что при использовании активированного угля в виде волокна холодильный коэффициент увеличивается на 20 - 30%, а циклическая адсорбционная способность в 2 - 3 раза.

Активированный уголь-метанол является одной из самых перспективных рабочих пар для практического применения [34], [35], несмотря на некоторые недостатки:

1. Когда температура поднимается выше 150°C, уголь становится катализатором в реакции разложения метанола.

2. Обращение с метанолом требует определенной осторожности из-за его токсичности.

3. Активированный уголь отличается низкой теплопроводностью.

Так как температура десорбции метанола относительно низка, в системах, использующих активированный уголь-метанол, нет необходимости получать температуру в адсорбере выше 110 - 120°C, с другой стороны, благодаря тому, что система работает при низких давлениях, маловероятно загрязнение окружающей среды метанолом.

Можно выделить ряд преимуществ адсорбционных холодильных установок, использующих рабочую пару активированный уголь-метанол:

- 1) возможность использования энергии солнца в качестве единственного источника энергии;
- 2) возможность применения СХАТ в местах, удаленных от системы электрообеспечения;
- 3) низкая технологичность конструкции;
- 4) экологичность;
- 5) возможность достижения температур ниже 0°C в испарителе, а значит, получения льда для аккумуляции холода.

В связи с вышеперечисленным, активированный уголь-метанол выбирается в данной работе в качестве рабочей пары при исследовании СХАТ.

Термодинамический цикл

На приведенном графике (Рисунок 1.3) представлен идеальный термодинамический цикл солнечного холодильника адсорбционного типа периодического действия, где на оси ординат показан натуральный логарифм давления в системе, а на оси абсцисс — обратная функция температуры.

Линии АБ и БВ соответствуют процессу регенерации адсорбента, происходящему в дневное время суток, линии ВГ и ГД соответствуют процессу генерации холода, происходящему после захода солнца. Рассмотрим более детально эти процессы.

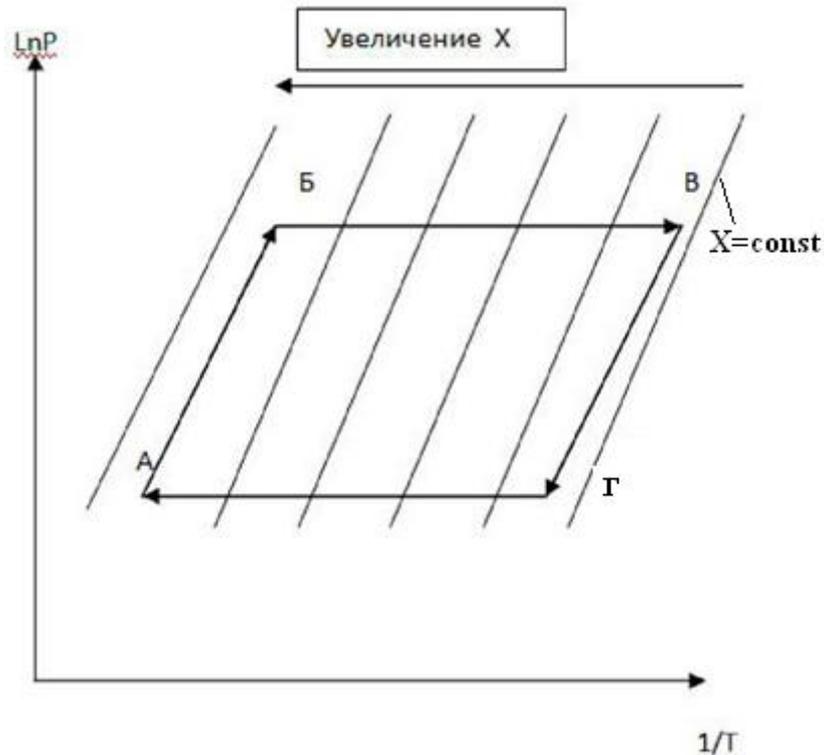


Рисунок 1.3. Термодинамический цикл СХАТ

Линия АБ. Изостерический нагрев. В первые часы после восхода солнца температура солнечного адсорбера, а также давление в системе медленно растут, но при этом концентрация метанола в активированном угле не меняется и остается приблизительно равной значению, достигнутому в течение предыдущей ночи во время процесса адсорбции. Длительность этого этапа может составлять от двух до четырех часов.

Линия БВ. Десорбция. С увеличением потока солнечной радиации давление в системе растет до тех пор, пока не достигнет давления насыщения метанола, соответствующего температуре конденсатора. В этот момент начинается процесс конденсации, жидкий метанол под действием силы тяжести попадает в испаритель. По мере того, как происходит фазовый переход метанола в конденсаторе, в адсорбере активированный уголь освобождает газообразный метанол из своих пор; другими словами, происходит процесс десорбции, и концентрация метанола в активированном угле уменьшается.

Этот процесс в идеале проходит при постоянном давлении, соответствующем давлению насыщения метанола при температуре конденсатора. Постоянство давления означает равенство скорости процессов десорбции и конденсации. Во время процесса десорбции температуры в адсорбере максимальны для каждого цикла.

Линия ВГ. Изостерическое охлаждение. Когда уменьшается поток солнечной радиации, одновременно снижаются температура адсорбера и давление в системе. Этот процесс является изостерическим, то есть концентрация метанола в порах активированного угля не меняется.

Линия ГА. Адсорбция. Когда давление в системе снижается настолько, что активированный уголь восстанавливает свои адсорбционные качества, начинается процесс адсорбции метанола активированным углем, что приводит к испарению метанола и генерации холода в испарителе и, следовательно, в холодильной камере.

Анализ работ по математическому моделированию солнечных адсорбционных холодильных установок периодического действия

Действие СХАТ является периодическим, поэтому при разработке такой установки перед исследователями ставится задача спроектировать СХАТ с характеристиками, позволяющими произвести как можно большее количество льда во время этапа производства холода на каждый квадратный метр поверхности генератора.

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований СХАТ с рабочей парой активированный уголь-метанол, проведенных учеными разных стран [36-44], по-прежнему актуальна проблема повышения холодопроизводительности и холодильного коэффициента установки. Кроме того, в изученной автором литературе не представлены ни удовлетворительная математическая модель физических процессов, происходящих в СХАТ, ни метод расчета, позволяющий рассчитать и

спроектировать наиболее эффективную и адекватную установку, отвечающую требованиям конечного пользователя.

Pons M. и Guillemintot J.J. [42] в 1986 году предложили конструкцию солнечного холодильника, использующего активированный уголь и метанол. Их установка дает холодильный коэффициент (COP) в пределах 0.10 — 0.12. Anyanwu E.E. и Ogueke N.V. [37] сообщают, что в их экспериментах холодильный коэффициент (COP) менялся в диапазоне 0.002 — 0.02.

Boubakri A., Guillemintot J.J. и Meunier F. [36] представляют математическую модель солнечной холодильной установки адсорбционного типа с плоским коллектором, с помощью которой оценивают, какое количество льда может быть произведено, и приводят холодильный коэффициент порядка 0.12 — 0.19, но не представляют результаты численных расчетов для переходных процессов.

Лuo L. и Tondeur D. [39] в своей работе представляют результаты, полученные в экспериментах с прототипом СХАТ, в котором адсорбер имел цилиндрическую форму с внешним и внутренним диаметрами 0.06 м и 0.02 м соответственно. Подвод тепла производился с помощью электрического нагрева с максимальным тепловым потоком на поверхности 750 Вт/м^2 , а в самом адсорбере находилось 0.86 кг активированного угля.

В течение эксперимента для достижения необходимого давления в системе применялся вакуумный насос, в то время как при нормальной работе установки не требуется использование насоса. Авторами была построена математическая модель, состоящая из трех уравнений, записанных в цилиндрических координатах: уравнение сохранения массы, уравнение сохранения энергии и уравнение Дубинина-Радушкевича, описывающее равновесные состояния адсорбата и адсорбента. Получены расчетные значения искомых неизвестных в разные моменты времени: температуры T , концентрации газообразного метанола c и количества адсорбированного метанола X . Во время экспериментов измерялась температура внутри адсорбера и в испарителе и количество десорбированного метанола. При построении математической модели авторы [39] полагают, что давление в системе и во всем слое угля в течение всего процесса

адсорбции постоянно, в течение процесса десорбции — тоже, но эти два давления меняются во времени и в слое угля.

Авторы приводят расчетные и экспериментальные графики температуры в слое активированного угля во времени для процессов адсорбции и десорбции, а также количество десорбированного метанола во времени. Расчетные и экспериментальные температурно-временные кривые хорошо согласуются для процесса адсорбции, но значительно расходятся для процесса десорбции. При сравнении количества десорбированного метанола, полученного расчетным и экспериментальным путем, наблюдается совпадение в форме кривых, но при этом экспериментальный процесс заканчивается значительно раньше, и имеются существенные количественные расхождения. Расхождение между общим количеством десорбированного метанола в теории и в эксперименте доходит в некоторых случаях до 50%.

Исследователи [40] и [41] разрабатывали солнечную холодильную установку адсорбционного типа с начала 90—х годов. Были опубликованы многообещающие результаты экспериментов, но не представлено никакой математической модели. На основе опытных данных авторы строили экспериментальный термодинамический цикл, хорошо повторяющий теоретический, и проводили сравнение между двумя экспериментальными прототипами. Адсорбер представляет собой комплект цилиндров, помещающих в себе 21 кг активированного угля и на начальном этапе 6 кг метанола. Авторы публиковали данные по трем экспериментальным циклам: минимальная температура, достигнутая в испарителе, от -2°C до -4.6°C , количество произведенного льда от 0 до 6 кг, масса конденсированного метанола от 2 до 3 кг, холодильный коэффициент от 0.067 до 0.085.

Anyanwu E.E. и Ogueke N.V. [37] в своей работе представляли результаты экспериментальных исследований и разработанную математическую модель солнечного адсорбционного холодильника, в котором адсорбер состоит из пяти цилиндрических коллекторов, заполненных активированным углем. Были представлены следующие расчетные и экспериментальные результаты:

температура поверхности цилиндра, температура воды в испарителе, в конденсаторе и количество десорбированного метанола. Минимальная зарегистрированная температура в испарителе 5°C , холодильный коэффициент, просчитанный авторами, находился в диапазоне 0.002 — 0.02. Для описания равновесных состояний активированного угля и метанола авторы использовали модель Дубинина-Астахова. В математической модели, построенной авторами, присутствует большое количество параметров, значение которых авторы практически не объясняют. Результаты измерений, проводимых каждые 30 минут, использовались для определения некоторых параметров. Поэтому разработанная [37] математическая модель не может служить базой для расчета адсорбционной установки с произвольными характеристиками.

Отмечено, что подбор технических параметров СХАТ, таких как геометрические размеры, масса и толщина слоя угля проводился авторами вышеперечисленных работ на основании практического опыта и приблизительных расчетов, основанных на оценке количества десорбированного и адсорбированного метанола по его равновесным значениям. Методы расчета параметров установки для достижения заданной холодопроизводительности на настоящий момент в литературе не описаны. Отсутствуют также рекомендации по увеличению таких характеристик СХАТ, как холодопроизводительность, отнесенная к площади поверхности солнечного коллектора и холодопроизводительность, отнесенная к массе активированного угля.

1.3 Модели адсорбционного равновесия

Для описания явления адсорбции используют эмпирическую функцию: $X = f(P, T)$, где X — количество адсорбированного вещества в адсорбенте, представляемое как отношение между массой адсорбированного вещества и массой адсорбента (кг/кг) или как отношение между объемом адсорбированного вещества и массой адсорбента (л/кг). Экспериментально можно определить изотерму адсорбции $X = f(P)$, изобару адсорбции $X = f(T)$ или изостеру адсорбции $P = f(T)$.

Существуют разные математические модели, позволяющие описать равновесные состояния, достигнутые между адсорбентом и адсорбентом по завершению процесса сорбции. Несмотря на то, что адсорбционные данные представляются не только в виде изотерм адсорбции, последние очень удобны для теоретической обработки данных. Поэтому, для формирования математических моделей, прежде всего, необходимо получить совпадение расчетной изотермы адсорбции с экспериментальной. Кроме того, теория должна правильно предсказать изменение теплоты и энтропии адсорбции с изменением количества адсорбированного вещества.

Большинство изотерм адсорбции газов и паров можно условно отнести к одному из пяти типов, показанных на Рисунке 1.4. Эта классификация впервые была предложена Брунауэром, Демингом Л., Демингом В. и Теллером (классификация БДДТ) [45], хотя часто она приписывается Брунауэру, Эммету и Теллеру. Изотермы I типа характерны для микропористых адсорбентов. Если адсорбция газа твердым телом описывается изотермой II типа, это указывает на то, что твердое тело является непористым [46], изотерма IV типа характеризует его как мезопористое. Изотермы III и V типа встречаются реже, чем трех других типов, и характерны для систем с очень слабым взаимодействием адсорбент-адсорбат. Изотермы III типа наблюдаются для непористых тел, а изотермы V типа указывают на наличие пористости.

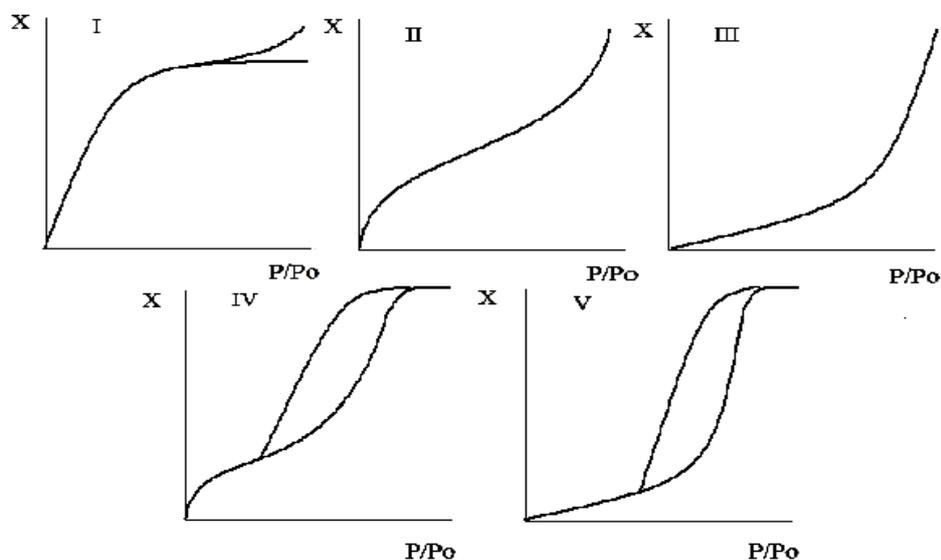


Рисунок 1.4. Классификация изотерм по БДДТ

Условия адсорбции на пористых телах или материалах зависят от характеристик этих материалов. М.М. Дубининым [47] была предложена классификация пористых тел, которая получила широкое применение; в настоящее время она официально принята Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC) [48].

По классификации Дубинина макропористые тела имеют размер пор в пределах 100 — 200 нм, площадь удельной поверхности 0.5 — 24 м²/г. Для макропористых тел применима обобщенная теория адсорбции Ленгмюра, так как размер пор намного больше адсорбируемых молекул, и их стенки, по сравнению с молекулами, можно рассматривать как ровные поверхности.

Переходнопористые тела (или мезопористые) имеют размер пор в пределах 1.5 — 100 нм, площадь удельной поверхности 10 — 500 м²/г. При малых давлениях на стенках этих пор происходит полимолекулярная адсорбция паров, которая при увеличении давления заканчивается капиллярной конденсацией. В этом случае характерна изотерма адсорбции с петлей капиллярно-конденсационного гистерезиса, нижняя кривая соответствует процессу адсорбции, а верхняя — процессу десорбции (Рисунок 1.3, изотерма I). При малых давлениях, когда не происходит капиллярная конденсация, гистерезиса не наблюдается. Начало появления гистерезиса зависит от природы адсорбента и адсорбата, таких например, как форма пор или условия смачиваемости (Рисунок 1.4, изотермы IV и V).

Микропористые тела характеризуются размером пор в пределах 2 нм и площадью удельной поверхности 500 — 1000 м²/г и более. Размер пор соизмерим с размером адсорбируемых молекул, и противоположные стенки пор настолько близко расположены, что их поля поверхностных сил перекрываются и действуют во всем объеме пор. К микропористым телам применима теория объемного заполнения пор, микропористыми адсорбентами являются цеолиты и некоторые активированные угли. Большинство промышленных адсорбентов относятся к смешанным типам адсорбентов и характеризуются широкой

полидисперсностью. Их полидисперсность определяется распределением пор по размерам, отражающим относительное содержание разных пор.

Модель Ленгмюра

Ленгмюр использовал представление об адсорбции как о квазихимической реакции между адсорбатом и адсорбционными центрами поверхности адсорбента, чтобы получить теоретическую изотерму адсорбции, описывающую более широкую область концентраций. Это положение теории Ленгмюра уточняется следующими допущениями:

1) адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах, каждый центр взаимодействует только с одной молекулой адсорбата, в результате чего образуется мономолекулярный слой;

2) адсорбционные центры энергетически эквивалентны — поверхность адсорбента эквипотенциальна;

3) адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом.

Приведенное ниже уравнение называется уравнением изотермы мономолекулярной адсорбции Ленгмюра [49]:

$$V(T, P) = V_0 \frac{k(T)P}{(1 + k(T)P)} \quad (1.1)$$

где константа адсорбционного равновесия k характеризует энергию взаимодействия адсорбата с адсорбентом; чем сильнее взаимодействие, тем больше константа адсорбционного равновесия.

Модель Ленгмюра применяют при условии, что адсорбция вещества сопровождается образованием мономолекулярного слоя. Это условие выполняется достаточно строго при хемосорбции, физической адсорбции газов при небольших давлениях и температурах выше критической (в отсутствие конденсации на поверхности адсорбента), а также при адсорбции из растворов. Указанное ограничение для применения уравнения Ленгмюра связано с

невозможностью получить правильные значения параметров, соответствующих их физическому смыслу. Модель Ленгмюра применяют, как правило, к изотермам второго типа, они соответствуют макропористым телам.

Модель БЭТ

В большинстве случаев мономолекулярный адсорбционный слой не компенсирует полностью избыточную поверхностную энергию, и влияние поверхностных сил может распространяться на последующие слои. Это происходит, когда газы и пары адсорбируются при температурах ниже критической, что приводит к образованию полимолекулярных слоев вещества на поверхности адсорбента.

Современная форма уравнения полимолекулярной адсорбции была предложена Брунауэром, Эмметом и Теллером, теория получила название "модель БЭТ". В этой теории сделано дополнительное допущение об образовании на поверхности адсорбента комплексов адсорбционных центров с одной, двумя, тремя и более молекулами адсорбата. При развитии обобщенной теории Ленгмюра авторы принимают следующие допущения:

- 1) во всех слоях, кроме первого, теплота адсорбции равна молярной теплоте конденсации;
- 2) во всех слоях, кроме первого, условия конденсации-испарения идентичны;
- 3) при $P = P_s$ адсорбат конденсируется на поверхности в объемную жидкость, т.е. число слоев становится бесконечным.

Приведенное ниже соотношение является основным уравнением обобщенной теории Ленгмюра, записанным в линейной форме, и называется уравнением полимолекулярной адсорбции БЭТ [50]:

$$\frac{P}{n(P_s - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{(C-1)P}{n_m C} \frac{P}{P_s}, \quad (1.2)$$

где n — число молей адсорбата на 1 г адсорбента; n_m — емкость монослоя; C — параметр адсорбции, зависящий от температуры и теплоты адсорбции. Уравнение БЭТ применяют с хорошим приближением в области относительных давлений $0.05 < \frac{P}{P_s} < 0.3$. При $\frac{P}{P_s} < 0.3$ сказывается взаимодействие между адсорбированными молекулами.

Модели Дубинина-Радушкевича и Дубинина-Астахова

В микропористых адсорбентах размеры микропор соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул. В микропорах молекулы, расположенные в основном вдоль поры, взаимодействуют друг с другом, подобно взаимодействию при образовании полимолекулярного слоя, но при этом, в отличие от последнего, большинство молекул находится в непосредственном контакте со стенками поры. Поэтому ни теория БЭТ, ни теория Ленгмюра для описания процесса адсорбции микропористым телом неприменимы. Имеется в виду главным образом получение правильных значений постоянных параметров уравнений, имеющих определенный физический смысл. В микропорах происходит объемное заполнение адсорбционного пространства, поэтому целесообразно принять за основной геометрический параметр пористого адсорбента не поверхность, а объем микропор [49]. Если твердое тело содержит микропоры, то силовые поля соседних стенок перекрываются, и энергия взаимодействия твердого тела с молекулой газа соответственно возрастает. Это вызывает отклонение изотермы в область больших величин адсорбции. Предполагают, что такого рода взаимодействие может быть достаточно сильным, чтобы полное заполнение пор происходило при очень низком относительном давлении. В простейшем случае адсорбция в микропористом твердом теле описывается изотермой первого типа [46].

Дубинин и Радушкевич развили теорию Поляни [51], предложенную первоначально для описания полимолекулярной адсорбции, исходя из двух

основных параметров: потенциала $\varepsilon = RT \ln \frac{P}{P_0}$ и степени заполнения микропор

$\theta = \frac{W}{W_0}$, где W и W_0 представляют собой объем заполненных микропор при $\frac{P}{P_0}$ и

общий объем микропор соответственно. Дубинин называет потенциал ε дифференциальной молярной работой адсорбции.

Дубинин и Радушкевич [52] предложили уравнение для оценки объема микропор по областям изотермы адсорбции, относящимся к малым и средним давлениям, предполагая, что распределение θ по дифференциальной молярной работе адсорбции определяется распределением Гаусса:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{P_0}{P}))^2}, \quad (1.3)$$

где β представляет собой коэффициент аффинности, а X_{eq} и X_0 —количество адсорбированного вещества при давлении P и при давлении P_0 соответственно, при этом X_{eq} и X_0 выражены в безразмерном соотношении массы адсорбтива приведенного к массе адсорбента. Позже Дубинин и Астахов предположили, что распределение θ по дифференциальной молярной работе адсорбции определяется распределением Вейбулла, и представили уравнение 1.3 следующего виде [53]:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{P_0}{P}))^n}. \quad (1.4)$$

В данной диссертации рабочей парой являются активированный уголь и метанол, и поскольку активированный уголь представляет собой микропористое твердое тело, для описания равновесных состояний адсорбента и адсорбата можно использовать модели Дубинина-Радушкевича или Дубинина-Астахова. Заметим, что все вышеупомянутые модели адсорбции применимы к равновесным состояниям, когда процесс адсорбции или десорбции уже завершен.

1.4 Выводы главе 1

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований СХАТ с рабочей парой активированный уголь-метанол, проведенных учеными разных стран [36-44,54-56] по-прежнему актуальна проблема повышения холодопроизводительности и холодильного коэффициента установки. Кроме того, в изученной автором литературе не представлены ни удовлетворительная математическая модель физических процессов, происходящих в СХАТ, ни метод расчета, позволяющий рассчитать и спроектировать наиболее эффективную и адекватную установку, отвечающую требованиям конечного пользователя. Например, исследователи Luo L. и Tondeur D. [57], а также Zhao Y., Eric Hu, Blazewicz A. [58] представили достаточно логичную математическую модель, которую создавали с целью достижения лучшего понимания физических процессов. Но даже эти исследователи после сравнения численных решений с экспериментальными результатами, пришли к заключению о необходимости пересмотра представленной ими модели.

На основе проведенного анализа состояния исследований в данной области, изученных подходов и предложенных математических моделей физических процессов, происходящих в установках данного типа, автором была сформулирована цель настоящей работы. Целью проводимой работы является совершенствование характеристик и разработка метода расчета солнечного адсорбционного холодильника периодического действия, использующего рабочую пару активированный уголь-метанол.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ состояния исследований в данной области, изучить подходы к описанию и существующие математические модели физических процессов, происходящих в установках данного типа.

2. Произвести экспериментальное исследование солнечной почасовой радиации в г. Санто-Доминго, необходимое для проектирования СХАТ, предназначенных для работы в данном регионе.
3. Провести серию испытаний адсорбционной способности различных марок активированного угля относительно метанола и определить их параметры в уравнении Дубинина-Астахова.
4. Разработать ряд действующих образцов СХАТ и провести экспериментальное исследование их работы с различными типами углей в различных климатических условиях.
5. Разработать математическая модель процессов тепло- и массообмена, протекающих в адсорбере СХАТ, и провести проверка ее адекватности.
6. Провести численные исследования работы солнечной адсорбционной холодильной установки с различными конструктивными параметрами при различных характеристиках активированного угля для разных климатических условий.
7. Разработать метод расчета СХАТ периодического действия, использующего рабочую пару активированный уголь–метанол.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АДсорбЦИОННОГО ТИПА

2.1 Расчет пропорций экспериментальной установки

Объект исследования — солнечная холодильная установка адсорбционного типа. Анализ публикаций по проблеме совершенствования ее характеристик показывает, что процессы, происходящие в адсорбере, изучены недостаточно. Имеются данные о влиянии дневных и ночных температур солнечного коллектора, но не изучались другие факторы, ни по отдельности, ни комплексно. Поэтому была поставлена цель — установить, как другие факторы (солнечная радиация, температура конденсатора и конструктивные характеристики СХАТ) влияют на работу установки, и добиться лучшего понимания происходящих в ней физических процессов. Для этого проводились и натурные, и численные эксперименты. Кроме того, результаты натурных экспериментов использовались для построения математической модели СХАТ и для ее дальнейшей верификации.

В Доминиканской Республике и в Аргентине исследовательской группой, в состав которой входил автор, было построено восемь прототипов солнечного холодильника адсорбционного типа, отличающихся формами, размерами, количеством активированного угля и циркулирующего метанола. На некоторых экспериментальных образцах удалось получить от 60 г до 800 г льда в течение суточного цикла. Опыт, приобретенный в экспериментах с прототипами СХАТ, использовался для расчета и постройки каждого следующего прототипа.

Для измерения солнечной радиации исследователями был разработан и построен солориметр новой конструкции. Принцип действия солориметра и сравнение его с другими образцами представлены в работах исследовательской группы [59-61].

Для расчета приблизительных пропорций экспериментальной холодильной установки адсорбционного типа нужно составить уравнение энергобаланса для

испарителя и применить уравнение, описывающее равновесные состояния между адсорбатом и адсорбентом. В случае использования рабочей пары активированный уголь-метанол состояния адсорбционного равновесия описываются уравнением Дубинина-Радушкевича [57] или Дубинина-Астахова [37]. Исходным параметром является количество льда, которое предполагается получить на установке. Из уравнения энергобаланса получаем необходимое количество метанола, которое должно испариться, чтобы произвести холод, необходимый для охлаждения исходного количества воды и осуществления фазового перехода.

Пример приближенного расчета пропорций экспериментальной установки представлен ниже. Предполагается, что необходимо получить 5 кг льда в сутки. Составляется уравнение энергобаланса без учета потерь в окружающую среду (изначально имеется 5 кг воды при температуре 30° С):

$$m_v c\Delta T + m_v L_v = m_{met} L_{met} \quad (2.1)$$

где m_v — масса воды, находящейся в холодильной камере, которая, как предполагается, перейдет в твердую фазу,

c — удельная теплоемкость воды;

m_{met} — масса метанола, находящегося в испарителе;

L_{met} — теплота фазового перехода метанола из жидкого состояния в газообразное;

L_v — теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в лед.

Из этого уравнения получается количество метанола, необходимое, чтобы охладить и заморозить 5 кг воды: $m_{met} = 2.04$ кг. Чтобы найти количество угля, которое будет гарантировать такое количество циркулирующего метанола в системе, используется равновесная модель адсорбции вещества в активированном угле, описанная уравнением Дубинина-Астахова [46]:

$$X_{eq} = X_o e^{-\beta(T \ln(\frac{P_o}{p}))^n} \quad (2.2)$$

Переменная X_{eq} в уравнении Дубинина—Астахова представляет собой массу адсорбированного метанола после достижения равновесия между адсорбатом и

адсорбентом (количество адсорбированного метанола всегда приводится на единицу массы активированного угля); X_0 — максимальное количество метанола, которое может быть адсорбировано данным типом активированного угля; T — температура активированного угля; P_0 — давление насыщения метанола, соответствующее температуре активированного угля; β — коэффициент аффинности, зависящий от характеристик активированного угля, это значение берется из литературы: $\beta = 1.12 * 10^{-6} \text{ (K}^{-2}\text{)}$; P — давление метанола в системе. Во время процесса десорбции давление в системе определяется температурой конденсатора, другими словами, оно равно давлению насыщения метанола при температуре конденсатора (30°C). Принимается усредненное значение для величины X_0 , найденное в литературе, для наиболее распространенных типов активированного угля - 0.316 кг/кг.

Сначала определяется количество метанола, оставшегося в порах активированного угля по истечению процесса десорбции (после того, как солнечный коллектор находился 3-4 часа при температуре 100°C). P — давление метанола в системе, во время процесса десорбции оно определяется температурой конденсатора, т.е. равно давлению насыщения метанола при температуре конденсатора (30°C). Рассчитывается X_{eq} по указанному уравнению, и получается значение 0.0930.

Вместе с тем, давление метанола во время процесса адсорбции определяется температурой в испарителе (приблизительно 0°C). Предполагая, что температура угля во время процесса адсорбции равна 30°C (условия г. Санто-Доминго), рассчитывается количество адсорбированного метанола активированным углем во время процесса адсорбции (Таблица 2.1), и получается значение 0.2401. Количество циркулирующего метанола в системе определяется разницей между дневным (минимальным) и ночным (максимальным) количеством адсорбированного угля метанола, в этом случае на каждый килограмм активированного угля приходится 0.1471 килограмма метанола.

Чтобы получить 2 кг циркулирующего в системе метанола, в солнечном коллекторе надо иметь 13.80 кг угля.

Расчет адсорбированного метанола

	P_s , mm Hg	P , mm Hg	$T_{конд}$, °C	$T_{колл}$, °C	X_{eq} , кг/кг
Десорбция	2650	164	30	100	0.0930
Адсорбция	164	30	25	30	0.2401

Чтобы определить общее количество метанола, помещенного в установку, максимальное количество адсорбированного метанола умножается на массу активированного угля.

После выполнения приведенного выше расчета получается три основных параметра установки:

1. количество активированного угля, которое должен вместить в себя солнечный адсорбер;
2. количество циркулирующего в системе метанола, а также количество метанола, которое должно быть введено в систему перед запуском установки;
3. количество воды, которое должно быть помещено в испаритель СХАТ.

Эти параметры следует учитывать при расчете основных составляющих частей установки.

2.2 Измерение солнечной радиации в г. Санто-Доминго

Чтобы выяснить, как интенсивность солнечной радиации влияет на работу солнечного холодильника, исследовательской группой, в состав которой входил автор, был разработан и собран солориметр новой конструкции и низкой стоимости. Принцип действия солориметра основан на измерении теплового потока между медным диском, получающим поток солнечной радиации, и цилиндрической алюминиевой базой. Тепловой поток отводится по стальному стержню, при этом в двух торцах стержня измеряется температура датчиками DS1624 с точностью $\pm 0.3^\circ\text{C}$. В работах исследователей [59] и [60] подробно описывается принцип действия солориметра, а в работе [61] сравниваются

данные, полученных экспериментальным солориметром, с теоретическими кривыми, полученными по модели Хоттеля [62], и с кривыми, представленными метеорологическим центром Аргентины.

Отмечается, что систематические измерения почасовой солнечной радиации в г. Санто-Доминго (Рисунок 2.1) были проведены впервые и в дальнейшем использованы в расчетных исследованиях. Для установления зависимости между интенсивностью солнечного излучения и эффективностью работы СХАТ было проведено исследование (сравнение) кривых солнечной радиации, измеренной в непосредственной близости от установок (в Аргентине и в Доминикане), и кривых температуры, измеренной на поверхности адсорбера.

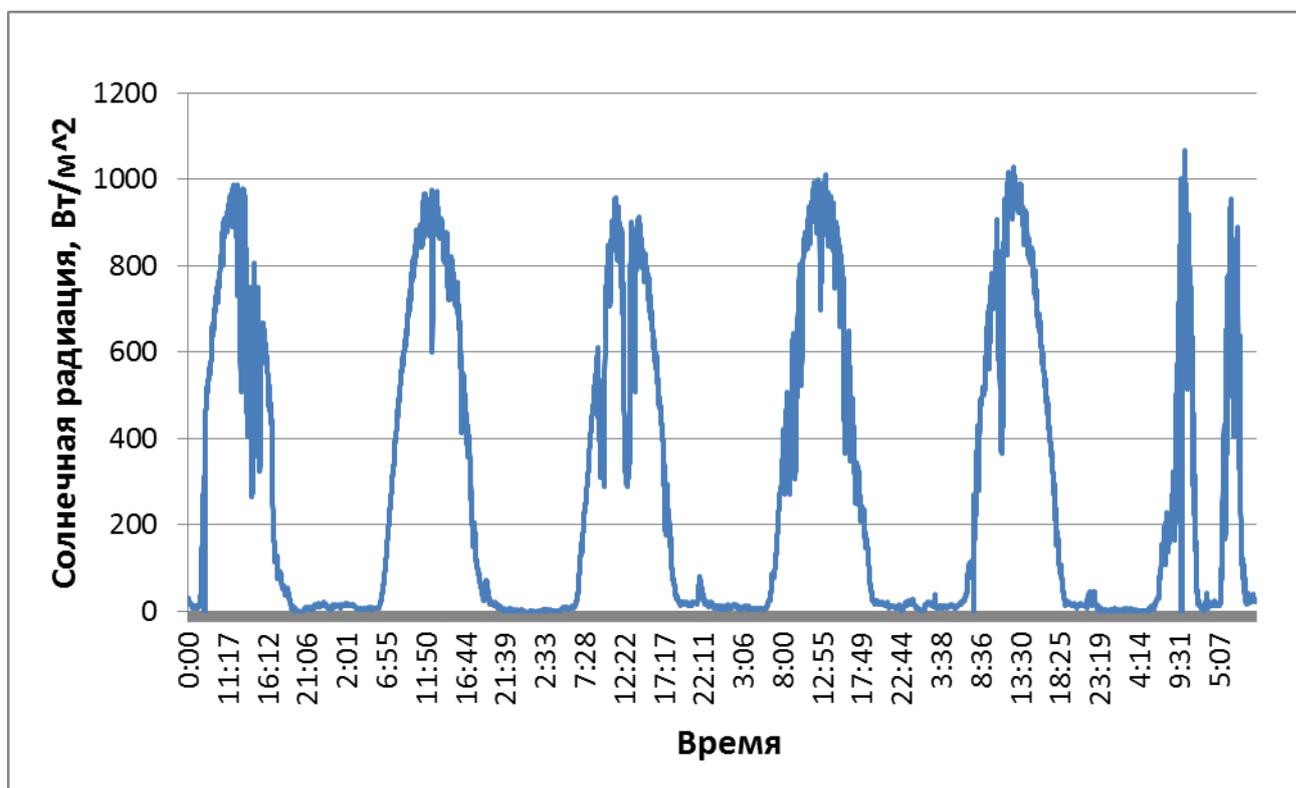


Рисунок. 2.1. Измерения солнечного излучения 13-16 мая 2011 года, Доминикана

2.3 Описание экспериментальных установок

Исследователями было построено восемь экспериментальных прототипов СХАТ, автор непосредственно принимал участие в создании четырех экспериментальных образцов. Наиболее полные систематические результаты

были получены на двух образцах, которые подробно описаны в настоящей работе.

Из всех прототипов, построенных исследовательской группой выбраны два, которые отличаются между собой размерами и количеством помещенного в адсорбере активированного угля, что является одним из параметров, определяющих максимальное количество холода, которое можно произвести на СХАТ. Каждый из двух прототипов был построен как в Доминиканской Республике, так и в Аргентине [63]. Для более удобного дифференцирования прототипов между собой авторы дали им имена собственные: установка 1 — Cholita в Аргентине (ее аналог в Доминиканской Республике остался без имени) и установка 2 — Chola в Аргентине и Cholada в Доминикане. Характеристики двух установок и условия проведения экспериментов представлены в Таблице 2.2. Доминиканский и Аргентинский варианты установки 1 схожи по геометрическим параметрам, но имеют некоторые различия.

Таблица 2.2

Характеристики установок и условия проведения экспериментов

Характеристики	Cholita	Cholada
Количество активированного угля в коллекторе, кг	4	16
Дневные температуры в коллекторе, °С	90	90
Дневные температуры в конденсаторе, °С	15-40	30
Ночные температуры в коллекторе, °С	10-15	20-22
Суточная выработка холода, Q_{fr} , кДж	400	1000
Холодильный коэффициент, $COP = Q_{fr}/Q_{inc}$	0.078	0.105
Q_{fr}/F_{con} , (F_{con} – фронт. поверхность концентратора), кДж/м ²	663	490
Q_{fr}/F_{sum} , (F_{sum} – фронт. площадь коллектора), кДж/м ²	265	327
Q_{fr}/M_{carb} , (M_{carb} – масса угля в коллекторе), кДж/кг	117	67.5

В доминиканском прототипе этой установки было получено примерно 400 грамм льда, и была зарегистрирована минимальная температура в испарителе 11°С. На Рисунках 2.2 и 2.3 представлены фотографии самой установки и полученного льда.



