

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДЯНЫХ РЕСУРСОВ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

УДК519.72:66.022.6

На правах рукописи

АБДУНАЗАРОВ Сунатулло Сабзаалиевич

**ФИЗИКО – ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УВЛАЖНЕННЫХ КОБАЛЬТОВЫХ
И ИРИДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО
ГРАНУЛИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

05.02.01 – материаловедение (в химической промышленности)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор,

заслуженный деятель науки и

техники Республики Таджикистан

Сафаров Махмадали Махмадиевич,

доктор технических наук, доцент

Зарипова Мохира Абдусаломовна

Душанбе – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	9
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	14
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	31
2.1. Описание экспериментальной установки для измерения теплопроводности зернистых материалов в различных газовых средах, в вакууме в широкой области температур.....	31
2.2. Методика измерения коэффициента теплопроводности зернистых материалов. Вычисление эффективной теплопроводности.....	35
2.2.1. Поправка на расположение спаев дифференциальной термопары.....	37
2.2.2. Поправка на нагрев внешнего цилиндра.....	38
2.2.3. Поправка на изменение геометрических размеров бикалориметра от температуры.....	39
2.2.4. Оценка доли лучистой составляющей в эффективной теплопроводности при различных значениях температуры.....	40
2.3. Описание экспериментальной установки для измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков в широком диапазоне температур.....	42
2.3.1. Методика измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков.....	45

- 2.4. Экспериментальная установка для комплексного определения физико-химических свойств веществ при различных температурах и давлениях.....47
- 2.5. Определение погрешности измерения теплофизических свойств веществ.....49
- 2.6. Экспериментальная установка для определения коэффициента адсорбции и массоотдачи.....54

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ И АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ.....56

- 3.1. Результаты экспериментального исследования изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде увлажнения при температуре 293 К и атмосферном давлении.....56
- 3.2. Экспериментальное определение адсорбционных свойств пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде увлажнителя.....59
- 3.3. Экспериментальное определение коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия, с металлическими наполнителями в среде увлажнителя.....62
- 3.4. Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....65
- 3.5. Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....67
- 3.6. Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....69

3.7.	Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....	71
3.8.	Корреляция между температуропроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....	72
3.9.	Корреляция между температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента.....	75
ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА И ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО АДСОРБЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ ИСЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ И ИХ КОРРЕЛЯЦИЯ.....		77
4.1.	Обработка и обобщение экспериментальных данных по коэффициенту адсорбции исследуемых катализаторов.....	77
4.2.	Обработка и обобщение экспериментальных данных по коэффициенту массоотдачи исследуемых катализаторов.....	80
4.3.	Корреляция между коэффициентом теплопроводности и коэффициентом адсорбции исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия.....	83
4.4.	Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по теплопроводности и коэффициентом массоотдачи исследуемых образцов.....	86
4.5.	Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по теплоемкости и коэффициентом адсорбции исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия.....	89
4.6.	Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по теплоемкости и коэффициентом массоотдачи опытных образцов.....	92

4.7. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по температуропроводности и коэффициентом адсорбции исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия.....	94
4.8. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по температуропроводности и коэффициентом массоотдачи исследуемых образцов.....	97
4.9. Метод расчета теплопроводности пористых зернистых и композиционных материалов с металлическим наполнителем в процессе увлажнения.....	100
4.10. Внедрение результатов исследований.....	107
ВЫВОДЫ	109
ЛИТЕРАТУРА	111
ПРИЛОЖЕНИЕ	125

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новой высокоэффективной техники, технологии и материалы с заранее заданными свойствами для различных отраслей народного хозяйства, как и в целом для ускорения научно-технического прогресса, невозможна без знания свойств веществ и материалов.

Систематические исследования физико – химических свойств (теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, адсорбции) дают полезные сведения о природе материалов, позволяют определить практическое их использование, а также служат основой для дальнейшего развития физики твердого тела. Знание физико – химических параметров особенно важно при конструировании промышленных тепловых установок самых разнообразных типов, а также для расчета кинетики исследуемых образцов.

В последнее время широкий спектр практического использования (керамическая, нефтяная, химическая, электротехническая и другие отрасли производства, а также ракетостроение) получили зернистые (гранулированные) и композиционные материалы, например оксид алюминия с содержанием различного количества металлов. Важнейшим представителем этого рода объектов является гранулированный пористый оксид алюминия.

Рассмотрение процессов тепло–и массообмена при непосредственном контактировании потоков воздуха и воды в свете известной аналогии между процессами переноса количества движения, тепла и массы приводит к заключению о существовании корреляционных выражений между коэффициентами тепло - и массоотдачи.

Физико–химические свойства монолита оксида алюминия и его наполнителей в настоящее время изучены достаточно хорошо [36]. Но сведения о физико – химических свойствах гранулированного пористого оксида алюминия в литературе практически отсутствуют. Они необходимы для определения возможности их применения в высокотемпературных конструкциях, для расчета и управления термохимическими режимами, оценки

их термостойкости и т.д. Надо отметить, что в период с 70 по 90 годы прошлого столетия в Республике Таджикистан под руководством профессора Маджидова Х.М. и профессора Сафарова М.М. был выполнен ряд исследований, которые были посвящены измерению свойств (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество активных металлов при различных температурах и газовых средах (аргон, азот, воздух, гелий, водород), а также в вакууме [110].

Для интенсификации технологических процессов при высоких температурах в качестве катализаторов используют пористый гранулированный оксид алюминия с металлическими наполнителями. Исследование процессов переноса теплоты в засыпках из пористого оксида алюминия с металлическим наполнителем позволит оценить диапазон изменения физико – химических свойств от перечисленных факторов.

В связи с этим изучение физико–химических свойств пористого гранулированного оксида алюминия, особенно содержащего на своей поверхности различные количества металла, представляется актуальным и имеет как научный, так и практический интерес.

Настоящая диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию физико – химических свойств (теплопроводности, температуропроводности, удельной теплоемкости и коэффициент адсорбции) пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего от 11,44 до 25 % кобальта и от 10 до 33% иридия при температуре 293 К в таких средах как воздух, вода и авиационный керосин.

Исследования физико–химических свойств образцов проводились соответственно методами цилиндрического бикалориметра и акалориметра регулярного теплового режима [22, 23, 37, 38, 48-50, 78]. Катализаторы на основе кобальта наиболее широко используются в промышленных каталитических процессах и порошковой металлургии. Например, катализаторы из кобальта являются одними из лучших в многочисленных

реакциях гидрирования, а в оксидной форме—очень активны в реакциях окисления молекулярным кислородом. В этой реакции кобальт проявляет наибольшую активность, а кобальтовые катализаторы активны в реакции орто, паравращения водорода, в различных реакциях изотопного обмена водорода с органическими соединениями, в реакциях гидрирования кратной связи в олефинах, диенах, пикленах, боковых цепях алициклов, ароматических соединений и их производных.

Нанесенные на оксид алюминия и другие носители кобальта и иридия значительно понижают температуру крекинга различных углеводородов, по сравнению с катализаторами без носителя.

Для кобальтовых катализаторов характерны различные реакции восстановления: спиртов и других оксидных соединений, перекисей и гидроперекисей, циклических и ароматических кетонов.

Катализаторы на основе кобальта применяются для весьма важной, в промышленном отношении, реакции синтеза углеводородов, спиртов и других высокомолекулярных соединений из оксидов углерода и водорода.

Кобальтовые катализаторы проявляют также высокую активность в реакциях разложения органических гидроперекисей в жидкой фазе, аммиака, закиси и оксида азота в газовой фазе. Так кобальтовые катализаторы на основе оксида алюминия применяются в процессе получения защитной среды из аммиака в металлургических процессах. Катализаторы на основе кобальта применяются также в процессах дегидратации, дегидроконденсации спиртов с образованием альдегидов и кетонов. Важное промышленное значение приобретают кобальтовые катализаторы из-за высокой активности в реакциях конверсии углеводородов с водяным паром. Здесь также широко используются кобальт-алюминиевые катализаторы. Оксиды кобальт-алюминиевых катализаторов применяются в процессах окисления органических и неорганических соединений и получении композиционных материалов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы заключается в том, что получены данные по физико – химическим свойствам (теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности) пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество металла на воздухе и адсорбционные свойства при увлажнении адсорбентом (паров воды и авиационного керосина), а также корреляционная функция между этими характеристиками, которая необходима для расчета тепло- и массообмена и создания математической модели происходящего процесса в различных реакторах.

Отсутствие в литературе данных по физико–химическим свойствам пористого гранулированного оксида алюминия, особенно содержащего различное количество кобальта и иридия в зависимости от температуры в различных средах и его адсорбционных свойств затрудняет его рациональное использование в различных реакторах и в химических процессах (порошковой металлургии).

Объект исследования – пористый гранулированный оксид алюминия, содержащий различное количество кобальта и иридия с фракциями 0,85 до 1,25 мм, обычная вода и авиационный керосин.

Целью работы является: Получение экспериментальных значений эффективной теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и адсорбционных свойств (коэффициента массоотдачи, адсорбции) пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия при температуре (293) К в среде воздуха, воды и авиационного керосина, а также выявление зависимости физико – химических свойств пористого гранулированного оксида алюминия от концентрации содержащегося в нем металла и рода металлического наполнителя.

Для реализации поставленной цели, требовалось решить следующие задачи:

- обосновать возможность применения метода монотонного разогрева и регулярного теплового режима первого рода для исследования физико-химических свойств пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия;
- выполнить комплексное исследование теплопроводности, адсорбционных свойств, теплоемкости и коэффициента массоотдачи при температуре 293К;
- изучить механизм и кинетику физико-химических процессов (ФХП) и их влияние на качество данных характеристик пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия.