Рисунок 2.2. Экспериментальная
Установка 1, Доминикана



Рисунок 2.3. Лед, полученный в
Доминиканской Республике

Что касается установки 2, замечено, что доминиканский и аргентинский (Cholada и Chola соответственно) прототипы являются абсолютными аналогами в геометрических характеристиках, но в них помещены разные активированные угли, и они эксплуатируются в разных климатических условиях. Результаты экспериментов, проведенных в обеих установках, подробно представлены ниже.

Солнечный коллектор представляет собой цилиндр, наполненный активированным углем, с некоторым пространством, оставленном в центре цилиндра для движения метанола. Цилиндр помещен в солнечный концентратор, общая площадь собирающей поверхности 0.6 м^2 . Длина адсорбера 1 м, внешний диаметр 0.10 м, внутренний диаметр 0.03 м; внутри находится 3 кг активированного угля. Более подробно этот прототип экспериментальной установки описан в работе исследовательской группы [63].

На Рисунках 2.4 и 2.5 представлена установка Cholita.



Рисунок 2.4. Установка 1 Cholita, Аргентина



Рисунок 2.5. Детали установки 1, Аргентина

На рисунке 2.4 изображен цилиндр адсорбера, помещенного в солнечный концентратор, а на рисунке 2.5 — конденсатор и резервуар, служащий испарителем. В течение экспериментов в стеклянной трубочке, соединенной с испарителем, наблюдался уровень метанола, по которому определялось общее количество метанола, находящегося в испарителе.

В 2010 году исследовательской группой были построены два одинаковых прототипа СХАТ, расположенные в разных климатических условиях (в Аргентине и в Доминикане). На рисунке 2.6 представлена подробная схема установки 2, на Рисунке 2.7 представлена фотография прототипа, помещенного на крыше Технологического Института Санто-Доминго (19° северной широты), а на Рисунке 2.8 — аналогичный прототип, установленный на территории Национального Университета провинции Генерал Сармьенто, в окрестностях г. Буэнос-Айреса (34° южной широты).

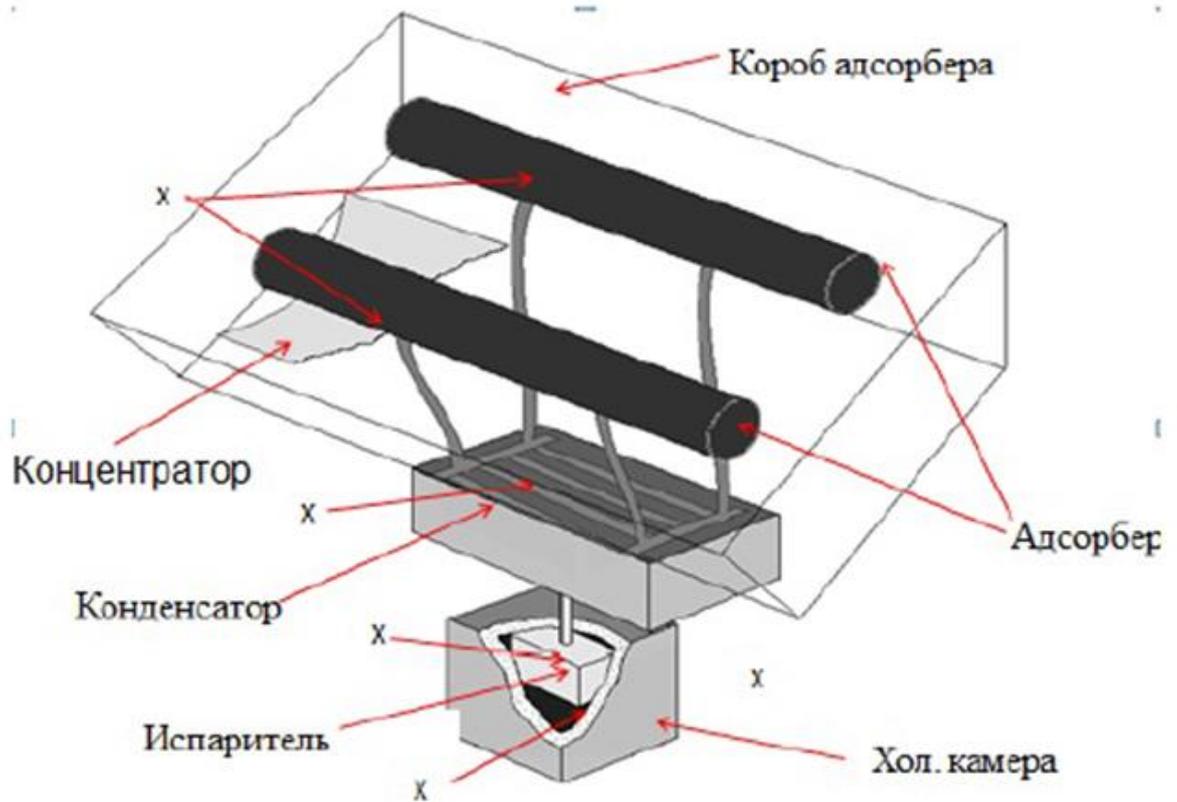


Рисунок 2.6. Схема СХАТ с точками измерения температуры

Термопары были размещены в следующих местах:

1. по одной термопаре на поверхности каждого цилиндра, в нижней части;
2. в конденсаторе, при этом измерялась температура воды между медными трубками;
3. на внешней поверхности резервуара, содержащего метанол;
4. на внешней поверхности резервуара, содержащего воду;
5. внутри холодильной камеры, измеряя температуру воздуха;
6. вблизи холодильной камеры, измеряя температуру воздуха.

На Рисунках 2.9, 2.10 представлены детали коллектора и корпуса холодильной камеры, фотографии сделаны во время сборки Установки 2.

При проведении экспериментов использовались электронные измерители температуры марки EL-USB-TC Thermocouple Data Logger с термопарой типа J,

работающей в диапазоне температур от -200 до $+1190^{\circ}\text{C}$ с погрешностью измерений $\pm 1^{\circ}\text{C}$, изготовитель Lascarc Eletronics Inc.

Температуры измерялись каждые 5 минут, и результаты записывались автоматически в памяти, интегрированной в измерителе. Производились также измерения давления в системе с помощью манометра марки WEKSLER с диапазоном измерения от 0 до 30 дюймов ртутного столба. Установка 2 была введена в действие в октябре 2010 года и продемонстрировала стабильную работу в течение 15 - 16 месяцев.



Рисунок 2.7. Экспериментальная Установка 2. Доминикана



Рисунок 2.8. Экспериментальная установка 2. Аргентина

Адсорбер

В этом прототипе СХАТ солнечный адсорбер состоит из двух одинаковых цилиндров, помещенных в изолированный короб, закрытый сверху стеклом. Цилиндры имеют следующие размеры: длина 1.2 м, внешний диаметр 0.13 м, внутренний диаметр 0.03 м, пространство между внутренним и внешним диаметрами заполнено активированным углем. Каждый цилиндр помещен в солнечный параболический концентратор (Рисунок 2.10) с общей площадью зеркальной поверхности 1.8 м^2 .

Общая масса активированного угля в двух цилиндрах составляет 16 кг, а масса метанола, находящегося в системе, 4 кг. При условиях адсорбции и десорбции, описанных выше, на 16 кг активированного угля получим примерно 2.4 кг циркулирующего в системе метанола.

Для того чтобы осуществился процесс десорбции указанного количества метанола, к адсорберу должно быть подведено определенное количество энергии, приблизительно равное 3.6 МДж. В работе [64] автором показано, что общее количество солнечной энергии, поступающее в адсорбер описываемой установки, значительно превышает рассчитанное количество 3.6 МДж.



Рисунок 2.9. Цилиндр коллектора при сборке

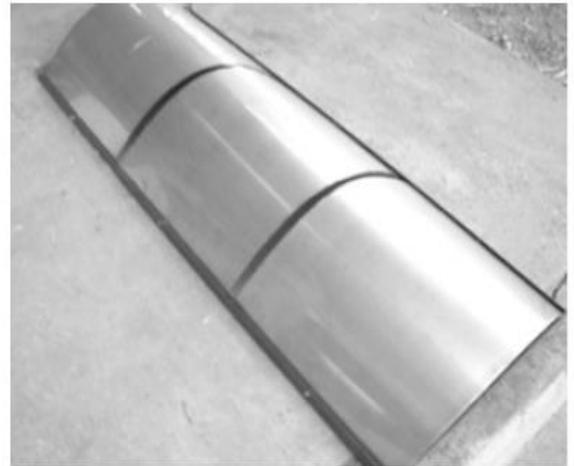


Рисунок 2.10. Концентратор адсорбера

Конденсатор

Конденсатор представляет собой две решетки из наклоненных медных трубок, диаметром 2 см каждая, с общей длиной 13 м и общей площадью поверхности 0.82 м^2 . Трубки конденсатора погружены в резервуар с водой. Из конденсатора спускается одна трубка диаметром 2 см, которая соединяет его с испарителем. В течение процесса десорбции, который длится примерно 5 часов, в конденсаторе должно быть отведено определенное количество теплоты, гарантирующее осуществление фазового перехода метанола из газообразного состояния в жидкое. Это количество равно 2.69 МДж, если количество циркулирующего в системе метанола равно 2.4 кг. Производится приближенный расчет, чтобы проверить возможности построенного нами конденсатора. Отводимая от метанола тепловая мощность должна быть равна 149 Вт.

Для расчета коэффициента теплоотдачи $\alpha = \frac{Nu_D \lambda}{D}$ сначала определяется число Нуссельта (для горизонтальных цилиндров, [65], Крэйт): $(T_p - T_{ag}) = 5^\circ\text{C}$;

$$Nu^D = 0.53(Gr^D Pr)^{1/4},$$

$$\text{где } Gr^D = \frac{g\beta(T_p - T_{ag})L^3}{\nu^2},$$

$$Pr = 5.4, \lambda = 0.615 \text{ Вт/м}^\circ\text{К [65]}.$$

В результате получается коэффициент теплоотдачи $\alpha = 51 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \text{ К})$, то есть через всю поверхность трубок удельный поток отводимого тепла будет равен 42 Вт/м^2 .

Испаритель и холодильная камера

Испаритель имеет форму параллелепипеда высотой 10 см, шириной 10 см и длиной 37 см, он вмещает в себя 3.7 литров метанола. Испаритель помещен в аналогичный резервуар с несколько большими размерами, в котором находилось 5 литров воды. Стенки холодильной камеры (Рисунок 2.11) сделаны из материала ПВС и имеют слой изоляции толщиной 7 см, изготовленной из пенополистирола.



Рисунок 2.11. Холодильная камера

Описав все составляющие части экспериментальной установки, уточняется теоретическое количество льда, которое можно на ней получить, принимая во внимание массу и удельную теплоемкость воды, метанола и металла, использованного в испарителе.

Записывается уравнение энергобаланса:

$$m_{ag} c_{ag} \Delta T + m_{ag} L_{ag} + m_{Fe} c_{Fe} \Delta T + m_{met} c_{met} \Delta T = m_{met} L_{met}, \quad (2.3)$$

где m_{ag} — масса воды, находящейся в холодильной камере;

c_{ag} — удельная теплоемкость воды;

m_{met} — масса метанола, находящегося в испарителе;

L_{met} — теплота фазового перехода метанола из жидкого состояния в газообразное;

L_{ag} — теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в лед;

c_{met} — удельная теплоемкость метанола;

m_{Fe} — масса металла;

c_{Fe} — удельная теплоемкость металла.

Из уравнения 2.3 получается значение искомой неизвестной:

$$m_{ag} = \frac{(m_{met} L_{met} - m_{met} c_{met} \Delta T - m_{Fe} c_{Fe} \Delta T)}{L_{ag} + c_{ag} \Delta T} \approx 5.4 \text{ кг} \quad (2.4)$$

2.4 Результаты проведенных экспериментов

В этом разделе представлены характерные результаты измерений, полученных в течение нескольких лет работы исследовательской группы.

Установка 2 Chola и Cholada, сравнение экспериментальных результатов

Анализируя работу двух одинаковых по конструкции экспериментальных установок, исследуется изменение температур во времени во всех элементах установки.

На приведенном ниже графике (Рисунок 2.12) представлены измерения, произведенные с 14 по 17 февраля 2011 года на образце холодильника, построенного в г. Санто-Доминго. Измерения температуры производились

каждые 5 минут, таким образом, в течение 24 часов сделано 288 измерений. Как было показано выше, температуры в прототипе, построенном в Санто-Доминго, измерялись при помощи семи термопар, установленных в следующих местах: на поверхности каждого цилиндра адсорбера, на поверхности испарителя, на поверхности резервуара с водой, внутри холодильной камеры, в конденсаторе и снаружи, в непосредственной близости от холодильной камеры.

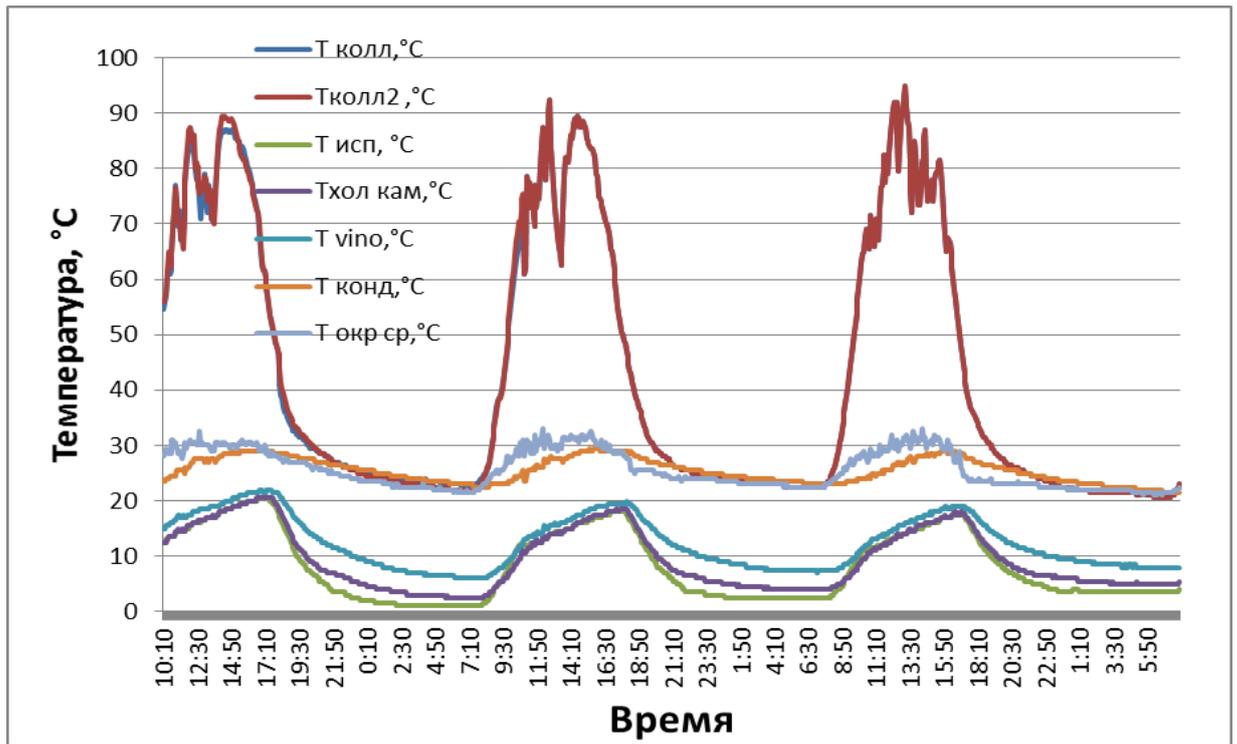


Рисунок 2.12. Графики температур, полученные с 14 по 17 февраля 2011, Доминикана

На Рисунке 2.12 представлены семь температурных кривых. Три нижние кривые соответствуют температурам, измеренным в холодильной камере, а две верхние — температурам цилиндров адсорбера, оставшиеся две соответствуют температурам конденсатора и окружающей среды. На оси абсцисс представляется время суток, соответствующее показанному на графике измерению, по оси ординат — температура. Максимальные температуры в солнечном коллекторе достигаются в промежутке 13-14 часов по времени г. Санто-Доминго. Начало повышения температуры солнечного коллектора является началом процесса десорбции метанола из активированного угля. Первая точка на графике соответствует 10 часам утра в г. Санто-Доминго 14 февраля 2011 года.

Если сравнивать представленные графики измеренных температур по времени с термодинамическим циклом, приведенным в предыдущей главе, то можно заметить, что процесс изостерического нагревания соответствует кривым в промежутке времени примерно с 5 до 10 часов утра, после этого с 10 до 15 часов следует процесс десорбции, с 15 до 17 часов идет изостерическое охлаждение, и с 17 часов происходит процесс адсорбции. На основании многочисленных экспериментов сделан вывод, что процесс адсорбции продолжается, как правило, более 12 часов, и в большинстве случаев прекращается только потому, что после восхода солнца начинается медленный нагрев адсорбера. Это означает, что активированный уголь не адсорбировал весь метанол, который может адсорбировать при имеющихся температурах в коллекторе.

Температуры, измеренные на поверхности каждого цилиндра адсорбера, различаются незначительно, различие составляет 2-5°C. Температура окружающей среды в течение всего цикла очень близка к температуре конденсатора, при этом примерно до 17 часов температура окружающей среды была на 3-5°C выше, чем температура конденсатора, а после 17 часов на 1-2°C ниже температуры конденсатора. В холодильной камере были установлены три термопары:

1. первая находилась на внешней поверхности испарителя и была погружена в воду, данные этой термопары - это температура испарителя;
2. вторая находилась на внешней поверхности резервуара с водой, при полном контакте со стенкой резервуара и окруженной воздухом, ее данные - это температура холодильной камеры;
3. последняя термопара находилась внутри холодной камеры, в 5-6 см от одной из боковых стенок камеры, и была полностью окружена воздухом.

Проанализировав температурные данные, полученные с термопар, расположенных в холодильной камере отмечено, что формы всех кривых приблизительно одинаковы. Термопара, установленная в непосредственном контакте с испарителем, регистрирует самые низкие температуры; температура,

зарегистрированная термопарой, помещенной на внешней стенке резервуара с водой, на $1 - 1.5$ °С, а температура, измеренная внутри холодильной камеры, — на $4 - 6$ °С выше, чем температура испарителя. Эти различия в измеренных температурах в холодильной камере имеют место на этапе генерации холода, то есть примерно с 17 часов вечера до 6-7 часов утра следующего дня. В остальное время цикла разница между температурой испарителя и температурой внутри холодильной камеры не превышает $2-3$ °С, а разница между температурой испарителя и температурой внешней стенки резервуара с водой просто исчезает, более того, в начале процесса десорбции температура испарителя становится на 1 °С выше.

Эти результаты вместе с наблюдаемым резким повышением измеряемых температур в холодильной камере приводят к следующей гипотезе: из-за отсутствия перекрывающего клапана часть газообразного метанола в процессе десорбции попадает в испаритель и в нем конденсируется. При этом теплота фазового перехода отдается метанолу, находящемуся в испарителе, и окружающей его воде. Сделанное наблюдение ставит под сомнение выводы авторов работы [66] о том, что наличие или отсутствие клапана в СХАТ не влияет на работу установки. Ниже приводятся дополнительные аргументы в пользу сформулированной гипотезы.

В Доминиканской Республике в ходе экспериментов записывались результаты измерения температур в указанных семи точках. На Рисунке 2.13 представлены температуры окружающей среды, испарителя и солнечного коллектора, измеренные во время экспериментов с 25 по 31 января 2011 года. Экспериментальные кривые, представленные на Рисунке 2.13, ведут себя подобно тем, что приведены на Рисунке 2.12. Замечено, что во время процесса адсорбции, относящемуся к циклу, начавшемуся 28 января, минимальная температура, зарегистрированная в испарителе, была 2.5 °С. Эта температура поддерживалась в испарителе с 0:30 часов по 9:10 в течение почти 9 часов, а в 8 часов утра при открытии крышки холодильной камеры наблюдалось наличие льда, приблизительно 0.5 кг.

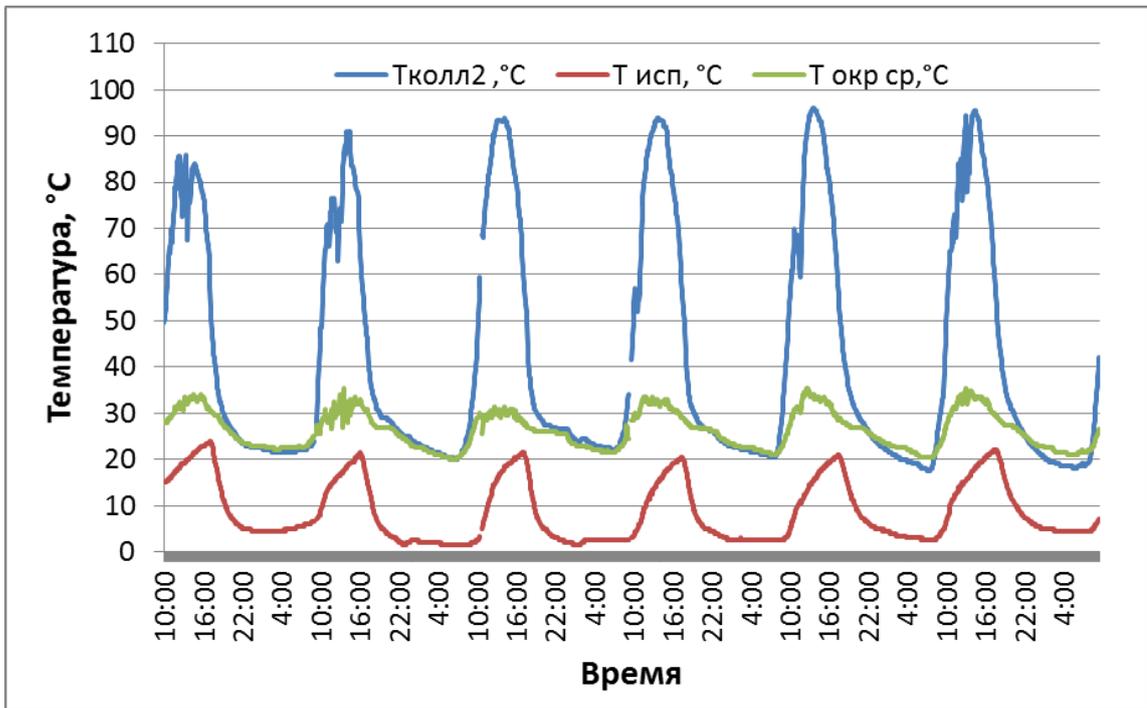


Рисунок 2.13. Графики температур, полученные с 25 по 31 января 2011, Доминикана

На Рисунках 2.14 и 2.15 представлены экспериментальные циклы 7-11 февраля 2011 года и 12-16 октября 2011 года. Эти рисунки аналогичны рисункам 2.12 и 2.13. На основании этого наблюдения можно констатировать стабильную работу экспериментальной установки.

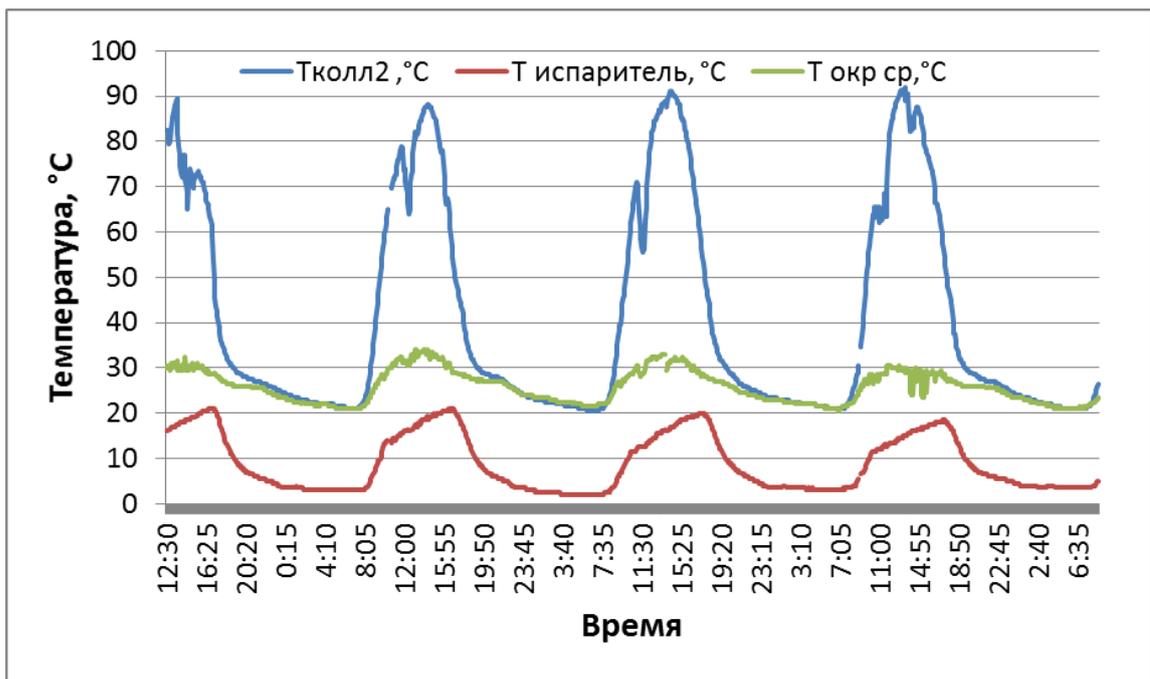


Рисунок 2.14. Графики температур, полученные с 7 по 11 февраля 2011, Доминикана

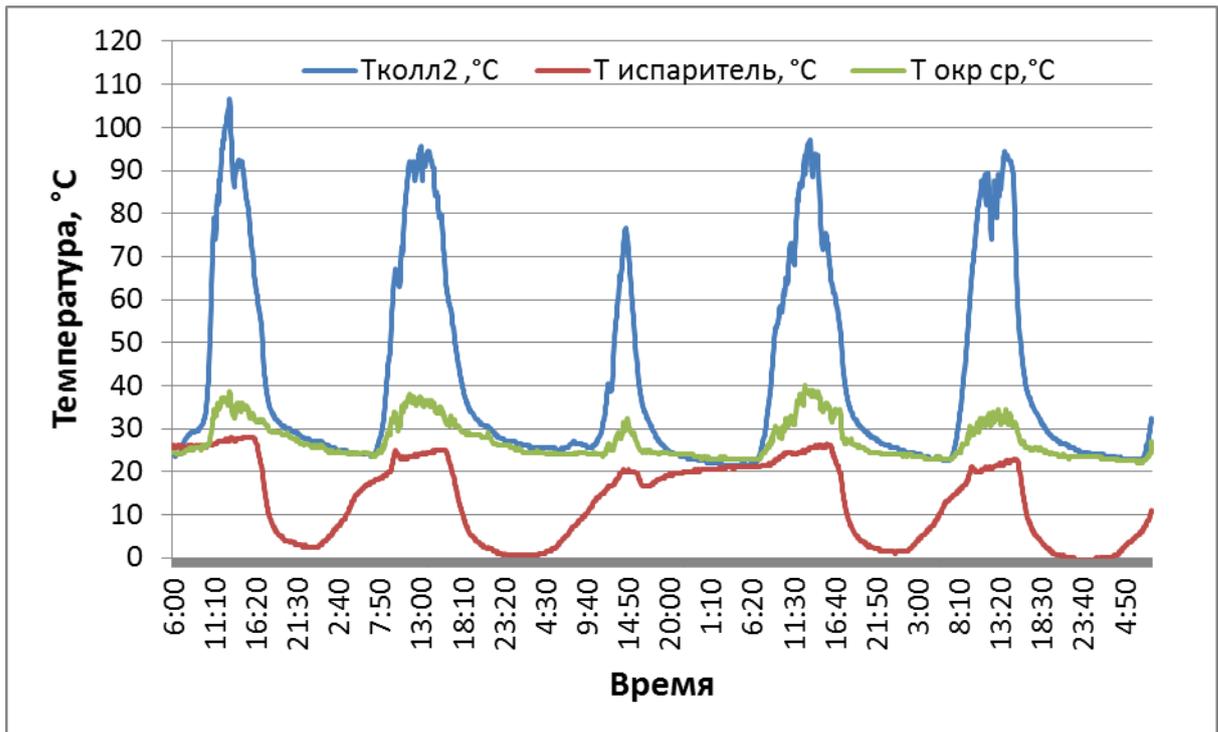


Рисунок 2.15. Графики температур, полученные с 12 по 16 октября 2011, Доминикана

На графиках, представленных на рисунке 2.14, наблюдается 4 рабочих цикла установки (первое представленное измерение соответствует 12:30 часам 7 февраля), а на графиках, представленных на рисунке 2.15, наблюдается 5 рабочих циклов установки (первое измерение соответствует 6:00 часам 12 октября 2011 года). Замечено, что чем выше температура, достигаемая в солнечном коллекторе в дневные часы, и чем больше промежуток времени, в течение которого поддерживаются высокие температуры (выше 85 - 95°C), тем ниже температура испарителя во время процесса адсорбции, и тем дольше длится сам процесс адсорбции, в течение которого производится холод. И, наоборот, при невысоких температурах, зарегистрированных в адсорбере в дневное время цикла, при снижении солнечной радиации процесс адсорбции в испарителе сопровождается менее заметным охлаждением.

Например, во время рабочего цикла 14 октября наблюдается, что температура солнечного коллектора не достигает значения 80 °C, и поэтому при снижении температуры коллектора в испарителе практически не происходит охлаждения.

Это обусловлено тем, что в течение этапа регенерации адсорбента десорбировалось недостаточное количество метанола. Для обсуждаемого графика минимальные температуры и наибольшая длительность процесса адсорбции были достигнуты в циклах 13 и 16 октября.

На рисунках 2.16 и 2.17 представлены экспериментальные циклы 18-24 октября 2011 года и 12-15 декабря 2011 года. Для этих циклов также применимы анализ и комментарии, сделанные выше. Наблюдается устойчивая работа установки, и замечено, что в циклах 12-15 декабря достигнуто меньшее охлаждение ввиду того, что температуры коллектора не были достаточно высокими и были подвергнуты значительным колебаниям в течение фазы регенерации активированного угля.

Минимальные температуры, зарегистрированные в испарителе ($-1.5 - +0.5^{\circ}\text{C}$), приходятся на циклы 13,15,16 и 20 октября и поддерживаются в течение нескольких часов. Для этих же циклов достигается максимум температур в солнечном коллекторе 100°C .

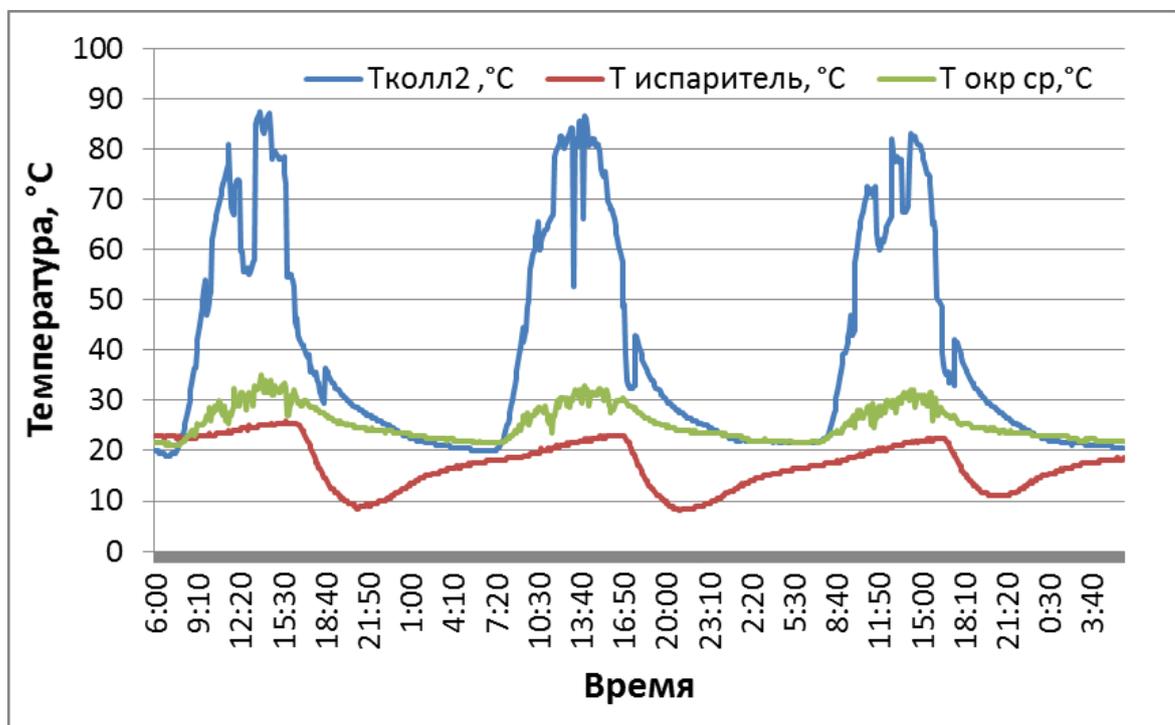


Рисунок 2.16. Графики температур, полученные с 12 по 15 декабря 2011, Доминикана

Наблюдения и анализ работы экспериментальной установки в г. Санто-Доминго говорят о том, что нужно исследовать зависимость температуры солнечного коллектора от падающей солнечной радиации, а также определять количество адсорбированного метанола для каждого экспериментального цикла. Это позволит лучше понять процессы, происходящие в СХАТ, и улучшить характеристики установки.

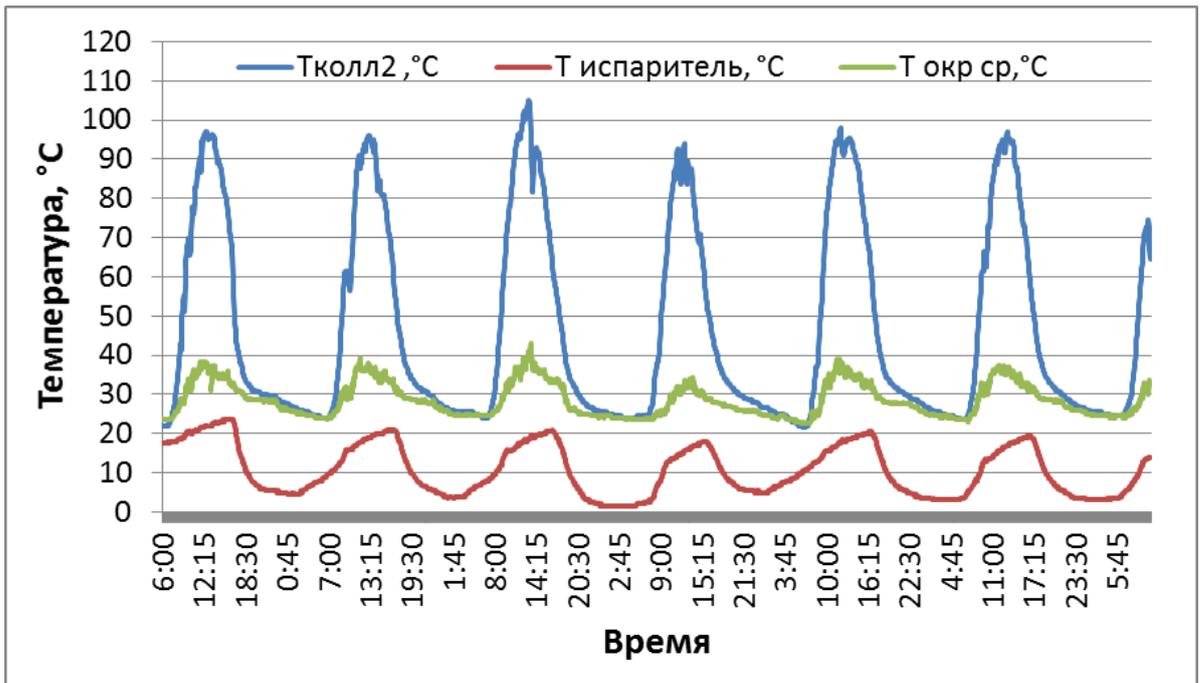


Рисунок 2.17. Графики температур, полученные с 18 по 24 октября 2011, Доминикана

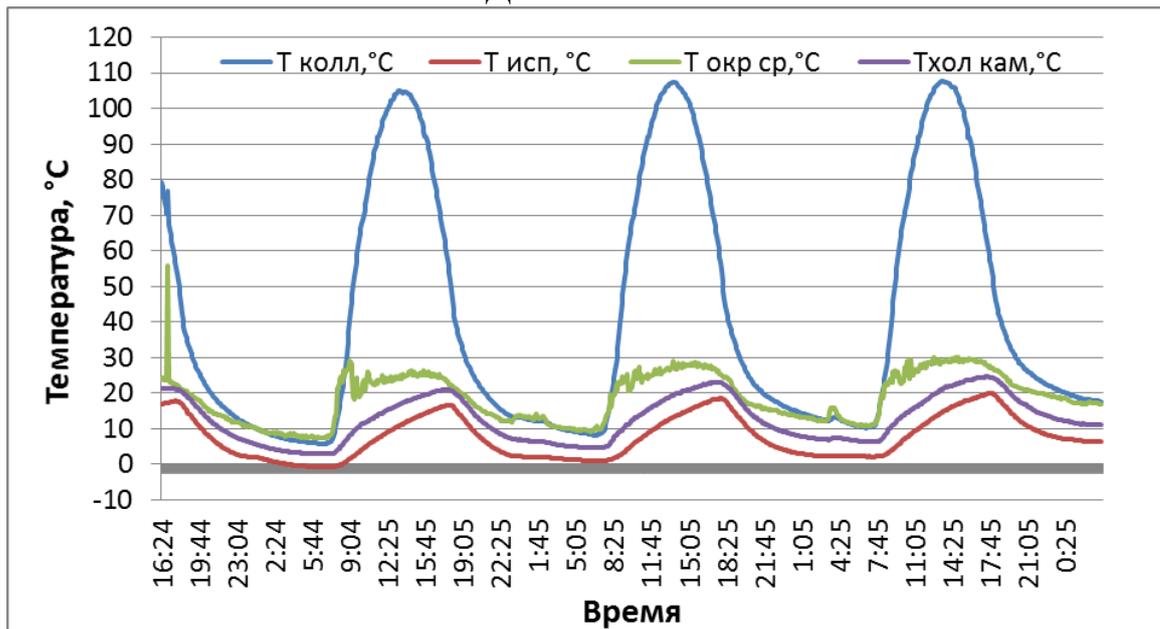


Рисунок 2.18. Графики температур, полученные с 18 по 21 января 2011, Аргентина

На приведенном графике (Рисунок 2.18) представлены измерения, выполненные на установке, построенной в Аргентине. Характер кривых не изменился, но при этом температуры коллектора, достигнутые в доминиканском прототипе, ниже, чем в аргентинском.