Научная новизна:

- впервые выполнено комплексное исследование теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и адсорбционных свойств пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия при температуре 293К и атмосферном давлении;
- установлено, что теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость исследуемых катализаторов с ростом концентрации Co, Ir изменяются монотонно.
- установлена, закономерность между физико-химическими свойствами исследуемых композиционных материалов (катализаторов) на основе пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различную концентрацию активных металлов (кобальта и иридия) и структурами катализаторов.
- усовершенствовано измерительное устройство и научно обоснована возможность его адаптирования для исследования теплофизических, адсорбционных свойств катализаторов при температуре 293К и атмосферном давлении;
- получены экспериментальные данные по теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и адсорбционным свойствам пористого гранулиро-

ванного оксида алюминия с металлическими наполнителями при температуре 293К;

-получены эмпирические уравнения для расчёта теплопроводности, теплоемкости, коэффициента адсорбции и массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с содержанием различного количества кобальта и иридия при температуре 293К, атмосферном давлении и корреляционные уравнения между теплопроводностью, теплоемкостью и коэффициентом адсорбции.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- получены данные о физико–химических и адсорбционных свойствах катализаторов, которые могут быть использованы при инженерных расчётах, составлении физических моделей и выборе тепловых режимов работы каталитических изделий, порошковой металлургии в зависимости от температуры и коэффициента увлажнения;

- создана аппаратура для измерения физико – химических и адсорбционных свойств, которая используется в научных и учебных лабораториях кафедры «Общей физики» Таджикского государственного педагогического университета имени Садриддина Айни аспирантами и преподавателями для выполнения научных работ, а также студентами, магистрантами, при выполнении курсовых и лабораторных работ и ГНУ «Научно–исследовательский институт промышленности» Министерства и новых технологий Республики Таджикистан.

Внедрение результатов работы: Результаты исследования приняты для внедрения: в ТГПУ им. С. Айни и в Институте промышленности и новых технологий Министерства промышленности Республики Таджикистан (имеется акт внедрения).

Методология и методы исследования – для выполнения диссертационной работы использовали метод монотонного разогрева (теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость), метод регулярного теплового

режима первого рода, метод наименьших квадратов (компьютерная программа Excel).

Основные положения, выносимые на защиту:

-результаты экспериментального исследования физико–химических и адсорбционных свойств пористого гранулированного оксида алюминия содержащего различное количество кобальта и иридия при температуре 293 К:

-результаты корреляции между физико–химическими и адсорбционными свойствами пористого гранулированного оксида алюминия, с содержанием различного количества кобальта и иридия.

Личный вклад автора состоит в выборе методов и разработки алгоритмов решения поставленных задач при проведении исследования, установлении основных закономерностей протекающих физико-химических процессов, проведении экспериментальных исследований по теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, коэффициенту адсорбции, коэффициенту массоотдачи, обработке и анализе полученных результатов, формулировке основных выводов диссертационной работы. Все результаты диссертационной работы получены автором под руководством научных руководителей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Всероссийский симпозиум с международным участием «Термодинамика и материаловедение» (Санкт-Петербург, 2015); Международная научно-практическая конференция, посвященная 115-летию персидского таджикского ученого энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абубакра Мухаммада ибн Закария Розы. Институт химии АН РТ (Душанбе, 2015); Международная молодежная научная школа-семинар «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» - (Томск, 2015); Научная конференция «Актуальные проблемы современной науки», посвященная 70 – летию Победы в Великой Отечественной войне – (Душанбе, 2015); Республиканская научно –

практическая конференция «Экономическое развитие энергетики в Республике Таджикистан» (Курган-Тюбе, 2015); Первые Международные Лыковские научные чтения, посвященные 105 – летию академика А. В. Лыкова (Минск, 2015); Первая Международная научно–практическая конференция «Проблемы и перспективы современной науки» (Москва, 2015); Минский Международный форум по тепло – и массообмену (Минск, 2016); Республиканская научно - практическая конференция «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан», ко Дню химика и 80-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, академика МИА, академика ИА РТ Вахобова А. В. (Душанбе, 2016); Международная научно-техническая конференция, посвященная 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (Москва, 2016); Международная научно–практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», посвященная 25-летию Государственной независимости РТ и 60 – летию ГТУ имени академика М. С. Осими (Душанбе, 2016); Десятая международная теплофизическая школа, «Исследование коэффициента адсорбции иридиевых катализаторов различной концентрации» (Душанбе -Тамбов, 2016); Десятая международная теплофизическая школа «Взаимосвязь теплопроводности с коэффициентом адсорбции иридиевых катализаторов на основе гранулированной пористой окиси алюминия» (Душанбе–Тамбов, 2016); Международная конференция фундаментальных и прикладных вопросов физики (Ташкент, 2017).

По результатам работы опубликовано 21 научные статьи (из них 9, рекомендуемых ВАК РФ и ВАК при Президенте РТ).

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, основных результатов работы, выводов, списка литературы (111 наименований) и приложения. Содержание работы изложено на 146 страницах компьютерного текста, включая 62 таблицы и 39 рисунков.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ И АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическому изучению процесса теплопереноса в зернистых материалах посвящен ряд работ, в том числе и обзоры [1, 7, 14-16, 27-35, 74-77, 82, 85]. Мы рассмотрим некоторые экспериментальные работы по исследованию физико-химических и адсорбционных свойств зернистых материалов с целью описания современного состояния данной проблемы.

В работе [81] А.Г. Харламов исследовал теплопроводность засыпки дроби окиси алюминия, двуокиси циркония диаметром 1-4 мм в интервале температур 373-1873К стационарным методом коаксиальных цилиндров. Было установлено, что теплопроводность сильно зависит от газовой среды заполнителя и незначительно от формы частиц. В области температур от 473 до 873 К теплопроводность всех образцов дроби окиси алюминия достаточно близок. Однако, с ростом температуры наблюдается более интересное возрастание теплопроводности у систем с большими диаметрами, что объясняется увеличением доли лучистого теплообмена. В работе [81] также установлено, что с увеличением температуры теплопроводность гранулированных материалов возрастает, но слабо зависит от теплопроводности исходного материала и его плотности. Это объясняется ростом теплопроводности газовой среды и теплопроводностью излучением.

Для приблизительного расчета теплопроводности засыпки керамической и металлической дроби с диаметром 1:4 мм в различных газовых средах и вакууме в интервале температур 273-1273 К в [81] предложена эмпирическая формула

$$\lambda = 0,07 + 8,4\lambda_0 + 0,4\sqrt{d} \cdot t \cdot 10^{-3}, \quad (1.1)$$

где λ_0 -теплопроводность газа при 0⁰С; d – диаметр дроби; t - средняя температура в ⁰С. Погрешность при этом достигает 29 %.

В работе [13] методом плоского бикалориметра измерена теплопроводность свинцовых и стеклянных шариков диаметром 1,2 – 1,55 мм в среде различных

наполнителей в интервале температур (293-323)К. Показано, что теплопроводность в основном определяется материалом шариков. Кроме того, показано, что если гранулы имеют строго шаровую форму, то тепло, в основном, передается конвективным потоком через наполнитель.

Авторы работы [35] при измерении теплопроводности засыпки с полыми шариками диаметром 8-9 мм отмечают, что передача тепла в слое шариковой изоляции происходит путем конвекции, теплопроводности и лучеиспусканием, хотя теплопередача лучеиспусканием и теплопроводностью материала незначительны.

В 1952 г. М.И. Казаком [41] была исследована теплопроводность засыпки порошков кварца (силикагель) и графита с различным размером гранул (0,3-1,0) мм; (1,0-1,8) мм; (3-7) мм в интервале температур (373-873) К в воздухе. Автором работы [41] установлено, что теплопроводность кварцевых засыпок до температуры 473 К почти не зависит от величины зерен. Показано, что увеличение теплопроводности с ростом температуры тем больше, чем крупнее размеры зерен, при этом теплопроводность гранулированных порошков изменяется незначительно.

В работе [84] исследована эффективная теплопроводность гранул из плексигласа, стекла, чугуна и полистирола, имеющих форму, близкую к сферической в атмосфере воздуха, углекислого газа, фреона-12 и аргона при температуре 293 К. установлено, что теплопроводность газа весьма существенно влияет на эффективную теплопроводность дисперсного материала.

Теплопроводность дробы из свинца и чугуна с размерами 1-4 мм в интервале (373-873) К в воздухе исследована в работе [17]. Согласно данным [17] для чугуна с различными размерами дробы во всей исследованной области температур получены одинаковые результаты.

В работах [35, 62-67] стационарным методом коаксиальных цилиндров исследована эффективная теплопроводность чугунных и шлаковых шариков различных фракций (0,5-1; 2-3; 3-4 мм) в воздухе, в двуокиси углерода, в

гелии, а также в вакууме ($p = 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) в интервале температур (373 - 1273) К. В результате измерений в вакууме обнаружено, что эффективная теплопроводность засыпок увеличивается с температурой независимо от теплопроводности исходных материалов (для чугуна она отрицательна, для шлака – положительна).

Измерение эффективной теплопроводности шлаковых и чугунных шариков показало, что теплопроводность засыпки слабо зависит от теплопроводности газовой среды [64]. Слабое влияние теплопроводности материала на эффективную теплопроводность засыпок объясняется наличием значительных контактных тепловых сопротивлений между частицами [62].

Для определения эффективной степени черноты слоев дисперсных материалов В.С. Никитиным в [62] предложена полуэмпирическая формула:

$$\lambda_{\text{эф}} = \left[1 + \frac{d^{0.1}}{\sigma(1-m)} \right] [\varepsilon_n m + \varepsilon_m (1-m)], \quad (1.2)$$

где d - диаметр частиц; m - пористость слоя; ε_n - степень черноты пор; ε_m - степень черноты материала.

Погрешность расчета автором оценивается в ± 12 %.

Для определения лучистой составляющей эффективной теплопроводности дисперсного слоя получено уравнение [62]:

$$\lambda_n = \frac{3,46\sigma T_{cp}^3 d [3m\varepsilon_n + (1-m)\varepsilon_m]}{1 + (1-m)(1-\varepsilon_m)}, \quad (1.3)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$; T_{cp} - средняя температура.

На основе экспериментальных данных по измерению эффективной теплопроводности чугунных и шлаковых шариков, В.С. Никитиным также получено уравнение для расчёта эффективной теплопроводности засыпок дисперсных материалов:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \left[1 + 3,91(1-m)\lambda_2^{0.1} \ln \frac{\lambda_m}{\lambda_2} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_T - \gamma} \left(\frac{\Lambda}{d} \right)^{0.55}} \right] + \frac{3,46\sigma T^3 d [3m\varepsilon_n + (1-m)\varepsilon_m]}{1 + (1-m)(1-\varepsilon_m)} + \lambda_k \quad (1.4)$$

где λ_{Γ} , $\lambda_{\text{м}}$ составляющие эффективной теплопроводности засыпки, обусловленные теплопроводностью газа и материала частиц соответственно; m – порозность; γ_{Γ} – удельной вес вещества твердой фазы; γ – объемный вес дисперсного материала; Λ – длина пути свободного пробега молекул газа; d – диаметр частицы; T – абсолютная температура; σ – постоянная Стефана – Больцмана; $\lambda_{\text{к}}$ – контактная теплопроводность

В работах [18,19,75,76] экспериментально исследованы теплофизические характеристики (λ , α , C_p) в интервале температур (80-300) К следующих многокомпонентных систем: порошкообразный плексиглас АКР-15 – воздух, П=40%; АКР- кремнийорганическая жидкость ВКЖ – 94; стеклянные шарики ($d = 0,5$ мм П=40%) – пленочное покрытие кремнийорганической жидкости ВКЖ – 94 – воздух; порошок Al_2O_3 – воздух; порошок Al_2O_3 – (П = 40 %) – кремнийорганическая жидкость.

Результаты экспериментов сопоставлены с выведенной авторами расчетной формулой для определения эффективной теплопроводности влажных пористых материалов (двухфазная система: твердые частицы – жидкость или газ) [14]:

$$\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{ск}}} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{h}{L}\right)^2 + A} + \nu_{\Gamma} \left(1 - \frac{h}{L}\right)^2} + \frac{2}{1 + \frac{h}{L} + \frac{1}{\nu_{\Gamma} \cdot \frac{h}{L}}}, \quad (1.5)$$

где

$$A = \frac{1}{\frac{\lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{ск}}} + \frac{\nu_{\Gamma.3}}{4K_{\text{к}}K_{\text{м}}} \left(\frac{h}{L}\right)^2 \cdot 10^3}; \quad L = \ell + h; \quad \frac{h}{L} = \frac{\frac{h}{L}}{1 + \frac{h}{L}}; \quad \nu_{\Gamma} = \frac{\lambda_{\Gamma}}{\lambda_{\text{ск}}}; \quad \nu_{\Gamma.3} = \frac{\lambda_{\Gamma.3}}{\lambda_{\text{ск}}},$$

где A – величина, отражающая передачу тепла на стыке двух частиц через контакт между ними и газовый микрозазор; $\lambda_{\text{ск}}$ – теплопроводность скелета дисперсного материала; $\frac{h}{L}$ – функция пористости; ℓ – основной размер поры; L – диаметр частицы; $h = 2\Delta$ – толщина и ширина стержня твердого скелета ячейки; $K_{\text{м}}$, $K_{\text{к}}$ – эмпирические коэффициенты, характеризующие сцепление

микрошероховатостей двух соседних частиц; λ_k - контактная теплопроводность; λ_r - молекулярная и лучистая теплопроводность; $\lambda_{r,3}$ - молекулярная и лучистая теплопроводность микрозазоров между частицами.

Данная формула учитывает ряд видов переноса теплоты в пористых материалах. Основная трудность при расчетах заключается в учете контактного теплообмена между частицами.

Авторами [42] исследована эффективная теплопроводность силикагеля марки КСМ и железного катализатора марки ГК-М с размерами гранул 2-3 мм в зависимости от давления газа-наполнителя, которые в свою очередь, зависят от размера, формы и теплопроводности материала зерен. От давления $1 \cdot 10^{-2}$ до 760 мм рт. ст. теплоперенос возрастает за счет молекулярной теплопроводности и свободной конвекции газа-наполнителя, от давления 760 до 3000 мм рт. ст. увеличение λ практически прекращается.

В работе [6] Д.Л. Свифтом измерена эффективная теплопроводность систем частицы сферической формы – газ с использованием метода переходного линейного источника. Измерения теплопроводности циркония, меди, магния, никеля, алюминия и перестекла проводили в интервале (298-573)К в зависимости от давления в атмосфере водорода, гелия, метана, азота, аргона, и фреона-12. Порошки урана и циркония подвергались окислению и установлено, что эффективная теплопроводность при атмосферном давлении с окислением уменьшается. Порошкообразную систему, состоящую из беспорядочно уложенных сферических частиц, Свифт аппроксимирует правильной ромбической кладкой частиц с пористостью 39,5%. Рассмотрев элементарную ячейку в предположении, что линии теплового потока не искривляются и тогда:

$$\frac{\lambda_{эф}}{\lambda_n} = 0,577\pi \left[\left(\frac{\lambda_n}{\lambda_g - 1} \right)^{-1} - \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_g} \right)^{-2} \frac{\lambda_n}{\lambda_g} \right] + 0,093, \quad (1.6)$$

где λ_n - теплопроводность наполнителя; λ_g - теплопроводность газа.

Им выведено также соотношение, которое можно применять для расчета эффективной теплопроводности аналогичных порошкообразных систем, состоящих из частиц, покрытых пленками оксида.

М.Ж. Лаубицем [4] измерена эффективная теплопроводность порошков окиси алюминия, оксида магния и оксида циркония в интервале температур (373-1273)К. Экспериментальные результаты объясняются на основе допущения, что эффективная теплопроводность порошков может быть представлена как бы состоящей из 2-х частей, где первая часть – это теплопроводность двух фаз газ-твердое тело, а вторая – это эквивалентная радиационная теплопроводность, т.е.:

$$\lambda_{эф} = \lambda(P) + 4\sigma T^3 \epsilon \frac{a}{P} \left(1 - P^{\frac{2}{3}} + P^{\frac{4}{3}} \right), \quad (1.7)$$

где

$$\lambda(P) = \lambda_m \cdot \frac{VP^{\frac{2}{3}} + \left(1 - P^{\frac{2}{3}} \right)}{V \left(P^{\frac{2}{3}} - P \right) + \left(1 - P^{\frac{2}{3}} + P \right)}$$

- теплопроводность вычислена Расселом; ϵ -

удельная излучательная способность; a – линейный размер частиц; P – фракционный объем частиц; σ - константа Стефана-Больцмана; $V = \frac{\lambda_0}{\lambda_{эф}}$, λ_0 - теплопроводность частиц; λ_m - теплопроводность сплошной непрерывной фазы.

В [2] исследована эффективная теплопроводность засыпки оксида алюминия со средним диаметром гранул 1,2 и 0,48 мм и боросиликатного стекла со средним диаметром гранул 0,54 мм при температуре 303 К в вакууме, а также в среде различных газов (гелий, водород, азот, двуокись углерода) в зависимости от давления. Установлено, что эффективная теплопроводность исследуемых засыпок в гелие, водороде и азоте с ростом давления увеличивается по линейному закону, а в двуокиси углерода зависимость $\lambda_{эф}$ от давления даёт параболическую кривую.

Куни и Смит [3] изучили вопрос об эффективной теплопроводности рыхлого слоя частиц, находящихся в среде неподвижного газа или жидкости. Показано, что эффективная теплопроводность такой системы является функцией теплопроводности твердой и жидкой фаз и объемных долей компонентов, а в случае, если заметную роль играет излучение, а также лучеиспускательная способность, средняя температура и диаметр твердых частиц. Принимая сферическую форму частиц, Куни и Смит предлагают следующий механизм передачи тепла: 1) перенос тепла через газ или жидкость посредством теплопроводности и радиации: 2) перенос тепла через твердую фазу, который в свою очередь может происходить путем передачи тепла через контактные поверхности твердых частиц, теплопроводность через газ или жидкость вблизи контактной поверхности, радиацией между поверхностями твердых частиц и теплопроводностью через твердую фазу.

В работе [1] приведены экспериментальные данные по эффективной теплопроводности порошков оксидов Al_2O_3 и MgO и ZrO_2 при температуре до 1123 К. Установлено, что эффективная теплопроводность порошков возрастает с повышением температуры.

О.А. Краев измерил температуропроводность оксида алюминия в интервале температур 130-750°C в воздухе [43]. Погрешность данных в [43] оценивается в 2-3%.

Из рассмотренных материалов видно, что теплофизические свойства гранулированного пористого оксида алюминия изучены недостаточно.

Не исследовано также влияние кобальта и иридия на λ , a и C оксида алюминия. Определенный научный интерес представляет экспериментальное изучение влияния на λ и a оксида алюминия, содержащего кобальт и иридий в различных газовых средах (водород, гелий, азот, аргон, воздух) в широкой области температур.

Анализ основных физико-химических процессов, влияющих на кинетику поглощения воды твердым пористым адсорбентом, модели используемые для описания кинетики сорбции, а также свойства композитных сорбентов

«гигроскопичная соль в пористой матрице» - и их особенности, которые могут влиять на кинетику сорбции, приведены в работе [24]. Согласно ее автору: а) лимитирующей стадией кинетики сорбции, как правило, является либо диффузия паров воды к внутренней поверхности через разветвленную пористую структуру сорбента, либо конвективный радиационный отвод выделившейся при адсорбции теплоты с его внешней поверхности; б) кинетическая кривая сорбции единичным зерном описывается теоретической диффузионной моделью с использованием коэффициента диффузии в порах при изотермической сорбции и нескольких параметрах – при не изотермической. При этом в мезо порах ($2 \text{ нм} < d < 50 \text{ нм}$) при давлении меньше атмосферного основной является кнудсеновская диффузия.

В работе [72] установлено, что сорбционные свойства $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и LiNO_3 диспергированные в порах силикагеля, существенно отличаются от их свойств в массивном состоянии. Показано, что помещение соли в поры силикагеля позволяет существенно ускорит процесс сорбции паров воды; процесс гидратации переходит из кинетического режима в диффузионный, когда лимитирующей стадией является транспорт воды соли по системе пор матрицы; определены D_{ef} воды и пор.

Метод комплексного измерения физико-химических свойств (ФХС) грунтов и фазового состава поровой влаги в них в области температур фазового перехода, существенно повышающей точность эксперимента, описан в диссертации [77]. Предложены эмпирические зависимости изменения теплопроводности и D_c глинисто-песчаных смесей от количества циклов замораживания – оттаивания.

Данные о ФХС оксидов и карбидов в широком диапазоне температур приведены в работе [36]. Для каждого материала имеются данные, характеризующие его структуру, степень взаимодействия с другими материалами.

В работе [51] описаны результаты опытов по определению размеров пор порошковых материалов на основе железа, исследовано влияние пористости на

фактическую площадь зоны контакта. Предложены методики расчета площади единичной поры и пористости на поверхности.