2.5 Построение зависимости, связывающей солнечную радиацию и температуру поверхности солнечного коллектора

Для установления зависимости между интенсивностью солнечного излучения и эффективностью работы СХАТ было проведено исследование кривых солнечной радиации, измеренной в непосредственной близости от установки (как в Аргентине, так и в Доминикане) и кривых температуры, измеренной на поверхности адсорбера. На Рисунке 2.19 представлена почасовая солнечная радиация, измеренная в г. Санто-Доминго с 13 по 16 мая 2011 года, а на Рисунке 2.20 представлены температура поверхности солнечного коллектора и температура окружающей среды, измеренные на доминиканском образце в эти же дни.

Сравнивая графики солнечной радиации и температуры на поверхности цилиндра солнечного коллектора, было замечено абсолютное сходство в форме кривых. Различие составляет частота колебаний измеряемых величин: значения солнечной радиации колеблются с более высокой частотой (при появлении облачности), чем значения температуры поверхности солнечного коллектора. Это вполне объясняется инерцией солнечного коллектора.

Предполагая линейную зависимость между разницей температур поверхности коллектора и температурой окружающей среды и солнечной почасовой радиации, были проанализированы температурные кривые и кривые солнечной радиации за длительный период работы установки.

На основе этого анализа была определена эмпирическая зависимость между солнечной радиацией и температурой коллектора, которая с погрешностью примерно в 10% давала удовлетворительное совпадение с экспериментальными

кривыми, полученными на идентичных по геометрии установках в Доминиканской Республике и в Аргентине:

$$T_{col} = 0.06\overline{Rad} + T_{amb} , \quad (2.5)$$

где \overline{Rad} - осредненное по времени значение солнечной радиации.

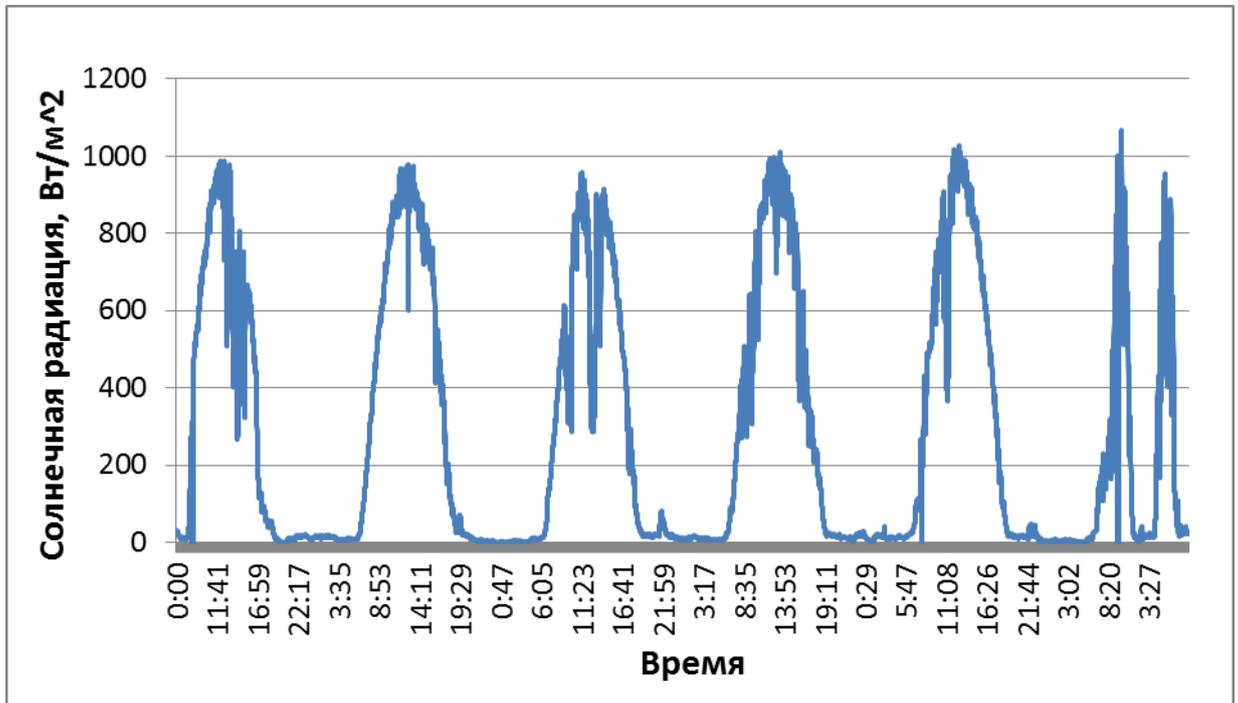


Рисунок 2.19. Измерения солнечного излучения 13-16 мая 2011 года, Доминикана

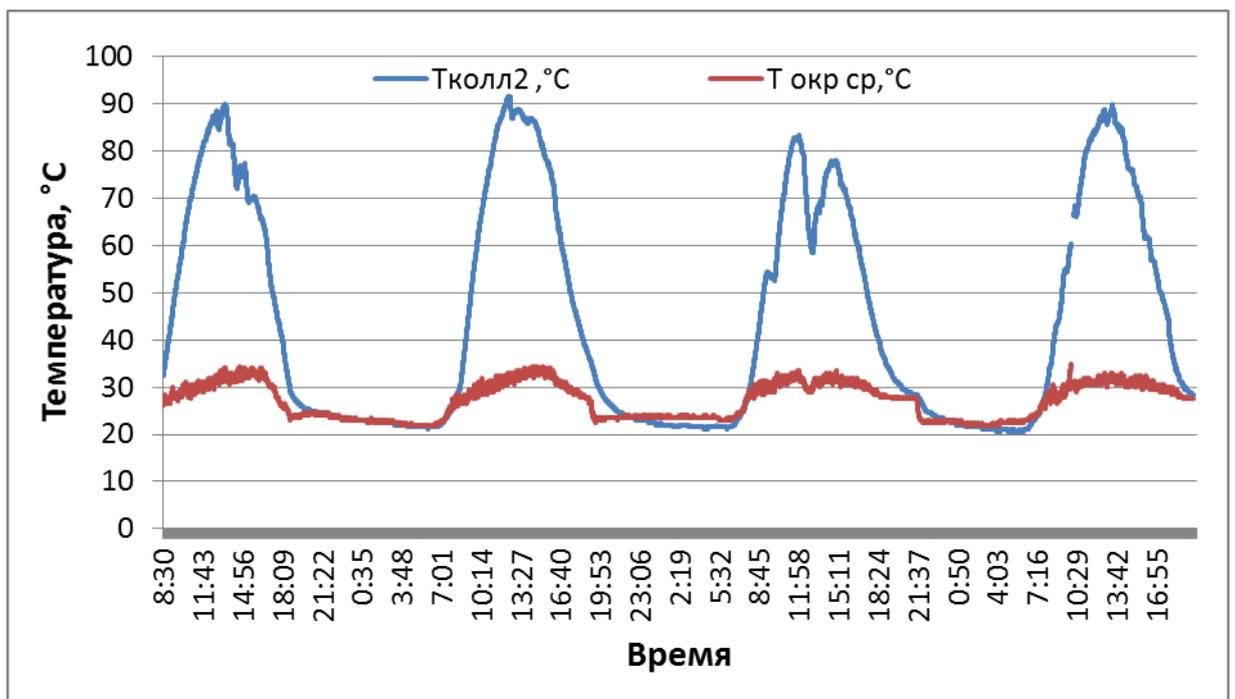


Рисунок 2.20. Измерения температуры коллектора 13-16 мая 2011 года, Доминикана

Осредненное значение \overline{Rad} рассчитывалось следующим образом для последовательных во времени измерений:

$$(\overline{Rad}(J)) = \frac{1}{J} * (Rad(1) + Rad(2) + \dots + Rad(J + 1)) \quad (2.6)$$

На рисунке 2.21 приводятся экспериментальная температурная кривая и теоретическая, построенная с помощью найденной эмпирической зависимости.

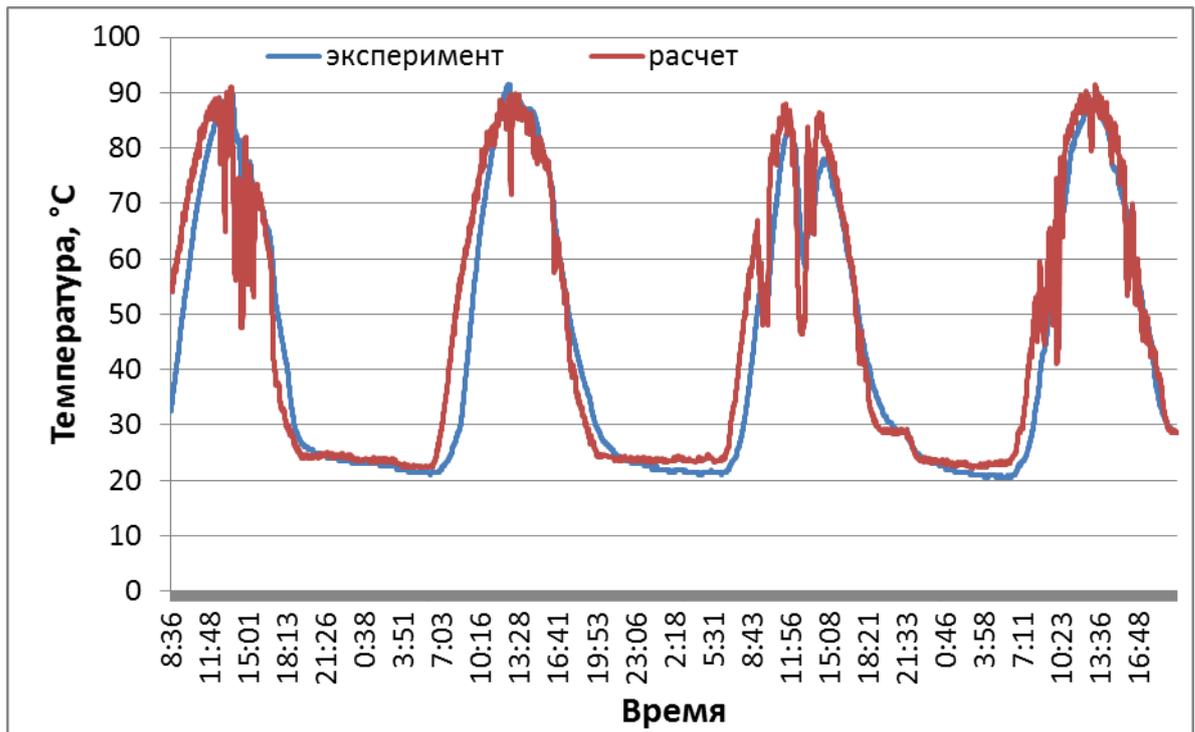


Рисунок 2.21. Расчетная и экспериментальная температуры поверхности коллектора 13-16 мая 2011, Доминикана

Установка 1 Cholita. Экспериментальные результаты

Чтобы исследовать влияние температуры конденсатора на холодопроизводительность установки при одинаковых температурах коллектора, была произведена серия экспериментов. Для поддержания постоянной температуры в коллекторе был использован комбинированный подвод тепла: с помощью солнечной энергии и с использованием электрического подогревателя. Конденсатор помещался в резервуар с водой, температура которой поддерживалась постоянной в течение каждого эксперимента. Конденсированный

метанол поступал в цилиндрический резервуар, сообщающийся с тонкой стеклянной трубкой, в которой наблюдался уровень жидкого метанола.

На рисунке 2.22 представлено количество десорбированного метанола во времени для разных температур конденсатора. При этом поддерживалась температура солнечного коллектора $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на оси абсцисс представлено время, на оси ординат — количество десорбированного метанола, выраженного в высоте столба метанола в испарителе). Нижняя линия соответствует измерениям, произведенным при температуре конденсатора $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя — при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхняя — при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдается следующая закономерность: при снижении температуры конденсатора с 40°C до 20°C количество десорбированного метанола увеличивается почти на 40%. Это объясняется тем, что количество произведенного холода при каждом цикле зависит от количества циркулирующего в системе метанола, которое в свою очередь, зависит от давления паров в конденсаторе.

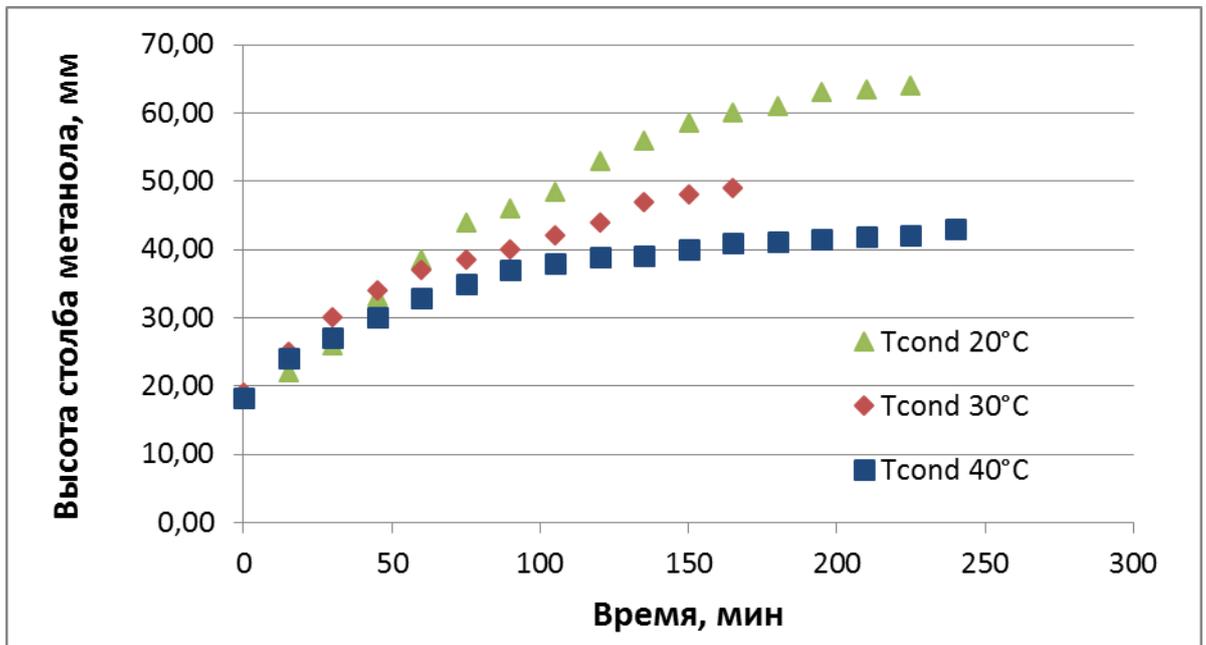


Рисунок 2.22. Количество десорбированного метанола во времени

На Рисунке 2.23 представлена зависимость количества десорбированного метанола от времени, полученная при проведении следующего эксперимента: в течение примерно 6.5 часов температура солнечного адсорбера поддерживалась $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура конденсатора — $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4.5 часов. После того, как

перестало меняться количество десорбированного метанола, была резко снижена температура воды в конденсаторе (до 20 °С), и за 2 часа было зарегистрировано увеличение количества десорбированного метанола, примерно на 20 %.

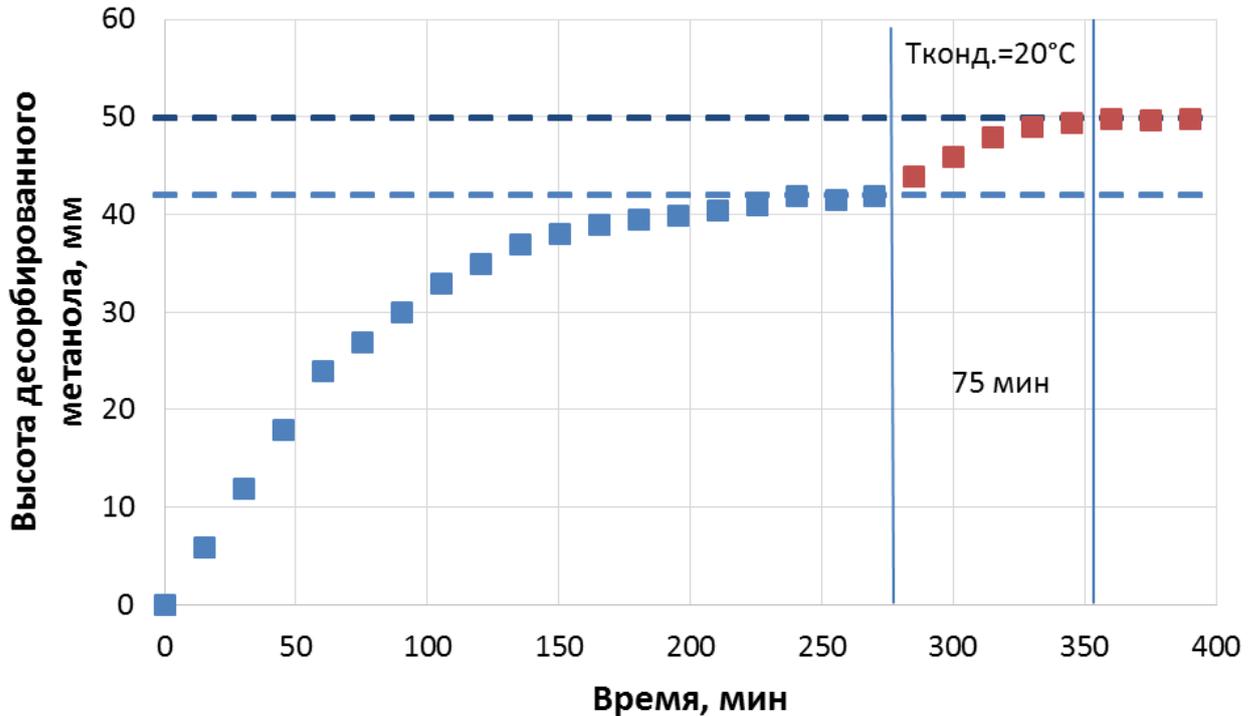


Рисунок 2.23. Количество десорбированного метанола во времени

Данный результат позволяет достаточно точно оценить длительность фаз работы установки. Таким образом, даже кратковременное охлаждение конденсатора в заключительной части процесса десорбции может существенно изменить холодопроизводительность установки.

На Рисунке 2.24 представлена температура испарителя, измеренная в течение процесса адсорбции. Измерения начались в 20:30 (г. Буэнос-Айрес) и регистрировались каждые 5 минут. На этом графике наблюдается, что в течение примерно 3 часов происходил процесс охлаждения в испарителе, и в течение следующих 7 часов происходил процесс замерзания воды при практически постоянной температуре в испарителе.

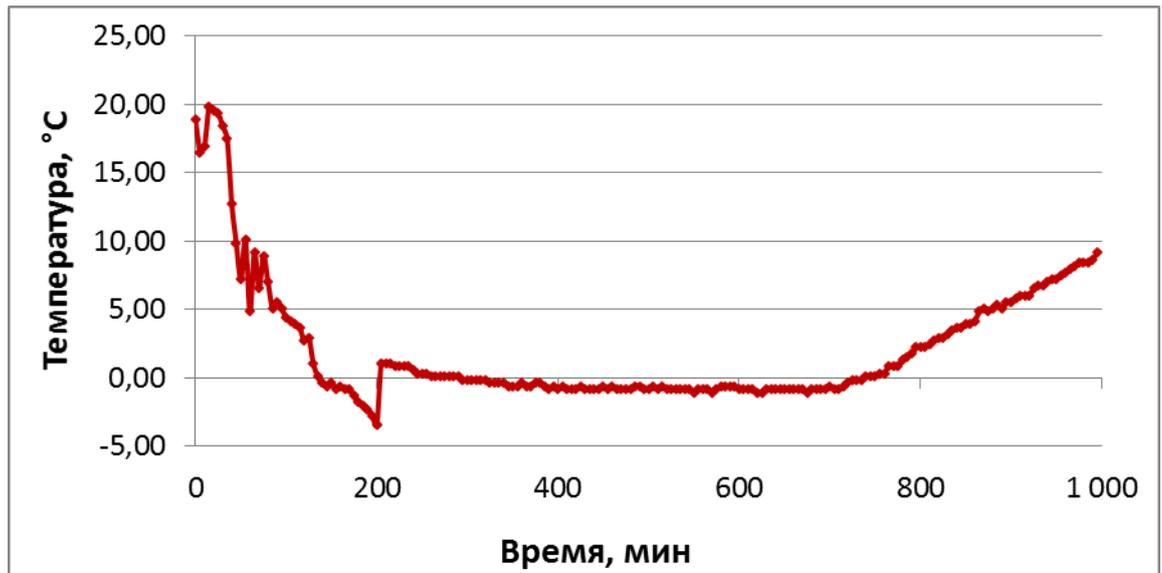


Рисунок 2.24. Температура испарителя во времени, измеренная в Аргентине

2.6 Анализ экспериментальных результатов во время процесса адсорбции

Как было замечено выше, в построенных в Аргентине и в Доминиканской Республике прототипах, испаритель сообщается с тонкой стеклянной трубкой, в которой можно наблюдать уровень жидкого метанола. Процесс десорбции происходит в дневное время суток, поэтому не представляет особой сложности визуальное регистрирование уровня метанола в испарителе, что нельзя сказать о процессе адсорбции. Процесс адсорбции начинается примерно в 17 часов и может длиться более 12 часов, что делает невозможным наблюдение во времени уровня метанола в испарителе в течение этого процесса. В связи с этим возникает необходимость произвести расчет количества адсорбированного метанола на основе данных об измеренных температурах в испарителе, внутри холодильной камеры и температуры окружающей среды.

Измеренные температуры регистрировались автоматически на компьютере в Аргентине и на регистрирующем устройстве в Доминикане, поэтому имеется полный набор данных по температуре для всех экспериментальных циклов. Для составления уравнения энергобаланса холодильной камеры необходимо оценить теплопритоки в холодильную камеру из окружающей среды. Эти теплопритоки в данном случае являются потерями, иными словами часть теплоты фазового

перехода при испарении метанола не используется на производства холода, а затрачивается на компенсацию тепловой энергии, поступающей в холодильную камеру из окружающей среды.

Теоретический расчет и экспериментальная оценка этих тепловых потерь подробно описывается в работе автора [64].

Для определения количества тепла, подводимого в холодильную камеру из окружающей среды, учитывается коэффициент теплопроводности и толщина изоляции, а также средняя площадь поверхности камеры: $\lambda = 0.05 \text{ Вт/м}^2$, $\delta = 7 \text{ см}$ и $A = 0.98 \text{ м}^2$. Определяется коэффициент передачи тепла через всю поверхность холодильной камеры с учетом площади поверхности теплообмена, который был назван коэффициентом тепловых потерь: $k_n = k F \sim 0.71 \text{ Вт/К}$. В течение каждого эксперимента измерялись температуры внутри холодильной камеры и снаружи, в непосредственной близости от нее. Имея эти измерения, выполненные каждые 5 минут, можно рассчитать количество теплоты, внесенное в холодильную камеру извне для каждого промежутка времени:

$$Q_{\text{perd}} = k F (T_{\text{amb}} - T_{\text{cam}}) \Delta t, \quad (2.7)$$

где k – коэффициент теплопередачи, F – площадь теплообменной поверхности, T_{cam} , T_{amb} температуры внутри и снаружи холодильной камеры, Δt - промежуток времени, в течение которого производились измерения.

Интегрируя по всему интервалу времени, в течение которого длится процесс адсорбции, получается общее количество энергии, равное тепловым потерям в холодильной камере.

Также на основе экспериментальных данных была произведена оценка коэффициента потерь в холодильной камере. После завершения цикла работы холодильной установки в определенный момент утром процесс адсорбции прекращается, а, следовательно, прекращается и генерация холода. Чтобы избежать нагревания адсорбера и процесса десорбции, был закрыт солнечный адсорбер, и измерялись температуры холодной камеры и окружающей среды (в

непосредственной близости от внешней стенки камеры). Используя закон Ньютона-Рихмана, по построенному графику $\ln(T_{cam} - T_{amb}) - t$ был определен коэффициент тепловых потерь в холодильной камере; он равен $k \sim 0.69$ Вт/К, [64]. Сравнивая экспериментальное значение коэффициента тепловых потерь с его расчетным значением, определяется погрешность измерения, составляющая примерно 3%.

Расчет количества адсорбированного метанола

На основе результатов экспериментальных измерений рассчитывается количество адсорбированного метанола для различных моментов времени. Для этого составляется уравнение энергетического баланса для холодильной камеры для конечного интервала времени, учитывая потери в окружающую среду:

$$Q_{perd} - (m_{ag}c_{ag} + m_{Fe}c_{Fe} + m_{met}c_{met})(T_{ev,f} - T_{ev,i}) = m_{adsmet}L_{met}, \quad (2.8)$$

где: m_{ag} - масса воды, находящейся в холодильной камере; c_{ag} - удельная теплоемкость воды; m_{adsmet} - масса адсорбированного метанола, испарившегося из холодильной камеры в течение короткого интервала времени между двумя последовательными измерениями температур; m_{met} - масса находящегося в испарителе метанола, эта величина меняется от измерения к измерению; L_{met} - теплота фазового перехода метанола из жидкого состояния в газообразное; c_{met} - удельная теплоемкость метанола; m_{Fe} - масса металла; c_{Fe} - удельная теплоемкость металла; $T_{ev,i}, T_{ev,f}$ - температура испарителя, измеренная в начале и в конце обсуждаемого временного интервала соответственно.

Тепловые потери для каждого интервала времени определялись по 2.7. Из уравнения 2.4 определяется масса адсорбированного метанола в течение каждого интервала времени между двумя последовательными измерениями:

$$m_{adsmet} = \frac{(k(T_{amb} - T_{cam})\Delta t - (m_{ag}c_{ag} + m_{Fe}c_{Fe} + m_{met}c_{met})(T_{ev,f} - T_{ev,i}))}{L_{met}}, \quad (2.9)$$

На основе полученных измерений был произведен расчет количества адсорбированного метанола для различных моментов времени. На Рисунке 2.25 представлены результаты измерений, произведенных на установке в Аргентине, и на Рисунке 2.26 показана зависимость количества адсорбированного метанола, полученная расчетных путем на основе представленных измерений.

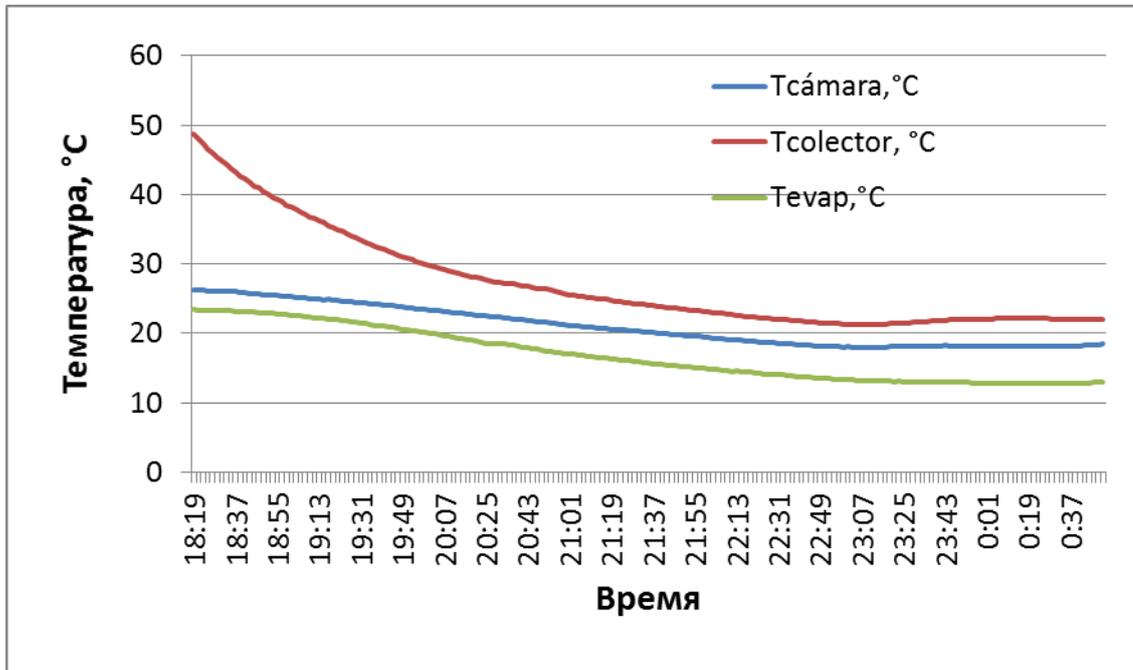


Рисунок 2.25. Графики температур во времени, измеренные 02.03.2011, процесс адсорбции, Аргентина

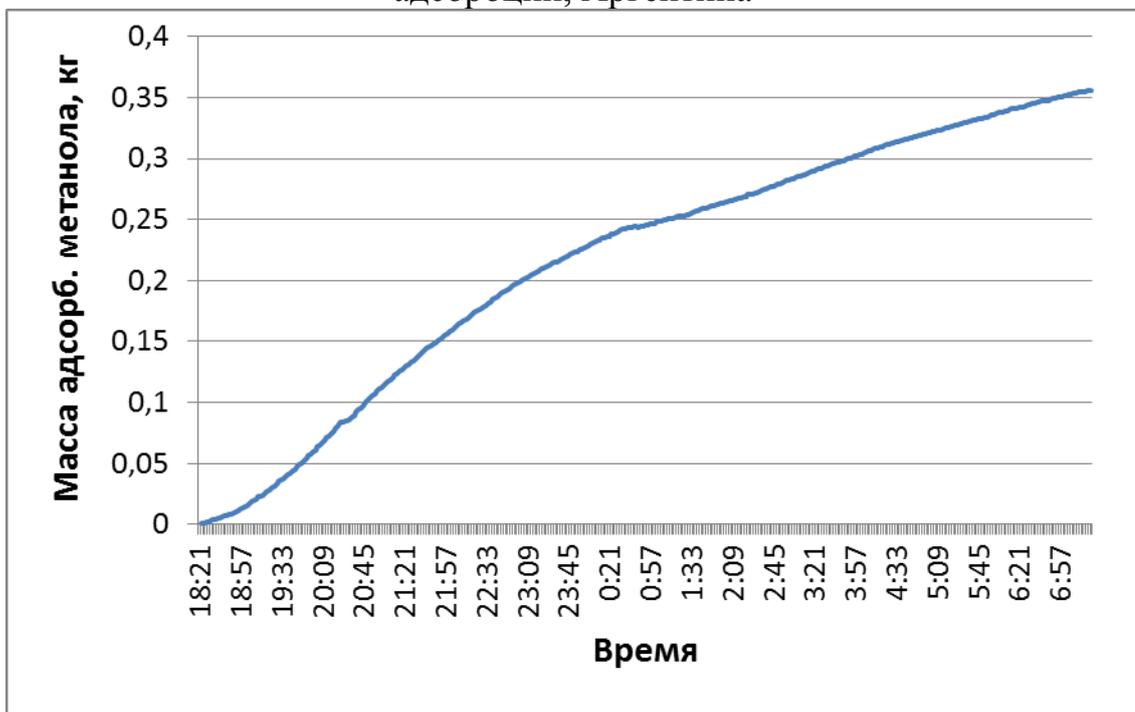


Рисунок 2.26. Расчетное количество адсорбированного метанола, цикл 02.03.2011, Аргентина

Измерения были сделаны 02 марта 2011 года, наблюдалось, что процесс адсорбции начался 18 часов по времени г. Буэнос-Айреса, минимальная температура, зарегистрированная в испарителе составляла 3°C при минимальной температуре окружающей среды 3°C. Общее количество адсорбированного метанола в течение этого цикла составило по расчетам 0.36 кг, в то время как измеренное количество, на основе наблюдения уровня метанола в 8 часов 02 марта и 8 часов 3 марта дает значение 0.34 кг. Отличие расчета и измерений составляет примерно 1.5%. Полученное удовлетворительное совпадение между рассчитанным и измеренным количеством адсорбированного за ночь метанола позволяет сделать вывод о достоверности приведенного метода расчета количества адсорбированного метанола для любого момента времени на основе измеренных температур.

Аналогичная процедура расчета была проведена для экспериментальных данных, полученных на образце СХАТ в Доминиканской Республике

На Рисунке 2.27 представлены результаты измерений температур, произведенных на установке в Доминиканской Республике 14 февраля 2011 года,

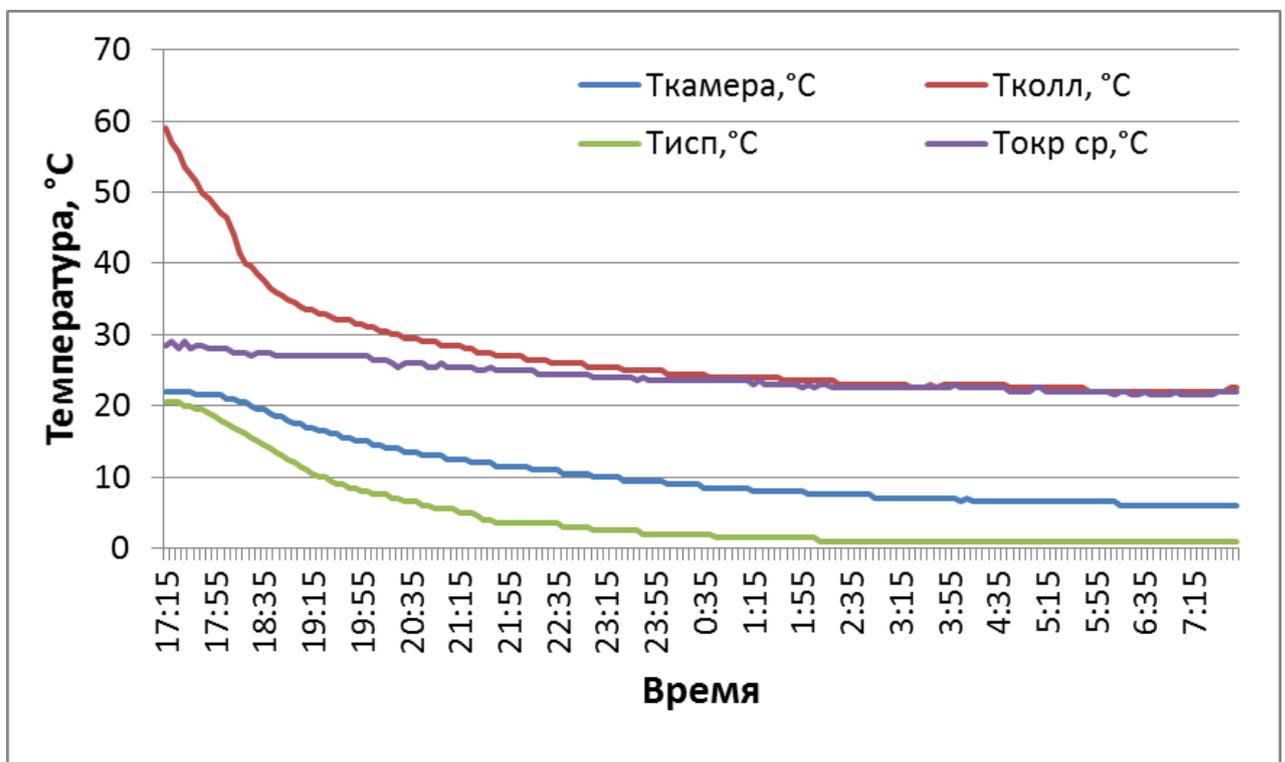


Рисунок 2.27. Графики температур во времени, измеренные 14.02.2011, процесс адсорбции, Доминикана

На Рисунке 2.28 показана зависимость количества адсорбированного метанола во времени, полученная расчетных путем на основе представленных измерений.