Метод расчета λ твердых пористых, спеченных, зернистых и др. материалов в широком диапазоне изменения определяющих параметров изложены в монографии [33, 44, 111, 110]. Приведены таблицы, графики, формулы для практических расчетов.

На основе анализа работ по определению теплопроводности дисперсных материалов, использующих структуру с взаимопроникающими компонентами, сформулированы основные принципы исследования процессов переноса тепла, применяемых в теории обобщенной проводимости, и продемонстрировано, что с помощью моделей таких структур можно рассчитать теплопроводность твердых дисперсных систем, некоторых сплавов, зернистых и волокнистых материалов. Также была предложена устойчивая модель зернистого или спеченного материала с взаимопроникающими компонентами и получены функциональные зависимости для расчета коэффициентов их обобщенной проводимости [33, 44, 111, 110].

В работе [20] приведены результаты исследования ФХС влажных пористых тел с различной пористостью и влагосодержанием при температурах от 80 до 400 К. Рассмотрены вопросы переноса капиллярной и диффузионной влаги в порах на основе теории тепло – и массообмена, термодинамики необратимых процессов и учений о формах связи влаги с влажными материалами; приведены итоги исследований ФХС многокомпонентных пористых систем и наполненных полимеров.

В работах [68, 69] построена функция отбора адсорбента в слое загрузки адсорбера. Сформулирована нестационарная линейная задача адсорбции примеси и получено ее точное решение для первой стадии, когда концентрация адсорбированного вещества не достигает предельного значения, и приближенное – для второй стадии. Расчетные формулы и уравнения иллюстрируются многочисленными примерами, также рассмотрена нестационарная линейная задача действия зерна адсорбента при переменном

содержании адсорбента в объеме и получено ее приближенное решение. Проведено его сопоставление со строгим решением на многочисленных примерах расчета относительных концентраций и притока вещества к зерну, показавшее высокую эффективность первого.

В работе [34] приводится анализ температурной зависимости сорбции водяных паров типичными капиллярно пористыми телами, в качестве которых были взяты: силикагели КСК-2 (крупнопористый), КСС-4 (среднепористый), КСМ-5 (мелкопористый) и КСМ-5а (ультратонкопористый).

Анализ изменений сорбционных свойств силикагелей при повышении температуры по изотермам сорбции и десорбции показал следующее: В интервале температур (293...313) К влагосодержание мономолекулярной адсорбции для всех исследованных силикагелей, рассчитанных исходя из уравнения полимолекулярной адсорбции, почти не изменяются, тогда как влагосодержания полимолекулярных слоев (начало петли сорбционного гистерезиса) уменьшаются [34].

В области капиллярной конденсации с повышением температуры при фиксированных значениях φ соответствующее влагосодержание, включая и максимально гигроскопическое, для всех силикагелей уменьшается, что согласуется с представлениями А.В. Лыкова [52].

Объем влаги V , сконденсированной в результате сорбции в капиллярах тела равен суммарному объему пор [34].

$$V = \int_{r_1}^{r_2} f(r) dr, \quad (1.8)$$

где $f(r)$ - объемная характеристика распределения пор по эффективным размерам, которые определяются выражением:

$$r = \frac{2\sigma p_v \cos(\alpha)}{\rho_w p_s \ln(1/\varphi)}, \quad (1.9)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения воды; ρ_v, ρ_w - плотность влаги в виде пара и жидкости соответственно; α - краевой угол смачивания; p_s - давление насыщенного пара.

С повышением температуры как следует из (1.9), величина r уменьшается, что приводит к уменьшению равновесного влагосодержания силикагелей. Это уменьшение наиболее значительное для влаги капиллярной конденсации [34].

Максимально гигроскопическое влагосодержание уменьшается при повышении T вначале слабо, затем более резко, что соответствует значительному возрастанию давления насыщающих водяных паров. Чем крупнее поры, тем значительнее падение максимального влагосодержания при повышении T . Начало петли сорбционного гистерезиса (начало капиллярной конденсации) сдвигается в сторону больших относительных влажностей [34].

Для всех типов силикагелей характерным является сужение петли сорбционного гистерезиса при повышении T . В работе [34] предложены следующие объяснения этого опытного факта. Рассмотрев сорбционный гистерезис с точки зрения неполного смачивания поверхности тела жидкостью вследствие наличия на ней адсорбированного воздуха (учтено множителем $\cos\alpha$ в (1.9)), сделан вывод о том, что с повышением T эвакуация образца улучшается и при сорбции паров величина $\cos\alpha \rightarrow 1$, что способствует сближению сорбционных и десорбционных ветвей изотермы.

Процесс капиллярной конденсации начинается только при наличии сплошной определенной толщины пленки адсорбированной жидкости, заполняющей все неровности, углубления, трещины пор. С повышением T ухудшаются условия смыкания отдельных адсорбционных образований, в частности, седловидных менисков. Также уменьшается толщина полимолекулярной пленки, являющейся определяющим параметром в уравнении капиллярной конденсации [34]. Все это может привести, особенно

для крупнопористых силикагелей, почти к полному отсутствию капиллярной конденсации.

С повышением температуры поверхностное натяжение горловой жидкости уменьшается, прорыв ее осуществляется легче и, следовательно, десорбционная ветвь изотермы будет приближаться к адсорбционной.

Для силикагелей КСМ-5 и КСС-4 эффективные размеры пор, которые соответственно увеличиваются при одновременном приближении формы пор к цилиндрической, температурная зависимость сорбционного процесса имеет промежуточный характер [34].

Установлено, что для влагосодержания соответствующих, примерно полимолекулярной адсорбции, температурный коэффициент химического потенциала влаги принимает почти постоянное значение, после чего начинает уменьшаться. Последнее указывает на уменьшение влияния массопереноса на внутренний теплоперенос капиллярно-пористых тел в области капиллярной конденсации влаги.

Количественные закономерности динамики адсорбции в адсорберах небольшой производительности с неподвижным слоем адсорбентов, которые широко применяются в химической и других отраслях промышленности, исследованы в работе [12].

Рассмотрен перенос сорбита в сорбенте при движении двухкомпонентного потока (газ-носитель и абсорбируемое вещество) в зернистой среде в изотермических условиях.

На основе уравнения материального баланса и используя ряд предположений, получено выражение для профиля концентрации в твердой фазе [12]:

$$z = z_m \left[\frac{1 - \exp(t/t_s)}{1 - \exp(t/t_s) - \exp(f_0 l)} \right], \quad (1.10)$$

где t_s - постоянная времени заполнения слоя сорбента; l - высота слоя адсорбента; f_0 - значение вероятной доли целевого компонента, перешедшего в адсорбционное состояние за единицу времени в начале процесса адсорбции.

Для перехода к профилю концентраций в газовой фазе используется соотношение:

$$\frac{y}{y_i} = \frac{z}{z_i}$$

Отсутствие в публикации [46] конкретных расчетов и их сравнения с соответствующими опытными данными делает затруднительным оценку достоверности предложенного метода прогнозирования.

Как отмечено в работе [12], разнообразие различных механизмов массопереноса адсорбтива в твердом адсорбенте препятствует предсказанию характера его диффузии в адсорбенте для широкого диапазона степени их заполнения.

При исследовании кинетики физической адсорбции углекислоты и паров воды на промышленных адсорбентах при постоянной температуре установлена линейная зависимость коэффициента массопроводности от степени заполнения адсорбента.

В ходе ее проверки использовались опытные данные по адсорбции *n*-пентана на силикагелях СГ-1, СГ-2 и СГ-3. Отмечены отличия при малой степени заполнения, которые объяснены в работе [12] тем, что в условиях вакуума имеет место кнудсеновская диффузия, когда *D* зависит от диаметра входного отверстия пор.

По мнению авторов работы [12], упомянутая зависимость имеет характер физико-химической закономерности, достаточной для построения общей теории массопереноса при физической адсорбции.

Результаты исследования кинетики процессов сорбции–десорбции водяного пара на зернах технических адсорбентов приведены в работе [71]. Отмечено, что транспорт распределенного вещества в зерне адсорбента осуществляется как в газовой, так и в адсорбированной фазах за счет таких разновидностей диффузии: нормальной, кнудсеновской (стесненной); поверхностной (активированной); в твердом теле. Возможно миграция сорбата

в порах под действием капиллярных сил – аналогична тому, как это имеет место при сушке.

Проведенный анализ показал, что эквиваленты понятия эффективного коэффициента диффузии и массопроводности [71] равна:

$$D_{ef} = D_a + D_r / \beta = k ,$$

где D_r – коэффициент стесненной диффузии сорбита в газовой фазе, учитывающий диффузионное сопротивление пористой среды; D_a – суммарный коэффициент диффузии в адсорбированной фазе; $\beta = \rho_0 (\partial C / \partial C_r)$ β – производная изотермы адсорбции; ρ_0 – кажущаяся плотность адсорбента.

Отмечено, что описание кинетики внутреннего массопереноса на основе дифференциального уравнения массопроводности предпочтительнее, т.к. его вывод является более корректным. К тому же, при экспериментальном определении D_{ef} часто используется весовой метод анализа концентрации сорбита в зерне [71].

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование упомянутых коэффициентов при сорбции водяных паров техническими адсорбентами, основные характеристики которых приведены в таблице 1.1. Исследование коэффициентов массопроводности проводилось: а) при сорбции из среды чистого водяного пара; б) при десорбции в атмосферу чистого водяного пара; в) при сорбции из потока воздуха; г) при десорбции в поток воздуха. В опытах снимались кривые на отдельных зернах адсорбента как в узких интервалах изменения давления пара в среде окружающей зерно (дифференциальной метод), так и при скачкообразном изменении давления во всем интервале исследуемых давлений (интегральный метод) [71].

При моделировании сушки температура среды $t_c = 30; 60; 100$ и 120^0 С., а скорость движения воздуха составляла $0,17$ м/с. Наряду с кривой сушки в параллельном опыте измерялась температура в центре зерна.

Таблица 1.1 – Основные характеристики адсорбентов

Адсорбент	ρ_c , кг/м ³	ε , м ³ /м ³	$S_{\text{БЭТ}}$, м ² /г
Активная окись алюминия	1210	0,46	252
Силикагель WS	1140	0,40	572

Установлено, что коэффициенты массопроводности зависят от величины адсорбции, причем функция $k = f(C)$ содержит два экстремума. Для исследуемого силикагеля в зависимости от коэффициента массопроводности при сорбции воды из потока воздуха, имеются минимальные значения, которые возрастают с увеличением размера зерен.

Обнаружена существенная зависимость интенсивности массопереноса от нестационарного температурного поля адсорбента, что объяснено авторами работы [71] сильной температурной зависимостью коэффициента массопроводности.

Влияние эффекта термодиффузии на процесс стационарного тепло- и массообмена от сферической поверхности к безграничной окружающей среде рассмотрено в работе [70] на основе системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{dr} \left\{ r^2 \rho D \left[c_1 (1 - c_1) \frac{\alpha^*}{T} \frac{dT}{dr} + \frac{dc_1}{dr} \right] \right\} = 0; \quad (1.11)$$

$$\frac{d}{dr} \left\{ r^2 \left[\frac{dT}{dr} + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_m} c_1 \alpha^* \frac{\mu_{11}}{c_p} \frac{dc_1}{dr} \right] \right\} = 0, \quad (1.12)$$

где c - концентрация; α - термодиффузионная постоянная; μ - химический потенциал Pr_m - диффузионное число Прандтля.

При оценке влияния диффузионного теплообмена на Nu_{\min} и термодиффузии на $Nu_{m\min}$ рассмотрены случаи тепло – и массопереноса между сферической поверхностью и паровоздушной смесью при стационарном режиме.

Сравнение полученных результатов показало, что в случаях, когда градиент определяющий основной поток значительно больше градиента определяющего дополнительный, минимальная интенсивность переноса субстанции близка к минимальной интенсивности «чистого» теплообмена (соответственно массообмена) [70].

Для установления общей взаимосвязи между макроскопическими параметрами изотермического массопереноса в капиллярно-пористых телах, описываемого первым и вторым законами Фика [45], в работе [11] экспериментально исследована кинетика физической адсорбции углекислоты и паров воды твердыми адсорбентами (силикагелями и цеолитами) из потока газа-носителя. При этом был использован «ступенчатый» метод получения кинетических кривых, обеспечивающий относительное постоянство коэффициента внутренней диффузии в узком диапазоне изменения концентрации адсорбтива в газовой фазе. При обработке кинетических кривых использовались решения дифференциального уравнения нестационарной диффузии, полученные в граничных условиях I рода для гранул адсорбента определенной геометрической формы при условии $D = const$.

В ходе обработки полученных опытных данных зависимости D_{ef} от степени заполнения для различных систем адсорбент – адсорбтив установлено, что D_{ef} монотонно падает в случае адсорбции паров воды из воздуха силикагелем КСК-2, для силикагеля КСС-3 имеет минимум, а для цеолита NaX – резкий максимум.

Возможность расчета кинетики физической адсорбции по данным о структуре адсорбента и равновесии системы адсорбент–адсорбтив предложенная в работе [45], позволяет предсказать характер зависимости коэффициента внутренней диффузии от степени заполнения, и может быть использована при проектировании промышленных предприятий с привлечением расчетных значений коэффициентов массопроводности и внутренней диффузии.

Заключение к 1 главе

Из рассмотренных материалов видно, что физико-химические и адсорбционные свойства влажного пористого гранулированного оксида алюминия изучены недостаточно.

Неисследовано также влияние кобальта и иридия на λ , α и S_p оксида алюминия. Определенный научный интерес представляет экспериментальное изучение влияния на λ , α и S_p оксида алюминия, содержащего кобальт и иридий при его увлажнении парами воды и авиационного керосина в зависимости от времени.

Не изучена кинетика, коэффициент адсорбции и коэффициент массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с содержанием различного количества активных металлов, как иридий и кобальт. Изучению этих вопросов и посвящена данная работа.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

2.1. Описание экспериментальной установки для измерения теплопроводности зернистых материалов в различных газовых средах, в вакууме в широкой области температур

Для измерения теплопроводности зернистых материалов в зависимости от температуры в вакууме и различных газовых средах была собрана экспериментальная установка, основанная на методе цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима [110]. Схема установки показана на рисунке 2.1.

Установка в основном состоит из электрических приборов, термостатирующей системы, цилиндрического бикалориметра и системы заполнения.

Бикалориметр состоит из двух коаксиально расположенных медных цилиндров—внутреннего и внешнего 1. Внутренний цилиндр (ядро бикалориметра) состоит из измерительного 2 и двух компенсационных цилиндров 3, позволяющих ликвидировать потерю тепла через верхний и нижний концы измерительного цилиндра [82,85]. Длина измерительного цилиндра 150 мм, компенсационного – 25 мм. Толщина исследуемого слоя составляет 6,165 мм. В верхней части внешнего цилиндра 1 имеется пробка 4, с двумя отверстиями диаметром 6 и 10 мм. Отверстие диаметром 6 мм просверлено по центру, через него проходит стальная трубка 5 с внутренним диаметром в 4 мм. Длина трубки 5 выбирается таким образом, чтобы она проходила по осевой линии прибора до отверстия, которое просверлено в его основании. Нижний конец этой трубки заварен. В отверстие диаметром 10 мм вварена другая стальная трубка 6, через которую бикалориметр заполняется исследуемым веществом. Через эту трубку производится также вакуумирование бикалориметра и заполнение газа.

Верхняя часть трубки 5 вварена в пробку 4. На трубку 5 плотно насажены измерительный 2 и компенсационный 3 цилиндры. Верхняя часть пробки 4 вварена в верхний торец бикалориметра.

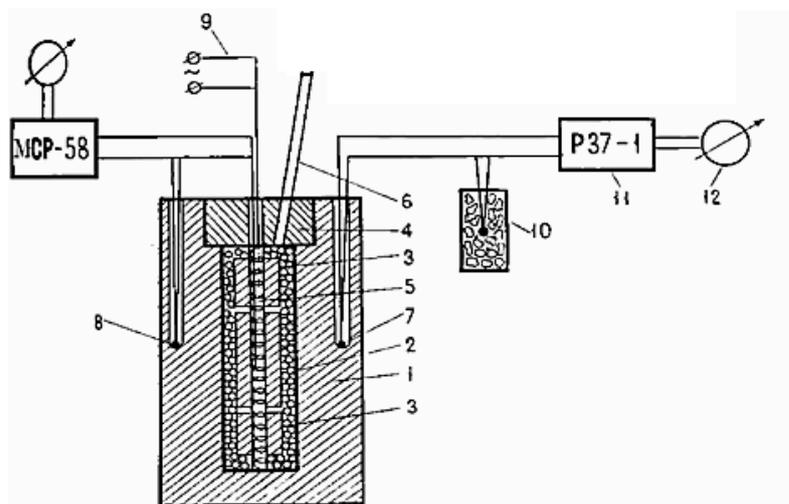


Рисунок 2.1 - Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности зернистых материалов: 1-внешний цилиндр; 2-внутренний цилиндр; 3-компенсационные цилиндры; 4-пробка; 5, 6 - стальная трубка; 7, 8 – термопары, 9- маломощный нагреватель 10 – термос с тающим льдом; 11- потенциометр; 12- гальванометр.

Внешний цилиндр 1 имеет сверху отверстие для размещения концов термопар 7,8. Нижний заваренный конец трубки 5 вставляется на глубину примерно 1 см в глухое отверстие, рассверленное в днище внешнего цилиндра 1 бикалориметра. Такая конструкция позволяет обеспечить надежную центровку ядра по отношению к поверхности внешнего цилиндра.

В трубку 5 через верхнее открытое отверстие вставляются маломощный нагреватель и горячий спай измерительной термопары. Для исключения электрического контакта с корпусом прибора провода нагревателя и термопары помещаются в фарфоровую соломку [54].

В качестве измерительной термопары применялись хромель-алюмелевые дифференциальные термопары, изготовленные из проволоки диаметром 0,3 мм. Измерительная дифференциальная термопара подключалась к гальванометру

M17/4. Измеряемые разности температур находились в пределах от 1,78 до 0,90 К.

Электронагреватель (9), изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 0,3 мм питается от сети через понижающий трансформатор типа ЛАТР-2М.

Для измерения при повышенных и высоких температурах прибор вставляется в электропечь типа СШОЛ 1.1,6/12, которая может работать в автоматическом режиме саморазогрева и в режиме ручной регулировки. Печь обеспечивает равномерный прогрев образца до температуры 1473 К [19, 20].

Включение печи в сеть осуществляется через систему стабилизаторов типа С-075, регулятора напряжения типа РНО-250-5 и электроизмерительных приборов, контролирующих режимный ток печи.

При переводе печи на ручное регулирование и правильном подборе режимного тока при заданной температуре система позволяет поддерживать постоянную температуру с точностью до сотых долей градуса в течение времени, необходимого для проведения замеров [19, 20].

Для измерения температуры опыта применялись также хромель-алюмелевые дифференциальные термопары. Один из спаев (горячий) вмонтирован в тело внешнего цилиндра 7, а другой (холодный) помещен в термос с тающим льдом 10. Концы термопары подсоединены к потенциометру 11 постоянного тока Р-363-3, класс точности которого составляет 0,005. Температура бикалориметра на протяжении всего опыта поддерживалась с точностью 0,02 К.

Данная установка позволяет проводить исследования теплопроводности зернистых материалов в воздухе в интервале температур 293-1173 К.

Контрольные измерения для проверки правильности постановки экспериментов были проведены в работах [19, 20] на Al_2O_3 (зерна, имеющие неправильную форму и размер 2-3 мм, насыпная плотность $\sim 1,09 \frac{г}{см^3}$; удельная поверхность $\sim 89 \frac{м^2}{г}$; суммарный объем пор $0,39 \frac{см^3}{г}$. Теплопроводность Al_2O_3 в

воздухе, которая измерялась нами ранее, была измерена на другой установке в интервале температур от 293 до 1073 К [110].