Рисунок 2.28. Расчетное количество адсорбированного метанола, цикл 14/02/2011, Доминикана

Из графиков видно, что в течение всего времени поддерживается значительная разница температур между температурой окружающей среды и температурой в испарителе от 9°C до 22 °C. Процесс адсорбции метанола начинается каждый день около 17 часов, в это же самое время начинается процесс охлаждения в испарителе и холодильной камере. Наблюдается, что количество адсорбированного метанола в доминиканском образце более чем в 2 раза превышает количество адсорбированного метанола в аргентинском прототипе.

Во время процесса десорбции наблюдаем, что при большей скорости охлаждения цилиндров коллектора происходит более быстрое охлаждение в испарителе, что говорит о большей скорости адсорбции метанола активированным углем.

Измерение параметров активированного угля. Погрешность измерения

На лабораторной установке фирмы BEISorp-Max (Япония) проведены экспериментальные исследования характеристик применяемых в СХАТ марок сорбентов. Были взяты семь образцов различных активированных углей и были получены изотермы адсорбции для каждого образца для следующих температур: $T = 20, 30, 40, 50, 60^{\circ}\text{C}$. Все полученные изотермы (5 изотерм для каждого исследуемого угля) представляют собой изотерму I типа согласно классификации БДТ (Рисунок 1.4).

На Рисунке 2.29 представлена изотерма активированного угля марки AguaSorb20 для температуры $T = 20^{\circ}\text{C}$, полученная на установке BEISorp-Max.

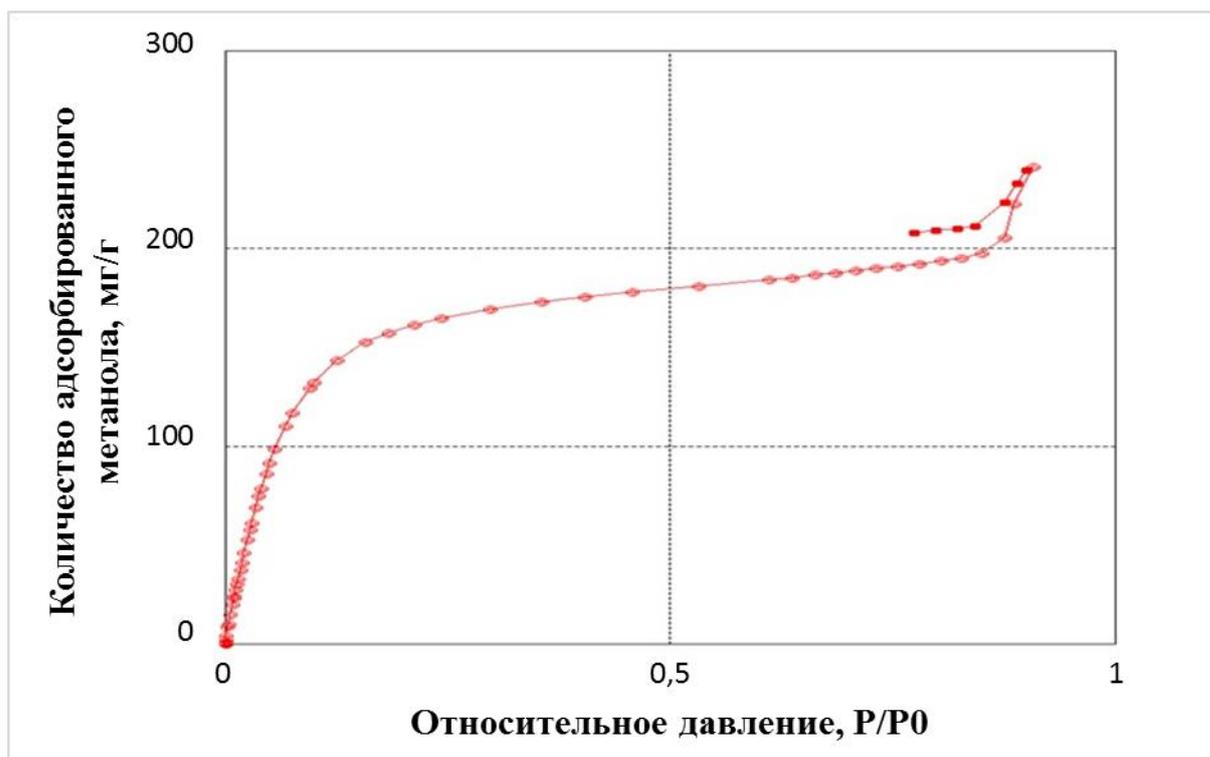


Рисунок 2.29. Изотерма адсорбции угля AguaSorb для $T=20^{\circ}\text{C}$. Эксперимент

На Рисунке 2.30 представлена экспоненциальная часть изотермы, которая может быть описана уравнением Дубинина-Астахова, а на Рисунке 2.31 представлены изотермы всех углей, для которых был проведен эксперимент ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

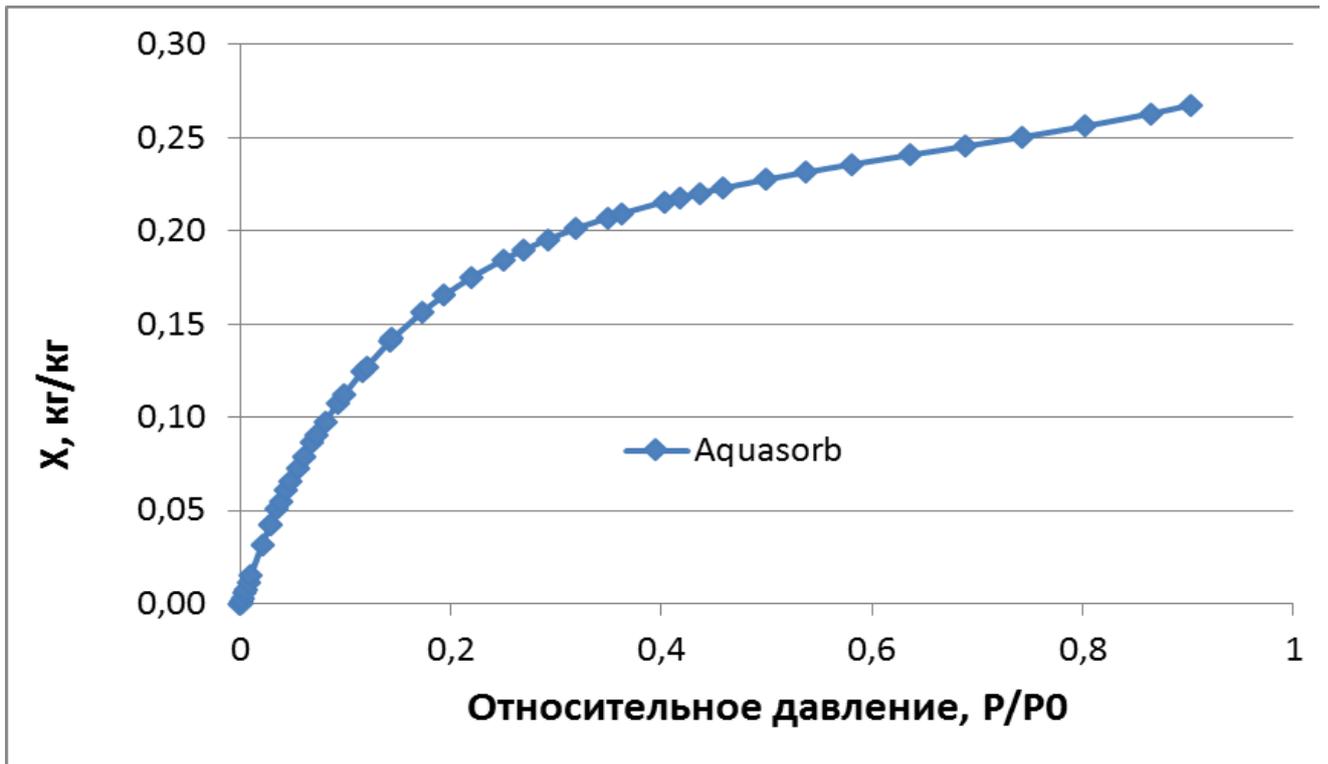


Рисунок 2.30. Изотерма адсорбции угля AquaSorb для $T = 20^\circ\text{C}$, полученная в эксперименте

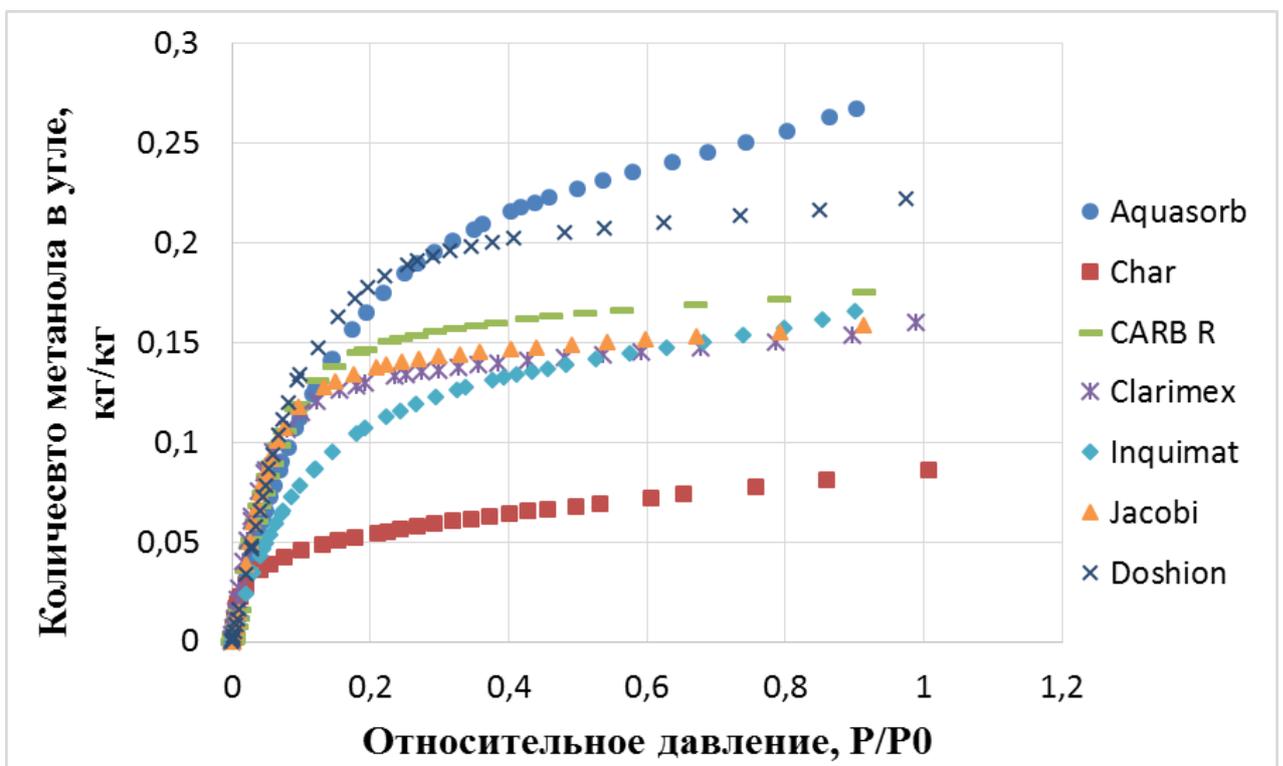


Рисунок 2.31. Экспериментальные изотермы адсорбции для различных углей, $T = 20^\circ\text{C}$

В диапазоне давлений, приближающихся к давлению насыщения метанола при температуре активированного угля, кривая изотермы достаточно резко поднимаются вверх, что говорит о процессе капиллярной конденсации. Эта часть кривой адсорбции не описывается моделью Дубинина-Астахова, но так как в исследуемой установке СХАТ рабочие относительные давления всегда находятся в экспоненциальной части изотермы сорбции, использование избранной модели считается оправданным.

При моделировании процесса работы СХАТ необходимо знать параметры уравнения Дубинина-Астахова X_0 , β и n , которые могут быть получены экспериментальным путем. Для получения параметров уравнения Дубинина-Астахова применялся следующий алгоритм:

- выбирались три точки на экспоненциальной части изотермы сорбции;
- для каждой точки записывалось уравнение Дубинина-Астахова:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{p}{p_0}))^n}; \quad (2.11)$$

- решалась система, состоящая из трех уравнений, и получались искомые параметры;

- полученные параметры подставлялись в уравнение Дубинина-Астахова, строилась теоретическая кривая адсорбции, и сопоставлялась с экспериментальной кривой.

Для всех полученных по описанному методу параметров уравнения Дубинина-Астахова были получены хорошие совпадения между теоретической и экспериментальной кривыми адсорбции с коэффициентами корреляции 0.998-0.999.

Следует заметить, что для каждой изотермы адсорбции получаемые параметры активированного угля незначительно зависели от выбора точек на экспериментальной кривой. Различие между значениями X_{max} , полученными для разных сочетаний выбранных точек на экспериментальной кривой адсорбции составляло не более 1.5%.

В качестве примера на Рисунке 2.32 представлены экспериментальная и теоретическая изотермы сорбции, полученные для угля AguaSorb ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

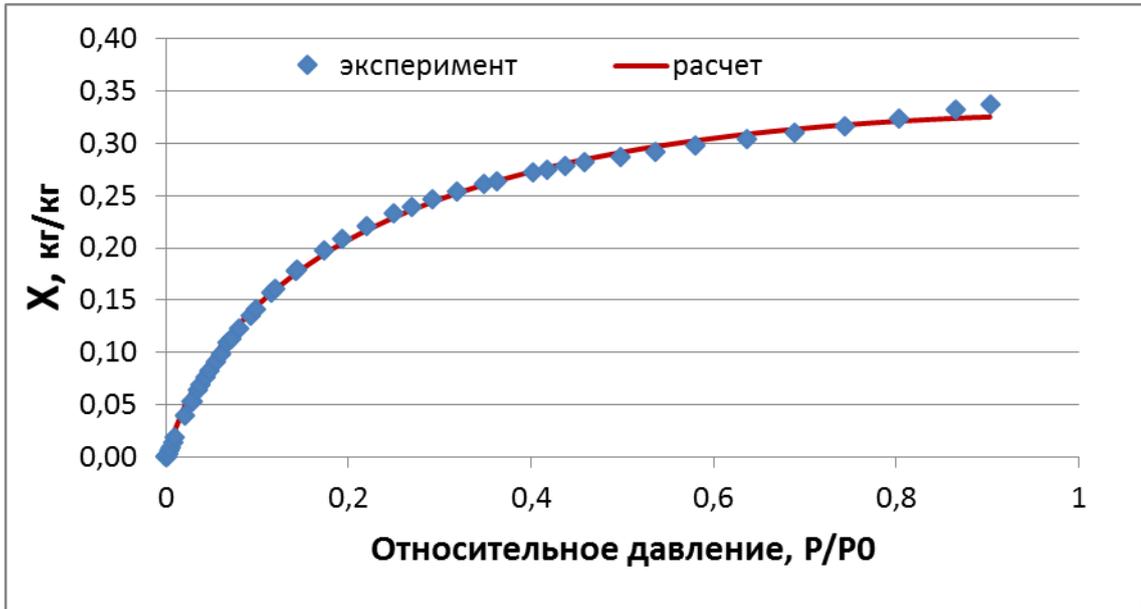


Рисунок 2.32. Сравнение расчетной и экспериментальной изотерм адсорбции угля AguaSorb для $T = 20^{\circ}\text{C}$

Показано (Таблица 2.3), что адсорбционная способность всех испытанных в экспериментах марок активированного угля относительно метанола подчиняется уравнению Дубинина-Астахова на большей части диапазона исследуемых относительных давлений.

Таблица 2.3
 Параметры уравнения Дубинина-Астахова измеренных активированных углей

Уголь	X_0	β	n
Doshion	0.212	$3.81 \cdot 10^{-8}$	2.482
Jacobi	0.151	$6.46 \cdot 10^{-9}$	2.68
Aguasorb	0.259	$1.92 \cdot 10^{-5}$	1.642
CarbonR	0.213	$4.45 \cdot 10^{-8}$	2.43
Clarimex	0.186	$1.61 \cdot 10^{-3}$	2.18
Inquimet	0.197	$1.36 \cdot 10^{-5}$	1.664
CHAR M	0.108	$2.06 \cdot 10^{-7}$	0.921

2.7 Выводы к главе 2

1. Были построены несколько экспериментальных образцов СХАТ, и удалось добиться длительной устойчивой работы установок (длительность непрерывных испытаний на различных установках составляла от 3 до 16 месяцев). Замечено существенное влияние солнечной радиации, температуры охлаждающей воды в конденсаторе на характеристики СХАТ, а также влияние облачности на температуры, достигаемые в солнечном коллекторе, и на количество десорбированного метанола, определяющего холодопроизводительность установки, а также высокая корреляция между температурами поверхности адсорбера и падающим излучением.
2. Впервые были проведены систематические измерения почасовой солнечной радиации в г. Санто-Доминго и в дальнейшем использованы в расчетных исследованиях. Уровень солнечной радиации измерялся солориметром новой конструкции, одним из разработчиков которой является автор.
3. На лабораторной установке фирмы BEISorp-Max (Япония) были проведены экспериментальные исследования характеристик применяемых в СХАТ углей. Показано, что адсорбционная способность всех испытанных в экспериментах семи марок активированного угля относительно метанола подчиняется уравнению Дубинина–Астахова на большей части диапазона исследуемых относительных давлений. Были определены параметры уравнения Дубинина–Астахова для каждой марки угля, путем аппроксимации экспериментальных изотерм сорбции при изменении параметров уравнения в заданном диапазоне. Средняя погрешность экспериментальных и аппроксимационных кривых лежит в пределах 1.5%. Данные результаты могут быть использованы при моделировании процессов в СХАТ, а также при проектных расчетах.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В СХАТ

3.1 Описание физических процессов в СХАТ

В главе 1 были перечислены модели процессов адсорбции, описанные в литературе: Ленгмюра, БЭТ, Дубинина-Радущкевича и Дубинина-Астахова. Но эти модели позволяют получить количество адсорбированного или десорбированного вещества только при достижении равновесного состояния между адсорбатом и адсорбентом. На практике важно иметь возможность определять количество метанола, находящегося в порах активированного угля, в любой момент процессов адсорбции или десорбции, а не только в состоянии равновесия [49].

В настоящей главе детально представлено построение математической модели физических процессов, происходящих в СХАТ. Расчеты, полученные на основе построенной математической модели, будут способствовать проектированию эффективных холодильных установок.

Самыми сложными с точки зрения математического описания и получения решения являются физические процессы, происходящие в солнечном коллекторе. Процессы, проходящие в конденсаторе и испарителе, изучены гораздо лучше. В представленной ниже математической модели они учитываются через граничные условия. Для холодильных установок методы расчета этих теплообменных аппаратов подробно изложены, например в [67].

Фаза производства холода. Адсорбция.

После того, как заканчивается процесс десорбции, адсорбент, в данной работе — активированный уголь, регенерирует. При снижении солнечной активности температура солнечного коллектора и активированного угля, находящегося в нем, снижается, как и давление в системе. Этому процессу изостерического охлаждения соответствует линия ВГ на Рисунке 1.3. Охлаждение активированного угля и снижение давления в системе приводят к тому, что

текущее количество метанола X , находящегося в активированном угле, опускается ниже равновесного значения X_{eq} , соответствующего температуре активированного угля и давлению в системе в этот момент времени. Равновесное значение X_{eq} получается, используя уравнение Дубинина-Астахова:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{P}{P_0}))^n}.$$

Пока $X < X_{eq}$ уголь поглощает молекулы метанола, который присутствует в системе в газообразном состоянии, происходит процесс адсорбции (линия ГА на Рисунке 1.3). Этот процесс приводит к уменьшению давления в солнечном коллекторе и, в свою очередь, к движению метанола из испарителя по направлению к солнечному коллектору (Рисунок 1.2).

При мгновенном снижении давления газа в системе интенсифицируется процесс испарения жидкого метанола, что приводит к снижению температуры сначала самого жидкого метанола, а потом и всей холодильной камеры. По мере снижения температуры активированного угля в солнечном коллекторе повышается скорость процесса адсорбции. Это обусловлено увеличением разницы между текущим значением количества адсорбированного метанола X и равновесным значением X_{eq} . В работах [58, 68-69], показано, что скорость протекания процессов адсорбции и десорбции может быть описана уравнением

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{15D_0}{R_p^2} e^{\frac{-K_0}{KT}} (X_{eq} - X). \quad (3.1)$$

Процесс адсорбции протекает несколько часов и может прекратиться по двум причинам:

1) количество адсорбированного метанола активированным углем достигает равновесного количества X_{eq} , соответствующего температуре солнечного коллектора и давлению в системе;

2) восходит солнце, и солнечный коллектор подвергается медленному нагреванию.

В течение процесса адсорбции давление в системе определяется температурой испарителя, другими словами, равно давлению насыщения метанола при температуре испарителя.

Фаза регенерации активированного угля. Десорбция.

До начала процесса нагревания солнечного коллектора (до восхода солнца) давление в системе приближается к давлению насыщения метанола при температуре испарителя, а температура солнечного коллектора равна температуре окружающей среды. В момент восхода солнца заканчивается процесс адсорбции метанола активированным углем, и начинается медленное нагревание солнечного коллектора.

Этап регенерации активированного угля наступает в момент, когда солнечный коллектор начинает нагреваться. Сначала повышается температура в слоях угля, прилегающих к внешней стенке цилиндра солнечного коллектора. Так как более высокую температуру имеют те слои угля, что ближе к внешней стенке цилиндра ($r = r_b$), то именно в этих слоях угля давление паров метанола превышает давление в слоях, более удаленных от внешней стенки цилиндра. Благодаря такому распределению давлений газообразный метанол движется в радиальном направлении в сторону внутреннего полого цилиндра, в котором поддерживается давление, близкое к давлению насыщения метанола, соответствующему температуре конденсатора.

Этап регенерации адсорбента происходит в два шага.

Первый шаг — изостерическое нагревание (линия АБ на Рисунке 1.3). В течение этого времени давление во всей системе растет до тех пор, пока не достигнет значения давления насыщения метанола, соответствующего температуре конденсатора. В момент, когда давление в системе достигает давления насыщения метанола при температуре конденсатора или несколько превышает его, в конденсаторе начинается процесс фазового перехода метанола из газообразного состояния в жидкое, а в солнечном коллекторе начинается второй шаг регенерации адсорбента — собственно десорбция. Процесс фазового

перехода происходит при постоянном давлении, если правильно рассчитан конденсатор. Этот процесс по времени совпадает с периодом наибольшей солнечной активности и, следовательно, в течение этого времени температура солнечного коллектора самая высокая. При снижении солнечной активности уменьшается количество метанола, десорбированного активированным углем, это сопровождается процессом снижения давления в системе. После достаточного снижения температуры солнечного коллектора активированный уголь восстанавливает свои адсорбционные качества и начинает поглощать метанол. В этот момент начинается фаза производства холода.

3.2 Построение математической модели

В работе была сформулирована математическая модель процессов тепло- и массопереноса в солнечном коллекторе холодильника адсорбционного типа. Солнечный коллектор представляет собой цилиндр с внешним диаметром d_b , внутренним диаметром d_a и длиной L . Пространство между двумя цилиндрами заполнено активированным углем. Выбранный контрольный объем представляет собой полый цилиндр радиусом r , толщиной стенки dr и длиной L (Рисунок 1.1).

Предполагается, что все процессы протекают одинаково по всей длине цилиндра (измерение z) и по окружности (измерение θ), изменения происходят только в радиальном направлении r . Таким образом, уравнения балансов записаны в цилиндрических координатах с одной переменной r .

При формулировке модели сделаны следующие основные допущения:

- поток теплоты к внешней поверхности адсорбера и отвод теплоты от его внутренней поверхности не меняется по длине и по периметру.
- изменение массового потока метанола по оси адсорбера пренебрежимо мало относительно их изменения по радиусу;
- параметры паров метанола подчиняются уравнению состояния идеального газа;
- равновесные состояния активированного угля и метанола подчиняются уравнению Дубинина–Астахова;

- движение метанола в насыпке угля подчиняется закону Дарси;
- скорость процесса десорбции и адсорбции пропорциональна разности текущей и равновесной концентрации метанола.

Модель включает следующие уравнения и расчетные соотношения.

Уравнение сохранения массы метанола будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g) + (1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (X) + \frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v) = 0, \quad (3.2)$$

где первый член $\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g)$ представляет собой изменение концентрации газообразного метанола во времени в пространстве между частицами активированного угля;

Член $(1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (X)$ отражает изменение во времени количества метанола, находящегося в порах активированного угля;

Член $\frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v)$ показывает баланс между количеством газообразного метанола, входящего в контрольный объем и выходящего из него при конвективном движении.

Уравнение сохранения энергии имеет следующий вид:

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g U_g) + (1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (U_c + X U_{met} + X U_{ads}) + \frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v h_g) = \frac{\partial}{\partial t} (K_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r}), \quad (3.3)$$

Здесь $\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g U_g)$ представляет собой энергию газа, находящегося в пустотах между частицами угля;

$(1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (U_c + X U_{met} + X U_{ads})$ представляет собой энергию активированного угля и метанола, находящегося в порах угля в адсорбированном состоянии, а также энергию адсорбции, поглощенную или выделенную в контрольном объеме;

$\frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v h_g)$ представляет энергию, которая появляется или исчезает из контрольного объема за счет движения газообразного метанола;

$\frac{\partial}{\partial t} (K_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r})$ выражает энергию, передающуюся через грани контрольного объема путем теплопроводности.

Уравнение, описывающее скорость протекания процессов адсорбции и десорбции:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{15D_0}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} (X_{eq} - X). \quad (3.4)$$

Закон Дарси, записанный без учета гравитационной составляющей:

$$v = -\frac{K_d}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (3.5)$$

При построении математической модели принимается, что газообразный метанол, находящийся в пустотах между частицами активированного угля, ведет себя как идеальный газ, поэтому добавляется уравнение идеального газа:

$$P = C_g RT. \quad (3.6)$$

Кроме того, в модель входит записанное ранее уравнение Дубинина–Астахова:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{P}{P_0}))^n}. \quad (3.7)$$

где ε – пористость, м³/м³; C_g – концентрация паров метанола, кг/м³; ρ_c – плотность угля, кг/м³; X – количество метанола, адсорбированного углем, кг/кг; V – скорость газа, м/с; T – температура активированного угля, К; k_{eff} – коэффициент эффективной теплопроводности угля, Вт/(м·К); P – давление газа, Па; P_{sat} – давление газа в состоянии насыщения, соответствующее температуре угля, Па; U_{ads} – энергия адсорбции, Дж/кг; C_{PC} – удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К); C_{Pg} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); C_{met} – удельная теплоемкость метанола, Дж/(кг·К); D_0 – коэффициент диффузии; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; K_D – коэффициент в законе Дарси.

Таким образом, имеется система уравнений (3.2-3.7) с шестью неизвестными P , T , X , V , C_g , X_{eq} . Для решения этой системы уравнений используется численный метод контрольного объема.

3.3 Выбор граничных условий, планирование численного эксперимента

Для проведения численного эксперимента на основе построенной программы сначала необходимо правильно определить граничные условия, соответствующие реальным процессам, происходящим в СХАТ.

Нужно иметь в виду, что граничные условия работы СХАТ являются зависящими от времени и определяются интенсивностью солнечной радиации, температурами окружающего воздуха и охлаждающей воды в конденсаторе, определяющей давление метанола в адсорбере.

На этапе регенерации адсорбента, в первые 4-5 часов после восхода солнца, температура труб солнечного коллектора и давление в системе медленно растут, это соответствует изостерическому нагреву в идеальном термодинамическом цикле (Рисунок 1.3).

Примерно в 9-10 часов утра (г. Санто-Доминго) давление в системе достигает значения давления насыщения метанола при температуре конденсатора и после этого остается практически постоянным в течение нескольких часов, пока солнечная радиация достаточно высока. В течение этого времени, примерно с 11 до 15 часов температура солнечного коллектора поддерживается в диапазоне от 90°C до 100°C, что соответствует линии десорбции в идеальном термодинамическом цикле (Рисунок 1.3).

На этапе изостерического охлаждения, который в реальном цикле начинается примерно в 15 часов и длится от двух до трех часов, давление в системе снижается до тех пор, пока не достигнет значения давления насыщения метанола, соответствующего температуре испарителя. После этого начинается процесс адсорбции, который сопровождается процессом испарения метанола в холодильной камере. В течение этого процесса давление в системе остается примерно постоянным, как и температура внешней стенки солнечного коллектора.

Начальные условия.

При численном моделировании процесса десорбции начальные условия для концентрации метанола в активированном угле определяются по условиям предыдущей ночи и рассчитываются по уравнению Дубинина-Астахова. Иными словами, начальным является равновесное состояние, достигнутое в солнечном коллекторе в финале процесса адсорбции. Это равновесное состояние будет определяться двумя температурами — температурой солнечного коллектора и температурой испарителя в последние два часа перед рассветом. Аналогичным образом задаются начальные концентрации метанола для численного расчета процесса адсорбции. В этом случае температура солнечного коллектора и температура конденсатора днем, в последний час в течение процесса десорбции, до начала процесса изостерического охлаждения адсорбера, определяют начальные равновесные значения X . Начальные значения температур в слое активированного угля задаются по температуре, достигнутой на предыдущем этапе, а начальные концентрации газообразного метанола в адсорбере рассчитываются по уравнению состояния идеального газа. Начальные значения давления в системе определяются по кривой насыщения метанола, при этом в начале процесса десорбции давление насыщения определяется для температуры испарителя в последние часы процесса адсорбции, а в начале процесса адсорбции это давление определяется температурой конденсатора в конце процесса десорбции. В начале численного расчета как процесса десорбции, так и процесса адсорбции, начальные значения всех искомым переменных задаются постоянными для всего слоя активированного угля и не зависят от радиуса.

Граничное условие для расчета адсорбера.

Корректной постановкой граничного условия на поверхности адсорбера (как части солнечного коллектора), является постановка сопряженной задачи, в которой задается равенство тепловых потоков, поступающих и уходящих с его

поверхности. Однако на практике сложно обеспечить строгое математическое описание и вычисление указанных потоков, поскольку они сильно меняются от одного конкретного случая к другому. Каждый солнечный коллектор, содержащий адсорбер СХАТ индивидуален. Отличаются размеры и форма коллектора, расположение и форма отражателей, положение и оптические характеристики стекла. По-разному расположены наружные объекты: здания, деревья и др. воспринимающие излучение с нагретой поверхности адсорбера. Все это влияет как на величину результирующего лучистого потока, так и на конвективный отвод теплоты. В реальности поток меняется и по поверхности адсорбера. Все это вынуждает исследователей искать другие способы постановки граничного условия на поверхности адсорбера [57], [58].

В данной работе также стояла задача постановки граничного условия. Следует обратить внимание на то, что температура стенки адсорбера во время процесса выравнивается за счет теплопроводности по металлической стенке. Она определяется балансом следующих основных тепловых потоков:

- поступающая на поверхность солнечная радиация (точнее, ее часть, прошедшая через стекло);
- поток излучением с поверхности адсорбера;
- конвективный поток с поверхности адсорбера;
- поток тепла теплопроводностью внутрь слоя угля.

Как показывают косвенные измерения, последний поток относительно невелик. Сравнение холодопроизводительности установки (определяется по количеству десорбированного метанола) и измеряемой падающей солнечной радиаций показывает, что поток теплоты теплопроводностью в слой угля составляет 7-10 % от поступающего теплового потока солнечной радиации. Конечно, тепловой поток меняется в зависимости от марки применяемого угля, от геометрии коллектора и внутренней части адсорбера, но температура определяется в первую очередь падающей солнечной радиацией.

Имеющиеся эксперименты, проведенные в одних и тех же условиях и на одной и той же установке, но с углями с разной сорбционной способностью

свидетельствуют о том, что температура поверхности адсорбера меняется слабо [70-77]. Об этом же свидетельствуют данные полученные в настоящей работе (см. Главу 2). Сопоставление температур адсорбера и потока солнечной радиации на поверхность хорошо коррелируют друг с другом.

В итоге может быть получена зависимость, связывающая температуру поверхности адсорбера и падающую солнечную радиацию. Ее можно получить либо экспериментально (для одного конкретного случая, далее распространив ее на другие случаи), либо теоретически - из равенства тепловых потоков на поверхности, с заданным ориентировочным значением холодопроизводительности установки. Такие функции были получены в данной работе для Доминиканы (г. Санто-Доминго) и Аргентины (г. Буэнос-Айрес) и использованы в качестве граничного условия в расчетах. Они представляли собой линейные зависимости. Индивидуальные особенности установки и климатические условия учитывались коэффициентами.

Как и поступающая солнечная радиация, температура являлась в этом случае функцией времени. Данную зависимость, конечно с определенной погрешностью, можно использовать для расчетных исследований и проектирования СХАТ.

На внутренней стенке канала ($r=r_a$) цилиндрического коллектора задавались два граничных условия:

- $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ —нулевой тепловой поток путем теплопроводности для уравнения сохранения энергии;
- $P_{r_a} = f(t)$ давление внутри канала, граничное условие для уравнения Дарси.

Отдельного упоминания заслуживает анализ граничного условия для давления в канале коллектора. Это граничное условие является связующим звеном в математической модели солнечного коллектора с конденсатором и испарителем. Как было указано ранее, от работы конденсатора зависит давление внутри канала солнечного коллектора в течение процесса десорбции. От работы испарителя зависит давление в системе во время процесса адсорбции (ночной период работы холодильника).

Давление внутри канала является параметром, зависящим от работы конденсатора в течение процесса десорбции и от работы испарителя в течение процесса адсорбции. В первом приближении это давление (P_{ra}) задавалось постоянным во времени для обоих процессов, разными для каждого из них. В ходе исследований оказалось, что во время переходных периодов (изостерических нагрева и охлаждения) получаем более реалистичные результаты, если изменение давления в канале во времени аппроксимируется по модели Ричардсона и по полиномиальной зависимости соответственно. Для измеренных в ходе экспериментов значений давления в системе, с помощью программы CurveExpert подбиралась математическая функция, которой соответствовало наибольшее количество экспериментальных точек.

На внешней стенке коллектора ($r=r_b$) задавались:

- $T=f(t)$ —граничное условие первого рода для уравнения сохранения энергии;
- $v = 0$ —граничное условие для уравнения Дарси.

Температура на поверхности задавалась в виде функции времени и зависела от падающего потока солнечной радиации и от ночных температур в солнечном коллекторе.

3.4 Дискретизация дифференциальных уравнений и построение программы

Для получения дискретного аналога каждое дифференциальное уравнение системы (3.2-3.6) интегрируется по объему от его внутренней границы w до его внешней границы e . Выбранный контрольный объем представляет собой цилиндр с внутренним радиусом r_a , внешним радиусом r_b , толщиной стенки dr и длиной L (Рисунок 3.1). Расчетная область представлена на Рисунке 3.2, показывающая деление слоя сорбента на контрольные объемы.

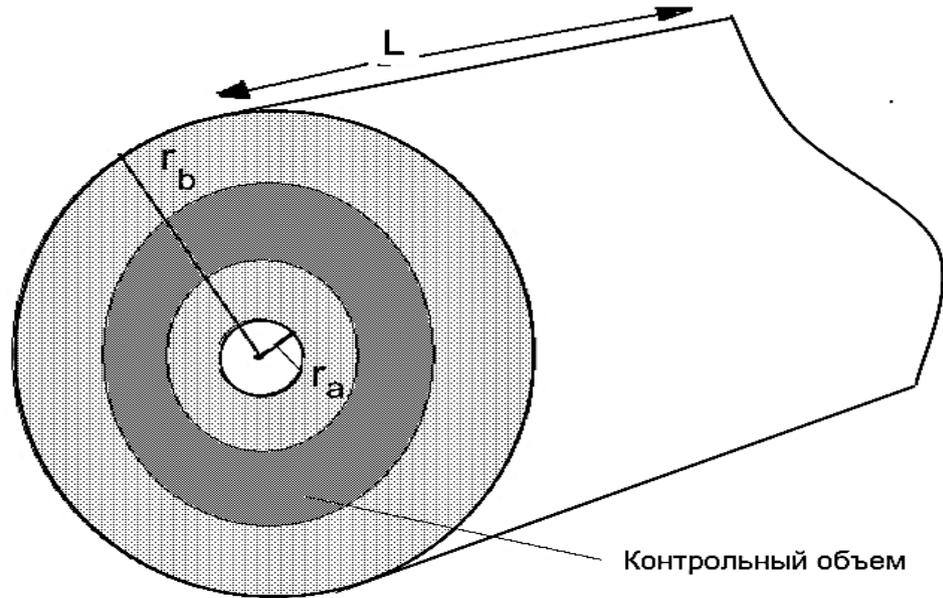


Рисунок 3.1. Вид расчетной области с выделенным контрольным объемом

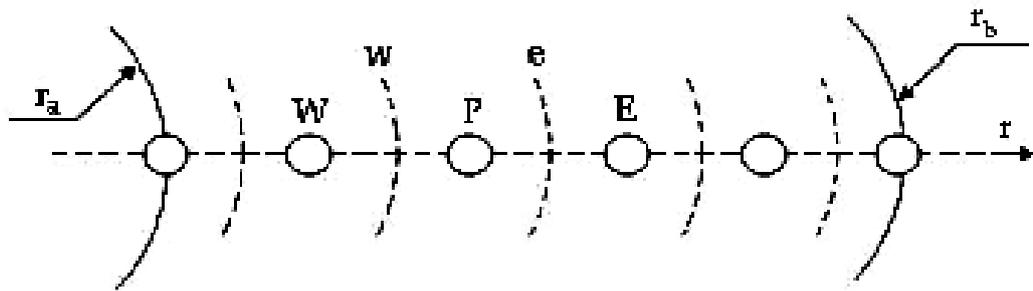


Рисунок 3.2. Разделение слоя сорбента на контрольные объемы

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e (1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (X) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v) dV dt = 0 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (C_g U_g) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e (1 - \varepsilon) \rho_c \frac{\partial}{\partial t} (U_c + X U_{met} + X U_{ads}) dV dt + \\ & + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\varepsilon}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_g v h_g) dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial t} (r K_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) dV dt, \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e v dV dt = - \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{K_d}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} dV dt, \quad (3.10)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial X}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{15D_0}{R_p^2} e^{-\frac{E_a}{RT}} (X_{eq} - X) dV dt, \quad (3.11)$$

где $dV = 2\pi r dr L$ — контрольный объем.

Проинтегрировав уравнения 3.8-3.11, умножив все члены на Δt и разделив на $dV = 2\pi r dr L$, получается следующая система конечно-разностных уравнений, в которой уравнения 3.12-3.15 является дискретными аналогами исходных дифференциальных уравнений 3.1-3.5 соответственно:

$$\varepsilon (C_{g(p,(t+\Delta t))} - C_{g(p,t)}) + (1 - \varepsilon) \rho_c (X_{p,(t+\Delta t)} - X(p,t)) + \varepsilon \Delta t C_{g(p,(t+\Delta t))} \frac{(v_{e,t} r_e - v_{w,t} r_w)}{r_p \Delta r} = 0, \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon C_{vg} (C_{g(P,t+\Delta t)} T_{(P,t+\Delta t)} - C_{g(P,t)} T_{(P,t)}) + \\ & + (1 - \varepsilon) \rho_c (C_{pcarb} T_{(P,t+\Delta t)} + (X_{(P,t+\Delta t)} C_{vmet} T_{(P,t+\Delta t)} + X_{(P,t+\Delta t)} U_{ads} - \\ & - C_{pcarb} T_{(P,t)} - X_{(P,t)} C_{vmet} T_{(P,t)} - X_{(P,t)} U_{ads}) + \\ & + \varepsilon \Delta t C_{g(P,t+\Delta t)} C_{vg} T_{(P,t+\Delta t)} \frac{(v_{(e,t)} r_e - v_{(w,t)} r_w)}{r_p \Delta r} = \\ & = K_e \frac{\Delta t}{r_p \Delta r} (r_e \frac{(T_{(E,t+\Delta t)} - T_{(P,t+\Delta t)})}{\Delta r} - r_w \frac{(T_{(E,t+\Delta t)} - T_{(P,t+\Delta t)})}{\Delta r}), \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$(X_{(P,t+\Delta t)} - X_{(P,t)}) = \Delta t \frac{15D_0}{R_p^2} e^{-\frac{E_a}{RT}} (X_{eq} - X_{(P,t)}), \quad (3.14)$$

$$v_{(w,t)} = -\frac{K_d}{\mu} \frac{(P_{(w,t)} - P_{(P,t)})}{\Delta r}. \quad (3.15)$$

После получения дискретного аналога дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель, определяется порядок расчета. Поскольку изменение температуры активированного угля приводит к нарушению равновесия между адсорбатом и адсорбентом, в первую очередь рассчитывается значение $X_{p,(t+\Delta t)}$, соответствующее новому моменту времени, получая это значение из дискретного уравнения, определяющего скорость течения процесса сорбции:

$$X_{(P,t+\Delta t)} = \Delta t \frac{15D_0}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} (X_{eq} - X_{(P,t)}) + X_{(P,t)}. \quad (3.16)$$

После этого из дискретной формы уравнения сохранения массы получается новое значение плотности газа $C_{g(P,t+\Delta t)}$:

$$(C_{g(P,t+\Delta t)} = (C_{g(P,t)} - (\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_c (X_{P,(t+\Delta t)} - X(P,t))) \frac{r_p \Delta r}{(r_p \Delta r + \Delta t (v_{e,t} r_e - v_{w,t} r_w))}, \quad (3.17)$$

Значение температуры в каждой узловой точке получается из уравнения сохранения энергии методом ТДМА [79]. Для этого сначала записывается дискретная форма уравнения сохранения энергии в каноническом виде:

$$a_i T_p = b_j T_E + c_i T_w + d_i, \quad (3.18)$$

где коэффициенты прямой прогонки определяются следующим образом

$$a_i = \varepsilon C_{vg} C_{g(P,t+\Delta t)} + (1 - \varepsilon) \rho_c C_{pcarb} + (1 - \varepsilon) \rho_c C_{vmet} X_{(P,t+\Delta t)} + \\ + \varepsilon \Delta t C_{g(P,t+\Delta t)} C_{vg} \frac{(v_{(e,t)} r_e - v_{(w,t)} r_w)}{r_p \Delta r} + b_i + c_i, \quad (3.19)$$

$$b_i = K_e \frac{\Delta t r_e}{r_p \Delta r^2}, \quad (3.20)$$

$$c_i = K_e \frac{\Delta t r_w}{r_p \Delta r^2}, \quad (3.21)$$

$$d_i = (\varepsilon C_{vg} C_{g(P,t)} + (1 - \varepsilon) \rho_c C_{pcarb} + (1 - \varepsilon) \rho_c C_{vmet} X_{P,(t)}) T_{P,(t)} - \\ - (1 - \varepsilon) \rho_c (X_{(P,t+\Delta t)} - X_{(P,t)}) U_{ads}. \quad (3.22)$$

Далее представляется температуру в произвольной узловой точке i в виде:

$$T_i = P_i T_{(i+1)} + Q_i, \quad (3.23)$$

и определяются коэффициенты обратной прогонки:

$$P_i = \frac{b_i}{(a_i - c_i P_{(i-1)})}, \quad (3.24)$$

$$Q_i = \frac{(d_i + c_i Q_{(i-1)})}{(a_i - c_i P_{(i-1)})}. \quad (3.25)$$

Таким образом, после расчета количества находящегося в активированном угле метанола X , плотности газа C_g и температуры T во всех узловых точках в определенный момент времени, не представляет труда получить значения скорости v и давления P для тех же контрольных объемов в тот же момент времени:

$$P_{(P,t+\Delta t)} = C_{g(P,t+\Delta t)} R T_{(P,t+\Delta t)}, \quad (3.26)$$

$$v_{(w,t+\Delta t)} = - \frac{K_d (P_{(w,t+\Delta t)} - P_{(P,t+\Delta t)})}{\mu \Delta r}. \quad (3.27)$$

Значения переменных X , C_g , T , P рассчитываются в узловых точках контрольных объемов, тогда как переменная v рассчитывается на гранях контрольных объемов. По кратко описанному выше алгоритму для численной реализации модели автором была составлена программа в среде Matlab и проведены численные эксперименты, результаты которых приводятся и подробно обсуждаются в следующей главе. При расчете температуры и концентрации метанола во времени была использована полностью неявная схема. Выбор шага по времени осуществлялся по выполнению критерия сходимости $(\Delta r^2 / \Delta \tau) \leq 1$

3.5 Проверка адекватности математической модели

Проверка адекватности математической модели проведена путем сравнения результатов численных расчетов и экспериментальных измерений на прототипе Cholita. Во второй главе были описаны эксперименты, в ходе которых производилось измерение количества десорбированного метанола при различных условиях в конденсаторе. Для верификации построенной математической модели были произведены численные расчеты, которые соответствовали экспериментам с температурами конденсатора 20°C и 30°C , и результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными по определению количества десорбированного метанола во времени.

В ходе экспериментального исследования были измерены параметры угля, использованного в установке Cholita, и получено значение $X_0 = 0.22 \pm 10\%$. Результаты численных экспериментов, выполненных для $X_0 = 0.20, 0.22, 0.24$ и для температуры конденсатора 20°C представлены на Рисунке 3.3. Наблюдается, что все расчетные кривые находятся в хорошем приближении от экспериментальной кривой, при этом наибольшее совпадение имеется для теоретической кривой, полученной для $X_0 = 0.22$.

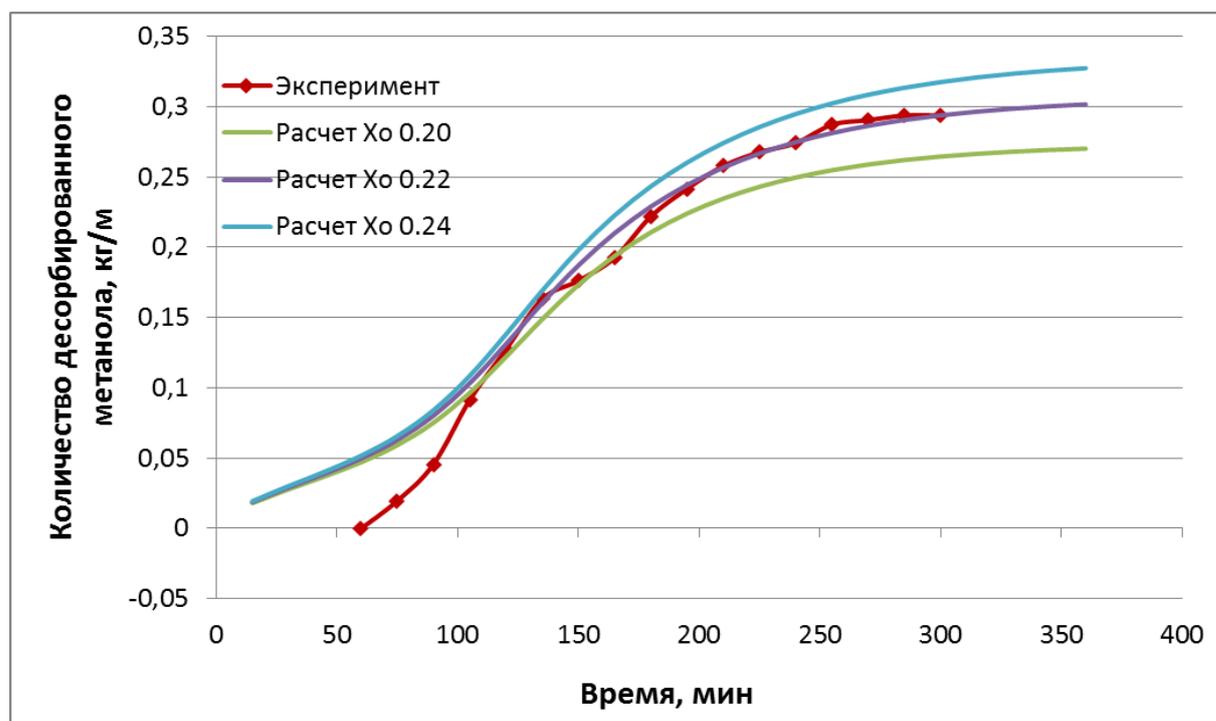


Рисунок 3.3. Сравнение экспериментальной и теоретической кривых для $T_{cond} = 20^{\circ}\text{C}$

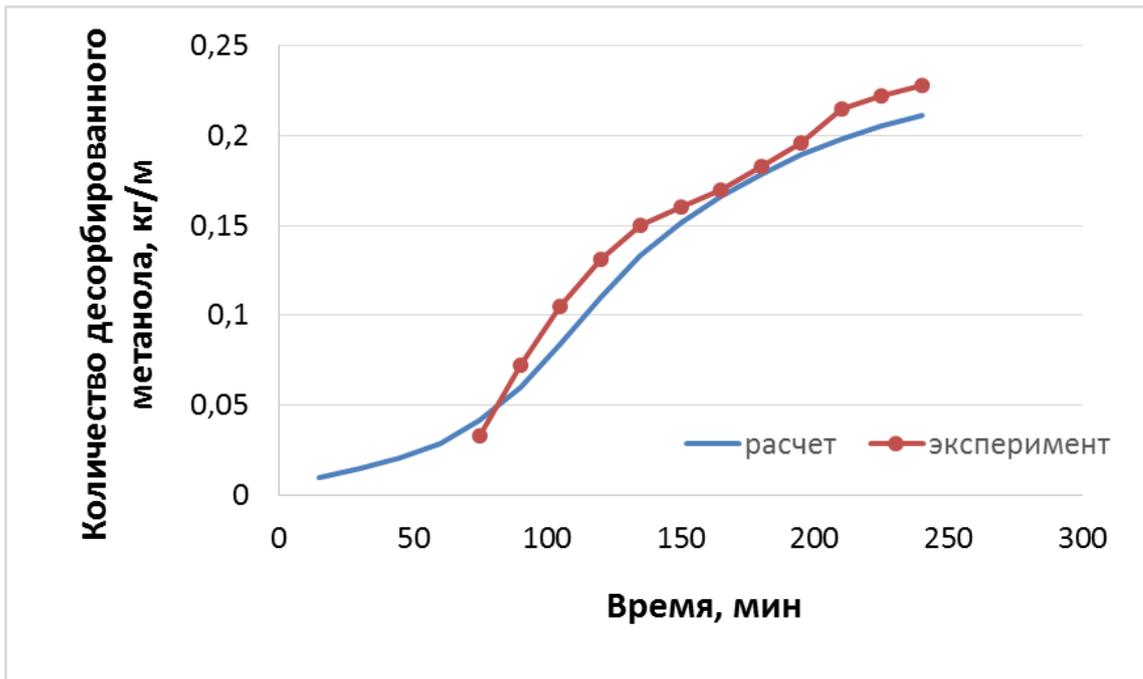


Рисунок 3.4. Сравнение экспериментальной и теоретической кривых для $T_{cond} = 30^{\circ}\text{C}$

На рисунке 3.4 представлена экспериментальная кривая десорбции, полученная на образце Cholita в условиях, когда температура воды в конденсаторе поддерживалась на 30°C . Было проведено численное моделирование, повторяя условия проведения реального эксперимента, и сопоставлены результаты расчета, полученного по разработанной автором программе, с экспериментальной кривой. На большей части рассматриваемого временного интервала наблюдалось хорошее совпадение теоретической и экспериментальной кривых. Наибольшее отличие наблюдается в первые полтора часа от начала процесса.

Наиболее вероятной причиной отличия является то обстоятельство, что начальные значения температур и концентраций метанола в слое угля задаются в расчетах постоянной величиной, соответствующей равновесному состоянию системы при температурных условиях предыдущей ночи, тогда как в экспериментах это состояние определяется предысторией процесса.

Таким образом, доказано, что разработанную математическую модель можно использовать для численного исследования процессов, протекающих в СХАТ при различных условиях.

3.6 Выводы к главе 3

1. Разработана математическая модель процессов, происходящих в адсорбере, и описан алгоритм получения решения. Модель позволяет определить распределение температур и концентраций метанола в слое сорбента во времени при изменении внешних условий. Это дает возможность найти количество адсорбированного и десорбированного метанола и вычислить удельную холодопроизводительность установки.

2. При формулировке модели сделаны следующие основные допущения:

- поток теплоты к внешней поверхности адсорбера и отвод теплоты от его внутренней поверхности не меняется по длине и по периметру.

- изменение массового потока метанола по оси адсорбера пренебрежимо мало относительно его изменения по радиусу;

- параметры паров метанола подчиняются уравнению состояния идеального газа;

- равновесные состояния активированного угля и метанола подчиняются уравнению Дубинина–Астахова;

- движение метанола в насыпке угля подчиняется закону Дарси;

- скорость процесса десорбции и адсорбции пропорциональна разности текущей и равновесной концентрации метанола.

Учет подвода (отвода) теплоты извне и присутствия других составных частей холодильной установки (конденсатора и испарителя) производится путем постановки граничных условий.

3. Граничными условиями являются:

- На внутренней стенке коллектора:

- 1) нулевой тепловой поток путем теплопроводности для уравнения сохранения энергии;

- 2) давление внутри канала коллектора для уравнения Дарси.

Это давление определяется давлением в конденсаторе в течение процесса десорбции и давлением в испарителе в течение процесса адсорбции, а во время переходных периодов (изостерических нагрева и охлаждения) давление

аппроксимируется на основе экспериментальных данных автора по модели Ричардсона и по полиномиальной зависимости соответственно.

- На внешней стенке коллектора:

Температура на поверхности задавалась в виде функции времени и зависела от падающего потока солнечной радиации в солнечном коллекторе и от температуры окружающей среды в ночное время.

Для численной реализации модели была разработана программа в вычислительном комплексе MATLAB

4. Проведена проверка адекватности математической модели путем сравнения результатов численных расчетов и экспериментальных измерений на прототипе Cholita. Были сопоставлены результаты расчета и экспериментальные данные по количеству десорбированного метанола в процессе работы установки при различных температурах воды в конденсаторе, доказывающие адекватность модели.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СХАТ

4.1 Исследование влияния свойств адсорбента

В ходе исследований были определены основные факторы, влияющие на работу установки: параметры активированного угля, почасовая солнечная радиация, дневные и ночные температуры, достигаемые в основных составляющих частях установки, геометрические характеристики адсорбера (диаметр внутреннего канала для прохождения газа и внешний диаметр коллектора) и других элементов установки: конденсатора и испарителя, а также интенсивность подвода и отвода теплоты в этих аппаратах.

Влияние указанных параметров на характеристики установки изучено на основании расчетов, выполненных по математической модели, разработанной автором, а также оценок, проведенных на основании математической модели, описывающей равновесные состояния сорбента и сорбата, предложенной Дубининым и Астаховым.

Эффективность работы СХАТ зависит от процессов сорбции, происходящих в солнечном коллекторе. Параметры активированного угля могут существенно влиять на важнейшие характеристики установки. В связи с этим было выполнено исследование влияния адсорбционных свойств активированного угля на работу установки.

В отличие от других типов холодильных установок (например, компрессионных), в СХАТ для получения холода используется не топливо и не электроэнергия, а солнечная энергия, за которую не нужно платить. Затраты солнечной энергии на производство холода, определяющие холодильный коэффициент, не очень важны. В данных установках на практике важнее не холодильный коэффициент и не эксергетический КПД, а такие характеристики, как холодопроизводительность, отнесенная к количеству используемого сорбента или холодопроизводительность отнесенная к единице площади солнечного коллектора. Это обусловлено тем, что стоимость активированного угля с хорошей

сорбционной способностью достаточно высока (порядка 20-80 долларов за килограмм), поэтому важно сократить его количество при заданной холодопроизводительности. Другой важной характеристикой является размер адсорбера, определяющего габариты и металлоемкость установки.

В диссертации измерялось и рассчитывалось изменение количества десорбированного метанола, которое напрямую связано с холодопроизводительностью установки. Поэтому приведенные результаты по количеству метанола для каждой конкретной установки однозначно определяют холодопроизводительность, отнесенную к количеству используемого сорбента или к единице площади солнечного коллектора.

Как было показано во второй главе, наиболее подходящей математической моделью, описывающей равновесные состояния рабочей пары активированный уголь-метанол, является уравнение Дубинина-Астахова:

$$X_{eq} = X_0 e^{-\beta(T \ln(\frac{P_0}{P}))^n}, \quad (4.1)$$

где T — температура активированного угля, P_0 — давление насыщения метанола, соответствующее температуре T , P — давление в системе, β — коэффициент аффинности активированного угля по отношению в метанолу, n — показатель степени в уравнении Дубинина-Астахова, X_0 — максимальное количество метанола, которое может поглотить активированный уголь, и X_{eq} — количество метанола, адсорбированное углем при достижении равновесия между сорбентом и сорбатом при заданных условиях по температуре и давлению. Переменные X_0 и X_{eq} являются безразмерными величинами, выражающими отношение массы адсорбированного метанола к массе активированного угля.

Параметры X_0 , β и показатель степени n уравнения Дубинина-Астахова определяют взаимодействие между конкретным типом активированного угля и метанолом. Иными словами, эти параметры определяют адсорбционные способности каждого конкретного активированного угля по отношению к метанолу. Диапазон изменения параметра X_0 составляет от 0.05 до 0.99; параметра β — от 10^{-8} до 10^{-4} K^n ; параметра n — от 0.7 до 3 (Таблица 4.1).

Следует заметить, что производители активированных углей не могут предоставить данные по интересующим параметрам, и для каждого конкретного типа активированного угля эти параметры должны быть определены экспериментально. Характеристики части углей были взяты из литературы [66], [79], а для семи углей экспериментально получены автором (см. Главу 2). Важно определить влияние этих параметров на основные характеристики работы СХАТ как по отдельности, так и комплексно. Для различных параметров активированных углей были произведены расчеты равновесных состояний активированного угля и метанола, а также была исследована динамика неравновесных состояний на основе численных расчетов, выполненных по программе, разработанной автором.

Была использована следующая методика сравнения активированных углей. Одной из важнейших характеристик установки является холодопроизводительность на единицу массы адсорбента, которая зависит от количества метанола, циркулирующего в системе. Чтобы определить максимально возможное количество циркулирующего метанола на единицу массы адсорбента для каждого типа активированного угля, приведенного в таблице, были рассчитаны минимальное и максимальное количество метанола, поглощенного активированным углем при достижении равновесия между адсорбентом и адсорбатом при дневных и ночных условиях (температурах). При проведении этого расчета были выбраны такие дневные температуры:

$$T_{col} = 100^{\circ}\text{C}, T_{cond} = 30^{\circ}\text{C}, \quad (4.2)$$

а также следующие ночные температуры:

$$T_{col} = 20^{\circ}\text{C}, T_{evap} = 0^{\circ}\text{C}. \quad (4.3)$$

Результаты выполненных расчетов приводятся в таблице 4.1.

Можно заметить, что угли MaxSorbIII и CNR115 обладают наилучшими характеристиками с точки зрения использования их в СХАТ. Для этих углей при приведенных дневных и ночных условиях в идеальном случае можно получить примерно 0.76 кг и 0.48 кг циркулирующего метанола на каждый килограмм активированного угля, что является эквивалентом получения примерно 2.8 кг и

1.6 кг льда (соответственно) на каждый килограмм активированного угля. Это означает, что максимальная удельная холодопроизводительность установок составит соответственно 938 и 536 кДж/сутки на 1 кг активированного угля.

Таблица 4.1

Параметры различных активированных углей

№	Уголь	X_0	β	n	X_{min}	X_{max}	ΔX
1	Doshion	0.212	$3.81 * 10^{-8}$	2.482	0.0631	0.1976	0.1345
2	Jacobi	0.151	$6.46 * 10^{-9}$	2.68	0.0660	0.1456	0.0793
3	Aguasorb	0.259	$1.92 * 10^{-5}$	1.642	0.0634	0.2029	0.1395
4	CarbonR	0.213	$4.45 * 10^{-8}$	2.43	0.1105	0.1996	0.0891
5	Clarimex	0.186	$1.61 * 10^{-3}$	2.18	0.1069	0.1739	0.067
6	Inquimet	0.197	$1.36 * 10^{-5}$	1.664	0.0644	0.1567	0.0923
7	CHAR M	0.108	$2.06 * 10^{-7}$	0.921	0.0468	0.0764	0.0296
8	Cholita	0.22	$1.01 * 10^{-5}$	1.72	0.0603	0.1535	0.0981
9	CNR115	0.936	$1.3 * 10^{-4}$	1.4	0.1131	0.5925	0.04795
10	MaxSorblll	0.992	$4.022 * 10^{-6}$	2	0.0153	0.6206	0.6053
11	WSC 470	0.496	$4.9 * 10^{-7}$	2.18	0.0847	0.4214	0.3367
12	AC2060	0.290414	$2.067 * 10^{-5}$	1.599	0.0765	0.2303	0.1537
13	ECOK70	0.1104	$3.48 * 10^{-4}$	1.18	0.0322	0.0786	0.0465
14	AC35	0.344	$5 * 10^{-7}$	2.15	0.0795	0.2992	0.2197
15	NORIT RB	0.332	$1.81 * 10^{-7}$	2	0.2749	0.325	0.0501
16	DEG	0.427	$5.95 * 10^{-5}$	1.31	0.2542	0.3773	0.1231
17	Act.Charcoal	0.564	$3.012 * 10^{-6}$	2	0.0248	0.3972	0.3724
18	RKST	0.2064	$1.55 * 10^{-7}$	2	0.1758	0.2027	0.027

Наихудшими углями являются NORITRB, PKST, 207C и ECOK-70, использование которых в СХАТ просто неприемлемо. Очевидно влияние параметра X_0 , который определяет максимальный объем пор активированного угля (количество циркулирующего метанола пропорционально параметру X_0), в то время как влияние параметров β и n неочевидно; кроме того, их влияние взаимозависимо.

На Рисунке 4.1 представлена зависимость количества циркулирующего метанола, рассчитанного при условиях (4.2) и (4.3) при достижении равновесных состояний, от параметра X_0 , который меняется от 0.1 до 1.0. Расчет был выполнен для двух различных значений параметра β : $\beta = 2.61 * 10^{-4}$ и $\beta = 2.61 * 10^{-5}$, при неизменном показателе степени $n = 1.22$. По представленному графику видно, что

уменьшение параметра β на порядок радикальным образом меняет количество циркулирующего метанола. Следует заметить, что изменение параметра β было выбрано случайным образом. По данным, представленным в таблице 4.1, наблюдается, что параметр β для конкретных углей колеблется в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-4} , и в некоторых случаях один и тот же порядок значения параметра β , например 10^{-7} , дает очень разные значения ΔX (количества циркулирующего метанола). Измерения адсорбционных способностей углей показали, что параметры β и n взаимосвязаны.

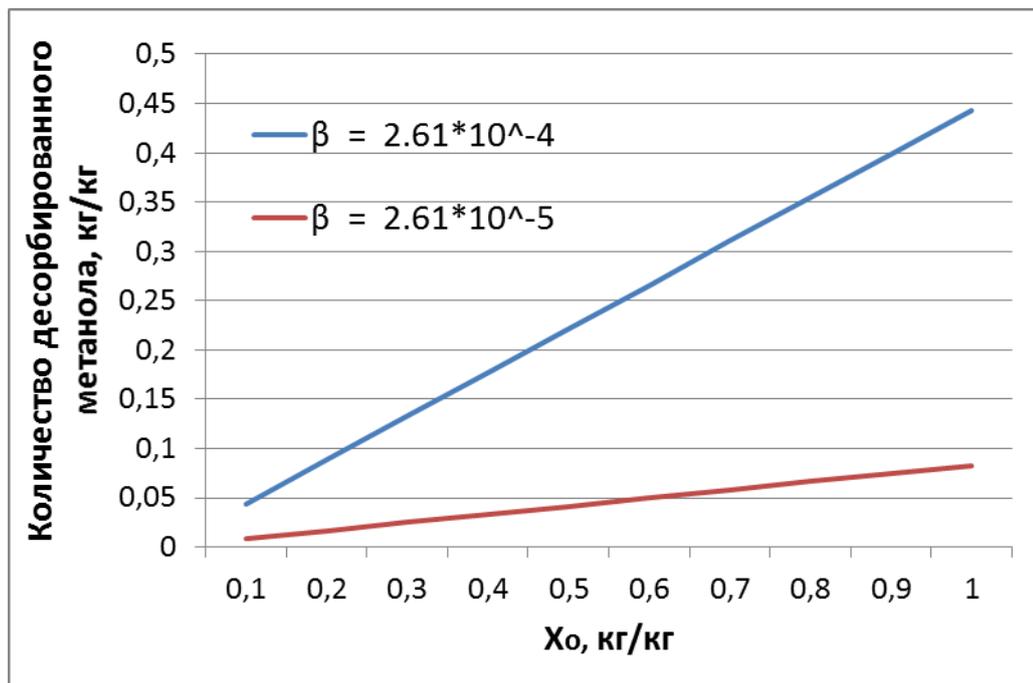


Рисунок 4.1. Влияние коэффициента аффинности и параметра X_0 в уравнении Дубинина-Астахова на количество циркулирующего метанола

Анализируя параметры активированных углей и максимально возможное количество циркулирующего метанола ΔX , можно рассчитать для каждого типа угля теоретически максимальное количество льда, которое можно произвести на единицу массы метанола. Например, для угля, использованного в установке Cholita, это значение равно 0.3 кг/кг. Иными словами, максимальное количество льда, которое в идеале образовалось бы в установке, в коллекторе которой находится 16 кг угля, достигает пяти килограмм. А если бы в аналогичной установке (16 кг угля в адсорбере) использовали уголь CNR115, то теоретически возможное количество льда, полученное в СХАТ, достигало бы 25 кг.

Таким образом, выбор активированного угля является важнейшим фактором, влияющим на холодопроизводительность установки и на ее экономические показатели. В зависимости от выбора угля холодопроизводительность может изменяться в несколько раз.

Расчетов, выполненных для равновесных состояний на основе уравнения Дубинина-Астахова недостаточно, чтобы определить эффективность работы установки в конкретных климатических условиях. Нужно провести анализ динамики работы СХАТ на основе математической модели, разработанной автором.

Эта модель учитывает геометрические характеристики установки и адсорбционные свойства активированного угля и позволяет рассчитать, как меняется температура внутри активированного угля и количество адсорбированного метанола во времени. Важно, что модель дает ответ на вопрос, насколько приблизится определенный активированный уголь в солнечном коллекторе с определенными геометрическими пропорциями к равновесному состоянию при заданных граничных условиях. Для определения влияния свойств активированного угля на холодопроизводительность СХАТ в неравновесном процессе была проведена серия численных экспериментов для установки, идентичной образцу Cholita. Использовались параметры трех активированных углей: Cholita, MaxSorb III и CNR115. При численном исследовании применялись граничные условия, идентичные эксперименту — температура на внешней стенке коллектора и давление внутри канала задавались функциями от времени. Искомыми неизвестными являются переменные X , T , P , C_g , v , которые рассчитываются в семи контрольных объемах в ходе восьмичасового моделирования процесса десорбции.

Граничные условия для температуры на внешней поверхности и для давления внутри канала зависят от времени. В расчетах эта зависимость выбрана аналогично той, что получена в экспериментах. При этом максимальное значение температуры солнечного коллектора днем было $T_{colmax} = 90^\circ\text{C}$, а температура

конденсатора днем, соответствующая максимальному значению зарегистрированного в течение эксперимента давлению, равна $T_{condmax} = 47^\circ\text{C}$.

Составленная на основе предложенной математической модели программа позволяет рассчитать все искомые неизвестные для каждого контрольного объема в любой момент времени. Регистрировалось распределение каждой неизвестной по радиусу каждые 15 минут в течение всего времени процесса, причем расчетный шаг по времени составляет $dt = 0.025$ с. Выбор шагов осуществляется исходя из условия сходимости процесса $\frac{\Delta x^2}{\Delta t} \leq 1$. Количество паров метанола, находящихся в системе определялось путем интегрирования по радиусу (от r_a до r_b) функций, описывающих распределение количества метанола в углях в ночное и дневное время. На рисунке 4.2 представлены распределения температуры в слое угля различных марок через 8 часов процесса десорбции.

Анализ распределения температуры позволяет оценить, насколько концентрация метанола в активированном угле внутри коллектора приблизилась к равновесному состоянию. В каждом численном эксперименте вызывает интерес изменение количества десорбированного или адсорбированного метанола во времени.

Для определения общего количества метанола, поглощенного активированным углем, необходимо знать распределение переменной по пространственной координате. Пример такого распределения представлен на графиках, изображенных на Рисунке 4.3. Начальными условиями для концентрации X при расчете процесса десорбции является равновесное состояние угля и метанола при условиях предыдущей ночи ($T_{col} = 20^\circ\text{C}$, $T_{evap} = 0^\circ\text{C}$), что представляет собой максимальное количество метанола, поглощенного углем для рассматриваемого цикла X_{max} .

По распределению количества адсорбированного метанола в угле (Рисунок 4.3) рассчитывается масса метанола, покинувшего активированный уголь или поглощенного им, с начального момента времени. Результат представляет собой количество десорбированного метанола в определенный момент времени.

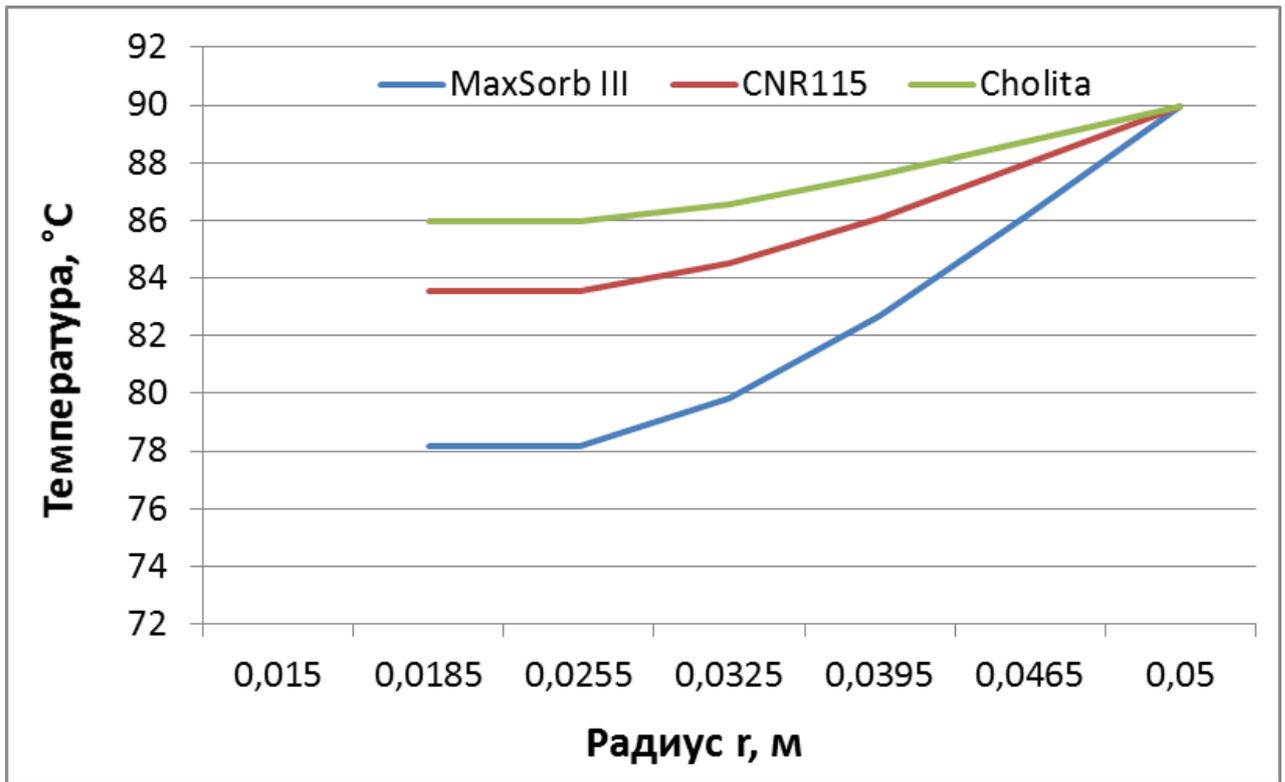


Рисунок 4.2. Распределение температуры в слое угля от координаты для различных углей через 8 часов после начала процесса десорбции

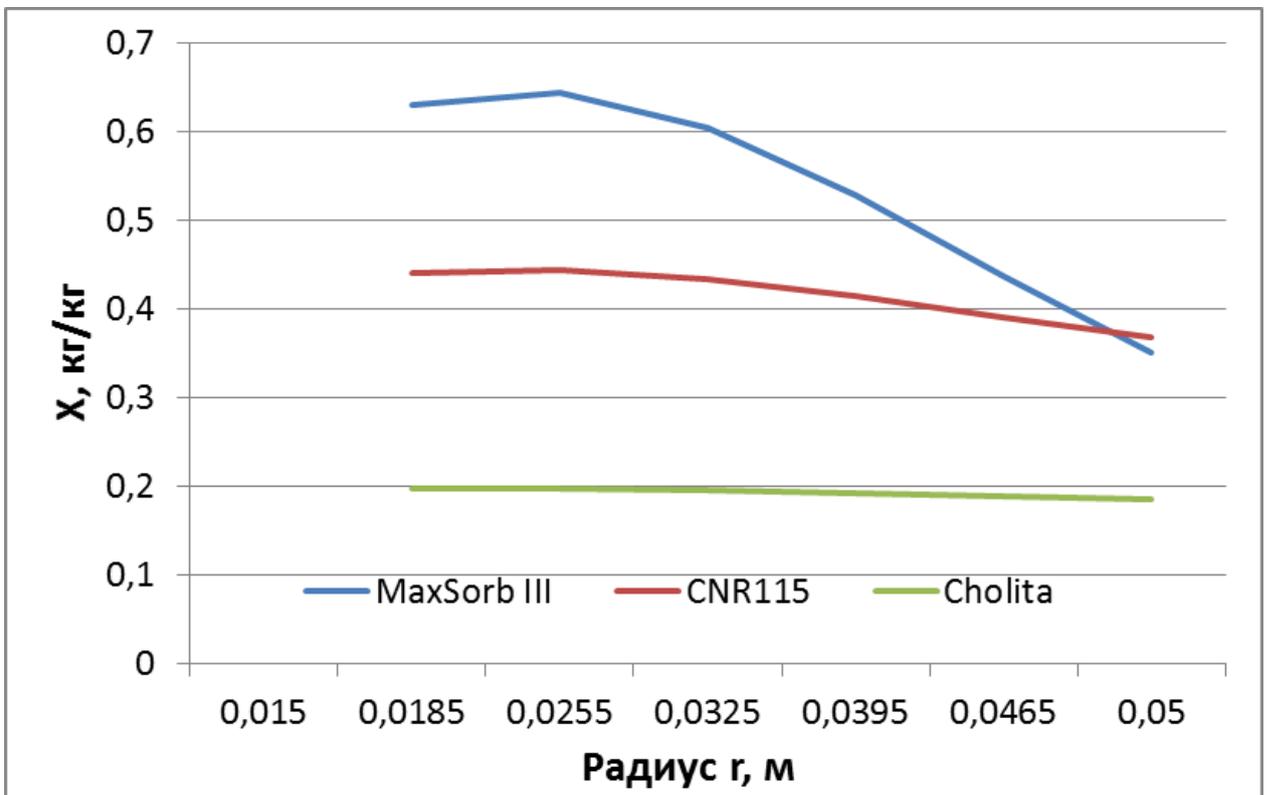


Рисунок 4.3. Распределение количества адсорбированного метанола от координаты для различных углей через 8 часов процесса десорбции

Зависимость количества десорбированного метанола от времени показана на Рисунке 4.4.