Выбор Al_2O_3 в качестве контрольного образца обусловлен тем, что в литературе отсутствуют надежные данные, определяющие теплофизические параметры в широком интервале температур какого-либо другого материала. Часто в качестве контрольного образца используются засыпки натурального кварцевого песка. Анализ литературных данных показал, что эффективная теплопроводность кварцевого песка колеблется в широких пределах (рисунок 2.2). Как видно из рисунка 2.2, данные различных авторов как качественно, так и количественно отличаются. Согласно [21] большое расхождение между данными различных авторов вызвано следующими причинами: теплопроводность изменяется на порядок от 5-10 Вт/(м·К) для кристаллического кварца и до 1,5 Вт/(м·К) для расплавленного; форма частиц изменяется в зависимости от способа образования зерен; существенно колеблется высота микрошероховатостей и размер частиц [87-95].

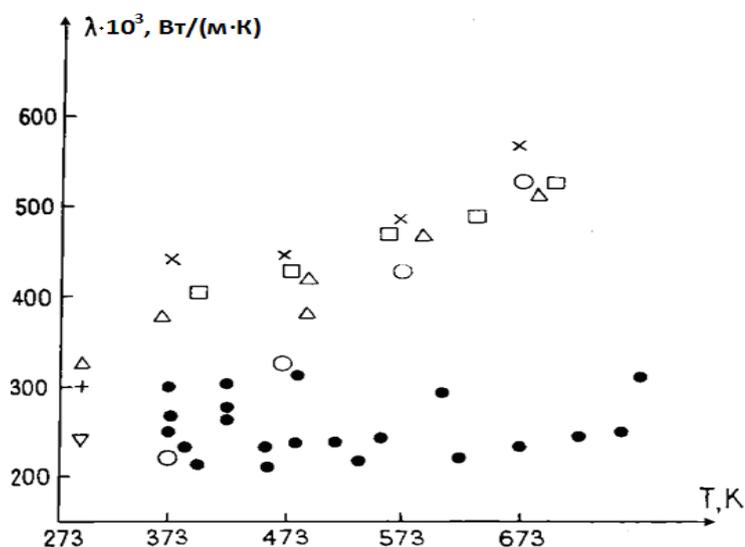


Рисунок 2.2 – Зависимость теплопроводности кварцевого песка от температуры в воздухе при атмосферном давлении по данным различных авторов: о – В.С. Никитин [43]; Δ - В. А. Осипова; □ – Л. Л. Васильев [19,46], Ю. Е. Фрайман [66]; x–М.И.Козак [37]; + – А.Ф. Бегункова [35]; Δ– С.А. Танаева [47,48]; • – А.Ф. Чудновский [32].

Как было уже отмечено, в качестве контрольного образца использовали оксид алюминия в виде гранул неправильной формы размерами 2-3 мм. Полученные данные по теплопроводности (λ) контрольного образца (Al_2O_3) приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Теплопроводность ($\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м К)) Al_2O_3 в зависимости от температуры в воздухе.

T, К	295,0	383,0	468,0	579,9	689,0	789,0	811,8	973,0
$\lambda_{\text{конт}} \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	219	238	258	280	301	326	354	396
$\lambda_{\text{лит}} \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	223	236	260	276	300	323	350	392
Δ , %	1,8	-0,85	0,77	-1,45	-0,33	-1,34	-1,14	-1,0

Данные таблицы 2.1 с точностью до 1-2 % совпадают с данными, полученными на другой установке [56].

Анализ возможных ошибок при измерении теплопроводности показывает, что общая относительная погрешность при $\alpha=0,95$ не превышает 5,2 % [1, 82].

Эффективная теплопроводность контрольного образца в разное время разными бикалориметрами измерялась при различных толщинах исследуемого слоя и различных засыпках, при этом в пределах погрешности опытов были получены одинаковые результаты.

Убедившись, что экспериментальная установка воспроизводит эффективную теплопроводность эталонного образца, нами была измерена эффективная теплопроводность гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями [84, 97].

2.2. Методика измерения коэффициента теплопроводности зернистых материалов. Вычисление эффективной теплопроводности

Бикалориметр со вставленной термопарой и внутренним нагревателем заполняется исследуемым образцом. После вакуумирования или заполнения бикалориметра нужным газом устанавливается положение нулевой точки зеркального гальванометра типа М 17/4, к которому подключена основная рабочая термопара. Затем включается цепь внутреннего нагревателя и

происходит нагрев в течение 1,5-2 мин током 1 А [1,82,84,87]. Нагрев фиксируется по отклонению зайчика гальванометра до конца шкалы.

Далее цепь внутреннего нагревателя выключается и наблюдается самопроизвольное охлаждение исследуемого слоя до температуры начала опыта.

Время охлаждения фиксируется двухстрелочным секундомером типа С-11-16, с точностью 0,1 с. По шкале зеркального гальванометра М 17/4 (чувствительностью 10^{-9} А/дел.), к которому подсоединена хромель-алюмелевая термопара, отмечается время прохождения светового зайчика между двумя значениями шкалы гальванометра. Оно всегда соответствует регулярному тепловому режиму процесса охлаждения, что было проверено построением полулогарифмических графиков для темпа охлаждения [84].

Теплопроводность исследуемых образцов определялась при свободной засыпке [92-102].

Уравнение эффективной теплопроводности для цилиндрического бикалориметра имеет вид [6, 84, 103, 104, 110]:

$$\lambda = \frac{R_1^2 C^1 \gamma \ln \frac{R_2}{R_1}}{2B_{\text{ц}}}, \quad (2.1)$$

$$B_{\text{ц}} = \frac{3\mathcal{J}_{\text{ц}}}{3\mathcal{J}_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}}; \quad \mathcal{J}_{\text{ц}} = \frac{1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2}{3K_{\text{ц}}} \cdot \frac{C_{\text{м}}}{C}; \quad K_{\text{ц}} = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1},$$

где $C_{\text{м}}$ – общая теплоемкость ядра, Дж/(кг·К); C – теплоемкость исследуемого образца, Дж/(кг·К); R_1 – радиус измерительного цилиндра, м; R_2 – внутренний радиус наружного цилиндра, м; C^1 – удельная теплоемкость меди, Дж/(кг·К); γ – плотность меди, кг/м³; m – темп регулярного охлаждения, определяемый по формуле, 1/с:

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (2.2)$$

где θ_1 и θ_2 – разность температур между теплообменивающимися поверхностями в начале τ_1 и в конце τ_2 отсчета; N_1 и N_2 – разность температур, выраженная числом делений шкалы гальванометра.

Для исследуемого слоя толщиной 6,165 мм величины, входящие в уравнение (2.1), имели следующие значения:

$$K_y = 0,74; \mathcal{J}_y = 1,3; B_y = 0,84.$$

Следовательно, коэффициент теплопроводности можно вычислить по формуле:

$$\lambda = 0,167C^1m. \quad (2.3)$$

При изменении толщины исследуемого слоя меняется геометрия прибора и соответственно коэффициент в формуле (2.3). При расчете эффективной теплопроводности уравнением (2.1) учитывается ряд поправок [82, 84, 97].

2.2.1. Поправка на расположение спаев дифференциальной термопары

Спаи термопары в бикалориметре расположены не на поверхности слоя исследуемого вещества, а на некотором расстоянии от этих поверхностей. Измеряя разность температур $(t_0 - t_3)$, помимо перепада температур в исследуемом слое $(t_0 - t_2)$ также учитывается перепад температур в стенках цилиндров: $(t_0 - t_1)$ и $(t_2 - t_3)$ [84, 87, 110].

В процессе охлаждения внутреннего цилиндра происходит передача тепла через многослойную стенку [1, 6, 82, 84, 110].

Решая уравнение Фурье при этом случае с уравнением (2.1), и используя метод последовательных приближений, получим [84, 87, 110]:

$$\lambda = \frac{K_{ц} C_{м} m (R_2 - R_1)}{F} \left[1 + \frac{K_{ц} C_{м} m (R_2 - R_1)}{F \ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot \left(\frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\lambda_1} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_2}}{\lambda_2} \right) \right], \quad (2.4)$$

где λ_1 и λ_2 – эффективные теплопроводности внутреннего и внешнего цилиндров; R_0 и R_3 – расстояние между осью внутреннего цилиндра и спаем термопары.

Уравнение (2.4) учитывает взаимосвязь между спаем термопары и исследуемым образцом. Для того, чтобы сократить количество поправок, нами был изготовлен цилиндрический бикалориметр из красной меди марки М-2.

Без учета поправки теплопроводность оксида алюминия, вычисленная по формуле (2.1), равнялась 0,171 Вт/(м·К). С учетом этой поправки эффективная теплопроводность имеет значение 0,1714 Вт/(м·К) [82, 84, 97, 103, 110]. Расхождения составляют 0,23 %. Поскольку эта разница значительно меньше погрешности эксперимента, то при расчете эффективной теплопроводности гранулированной окиси алюминия, содержащей различное количество никеля и меди, эта поправка не учтена [84, 97, 103, 110].

2.2.2. Поправка на нагрев внешнего цилиндра

Уравнение (2.3) получено нами в предположении того, что температура окружающей среды остается постоянной [110]. Поскольку установка теплоизолирована, то процесс охлаждения внутреннего цилиндра сопровождается ростом температуры [22, 23, 110].

В данном случае отношение температуры охлаждения измерительного цилиндра $\Delta\theta_1$ к температуре нагревания внешнего цилиндра $\Delta\theta_2$ определяется выражением [22, 23, 110]:

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{C_{\text{ядро}}}{C_{\text{внеш.цлд}}}, \quad (2.5)$$

где $C_{\text{внеш. цлд}}$ и $C_{\text{ядро}}$ – общая теплоемкость внешнего цилиндра и ядра, Дж/(кг·К).

Нагревание внешнего цилиндра при охлаждении ядра непосредственно влияет на темп охлаждения m [110].

С учетом изменения температуры холодного спая хромель-алюмелевой дифференциальной термопары истинное значение темпа охлаждения следует подставить в уравнение (2.1). Темп охлаждения определяется следующим соотношением [22, 23, 110]:

$$m = m_{\text{изм}} \cdot \frac{\ln \theta_1 - \ln[\Delta\theta_2 + (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)] \cdot \frac{C_{\text{ядро}}}{C_{\text{внеш.цлд}}}}{\ln \Delta n_1 - \ln \Delta n_2}, \quad (2.6)$$

Если выполняется условие $\frac{C_{\text{ядро}}}{C_{\text{внеш.цил}}}} \leq 0,01$, то эта поправка по своей величине незначительна.

В нашем опыте

$$\frac{m}{m_{\text{изм}}} = \frac{\ln 1,78 - \ln[0,9 + (1,78 - 0,9) \cdot 0,01]}{\ln 1,98}$$

Для исследуемого оксида алюминия с размерами гранул (0,8-1,25) мм $m_{\text{изм}} = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ тогда $m_{\text{изм}} = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, т.е. разница составляет 1,5 %. При расчете темпа охлаждения нами учитывалось изменение температуры внешнего цилиндра [22, 23, 110].

2.2.3. Поправка на изменение геометрических размеров бикалориметра от температуры

В числителе формулы (2.1) в качестве геометрической характеристики цилиндрического бикалориметра входят δ или $(R_2 - R_1)$, а в знаменателе F . Значение F является функцией температуры [110].

В расчетное уравнение необходимо внести поправку, характеризующую изменение геометрических размеров бикалориметра с изменением температуры. Данная поправка имеет вид [22, 23, 110]:

$$\frac{\delta}{F} = \frac{R_2 - R_1}{F} = \frac{(R_2 - R_1)_{t_0} \cdot (1 + \alpha \Delta t)}{F_{t_0} (1 + \alpha \Delta t)^2} = \frac{(R_2 - R_1)_{t_0}}{F_{t_0} [1 + \alpha(t_{\text{изм}} - 20)]}. \quad (2.7)$$

где α – коэффициент линейного расширения меди внутреннего цилиндра; t – температура опыта, при которой производится измерение размеров бикалориметра (при 20°C) [110]. Вычисления изменений геометрических размеров цилиндрического бикалориметра с изменением температуры дают:

$$\frac{R_2 - R_1}{F} = \frac{0,6165}{79,925 [1 + 0,000017(800 - 20)]} = \frac{0,6165}{80,9848} = 0,00761$$

Если вычислить $(R_2 - R_1)/F$ при комнатной температуре, то получится значение 0,00778. Согласно этим данным поправка составит 2,23 %.

Толщина исследуемого слоя при температурах 293 и 1073 К соответственно равна 6,165 и 6,249 мм, т.е. при температуре 800°С она изменяется на 1,36 %. Так как эта разница меньше погрешности экспериментального измерения, при расчете эффективной теплопроводности по (2.1) эта поправка не учтена [23].

2.2.4. Оценка доли лучистой составляющей в эффективной теплопроводности при различных значениях температуры

В работе А.В. Лыкова [47] показано, что если стенки пор непрозрачны для теплового излучения, то радиационная составляющая теплопроводности может быть представлена в виде:

$$\lambda_1 = 4f\sigma T^3\delta. \quad (2.8)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; δ – размеры пор; f – коэффициент, связанный с оптико-геометрическими характеристиками, принятой моделью поры и схемой расчета.

В работе [47] также приводится сравнение параметров f по данным различных авторов:

$$f = \frac{1}{3} \text{ (Босворт); } f = \frac{\varepsilon_M}{(2-\varepsilon_M)} \text{ (Арго и Смит); } f = \varepsilon_M \text{ (Шотте);}$$

$$f = \frac{(\delta\varepsilon_M^2)}{2d} \text{ (А.Ф.Чудновский); } f = \left(1 + \frac{5 \cdot 10^{-5}}{2}\right) \cdot \frac{0,16}{(1-\Pi)^{-1,15}} \text{ (С.Н.Шорин, Л.Б. Зарудный, Г.Л. Серебрянный); } f = \varepsilon_M \Gamma \text{ (Лоеб); } f = \frac{0,865[3\Pi\varepsilon_M + (1-\Pi)\varepsilon_M]}{1+(1-\Pi)(1-\varepsilon_M)} \text{ (В.С. Никитин),}$$

где ε_M – степень черноты материала; Γ – геометрический фактор Π – пористость.

Отдать предпочтение какой-либо из этих формул, как указывает А.В. Лыков, не представляется возможным, а разброс параметров при расчете по различным уравнениям для одной и той же засыпки наших объектов исследования достигает 70 %.

Польц [110] для расчета лучистой составляющей теплопроводности для серой среды, ограниченной диффузными поверхностями, предлагает формулу:

$$\lambda = \frac{16}{3} \cdot \frac{n_{\text{пр}}\sigma}{\beta} T^3 V(\varepsilon_{\text{ст}}\delta_1), \quad (2.9)$$

где $V(\varepsilon_{\text{ст}}\delta_1)$ – функция, учитывающая влияние оптической толщины образца δ_1 и степень черноты $\varepsilon_{\text{ст}}$ граничащих поверхностей (стенок); $n_{\text{пр}}$ – коэффициент преломления света; σ – постоянная Стефана-Больцмана; β – спектральный коэффициент ослабления.

Авторы работы [5] указывают, что формула Польца для тонкого слоя. порядка 5 мм при плотности потока до $7,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ дает погрешность не более 10 %. С ростом оптической толщины слоя эта погрешность возрастает до 20 %.

Использовать все приведенные формулы для практического расчета вклада лучистой составляющей в эффективную теплопроводность засыпок очень сложно, так как каждая формула в коэффициенте f содержит большой набор величин, которые дополнительно должны быть определены экспериментально.

В связи с этим нами предпринята попытка определить вклад радиационной составляющей в эффективную теплопроводность исследуемых нами материалов, предполагая, что $\lambda_{\text{эф}}$ в вакууме можно представить в виде:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{л}}, \quad (2.10)$$

где $\lambda_{\text{к}}$ – теплопроводность через контакты зерен; $\lambda_{\text{л}}$ – теплопроводность излучением.

Все вышеуказанные формулы, определяющие $\lambda_{\text{л}}$, содержат один и тот же член σT^3 , который определяет рост лучистой составляющей теплопроводности в зависимости от температуры. Поэтому:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{к}} + f\sigma T^3, \quad (2.11)$$

где $f\sigma T^3$ – теплопроводность излучением; $\lambda_{\text{к}}$ – контактная теплопроводность, которую в первом приближении можно считать независимой от температуры, так как площадь контактного пятна при изменении температуры меняется незначительно. Предполагая, что коэффициент f убывает обратно пропорционально абсолютной температуре, можно найти значения $\lambda_{\text{к}}$ и $\lambda_{\text{л}}$ для различных температур.

2.3. Описание экспериментальной установки для измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков в широком диапазоне температур

Для измерения температуропроводности зернистых материалов была использована экспериментальная установка, работающая по методу цилиндрического α – калориметра регулярного теплового режима [110]. Схема установки приведена на рисунке 2.3.

Установка в основном состоит из α -калориметра, термостатирующей системы, вакуумной системы, системы заполнения, электроизмерительных датчиков.

α – калориметр состоит из медного цилиндра 1 диаметром 100 мм и высотой 190 мм, в котором расточена цилиндрическая полость диаметром 30 мм и глубиной 95, 8 мм. В верхней части α – калориметра имеется пробка 2, с двумя отверстиями. В одно из отверстий, расположенное по центру пробки, вставлена металлическая трубка 4 диаметром 6 мм. Длина трубки выбирается с таким расчетом, чтобы она проходила по осевой линии α – калориметра до основания, нижняя часть трубки вварена.

В другое отверстие (5) заварена металлическая трубка (6) диаметром 14/10 мм длиной 400 мм. Пробка с заваренными трубками вварена в корпус α калориметра. Через трубку 6 прибор заполняется исследуемым образцом. Трубка 6 также служит для подачи газа в α – калориметр и создания вакуума. Внутри трубки 4 вставляются горячий спай хромель-алюмелевой термопары 9 и маломощный нагреватель. Для создания хорошего теплового контакта горячий спай измерительной термопары 9 вплотную подведен к внутренней поверхности трубки 4, а холодный спай измерительной термопары 10 вставляется в отверстие в корпусе α – калориметра. Концы термопары через шунтирующий магазин сопротивления 11 подсоединены к зеркальному гальванометру М17/4 12. Шкала гальванометра соответствует температурному перепаду примерно 3 К. Медный цилиндр выполняет роль среды, обеспечивающей условие $\alpha \rightarrow \infty$. Для измерения температуры используется

другая дифференциальная хромель-алюмелевая термопара, горячий спай 13 которой вмонтирован в тело α – калориметра, а холодный 14 помещен в термос со льдом. Концы термопары подсоединены к потенциометру постоянного тока Р-37/1 (15). Класс точности 0,01 [110].

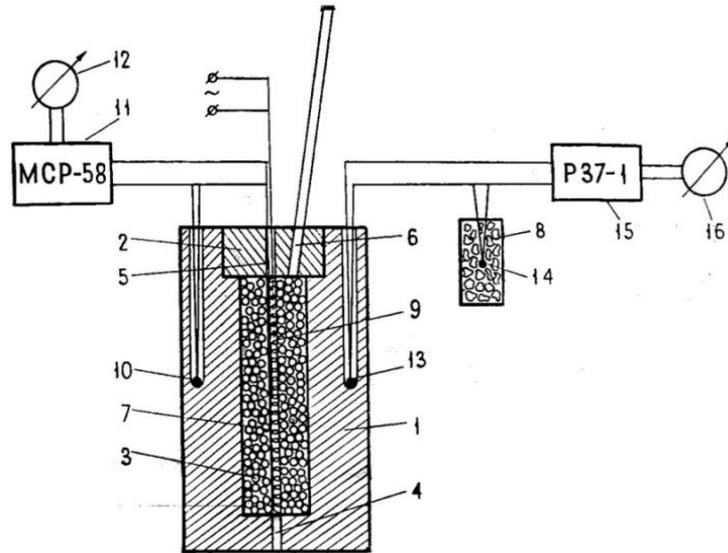


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки для измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков: 1 - медный цилиндр; 2 – пробка; 3- исследуемый объект; 4 , 6 – металлическая трубка; 5 – внутренней нагреватели; 7 – маломощный нагреватель; 8,9 – термопара; 10, 13 – спай термопары 14- 10 – термос с тающим льдом 15- потенциометр; 16 – гальванометр.

Выход потенциометра подсоединяется к зеркальному гальванометру М 25/2 (16), позволяющему регистрировать температуру тела α – калориметра с точностью до сотой доли градуса. Медный цилиндр, тело которого в установке используется как охлаждающая среда, вследствие большой теплопроводности обеспечивает также малые градиенты температур. Для создания вакуума в α - калориметре используется вакуумный пост типа ВОУ-1А. После вакуумирования производится замер температуропроводности исследуемого образца при заданной температуре. После выполнения замера в вакууме закрывается вентиль 19, открываются вентили 17, 18 и производится заполнение α -калориметра газом до заданного давления. Давление в камере измеряется вакуумметром ВИТ-2. Эта установка позволяет провести исследование

температуропроводности зернистых материалов и порошков в интервале температур (293-1008,6) К.