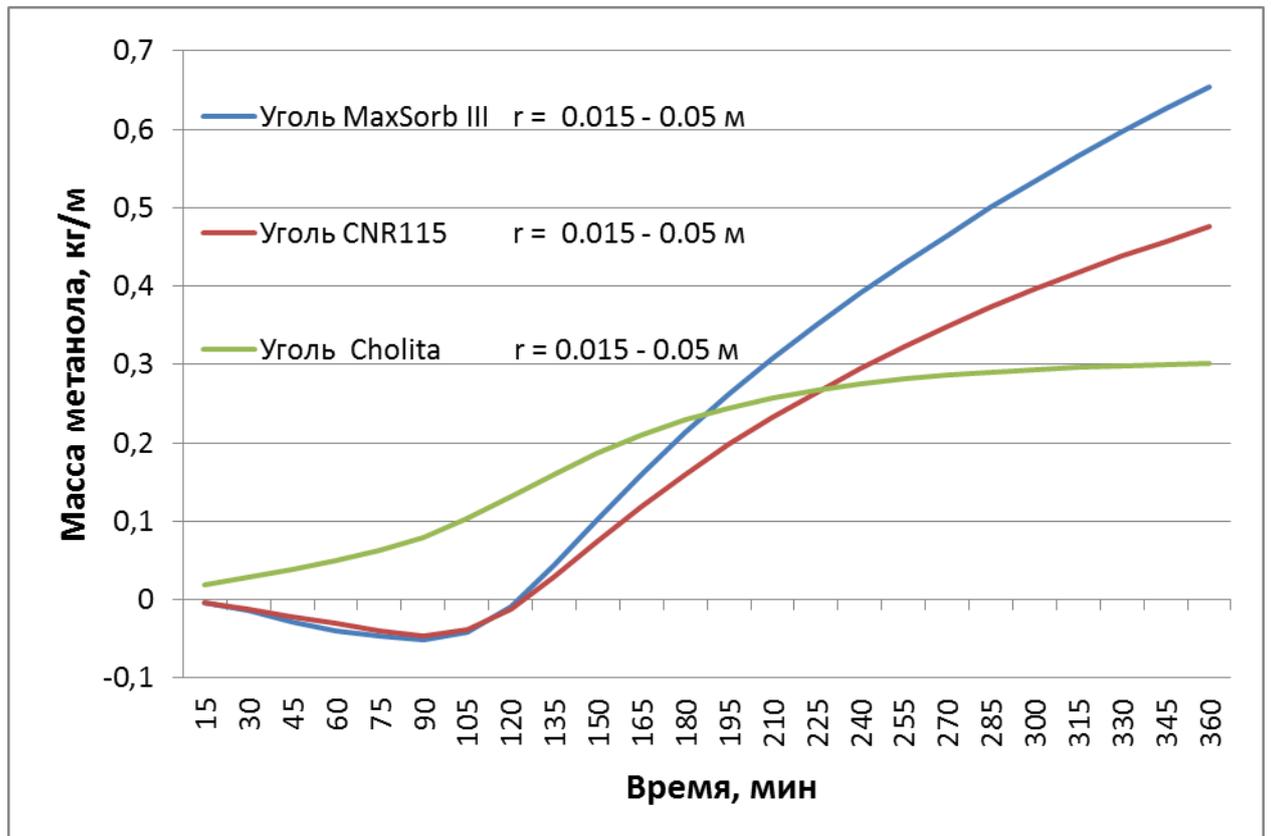


Рисунок 4.4. Изменение массы десорбированного метанола на единицу длины коллектора во времени для различных углей

На начальном этапе нагрева активированного угля расчеты дают физически неправильный результат (вместо процесса десорбции протекает процесс адсорбции небольшого количества метанола). Это вызвано недостаточно корректным заданием граничных значений температуры и давления. В расчетах эти данные брались на основе аппроксимации реального эксперимента, проведенного с использованием угля Cholita. Эта аппроксимация дает несколько завышенные значения давления в канале для других типов углей.

Неточность расчета десорбированного количества метанола на начальном участке не оказывает существенного влияния на итоговое количество десорбированного метанола.

Наблюдается, что для угля MaxSorb III получаются самые большие значения десорбированного метанола во времени, для угля CNR115 — несколько,

меньшие, а для угля Cholita — самые маленькие значения. Полученные результаты качественно согласуются с расчетами, выполненными по математической модели равновесных состояний Дубинина-Астахова. Тем не менее, очевидно, что активированный уголь Cholita достиг равновесного состояния в течение восьмичасового процесса.

Следует заметить, что поведение кривых для всех трех углей согласуется с термодинамическим циклом. Первые два часа процесса соответствуют изостерическому нагреву активированного угля (см. Главу 2). Во время реального эксперимента изостерический нагрев происходит примерно с 8 до 10 утра. В течение следующих шести часов происходит сам процесс десорбции, во время эксперимента он начинается примерно в 10 часов утра и заканчивается приблизительно около 14-15 часов. Это согласуется с кривой, соответствующей углю Cholita, используемого в экспериментальной установке. Только этот уголь доходит до равновесного состояния с метанолом. Это видно из графика $X = f(r)$ (Рисунок 4.3), и подтверждается графиком распределения температуры в угле, значения которой мало изменяются (всего на 4°C) по радиусу, после окончания восьмичасового процесса (Рисунок 4.2).

4.2 Исследование влияния солнечной радиации, дневных и ночных температур на характеристики установки

В ходе исследований было изучено влияние солнечной радиации на характеристики разрабатываемой установки. Было выявлено качественное совпадение форм кривых зависимости температуры поверхности солнечного коллектора от времени и солнечной почасовой радиации, измеряемой в непосредственной близости от экспериментальной установки. Кроме того, для конкретной экспериментальной установки была найдена зависимость температуры на поверхности коллектора от солнечной почасовой радиации в виде линейной зависимости с эмпирическими коэффициентами подобная (см. Главу 2). Наблюдая поведение упомянутых кривых, предполагается, что для другой экспериментальной установки с отличающейся геометрией, может быть

найдена другая эмпирическая зависимость температуры поверхности труб коллектора от почасовой солнечной радиации с другими эмпирическими коэффициентами. Следует заметить, что температура на внешней поверхности солнечного коллектора является граничным условием при решении уравнения сохранения энергии (см. Главу 3, постановка граничных условий). Таким образом, получив эмпирическую зависимость температуры поверхности солнечного коллектора от солнечной почасовой радиации для определенной конструкции СХАТ, используя программу, построенную на основе предложенной математической модели, можно проводить расчет конкретной установки в различных климатических условиях.

В работе было проанализировано влияние дневных и ночных температур на характеристики установки. Расчет выполняется по уравнению адсорбционного равновесия, предложенного Дубининым и Астаховым, в следующей последовательности:

- Для определенного активированного угля (с предварительно измеренными параметрами X_0 , β и показателем степени n) проводится расчет предельных значений количества поглощенного углем метанола X_{min} при достижении равновесного состояния. Это количество X_{min} соответствует дневной температуре активированного угля.
- Затем вычисляется количество X_{max} , которое соответствует ночной температуре активированного угля.
- После этого рассчитывается ΔX — количество циркулирующего метанола в системе с указанными дневными и ночными условиями, $\Delta X = X_{max} - X_{min}$.

Следует заметить, что не только дневные и ночные температуры активированного угля влияют на достигнутое равновесие. Большое влияние также оказывает давление в системе, которое, как было уже замечено раньше, в течение дневного периода цикла определяется температурой в конденсаторе, а в течение ночного этапа (во время генерации холода) температурой испарителя. Таким образом, дневные условия определяются температурами коллектора и

конденсатора (T_{col} и T_{cond}), а ночные условия определяются температурами коллектора и испарителя (T_{col} и T_{evap}).

Был выполнен расчет для конкретных активированных углей для различных комбинаций температур, влияющих на равновесные состояния адсорбента и адсорбата. Результаты расчета приводятся в Таблице 4.2.

Таблица 4.2

Равновесные состояния активированных углей при различных условиях

Условия расчета	$T_{cold}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{cold}=100^{\circ}\text{C}$	$T_{cond}=30^{\circ}\text{C}$	$T_{cold}=95^{\circ}\text{C}$	$T_{cond}=25^{\circ}\text{C}$	$T_{cold}=90^{\circ}\text{C}$	$T_{cond}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{cold}=85^{\circ}\text{C}$	$T_{cond}=15^{\circ}\text{C}$	$T_{cold}=80^{\circ}\text{C}$	$T_{cond}=10^{\circ}\text{C}$
Уголь	x_{max}	x_{min}	ΔX	x_{min}	ΔX	x_{min}	ΔX	x_{min}	ΔX	x_{min}	ΔX
MaxSorbIII	0.621	0.019	0.606	0.016	0.608	0.013	0.610	0.011	0.612	0.009	0.614
CNR115	0.593	0.113	0.480	0.106	0.486	0.100	0.493	0.093	0.499	0.087	0.506
Cholita	0.250	0.102	0.148	0.099	0.151	0.095	0.154	0.092	0.157	0.089	0.160
Act.Ch.	0.497	0.025	0.471	0.027	0.472	0.0237	0.473	0.020	0.476	0.018	0.481
WSC 470	0.421	0.085	0.337	0.0782	0.343	0.072	0.350	0.056	0.356	0.060	0.363
AC35	0.299	0.080	0.220	0.074	0.225	0.070	0.230	0.063	0.235	0.060	0.240
DEG	0.377	0.254	0.123	0.250	0.127	0.247	0.130	0.243	0.134	0.240	0.137
AC 2060	0.230	0.077	0.154	0.073	0.157	0.070	0.160	0.067	0.164	0.063	0.167

Все расчеты выполнены для одной и той же разницы между определяющими дневными температурами $T_{col} - T_{cond} = 70^{\circ}\text{C}$. Замечено, что угли MaxSorb III, CNR115 и Activated Charcoal обладают наилучшими адсорбционными характеристиками по отношению к метанолу, что в большей степени связано с большим максимальным объемом пор X_0 . Для всех углей наблюдается общая закономерность: при одновременном одинаковом снижении дневной температуры солнечного коллектора и температуры конденсатора общее количество циркулирующего метанола на каждый килограмм активированного угля увеличивается. Первоначально предполагалось, что чем выше дневная температура солнечного коллектора, тем лучшие результаты по холодопроизводительности могут быть получены. Выполненный анализ ставит под сомнение однозначность исходного предположения. Проведенные исследования показывают, что наиболее важно в течение работы СХАТ поддерживать разницу между дневными температурами коллектора и конденсатора, определяющими минимальное количество адсорбированного метанола.

После проведения описанного выше анализа, было более детально исследовано влияния дневных и ночных температур, каждой по отдельности, на характеристики работы установки. Поочередно изменялась одна из четырех определяющих температур, оставляя три оставшиеся постоянными. Все расчеты проводились на основании модели равновесных состояний по уравнению Дубинина - Астахова для трех активированных углей. За основу были взяты такие дневные температуры:

$$T_{col} = 90 \text{ }^\circ\text{C}, T_{cond} = 20^\circ\text{C}, \quad (4.4)$$

а также следующие ночные параметры:

$$T_{col} = 20 \text{ }^\circ\text{C}, T_{evap} = 0^\circ\text{C}. \quad (4.5)$$

Последовательно изменялась одна из четырех указанных температур с интервалом в 2°C при неизменных остальных. В первую очередь изменяли температуру насыщенных паров метанола в конденсаторе в диапазоне от $T_{cond}=10^\circ\text{C}$ до $T_{cond}=30^\circ\text{C}$, результаты расчетов приведены в Таблице 4.3, где показаны равновесные значения X_{min} , X_{max} и соответственно ΔX .

Таблица 4.3

Количество циркулирующего метанола
при различных температурах конденсатора

$T_{cond}, \text{ }^\circ\text{C}$	MaxSorbIII		CNR115		Cholita	
	X_{min}	ΔX	X_{min}	ΔX	X_{min}	ΔX
10	0.0016	0.6195	0.0536	0.5389	0.0703	0.1791
12	0.0025	0.6187	0.0612	0.5314	0.0750	0.1745
14	0.0036	0.6175	0.0695	0.5231	0.0798	0.1697
16	0.0053	0.6158	0.0737	0.5138	0.0848	0.1647
18	0.0075	0.6135	0.0888	0.5038	0.0900	0.1595
20	0.0107	0.6104	0.0998	0.4927	0.0954	0.1541
22	0.0148	0.6063	0.1118	0.4808	0.1010	0.1485
24	0.0202	0.6010	0.1248	0.4678	0.1068	0.1427
26	0.0270	0.5942	0.1388	0.4537	0.1127	0.1368
28	0.0358	0.5856	0.154	0.4386	0.1188	0.1307
30	0.0462	0.5750	0.1702	0.4223	0.1252	0.1244

На Рисунке 4.5 представлены графические зависимости $\Delta X = f(T_{cond})$ для углей MaxSorb III, CNR115 и Cholita.

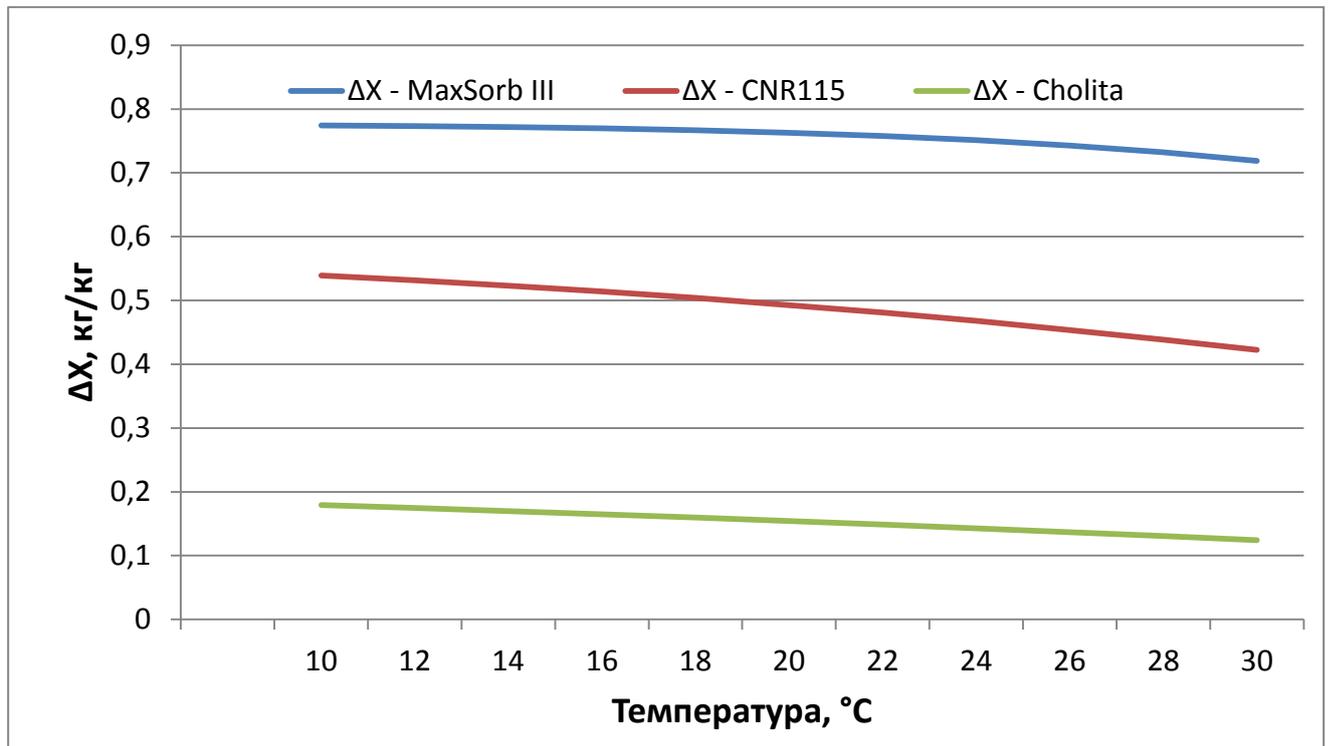


Рисунок 4.5. Количество циркулирующего метанола при различных температурах конденсатора

Наблюдая результаты, представленные в Таблице 4.3 и на Рисунке 4.5, отмечается, что при повышении температуры конденсатора в дневное время на 20°C , количество циркулирующего метанола - значение ΔX - уменьшается для всех исследуемых углей. Это уменьшение для угля Cholita составляет примерно 30%, для угля CNR115 примерно 21%, а для угля MaxSorb III примерно 7%.

Это снижение циркулирующего метанола связано с увеличением минимального количества метанола X_{min} , оставшегося в активированном угле при достижении равновесия при указанных условиях.

В таблице 4.4 показаны результаты расчетов равновесных состояний при описанных выше условиях. При этом изменялась дневная температура солнечного коллектора в диапазоне от $T_{col} = 80^{\circ}\text{C}$ до $T_{col} = 100^{\circ}\text{C}$. На Рисунке 4.6 представлены графики зависимости $\Delta X = f(T_{col})$ для трех различных активированных углей.

Равновесные состояния активированных углей при различных дневных температурах коллектора

$T_{col}, ^\circ C,$ день	MaxSorbIII		CNR115		Cholita	
	X_{min}	ΔX	X_{min}	ΔX	X_{min}	ΔX
80	0.0385	0.5857	0.1538	0.4387	0.1188	0.1307
82	0.0283	0.5928	0.1413	0.4512	0.1137	0.1357
84	0.0224	0.5987	0.1297	0.4628	0.1089	0.1406
86	0.0177	0.6034	0.119	0.4736	0.1042	0.1453
88	0.0138	0.6074	0.109	0.4835	0.0997	0.1497
90	0.0107	0.6104	0.0998	0.4927	0.0954	0.1541
92	0.0082	0.6129	0.0913	0.5013	0.0913	0.1582
94	0.0048	0.6148	0.0834	0.5091	0.0873	0.1622
96	0.0036	0.6163	0.0761	0.5164	0.0834	0.166
98	0.0027	0.6175	0.0694	0.5231	0.0797	0.1697
100	0.0018	0.6184	0.0633	0.5293	0.0762	0.1733

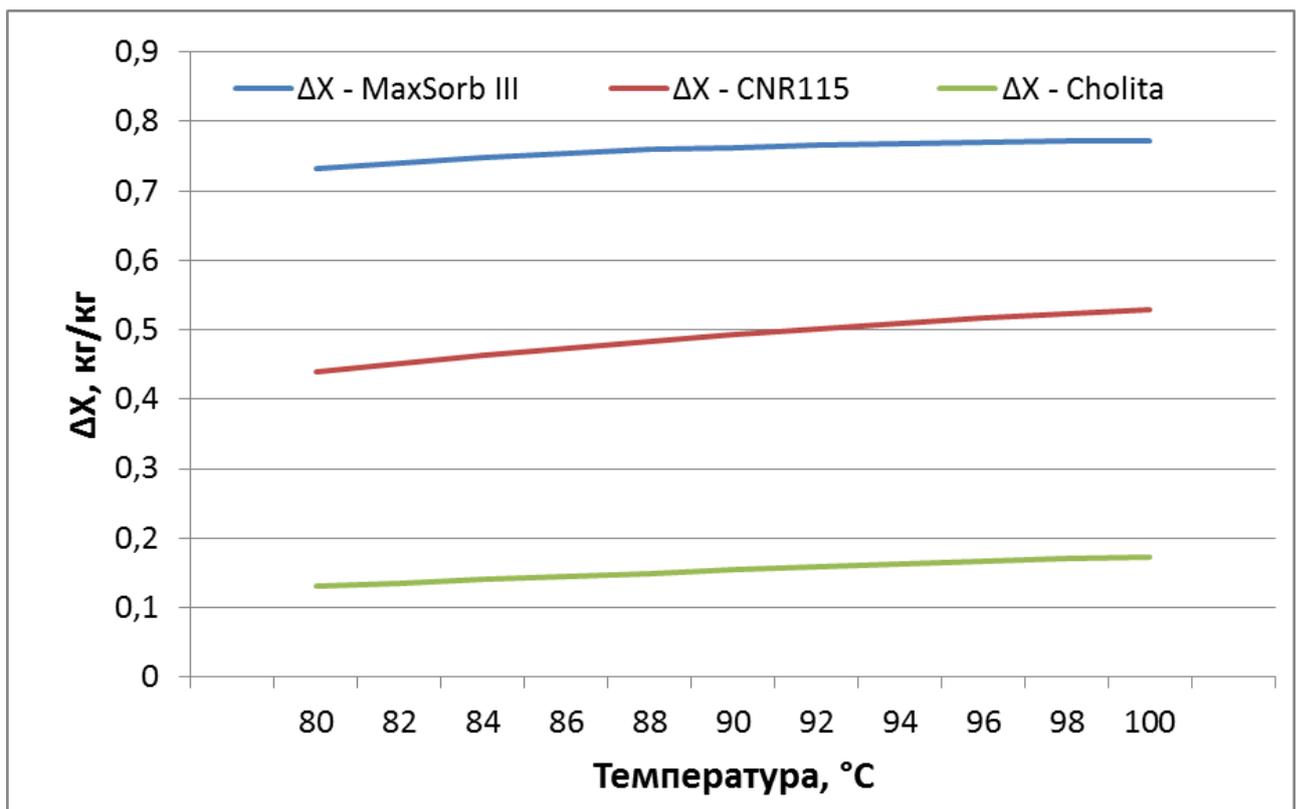


Рисунок 4.6. Зависимость количества циркулирующего метанола от дневной температуры коллектора

Наблюдается, что при повышении дневной температуры солнечного коллектора на $20^\circ C$ количество оставшегося в каждом представленном угле

метанола, X_{min} , уменьшается, и в связи с этим, увеличивается количество циркулирующего метанола ΔX . Это увеличение составляет для угля Cholita примерно 30%, для угля CNR115 примерно 20%, а для угля MaxSorb III примерно 5%.

Результаты расчетов равновесных состояний, представленных в Таблице 4.5, соответствуют условиям, при которых изменение было выполнено для ночных температур солнечного коллектора в диапазоне T_{col} от 10°C до 30°C с интервалом в 2°C, а на Рисунке 4.7 представлены графики зависимости количества циркулирующего в системе метанола от ночной температуры коллектора $\Delta X = f(T_{col})$, полученной для трех вышеупомянутых углей.

Наблюдается следующее поведение количества циркулирующего метанола: при повышении ночной температуры солнечного коллектора значение ΔX значительно уменьшается для всех исследуемых углей. Это снижение для угля Cholita и для угля CNR115 составляет примерно 50 %, а для угля MaxSorb III — примерно 61 %.

Таблица 4.5

Равновесные состояния активированных углей при различных ночных температурах коллектора

$T_{col}, ^\circ\text{C}$, ночь	MaxSorbIII		CNR115		Cholita	
	X_{max}	ΔX	X_{max}	ΔX	X_{max}	ΔX
10	0.8814	0.8707	0.7862	0.6864	0.2994	0.204
12	0.8370	0.8263	0.7475	0.6477	0.2893	0.1939
14	0.7876	0.7769	0.7084	0.6087	0.2792	0.1838
16	0.7343	0.7236	0.6693	0.5695	0.2691	0.1738
18	0.6784	0.6677	0.6305	0.5308	0.2592	0.1638
20	0.6212	0.6104	0.5925	0.4927	0.2495	0.1541
22	0.5635	0.5529	0.5555	0.4557	0.2399	0.1445
24	0.5067	0.4960	0.5196	0.4198	0.2305	0.1351
26	0.4516	0.4409	0.4849	0.3851	0.2213	0.1259
28	0.3989	0.3882	0.4517	0.3519	0.2124	0.117
30	0.3477	0.3386	0.4199	0.3201	0.2037	0.1083

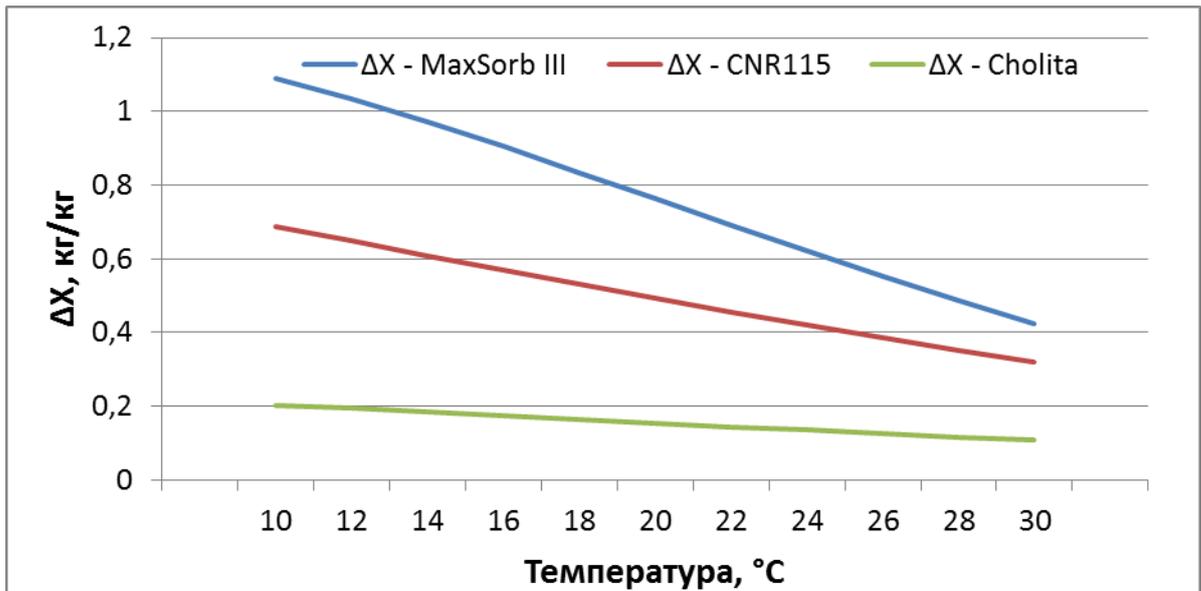


Рисунок 4.7. Зависимость количества циркулирующего метанола от ночной температуры коллектора

Снижение величины ΔX обусловлено снижением величины X_{max} , которая представляет собой количество адсорбированного углем метанола при достижении равновесия, соответствующего ночным условиям. Таким образом, СХАТ наиболее выгодно применять в условиях низких ночных температур.

4.3 Исследование влияния толщины угля, внутреннего и внешнего диаметров коллектора на работу установки

При оценке влияния геометрии солнечного коллектора на работу СХАТ в первую очередь должен вставать вопрос о времени прогрева толщины слоя активированного угля. Другими словами, важно знать успевают конкретный активированный уголь при определенных граничных условиях достичь равновесия с метанолом или нет. И второй вопрос, связанный с геометрическими пропорциями солнечного коллектора — это какое количество угля и, соответственно, циркулирующего в системе метанола, имеется на единицу длины цилиндра солнечного коллектора. По математической модели физических процессов, происходящих в солнечном адсорбере, разработанной автором, проводились численные расчеты параметров СХАТ для нестационарных состояний. Расчеты производились для параметров активированных углей

MaxSorb III, CNR115, Cholita и AguaSorb. Изменение толщины слоя угля происходило за счет изменения внутреннего радиуса цилиндра солнечного коллектора (r_a) при неизменном внешнем радиусе (r_b). Каждому выбранному размеру было присвоено имя собственное для более удобного обращения с большим количеством численных результатов:

- Cholada $r_a = 0.015\text{м}$, $r_b = 0.065\text{м}$;
- Choladal $r_a = 0.025\text{м}$, $r_b = 0.065\text{м}$;
- Cholada2 $r_a = 0.035\text{м}$, $r_b = 0.065\text{м}$.

На рисунках 4.8 - 4.10 приведены результаты численных экспериментов для трех значительно отличающихся по адсорбционным характеристикам углей. Все эти расчеты выполнены при одинаковых граничных условиях для температуры на внешней стенке цилиндра и для давления внутри канала, а именно:

- $T=f(t)$, при этом максимальная температура $T_{max} = 90^\circ\text{C}$;
- $P_r = f(t)$, максимальное давление $P_{rmax} = 50\text{ кПа}$, что соответствует давлению насыщения метанола при температуре $T_{max} = 47^\circ\text{C}$.

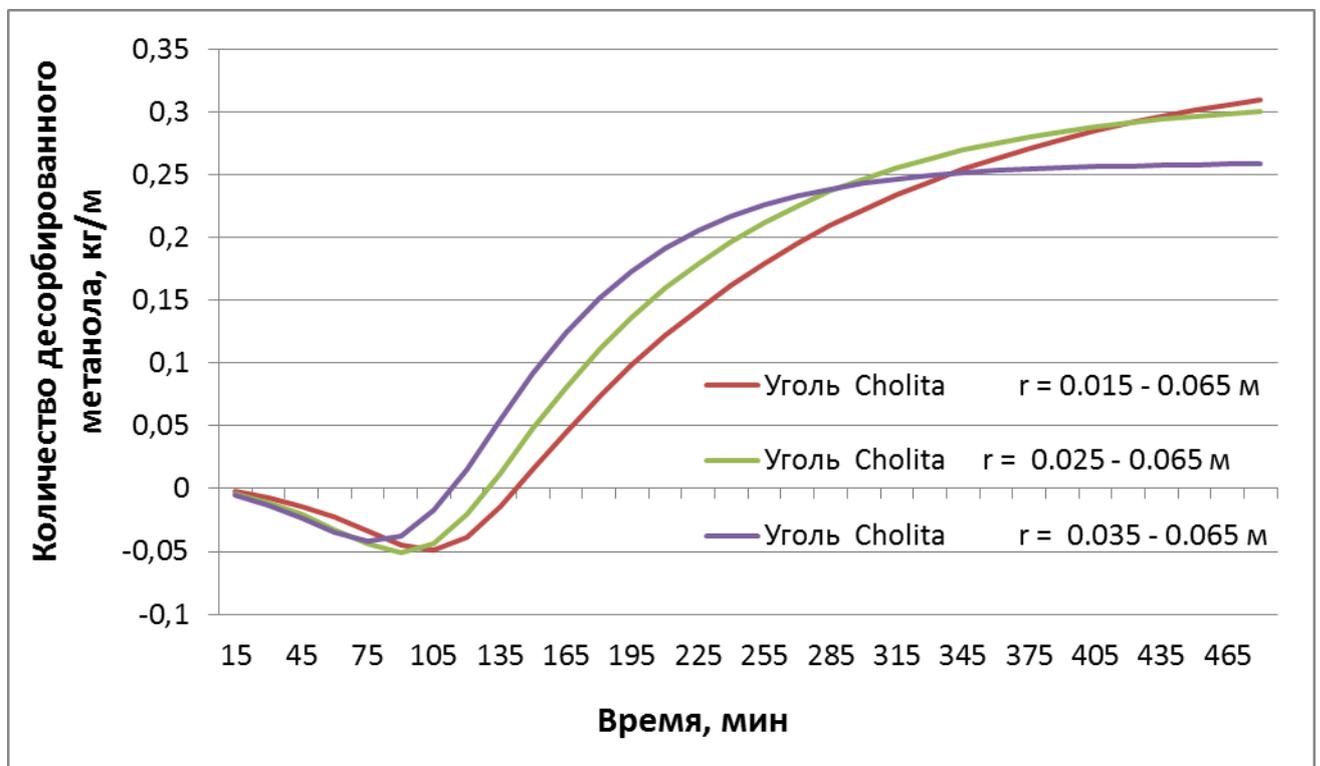


Рисунок 4.8. Количество десорбированного метанола во времени для угля Cholita при различных диаметрах коллектора

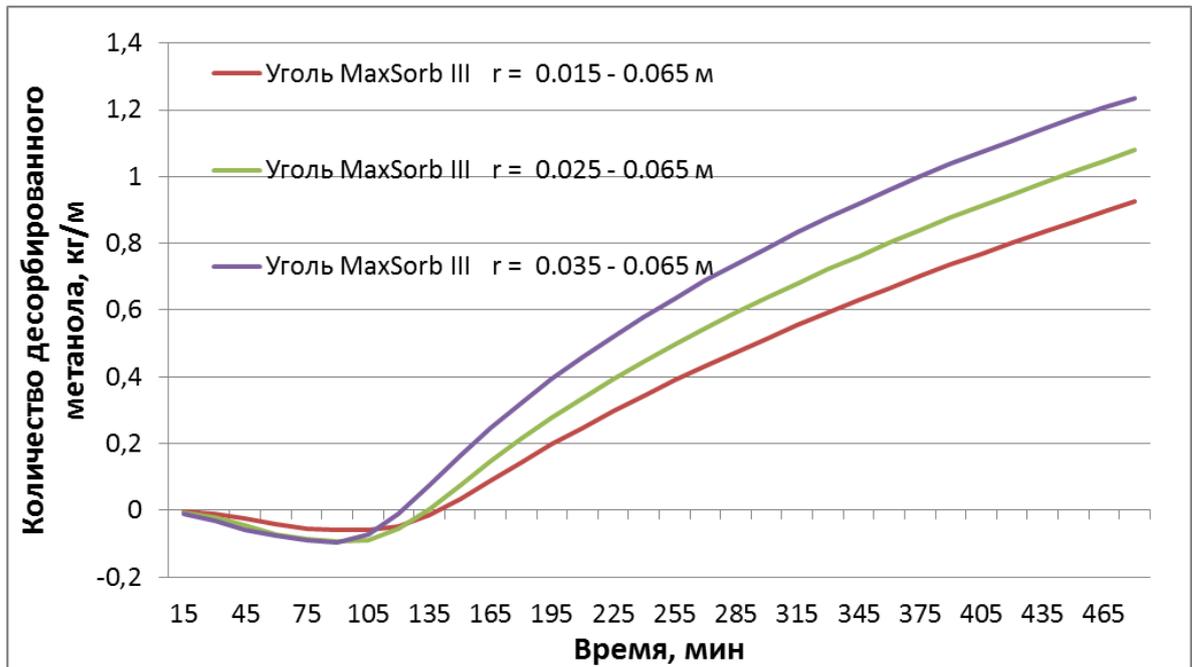


Рисунок 4.9. Количество десорбированного метанола во времени для угля MaxSorb III при различных диаметрах коллектора

Для углей с лучшими характеристиками (MaxSorb III, CNR115) уменьшение толщины слоя активированного угля приводит к увеличению общего количества десорбированного метанола, несмотря на то, что общая масса угля, помещенного в коллектор, уменьшается. Причиной является недостаточный прогрев сорбента на удалении от поверхности, воспринимающей солнечную радиацию.

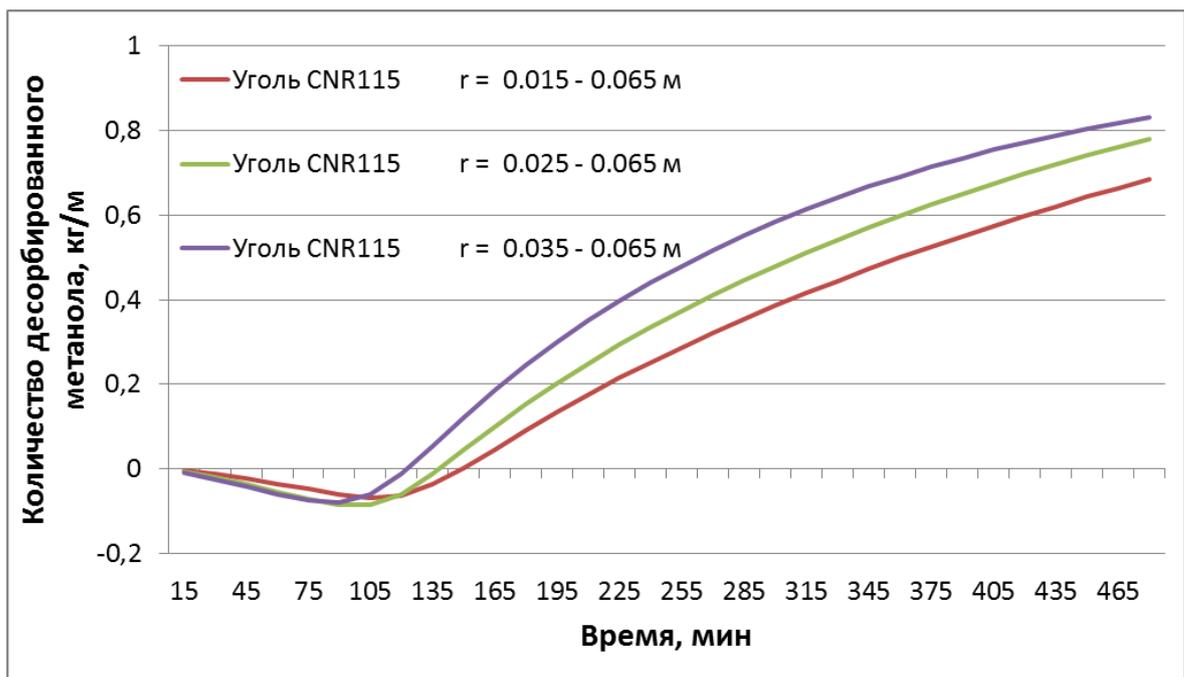


Рисунок 4.10. Количество десорбированного метанола во времени для угля CNR115 при различных диаметрах коллектора

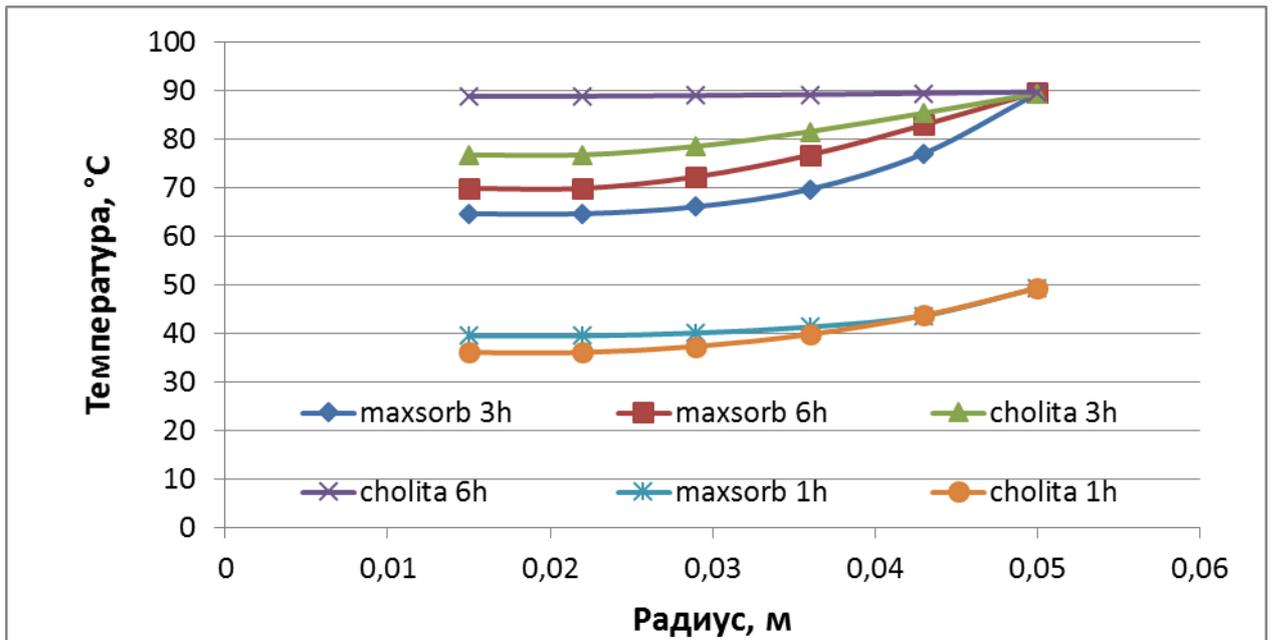


Рисунок 4.11. Распределение температуры в слое угля для углей MaxSorb III и Cholita

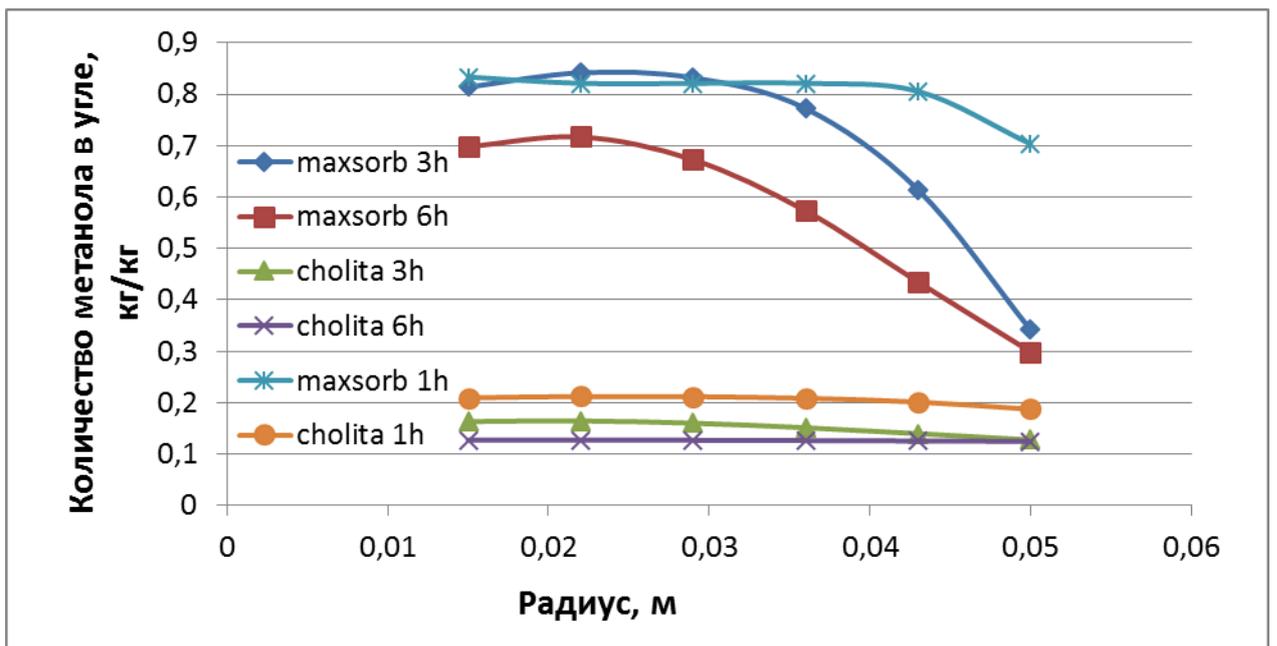


Рисунок 4.12: Распределение концентрации метанола в слое угля для углей MaxSorb III и Cholita

Для угля с худшими адсорбционными свойствами (Cholita1) расчеты показывают, что на начальных этапах десорбции предпочтительнее будет адсорбер с малой толщиной слоя угля, а после 6 часов работы - адсорбер с большей толщиной слоя. Это объясняется наличием двух противоположных

тенденций - количество первоначально поглощенного углем метанола тем больше, чем выше толщина слоя, а требуемое время прогрева тем меньше, чем тоньше слой.

Также замечено, что при выборе толщины слоя угля в солнечном коллекторе надо учитывать как сорбционные качества угля, так и климатические условия, в которых предполагается использование установки. На рисунках 4.11 и 4.12 представлены распределения температуры и концентрации метанола в слое адсорбента для углей Cholita и MaxSorb III. Наблюдаем, что в угле Cholita, который обладает худшими адсорбционными свойствами, чем уголь MaxSorbIII (Таблица 4.1) достаточно быстро устанавливается стационарный режим, и процесс десорбции прекращается раньше, до начала вероятного снижения солнечной радиации в реальном процессе.

Для исследования влияния температуры поверхности солнечного коллектора на количество десорбированного метанола были проведены численные эксперименты для следующих граничных условий на внешней стенке и в канале соответственно:

- $T = f(t)$, при этом максимальная температура $T_{max} = 100^{\circ}\text{C}$;
- $P_r = f(t)$, максимальное давление $P_{rmax} = 50$ кПа, что соответствует давлению насыщения метанола при температуре $T_{max} = 47^{\circ}\text{C}$.

Эти численные эксперименты проводились для активированного угля марки MaxSorb III, для трех различных геометрий коллектора. На рисунке 4.13 приводятся результаты расчетов. Наблюдая приведенные графики, замечено, что при увеличении температуры стенки коллектора растет количество десорбированного метанола (примерно на 20 %), при этом большее количество метанола соответствует меньшей толщине слоя угля. Используя результаты указанных расчетов, строятся графики распределений температуры и концентрации метанола в активированном угле (Рисунки 4.14 и 4.15) и анализируются совместно с графиками, представленными на Рисунке 4.13.

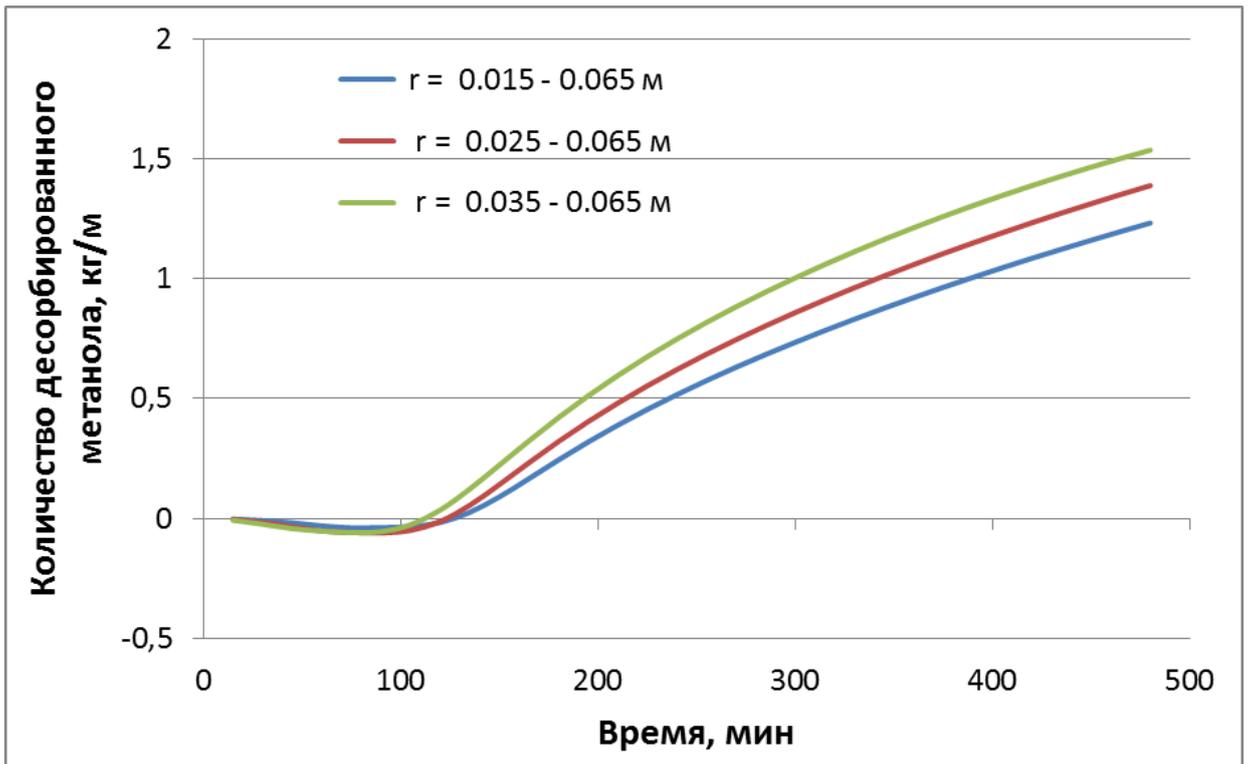


Рисунок 4.13. Количество десорбированного метанола во времени для угля MaxSorb III ($T_{max} = 100^\circ\text{C}$) при различных диаметрах коллектора

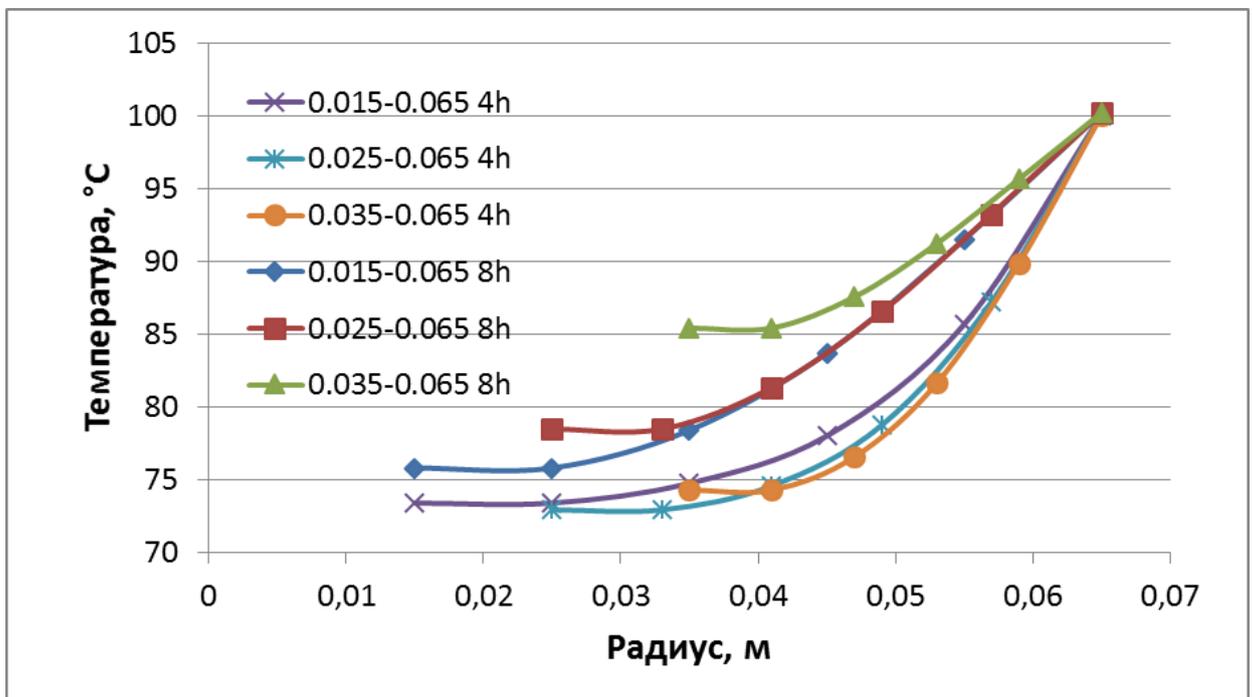


Рисунок 4.14. Распределение температуры в слое угля для угля MaxSorb III в разные моменты времени ($T_{max} = 100^\circ\text{C}$)

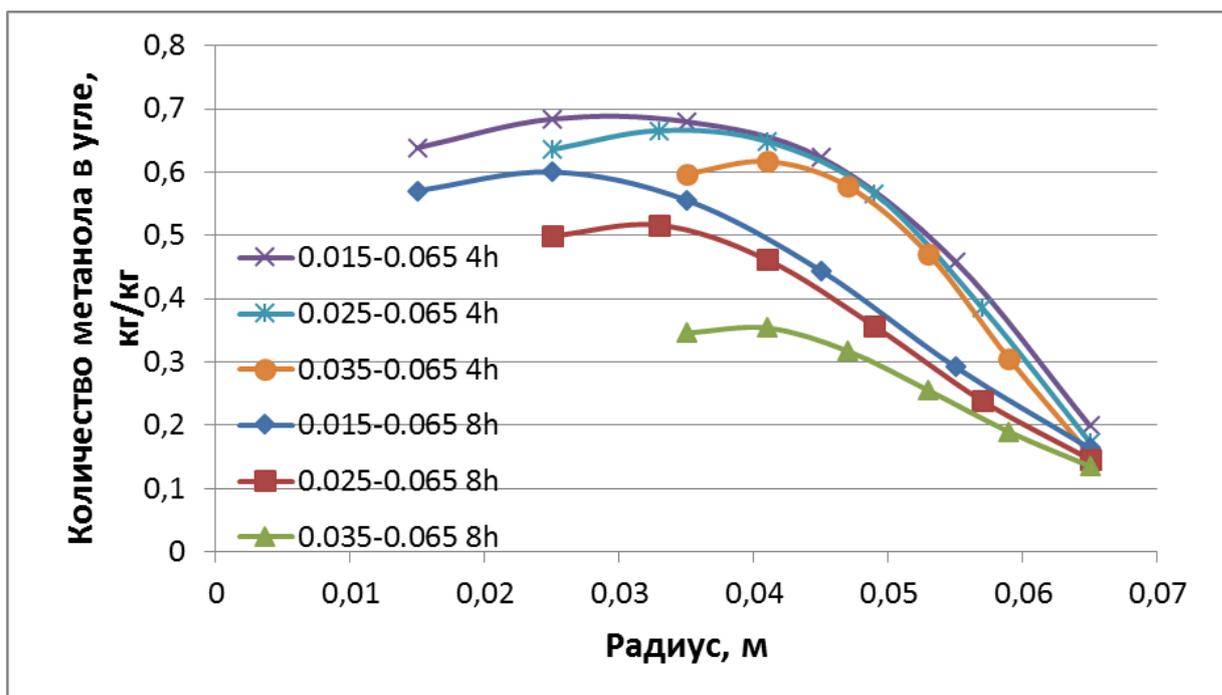


Рисунок 4.15. Распределение концентрации метанола в слое угля для различных моментов времени и геометрий, MaxSorb III ($T_{max} = 100^{\circ}\text{C}$)

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены результаты динамических расчетов для геометрии коллектора, соответствующей экспериментальным образцам Cholita и Cholada соответственно.

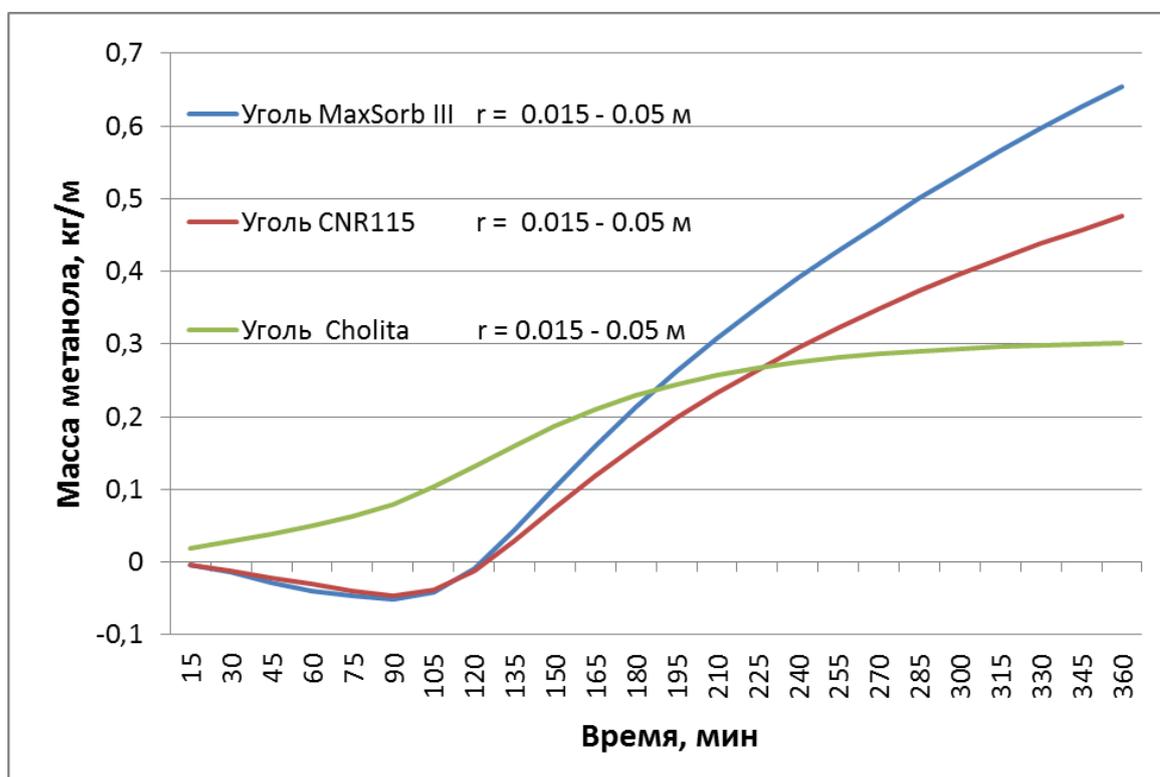


Рисунок 4.16. Количество десорбированного метанола во времени для прототипа Cholita при различных углях

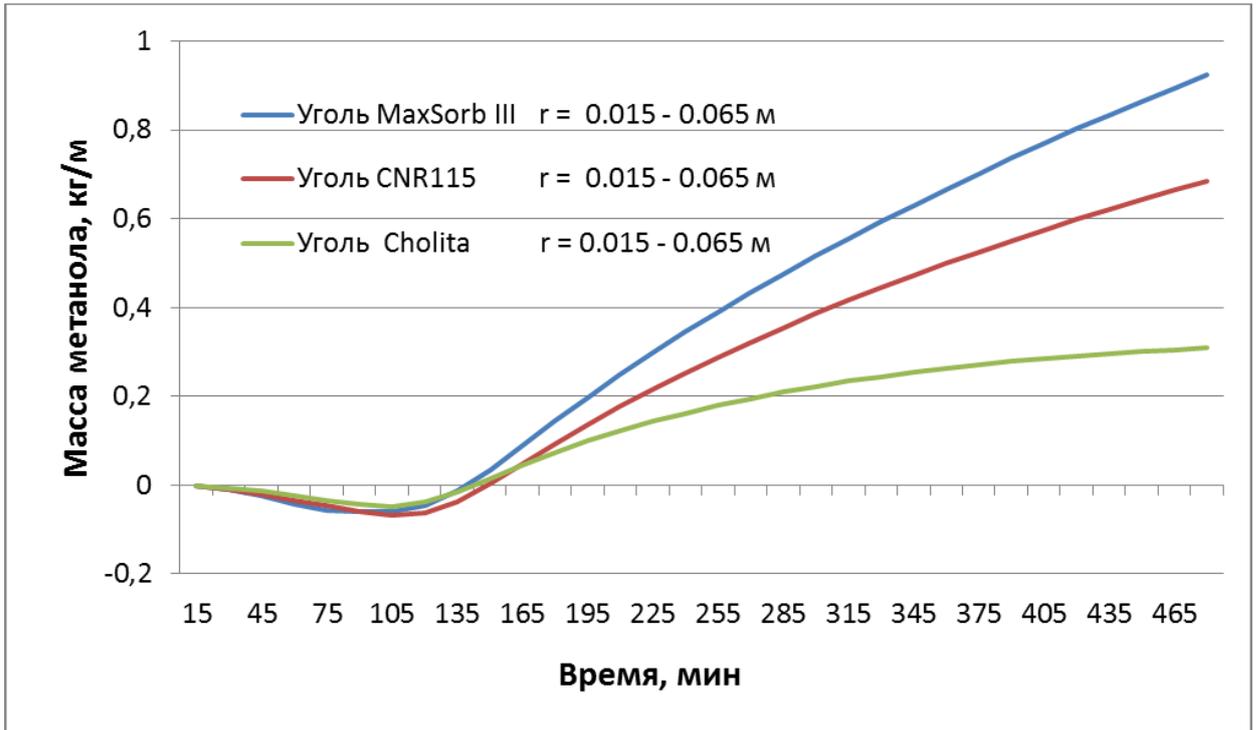


Рисунок 4.17. Количество десорбированного метанола во времени для прототипа Cholada при различных углях

Расчеты проводились для углей MaxSorb III, CNR115 и Cholita при следующих граничных условиях:

- $T = f(t)$, при этом максимальная температура $T_{max} = 90^{\circ}\text{C}$;
- $P_r = f(t)$, максимальное давление $P_{max} = 50$ кПа, что соответствует давлению насыщения метанола при температуре $T_{max} = 47^{\circ}\text{C}$.

Несмотря на то, что угли MaxSorb III, CNR115 не достигают равномерного прогрева по всему слою и не успевают прийти к равновесному состоянию в течение дневного этапа цикла, любой из этих углей был бы предпочтительней для использования в СХАТ.

На рис 4.18 представлены результаты численных расчетов для угля AguaSorb с вышеуказанными граничными условиями для двух различных диаметров внутреннего канала. Наблюдается, что в течение примерно 6-ти часов после начала прогрева коллектора для этого угля большее количество метанола десорбируется при более тонком слое сорбента. А по истечении 8-ми часов для

более толстого слоя угля получается большее количество десорбированного метанола.

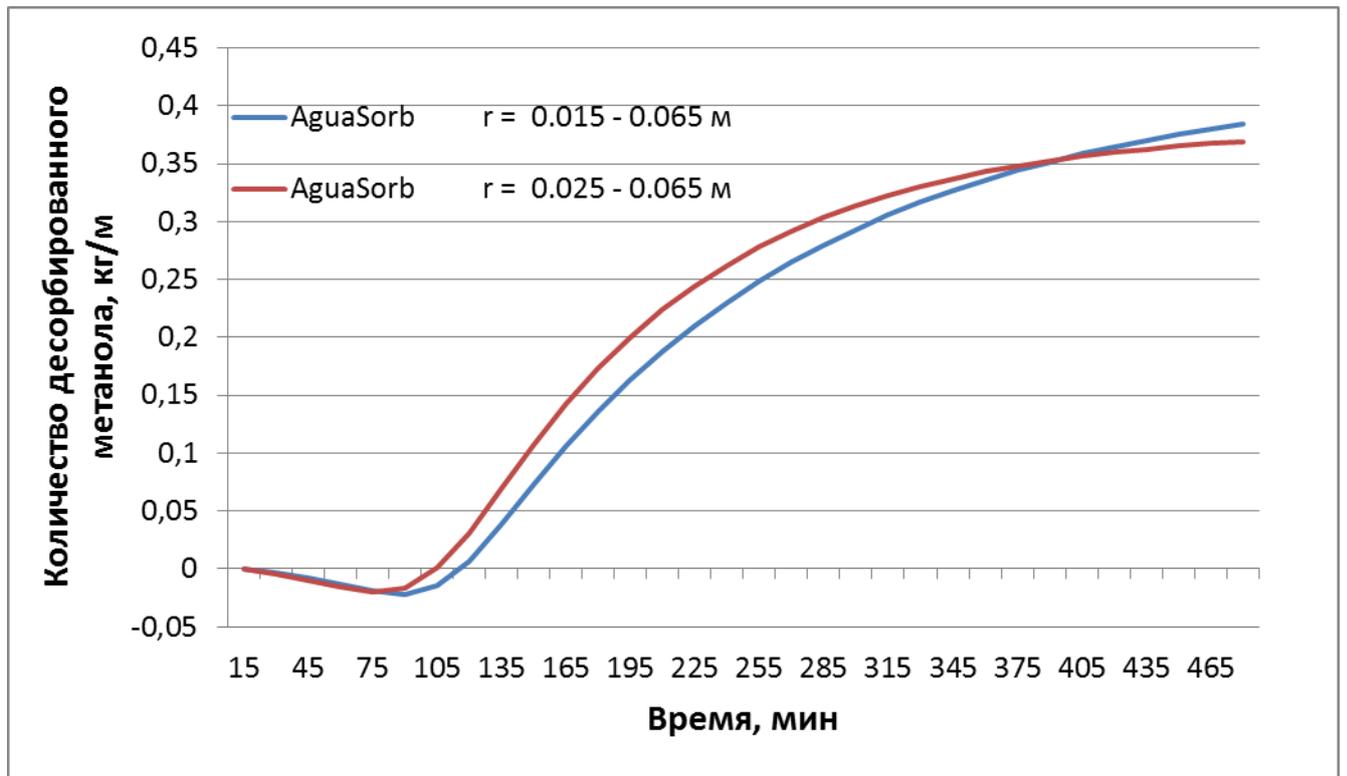


Рисунок 4.18. Количество десорбированного метанола во времени для угля AguaSorb при различных диаметрах коллектора

На основании представленных выше расчетов количества десорбированного метанола в течение восьмичасового процесса десорбции были рассчитаны характеристики СХАТ для трех предлагаемых размеров цилиндрического коллектора. Расчеты были проведены для углей AguaSorb, Cholita, CNR115 и MaxSorb III. Результаты расчета приводятся в таблице 4.6. Наблюдается, что для углей CNR115 и MaxSorb III с уменьшением толщины слоя угля увеличивается суточное производство холода и холодопроизводительность на единицу площади коллектора примерно на 20% и 33% соответственно, в то время как холодопроизводительность на единицу массы угля увеличивается на 61% и 77%. Уменьшение толщины слоя угля для углей с худшими адсорбционными свойствами - AguaSorb и Cholita – приводит к уменьшению суточного производства холода примерно на 16-18%, при этом удельная холодопроизводительность на единицу массы угля незначительно увеличивается.

Характеристики СХАТ

Уголь	Внутренний радиус коллектора	Суточная выработка холода, Q_{fr} , кДж	Удельная холодопроизводительность Q_{fr} / M_{carb} , кДж/кг	Удельная холодопроизводительность Q_{fr} / F_{sum} , кДж/м ²
MaxSorbIII	$r_a = 0.015$ м	2508	185	820
	$r_a = 0.025$ м	2900	238	948
	$r_a = 0.035$ м	3350	329	1095
CNR115	$r_a = 0.015$ м	1860	137	608
	$r_a = 0.025$ м	2115	174	691
	$r_a = 0.035$ м	2250	221	735
Cholita	$r_a = 0.015$ м	838	61.8	273
	$r_a = 0.025$ м	813	66.7	265
	$r_a = 0.035$ м	705	69.3	230
AguaSorb	$r_a = 0.015$ м	1040	76.7	340
	$r_a = 0.025$ м	1000	82.0	327
	$r_a = 0.035$ м	857	84.2	280

4.4 Исследование влияния условий теплообмена в конденсаторе на работу СХАТ

Условия теплообмена в конденсаторе будут определять давление в системе во время процесса десорбции. Здесь параметрически изменяется временная кривая давления в системе (граничное условие внутри канала), оставляя остальные ГУ неизменными. Производится расчет для угля AguaSorb и пропорций солнечного коллектора с размерами:

Choladal $r_a = 0.025$ м, $r_b = 0.065$ м;

И для следующих граничных условий:

Условие 1

• $T = f(t)$, при этом максимальная температура $T_{max} = 90^\circ\text{C}$;

• $P_r = f(t)$, максимальное давление $P_{rmax} = 50$ кПа, что соответствует давлению насыщения метанола при температуре $T_{max} = 47^\circ\text{C}$.

Условие 2

• $T = f(t)$, при этом максимальная температура $T_{max} = 90^\circ\text{C}$;

• $P_r = f(t)$, максимальное давление $P_{rmax} = 35$ кПа, что соответствует давлению насыщения метанола при температуре $T_{max} = 39^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов представлены на Рисунке 4.19.

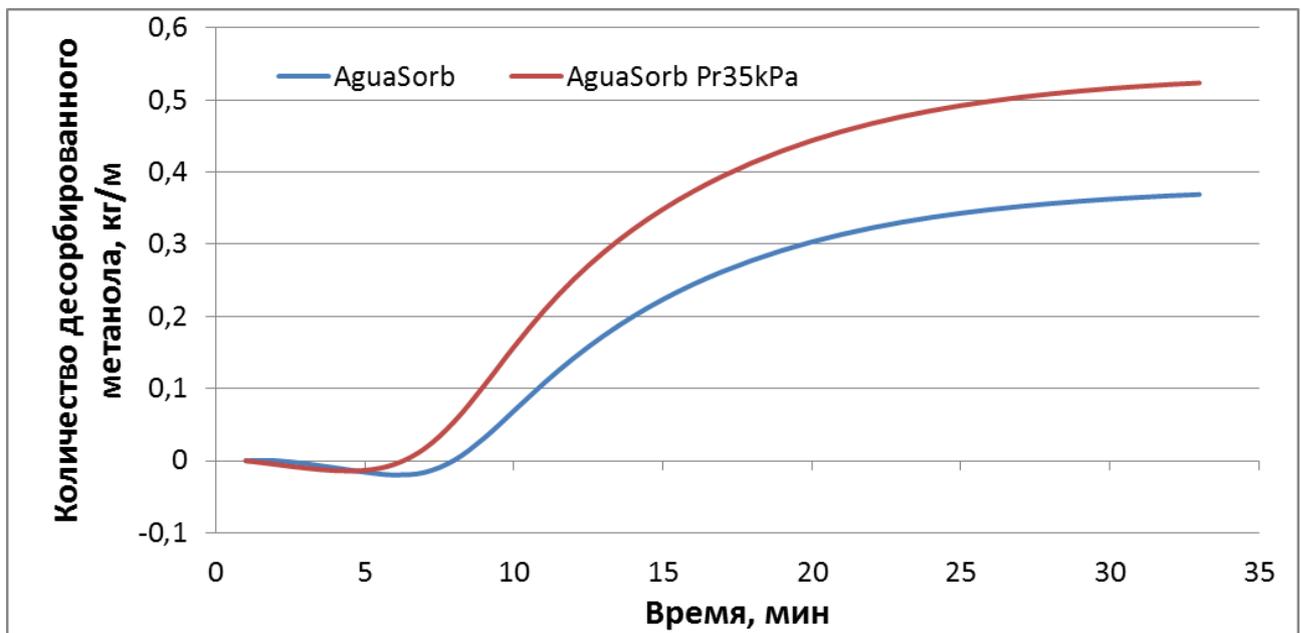


Рисунок 4.19. Количество десорбированного метанола во времени для угля AguaSorb при различных P_r

Наблюдается, что изменение условий отвода тепла в конденсаторе, приводящее к указанному снижению давления в системе в течение процесса десорбции приводит к увеличению общего количества метанола в СХАТ почти на 40%, а это означает, что и суточное производство холода для установки, использующей уголь AguaSorb также вырастет на 40%.

4.5 Выводы к главе 4

1. Проведены численные эксперименты, в которых исследовано влияние различных параметров на работу СХАТ.
2. Исследовано влияние сорбционных свойств угля на характеристики установки.
3. Исследовано влияние климатических условий на работу СХАТ. Интенсивность солнечной радиации определяет динамику прогрева слоя угля, а дневные температуры определяют потери теплоты с поверхности адсорбера, температуру в конденсаторе и теплопритоки в холодильной камере. В расчетах исследовалось влияние температуры поверхности солнечного коллектора и охлаждающей воды в конденсаторе, которое наиболее сильно отражаются на холодопроизводительности.
4. Показано, что во всех случаях одинаковое снижение температуры в конденсаторе и адсорбере увеличивает количество десорбированного метанола, которое для разных марок углей отличается. Это означает, что холодопроизводительность СХАТ, использованной в местах с умеренным климатом, может быть не хуже, чем в местах с более жарким климатом.
5. Проведены численные исследования работы СХАТ в зависимости от толщины слоя угля в солнечном коллекторе при постоянном внешнем радиусе адсорбера (65 мм) и при переменном радиусе внутреннего канала адсорбера (15 мм, 25мм и 35 мм). Показано, что для углей с высокой сорбционной способностью уменьшение толщины слоя угля увеличивает суточное производство холода, холодопроизводительность на единицу площади коллектора и холодопроизводительность на единицу массы угля. Рост этих показателей может составлять десятки процентов.

ГЛАВА 5. МЕТОД РАСЧЕТА СХАТ

5.1 Последовательность расчета

В предыдущих главах автором был проведен анализ исследований в области производства холода, используя феномен адсорбции. Несмотря на большое количество работ, посвященных этой теме, в настоящее время физические процессы, происходящие в элементах СХАТ, не являются достаточно изученными, и не существует метода расчета СХАТ. Отсутствие метода расчета и проектирования солнечных холодильных установок адсорбционного типа не позволяет предсказывать их технические характеристики и экономический эффект от их использования. Цель расчета - найти требуемые конструктивные характеристики адсорбера и других элементов установки в заданной местности для обеспечения необходимой холодопроизводительности. Как показали практика создания подобных установок и приведенные в данной работе результаты, расчет СХАТ на основании равновесных состояний пары «активированный уголь-метанол» может приводить к большим ошибкам.

Для определения целесообразности использования СХАТ в определенных климатических условиях было бы дорого и трудоемко проводить экспериментальные исследования, поэтому разработка расчетного метода имеет важное значение. Метод основан на представленной в Главе 3 математической модели физических процессов происходящих в холодильнике.

Метод реализуется в следующей последовательности:

1. Определяются исходные данные для расчета: требуемая холодопроизводительность установки; климатические условия: плотность радиационного потока теплоты, поступающего на поверхность адсорбера в течение суток как функция времени; температуры окружающей среды в дневное и ночное время (по часам); температура охлаждающей воды в конденсаторе установки.

2. Определяется примерное количество циркулирующего в установке метанола на основе заданной холодопроизводительности, с учетом только затрат теплоты на первоначальное охлаждение воды, находящейся в испарителе и теплоты фазового перехода воды из жидкого состояния в твердое.

3. Составляется перечень доступных проектировщику марок активированного угля с известными параметрами уравнения Дубинина-Астахова.

4. Используются данные о солнечной почасовой радиации для определения граничного условия на поверхности адсорбера на основании линейной зависимости температуры поверхности коллектора и температуры окружающей среда от падающего радиационного потока:

$$T_{кол} - T_{о.с.} = k \cdot \bar{q} + c, \quad (5.1)$$

где $T_{кол}$, $T_{о.с.}$ – температуры коллектора и окружающей среды, \bar{q} – осредненная текущая радиация, Вт/м², коэффициенты: k – инертности системы и c – поправочный коэффициент, для коллекторов с геометрическими размерами, описанными в данной работе, найденные автором. В случае отсутствия подобной зависимости используются данные из литературы или проводятся предварительные эксперименты.

5. Производится расчет максимального X_{max} и минимального X_{min} количества адсорбированного углем метанола по равновесной модели Дубинина-Астахова, разница $\Delta X = X_{max} - X_{min}$ между которыми и представляет собой количество метанола на единицу массы угля, которое циркулирует в СХАТ при имеющихся климатических условиях для обеспечения заданной холодопроизводительности.

Следует заметить, что это количество вычисляется в предположении идеальных условий, когда весь активированный уголь, помещенный в установку, находится при одинаковой температуре, достигнутой на внешней поверхности цилиндра, и кроме того, находится в состоянии равновесия с метанолом. Этот расчет производится для всех доступных марок активированного угля, и выбирается тот уголь, у которого разница ΔX имеет наибольшее значение.

6. Необходимое количество угля для установки рассчитывается как частное от деления общего количества метанола, которое должно циркулировать в системе, чтобы обеспечить заданную холодопроизводительность, на величину ΔX , полученную в п.5. Выбирается внутренний и внешний диаметры адсорбера, например, как в экспериментальном образце: $r_{внутр}=0.015$ м, $r_{внеш}=0.065$ м. Длина адсорбера определяется в зависимости от требуемой массы угля.

7. Производится расчет динамических характеристик пары активированный уголь-метанол в адсорбере СХАТ по разработанной в диссертации программе на основе предложенной математической модели. Определяются распределения концентраций адсорбированного метанола, температуры, давления и концентраций паров метанола в слое угля в различные моменты времени.

8. Путем интегрирования по объему слоя угля полученных в расчетах концентраций адсорбированного метанола, и учитывая начальные их распределения, определяется общее количество десорбированного в установке метанола, которое сравнивается с его значением, вычисленным в п.2. В случае если отличие не превышает 10 %, расчет считается законченным.

9. В противном случае имеется два возможных пути достижения холодопроизводительности:

- Увеличение количества угля и соответствующего ему количества метанола, циркулирующего в системе путем увеличения длины модулей адсорбера или их количества (экстенсивный путь, не сопровождающийся улучшением характеристик установки);
- Уменьшение слоя угля за счет увеличения внутреннего диаметра адсорбера и соответствующего увеличения длины (количества) модулей адсорбера при сохранении массы угля. Таким образом, может быть достигнут лучший прогрев (охлаждение) угля, и приближение концентраций к равновесным значениям.

10. Если производится изменения радиуса внутреннего канала, то для каждого нового значения повторяется расчет динамических характеристик в слое угля. Следовательно, необходимо возвратиться к п. 7 и продолжать расчет до

достижения необходимой массы циркулирующего метанола в системе, обеспечивающей заданную холодопроизводительность установки.

5.2 Пример расчета СХАТ

Ниже приведен пример расчета экспериментальной установки на основании предложенного метода.

1. Пусть необходимо получать 5 кг льда в сутки. Место предполагаемой эксплуатации установки – Доминиканская Республика, данные по климатическим условиям, представлены во второй главе.
2. Составляется уравнение энергобаланса без учета потерь в окружающую среду (изначально имеется 5 кг воды при температуре 30°C):

$$m_v c\Delta T + m_v L_v = m_{met} L_{met} \quad (5.1)$$

где m_v — масса воды, находящейся в холодильной камере, которая, как предполагается, перейдет в твердую фазу, C — удельная теплоемкость воды; m_{met} — масса метанола, находящегося в испарителе; L_{met} — теплота фазового перехода метанола из жидкого состояния в газообразное;

L_v — теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в лед.

Из этого уравнения получается количество метанола, необходимое, чтобы охладить и заморозить 5 кг воды: $m_{met} = 2.04$ кг. Таким образом, задается холодопроизводительность установки 2,2 МДж в сутки, и определяется количество метанола, которое должно циркулировать в установке в течение суточного цикла.

3. Находится информация о марках активированных углей, которые являются доступными в г. Санто-Доминго. В Таблице 5.1 представлены параметры уравнения Дубинина-Астахова для углей указанных марок [46]:

Параметры уравнения Дубинина–Астахова для различных марок угля

№	Марка угля	Параметры уравнения Дубинина–Астахова		
		X_0	β	n
1	Doshion	0.214	$3.81 \cdot 10^{-8}$	2.482
2	Jacobi	0.236	$1.3 \cdot 10^{-4}$	1.4
3	Aguasorb	0.327	$1.92 \cdot 10^{-5}$	1.6356

4. Анализируются кривые почасовой солнечной радиации и, по эмпирической зависимости, приведенной в Главе 2, определяется температура на поверхности цилиндра солнечного коллектора. Для выбранного коллектора в условиях Доминиканской Республики в течение большего количества циклов дневная температура достигает 90°C , и в наиболее жаркие дни 100°C .
5. Производится расчет максимального X_{max} и минимального X_{min} количества адсорбированного углем метанола по равновесной модели Дубинина–Астахова для всех рассматриваемых активированных углей. Результаты расчетов приводятся в Таблице 5.2 для дневных и ночных температур в г. Санто-Доминго, которые составляют:

день: $T_{col} = 90^\circ\text{C}$, $T_{cond} = 30^\circ\text{C}$;

ночь: $T_{col} = 20^\circ\text{C}$, $T_{evap} = 0^\circ\text{C}$.

Таблица 5.2

Результаты расчета максимального X_{max} и минимального X_{min} количества адсорбированного углем метанола

Марка угля	X_0	β	n	$X_{мин}$	$X_{макс}$	ΔX
Doshion	0.936	$1.3 \cdot 10^{-4}$	1.4	0.0963	0.1968	0.1005
Jacobi	0.992	$4.022 \cdot 10^{-6}$	2	0.0897	0.1450	0.0553
AguaSorb	0.259	$1.92 \cdot 10^{-5}$	1.64	0.0690	0.1962	0.1273

Выбирается уголь AguaSorb, так как для этого угля получается большее количество циркулирующего метанола на каждый килограмм активированного угля.

6. Рассчитывается количество угля, которое будет гарантировать полученное в п.2 количество циркулирующего метанола в системе (2кг/0.1273). Оно составляет 16 кг. Выбирается внутренний и внешний диаметры адсорбера, как в экспериментальном образце: $r_{внутр}=0.015$ м, $r_{внеш}=0.065$ м. Учитывая общий объем угля и площадь поперечного сечения выбранного коллектора, получается его длина, равная 2.5 м.
7. Производится расчет динамических характеристик пары активированный уголь-метанол в адсорбере СХАТ по разработанной в диссертации программе на основе предложенной математической модели. Находятся распределения концентраций адсорбированного метанола, температуры, давления и концентраций паров метанола в слое угля в различные моменты времени.
8. Проинтегрировав количество метанола, содержащегося в слое угля, по объему угля, определяется количество десорбированного во времени метанола на единицу длины коллектора (Рисунок 5.1).

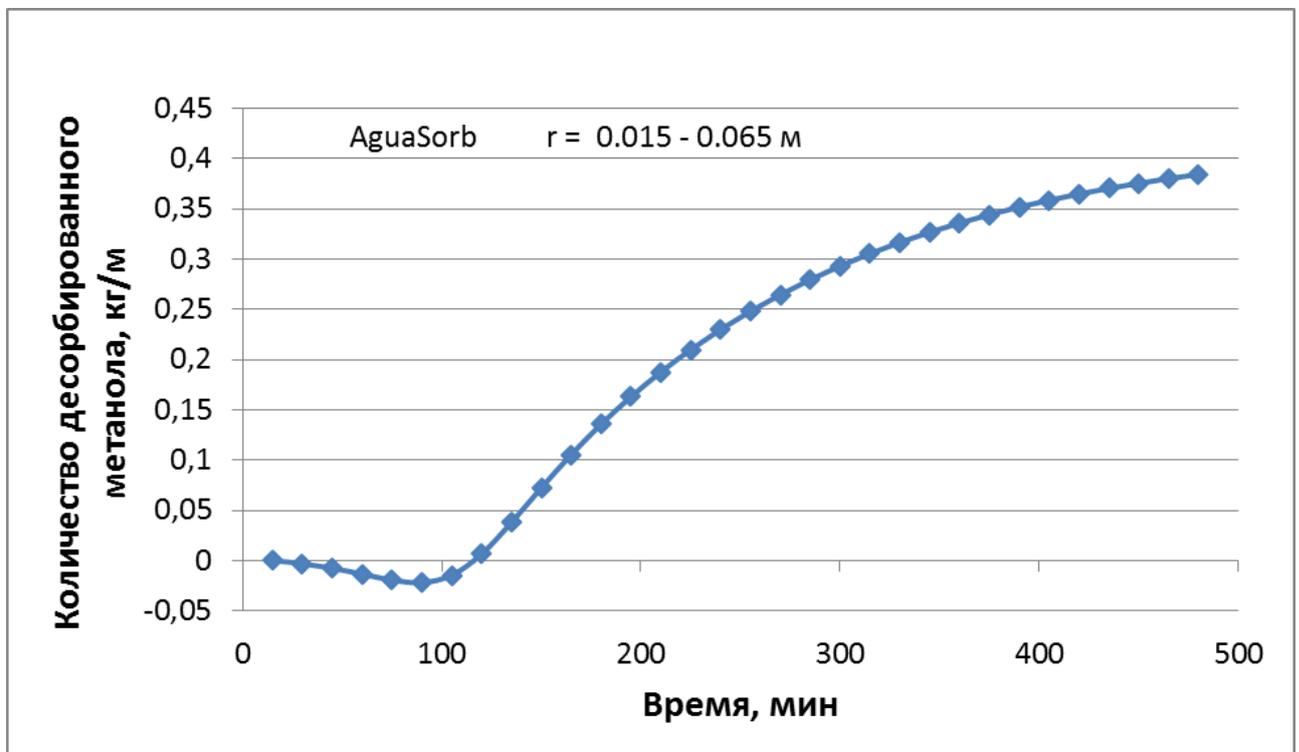


Рисунок 5.1. Изменение количества десорбированного метанола во времени на единицу длины коллектора

Учитывая длину коллектора, получается общее количество десорбированного метанола: 0.95 кг, что не удовлетворяет исходным данным, поскольку разница с заданной холодопроизводительностью составляет более 50%.

9 Изменяется радиус внутреннего канала коллектора: $r_{внутр}=0.025$ м, $r_{внеш}=0.065$ м и $r_{внутр}=0.035$ м, $r_{внеш}=0.065$ м, и повторяются динамические расчеты.

На графике (Рисунок 5.2) представлено изменение количества десорбированного метанола во времени на единицу длины коллектора, рассчитанное для трех различных размеров внутреннего канала. Наблюдается, что для угля AguaSorb уменьшение толщины слоя угля в коллекторе приводит к более быстрому прогреву слоя, но при этом, общее количества метанола по завершению процесса десорбции не увеличивается. Единственной возможностью достижения заданной холодопроизводительности при использовании угля AguaSorb остается увеличение общей длины солнечного коллектора до 5-ти метров.

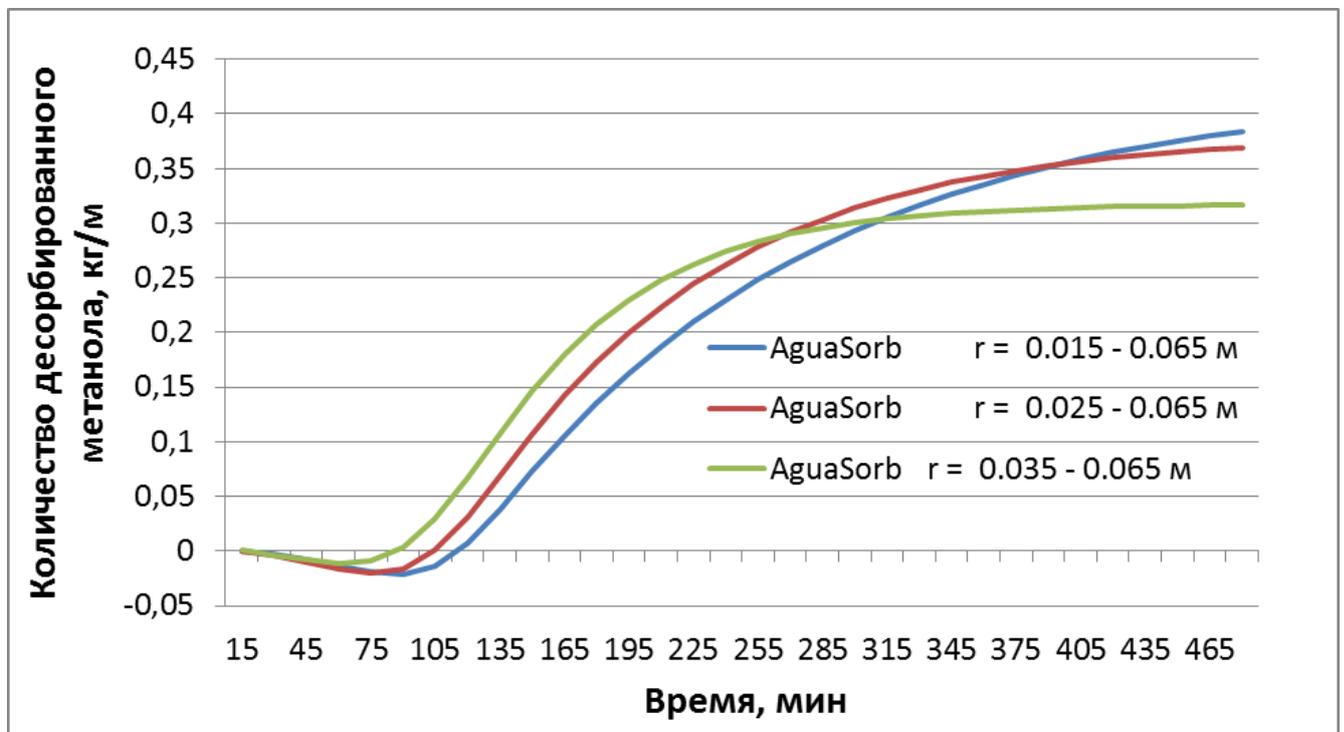


Рисунок 5.2. Количество десорбированного метанола на единицу длины коллектора для различных слоев угля

Для улучшения характеристик проектируемого СХАТ при выборе интенсивного пути проектирования рекомендуется заменить активированный уголь.

Пусть доступен уголь CNR115. Проведем динамические расчеты для трех размеров внутреннего канала и одного размера внешнего радиуса коллектора. На Рисунке 5.3 приводится зависимость количества десорбированного метанола во времени на единицу длины коллектора для трех указанных размеров.

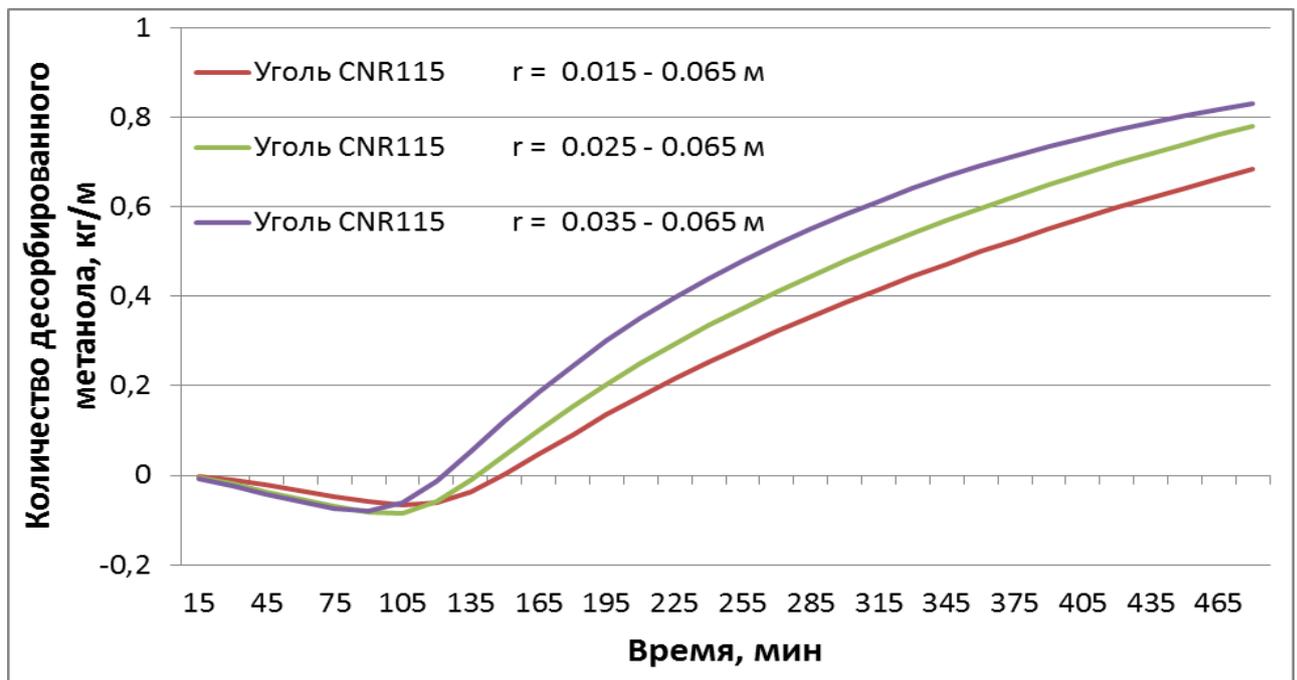


Рисунок 5.3. Количество десорбированного метанола на единицу длины коллектора для различных слоев угля CNR115

Наблюдается, что при использовании угля CNR115, большее количество метанола было бы получено при меньшей толщине слоя угля. Достигается заданная для коллектора с размерами $r_{внутр}=0.035$ м, $r_{внеш}=0.065$ м и длиной 2.5 м холодопроизводительность.

Таким образом, предлагаемый расчетный метод позволяет не только найти характеристики установки заданной холодопроизводительности, но и подобрать ее наилучший вариант для заданных климатических условий.

5.3 Выводы к главе 5

1. Разработан метод расчета СХАТ, который основан на использовании математической модели процессов, происходящих в адсорбере. Метод позволяет найти требуемые конструктивные характеристики адсорбера и других элементов установки в заданной местности для обеспечения необходимой холодопроизводительности.
2. Приведен пример расчета СХАТ и показана возможность использования программы для обеспечения улучшения его характеристик.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведен анализ состояния исследований в данной области, изучены подходы к описанию и существующие математические модели физических процессов, происходящих в установках данного типа.

2. Произведено экспериментальное исследование солнечной почасовой радиации в г. Санто-Доминго необходимое для проектирования СХАТ, предназначенных для работы в данном регионе.

3. Проведена серия испытаний адсорбционной способности различных марок активированного угля относительно метанола. Показано, что адсорбционные способности всех испытанных в экспериментах (5 образцов) марок активированного угля относительно метанола подчиняется уравнению Дубинина-Астахова и существенно различаются. Определены параметры этого уравнения для каждой марки угля.

4. Разработан ряд действующих образцов СХАТ. Продемонстрирована устойчивая работа установок в течение 10-16 месяцев и возможность получения льда для аккумулялирования холода.

5. Проведено экспериментальное исследование работы установок с различными типами углей в различных климатических условиях. Показано, что температура охлаждающей воды в конденсаторе очень существенно влияет на холодопроизводительность установки. Полученные данные могут быть использованы для разработки и верификации новых математических моделей подобных установок.

6. Разработана математическая модель нестационарных процессов тепло- и массообмена, протекающих в адсорбере СХАТ, которая позволяет определить распределение температур и концентраций метанола в кольцевом слое сорбента во времени при изменении внешних условий, количество десорбированного метанола и удельную холодопроизводительность установки. Произведена проверка адекватности модели путем сопоставления с экспериментальными

данными по количеству десорбированного метанола в процессе работы установки.

7. Проведены численные исследования работы солнечной адсорбционной холодильной установки с различными конструктивными параметрами при различных характеристиках активированного угля для разных климатических условий. Установлено, что при одинаковых климатических условиях и для одного и того же угля холодопроизводительность будет зависеть от толщины слоя активированного угля в коллекторе.

8. На основании предложенной математической модели разработан метод расчета СХАТ периодического действия, использующий рабочую пару «активированный уголь-метанол».

9. Даны практические рекомендации по выбору геометрических характеристик СХАТ и сорбционных свойств сорбента для заданных климатических условий. Впервые показано, что для различных климатических условий целесообразно применять сорбенты с различными характеристиками.

Список литературы

1. Патент на полезную модель «Аппарат для производства холода и охлаждения жидкостей» / Якоб Перкинс № 6662 от 1834г.
2. Patent «Manufacturing- ice»/ C. Twining US 10221 A, 8 -11- 1853.
3. Leslie, J. A Short Account of Experiments and Instruments, Depending of the Relations of the Air, Heat and Moisture/ John. Leslie- London, 1813.
4. Patent «Improvement in apparatus for freezing liquids»/ F. P. E Carre US 30201 A 02-10-1860
5. Patent « Improvement in the manufacture of-ice»/ F. P. E Carre USRE5288 E 18-02-1873
6. Patent « Refrigeration» / Einstein Albert, Szilard Leo, US1781541 A, 11-11-1930
7. Einstein A., Szilard L. Refrigeration, US Patent №1.781.541. 1930.
8. Einstein A., Szilard L. Accompanying notes and remarks, US Patent № 1.781.541. 1930.
9. Einstein A., Szilard L. Improvements Relating to Refrigerating Apparatus, UK Patent № 282.428. 1928.
10. Patent « Refrigeration» / Einstein Albert, Szilard Leo, US1781541 A, 11-11-1930
11. Meunier, F. Performance of adsorption heat pumps: Active Carbon - Methanol and Zeolite - Water paire., Research Report, LIMSI / F. Meunier, N. Douss – France: CNRS, Orsay, 1992. -№ 3412.
12. Wang, D.C. A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in the physical adsorption systems/ D.C. Wang, Y.H. Li, D. Li, Y.Z. Xia, J.P. Zhang // Renewable and Sustainable Energy Review- 2010.- № 14, pp. 344-353.
13. Tchernev, D.I. Natural zeolites: Occurrence properties and use/ D.I. Tchernev- London, UK: Pergamon Press, 1978.
14. Tchernev D.I. Solar air conditioning and refrigeration systems utilizing zeolites, Proceeding of meeting of Commission E1-E2 / D.I. Tchernev .// Erusalem: Issued by International Institute of Refrigeration.- 1979.-pp. 209-215.

15. Dupont M. Study of solar ice conservators using day night intermittent zeolite 13X-water cycle in temperate and tropical climates / M. Dupont, J.J. Guillemint, F. Meunier, P. Nguyen// Proceeding of meeting of Commission E1-E2, Erusalem. Issued by International Institute of Refrigeration.- 1982.-pp. 193-200.
16. Grenier, P. Experimental results on a solar 12 m² powered cold store using intermittent zeolite 13X-water cycle/ P. Grenier, J.J. Guillemint, M. Mester, F. Meunier, M. Pons// Szokolay SV,editor. Solar World Congress, Pergamon Press.- 1984 - №1.
17. Chua T. Adsorption characteristics of silica gel and water systems / T. Chua, K.C. NG, A. Chakraborty, N.M. Oo, M.A. Othman // Chemical Engineering.-2002-№ 47 –pp. 77-81.
18. Poyelle F. Experimental tests and predictive model of an adsorptive air conditioning unit Industrial Engineering / F. Poyelle, J.J. Guillemint, F. Meunier // Chemistry Research. -1999.-№38(1)-pp.298- 309.
19. Cho, S.H. Modeling of a silica gel/water adsorption-cooling system / S.H. Cho, J.N. Kim //Energy :Oxford.-1992.-№17 (9)-pp.829-839.
20. Vasiliev, L.L. Multi-effect complex compound/ammonia sorption machines / L.L. Vasiliev, D.A. Mishkinis, L.L. Vasiliev // International Adsorption Heat Pump Conference: Montreal, Canada.-1996 - pp. 3-8.
21. Tamainot-Telto, Z. Adsorption refrigerator using monolithic carbon- ammonia paire / Z. Tamainot-Telto, R.E. Critoph // International Journal of Refrigeration. -1997.- №20(2) –pp. 146-155.
22. Tamainot-Telto, Z. Advanced sold sorption air conditioning modules using monolithic carbon-ammonia paire / Z. Tamainot-Telto, R.E. Critoph // Applied Thermal Engineering.-2003.-№ 23(6) –pp. 659-674.
23. Critoph, R.E. Ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling / R.E. Critoph//Renewable Energy.-1994.-№ 5- pp. 502-508.
24. Critoph, R.E. Forced convection adsorption cycles / R.E. Critoph // Applied Thermal Engineering.-1998.- №18(9- 10) – pp. 799-807.

25. Critoph, R.E. Forced convection adsorption cycles with packed bed heat regeneration/ R.E. Critoph // International Journal of Refrigeration.-1999.-№ 22 (1) - pp. 38-46.
26. Critoph, R.E. Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigeration machine/ R.E. Critoph // Renewable Energy.-1999.-№1-4 (2) - pp. 673-678.
27. Jones, J.A. Sorption refrigeration research / J.A. Jones // Heat Recovery Systems.: CHP-1993.-№ 13 (4).- pp. 363-371.
28. Jones, J.A. Carbon/ammonia regenerative adsorption heat pump / J.A. Jones// Proceeding of International absorption heat pump conference.-1994-pp. 449-455.
29. Jones, J.A. High efficiency regenerative adsorption heat pump / J.A. Jones, V. Christophilos// ASHRAE Transactions.-1993 - № 99 - pp.54-60.
30. Vasiliev, L.L. New solid sorption refrigerator / L.L. Vasiliev, D.A. Mishkinis, A.A. Antukh, Jr. L.L. Vasiliev // Proceeding of International conference on energy and environment, ICEE- 1998.-pp. 169-176.
31. Vasiliev, L.L. Solid-gas solid sorption heat pump/ L.L. Vasiliev, D.A. Mishkinis, A.A. Antukh, Jr. L.L. Vasiliev // Applied Thermal Engineering.-2001.-№ 21 (5) – pp. 573-83.
32. Critoph, R.E. Possible adsorption pairs for use in solar cooling / R.E. Critoph, R.E. Vogel // Ambient Energy.- 1986.-№ 7 (4) - pp. 183-90.
33. Wang, R.Z. Study on a new adsorption refrigeration pair, active carbon fiber-methanol/ R.Z. Wang, J.P. Jia, Y. Teng, Y.H. Zhu, J.Y. Wu // ASME: Journal of Solar Energy Engineering -1997.-№ 119.- pp. 214-218.
34. Cacciola, G. Composites of activated carbon for refrigeration adsorption machines/ G. Cacciola, G. Restuccia, L. Mercadante // Carbon.- 1995.- №33 (9).- pp. 1205-1210.
35. Hu, E.J. A study of thermal decomposition of methanol in solar powered adsorption refrigeration machines / E. J.Hu // Solar Energy.- 1998.- № 62 (5)- pp. 325-329.
36. Boubakri, A. Adsorptive solar powered ice maker: Experiments and model / A. Boubakri, J.J. Guilleminot, F. Meunier.- Solar Energy, 2000.-Vol. 69, No 3, pp. 249-263.

37. Anyanwu, E.E. Transient analysis and prediction of a solid adsorption solar refrigerator / E.E. Anyanwu, N.V. Ogueke // *Applied Thermal Engineering*. -2007.- Vol. 27, pp. 2514-2523.
38. Попель, О.С. Энергетические показатели солнечного адсорбционного холодильника: оптимальная температура регенерации ISJAEEN / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.И. Аристов // *Теплоэнергетика*. -2007.-№10- С. 54.
39. Luo, L. Transiente Thermal Study of an Adsorption Refrigeratins Machine / L.Luo, D. Tondeur // *Adsorption*.-2000. - № 6, pp. 93-104.
40. Leite, A.P.F. Experimental Evaluation of a Multi-Tubular Adsorber Operating with Activated Carbon-Methanol / A.P.F. Leite, M.B. Grillo, R.R. Andrade, F.A. Bello, F. Meunier // *Adsorption*-2005- № 11-pp. 543-548.
41. Leite, A.P.F. Experimental thermodynamic cycles and performance analysis of a solar-powered icemaker in hot humid climate / A.P.F. Leite, M.B. Grillo, R.R. Andrade, F.A. Bello, F. Meunier // *Renewable Energy*-2007. -№32, pp. 697-712.
42. Pons, M. Design of an experimental solar-powered solid-adsorption ice maker / M. Pons, J.J. Guilleminot // *Solar Energy, T ASSME* -1986.-№108-t.4-pp. 332-337.
43. Lemini, F. Simulation of an adsortive solar refrigerator operating in Morocco / F. Lemini, F. Meunier // *Islamic Academy of Sciences* -1990.- №3,4. –pp. 273-279.
44. Pons, M. A phenomenological adsorption equilibrium law extracted from experimental and theoretical considerations applied to the carbon and methanol pairs / M. Pons, P. Grenier // *Carbon* -1986.- №24.-t.5.- pp. 615-625.
45. Brunauer, S. J.A. Chemical. Sociel / S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming, E. Teller // *Chemical. Sociel*-1940. - № 62.
46. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость // С. Грег, К. Синг.- Москва: МИР, 1984.
47. Дубинин, М.М. Физика химии / М.М. Дубинин- 1960.- №34-С.959.
48. Appendix, Pt.J. Manual of Symbols and Terminology / Pt.J. Appendix // *Colloid and Surface Chemistry Pure*.-1972.-№ 31- p. 578.
49. Фролов, Ю.Г. Поверхностные явления и дисперсные системы: Курс коллоидной химии / Ю.Г. Фролов.- Москва: Химия, 1989.-464 с.

50. Brunauer, S. Absorption of gases in multimolecular layers / S. Brunauer, P.H. Emmet, E. Teller.- J. Am. Chem. Soc. № 60, 1938.- pp. 309-319.
51. Polanyi, M. Active Carbon Manufacture: properties and application / M. Polanyi., M. Smisek, S. Cerney. – London: Elsevier Publishers, 1970.
52. Дубинин, М.М. Доклад АН СССР / М.М. Дубинин, Л.В.Радущкевич-1947.- №55, 331.
53. Dubinin, M.M. Adv. Chem. / M.M. Dubinin, V.A. Actakhov // Ser.-1971.-№102-p. 69.
54. Maggio, G. A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery /G. Maggio, A. Freni, G. Restuccia // Refrig.- 2006.-№29.-pp. 589–600.
55. Hu, J. Exell RHB. Simulation and sensitivity analysis of an intermittent solarpowered charcoal/methanol refrigerator / J. Hu// Renew Energy.- 1994.-№4.- pp. 133–149.
56. Wang, W. Investigation of non-equilibrium adsorption character in solid adsorption refrigeration cycle / W. Wang, R. Wang // Heat Mass Transfer- 2005.-№41.- pp. 680–681.
57. Luo, L. Transient Thermal Study of an Adsorption Refrigerating's Machine / L. Luo, D. Tondeur // Adsorption.-2000.- № 6, p. 93-104.
58. Zhao, Y. Dynamic modeling of an activated carbon–methanol adsorption refrigeration tube with considerations of interfacial convection and transient pressure process./ Y. Zhao, E. Hu, A. Blazewicz // Applied Energy.- 2012.-№95.- pp. 276–284.
59. Echarri, R. Estudio del comportamiento de un solarimetro de bajo costo Avances / R. Echarri, S. Vera, E. Cyrulies, S A.artarelli, I. Samson // Energias Renovables y Medio Ambiente.-2009.- № 13.
60. Sartarelli, A. Heat flux solarimeter Solar Energy / A. Sartarelli, S. Vera, R. Echarri, E. Cyrulies, I. Samson.- DOI: Solener, 2010.

61. Vera, S. Contrastacion de mediciones de radiacion solar en Santo Domingo con un solarimetro de construction sencilla / S. Vera, E. Cyrules, R. Echarri, A. Sartarelli, I. Samson // *Avances en Energies Renovables y Medio Ambiente* -2010.
62. Hottel, H. C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres / H. C. Hottel // *Solar Energy* -1976.- № 18- pp. 129.
63. Vera, S. Construction de una heladera solar por adsorcion / S.Vera, R.Echarri, A.Sartarelli, E.Cyrules, I. Samson // *Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente*- 2008.-№ 12.
64. Vera, S. Prototipos de refrigeradores solares por adsorcion / S. Vera, E.Cyrules, R. Echarri, A. Sartarelli, I. Samson // *Avances en Energias Renovables y Ambiente*-2011.-№10.
65. Kreith, F. Principios de transferencia de calor / F.Kreith, M.Bohn.- Thomson Learning -2001.
66. El-Sharkawy, I.I. Study of adsorption of methanol onto carbon based adsorbents / I.I. El-Sharkawy, M. Hassan, B.B. Saha, S. Koyama, M.M. Nast // *Refrigeration* -2009.- № 32- pp. 1579-1586.
67. Мааке, В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г.Ю. Эккерт, Ж.Л. Кошпен.- Москва: Ордена "Знак Почета", 1998.-1135 с.
68. Zhang, L. Z. A Three-Dimensional non-equilibrium model for an intermittent adsorption cooling system / L. Z. Zhang // *Solar Energy*.- 2000.- Vol. 69, №-1-pp. 27-35.
69. Khan, M.Z.I. Numerical simulation of advanced adsorption refrigeration chiller with mass recovery / M.Z.I. Khan, S. Sultana, A. Akisawa, T. Kashiwagi // *Naval Architecture and Marine Engineering*.-2006.-pp. 62-67.
70. Anyanwu, E.E. Review of solid adsorption solar refrigerator I: an overview of the refrigeration cycle / E.E. Anyanwu.- *Energy Conversion Management*, 2003.-№44, pp. 301-312.

71. Anyanwu, E.E. Review of solid adsorption solar refrigerator II: An overview of the principles and theory, Energy/E.E. Anyanwu.- Conversion Management-2004.-№45, pp. 1279-1295.
72. Critoph, R.E. Activated carbon adsorption cycles for refrigeration and heat pumping / R.E. Critoph // Carbon-1989.- № 27(1) –pp. 63-70.
73. Poyelle F. Experimental tests and predictive model of an adsorptive air conditioning unit Industrial Engineering/ F. Poyelle, J.J. Guilleminot, F. Meunier// Chemistry Research. -1999.-№38 (1) - pp.298- 309.
74. Самсон, И.Ф. Математическая модель солнечного холодильника адсорбционного типа/ И.Ф. Самсон, Р. Эчарри, М. Вассилева, А. Сартарелли, С. Вэра, Э. Сирулиэс // Шестая Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов. Энергосбережение: Теория и практика.- 2012.- С. 347-352.
75. Samson, I. Prototipo a pequena escala de una nevera solar: primeros resultados / I. Samson, R. Echarri, C. El Hasi // Ciencia y Sociedad-2008-Vol. XXXIII-Num. 2.- pp. 237-24
76. Samson, I. Una alternativa para production de frio con energia solar/ I. Samson, R. Echarri // Ciencia y Sociedad-2004.-Vol. XXIX
77. Исаев А.А. Влияние температуры окружающей среды на производительность солнечной адсорбционной холодильной установки./ А.А. Исаев, И.Ф. Самсон, А.Б. Горяев // XX Международная конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» М., МЭИ, 2014 г. - С. 125.
78. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/С. Патанкар.- Москва: Энергоатомиздат, 1984.- 152 с.
79. Chekiroua, W. Dynamic modeling and simulation of the tubular adsorber of a solid adsorption machine powered by solar energy/ W. Chekiroua, A. Chikoucheb , N. Boukheita , A. Karaalia , S. Phalippou// International journal of refrigeration.-2013.- El Sevier.