Контрольные измерения для проверки правильности постановки эксперимента были проведены на порошке оксида алюминия. Температуропроводность порошка оксида алюминия измерялась в воздухе в интервале температур (293-1008,6) К (таблица 2.2). Полученные экспериментальные данные температуропроводности порошка оксида алюминия с погрешностью 2-2,5 % совпадают с данными [9, 44] во всем интервале температур (рисунок 2.4).

Таблица 2.2 – Экспериментальные значения температуропроводности порошка оксида алюминия в зависимости от температуры в воздухе

T, К	298	329.5	380	427.3	476	526	586.1	633
$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	1,46	1,47	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64	1,67
	1,45	1,47	1,50	1,55	1,55	1,58	1,65	1,68
T, К	698,6	750,6	798,1	853,3	903,5	954,4	1008.6	
$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	1,73	1,77	1,83	1,84	1,90	1,92	1,99	
	1,75	1,79	1,82	1,86	1,92	1,93	1,98	

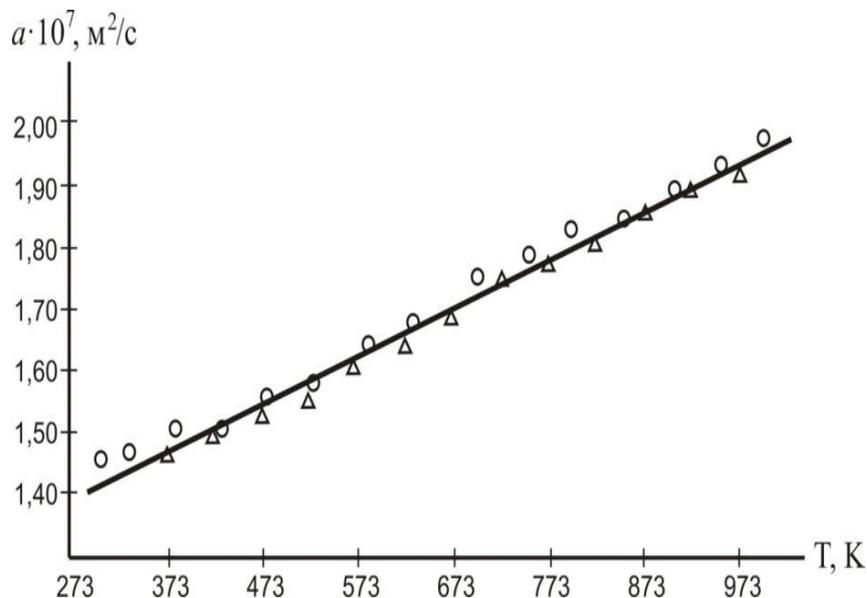


Рисунок 2.4 – Зависимость температуропроводности порошка оксида алюминия от температуры по данным: Δ – О.А.Краева [43]; о – автора.

Убедившись, что экспериментальная установка хорошо воспроизводит температуропроводность порошка оксида алюминия, мы приступили к измерению температуропроводности исследуемых образцов. Анализ расчета погрешности измерения температуропроводности показывает, что общая относительная погрешность измерения при $\alpha = 0,95$ не превышает 5,4 % [110].

2.3.1. Методика измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков

α -калориметр заполняется исследуемым образцом. Производится проверка отсутствия электрических контактов между телом α -калориметра, измерительными термопарами и нагревателем. Затем α -калориметр вставляется в шахтную печь типа СШОЛ-11,6/12, которая может работать и в автоматическом режиме, и в режиме ручной регулировки. Печь обеспечивает равномерный прогрев образца до температуры 1473 К. При переводе печи на ручное регулирование и правильном подборе режимного тока при заданной температуре система позволяет поддерживать постоянную температуру в теле α -калориметра с точностью до сотых долей градуса в течение всего времени, необходимого для проведения замеров. Для разогрева образца до заданной температуры печь переключается на автоматический режим. В этом режиме производится прогрев образца, после чего для получения точной постоянной температуры печь переводится на ручную регулировку. Контрольные приборы позволяют определить момент, когда температура α -калориметра перестанет изменяться. После вакуумирования до нужного давления и заполнения α -калориметра газом устанавливается положение нулевой точки зеркального гальванометра типа М17/49 (12). Затем, включается цепь внутреннего маломощного нагревателя, который поднимает температуру образца на 3-4 К выше температуры корпуса α -калориметра, что регистрируется по отклонению зайчика гальванометра 12.

После нагрева производится отключение нагревательной системы и наблюдается самопроизвольное охлаждение образца. Время охлаждения

образца фиксируется секундомером типа С-11-16. По шкале зеркального гальванометра 12 отмечается время прохождения светового зайчика между двумя определенными значениями шкалы гальванометра. Данный участок располагается в середине шкалы и всегда соответствует регулярному тепловому режиму процесса охлаждения, что было проверено построением полулогарифмических графиков для темпа охлаждения.

Температуропроводность исследуемых образцов вычислялась по формуле [37, 38, 40, 43, 50, 110]:

$$\alpha = Km_{\infty}, \quad (2.12)$$

где K – коэффициент, характеризующий форму образца: m_{∞} – темп охлаждения при $\alpha \rightarrow \infty$ и $t_c = const$.

Коэффициент формы образца K для цилиндра определяется по формуле [50, 112]:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{x_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}, \quad (2.13)$$

где x_0 – наименьший корень бесселевой функции первого рода нулевого порядка; $x_0 = 2,4040$; R и l – соответственно радиус и высота цилиндрической полости a -калориметра. Для нашей установки $R = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $l = 9,58 \cdot 10^{-2}$ м; $K = 0,34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Темп охлаждения определяется по формуле [1, 55, 82, 87]:

$$m = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (2.14)$$

2.4. Экспериментальная установка для комплексного определения физико-химических свойств веществ при различных температурах и давлениях

Для измерения физико-химических свойств (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) исследуемых образцов при высоких температурах и давлениях, применяли экспериментальную установку по методу

цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого рода [37]. Схема установки показана на рисунке 2.5.

Установка, в основном, состоит из цилиндрического бикалориматра, пережимного сосуда высокого давления 17, грузопоршневого манометра МП-2500 (18) и электроизмерительных приборов 7,11. При измерении температуры в опыте, нами использована дифференциальная хромель-алюмелевая термопара диаметром 0,15мм с потенциометром РЗ7-1 7,11 классом точности 0,001. Холодный спай дифференциальной термопары помещается в сосуд Дьюара со льдом 8 и 9. С помощью термопары и гальванометра типа М 17/4 регистрировалось изменение температуры опыта во время эксперимента, которое не превышало 0,02К.

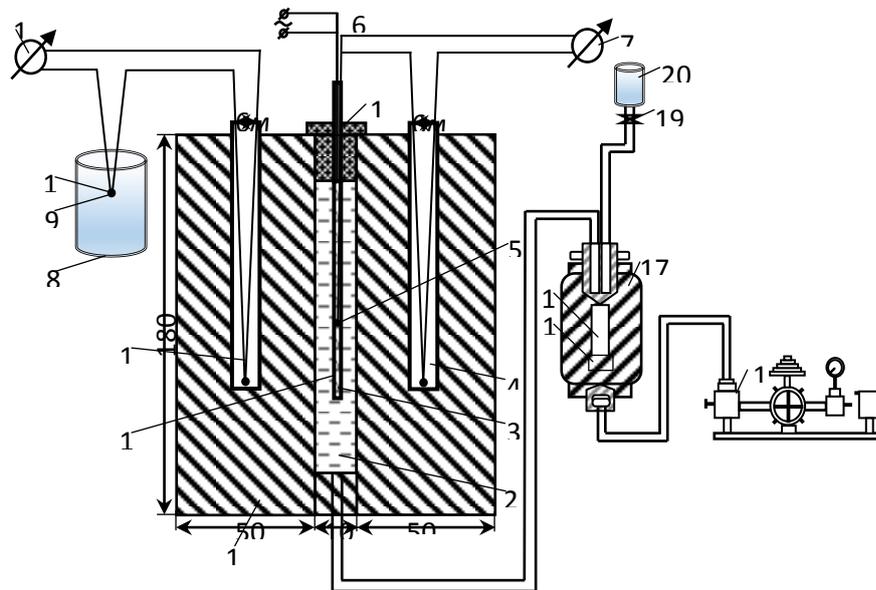


Рисунок 2.5 – Схема установки для комплексного определения физико-химических свойств растворов или порошкообразных образцов (разработка профессора Сафарова М.М. и его учеников) [74].

Для измерения перепада температуры на границах исследуемого слоя, использовалась также хромель-алюмелевая термопара, горячий спай которой находится в отверстии измерительного цилиндра 5, а холодный спай в отверстии 4 внешнего цилиндра, концы которого соединяются с гальванометром типа М 17/2. Внутренний нагреватель и горячий спай

измерительной термопары находились в бикалориметре при атмосферном давлении и полностью были изолированы от исследуемой среды.

Для создания перепада температуры на границе исследуемого слоя использовался внутренний нагреватель из нихромовой проволоки диаметром 0,15мм, вмонтированной в измерительный цилиндр, который питался от сети через понижающий трансформатор. Отверстия, высверленные в измерительном цилиндре для размещения нагревателя, спая измерительной термопары имели минимальные диаметры, чтобы наличие их не могло существенно влиять на равномерность температурного поля ядра. Для исключения электрического контакта термопара и внутренний нагреватель были изолированы от корпуса бикалориметра с помощью стеклоткани, пропитанной клеем БФ-2. Перепад температуры на границе исследуемого слоя составлял 1,31-0,65К. Для расчета методической погрешности измерения температуры в опыте использована универсальная методика. Расчёты показали, что доверительная граница погрешности теплопроводности при измерении по методу цилиндрического бикалориметра (комплексного) регулярного теплового режима в относительной форме при $\alpha=0,95$, составляет 1,9%, методическая погрешность 0,2%, инструментальная погрешность 1,1%. Общая относительная погрешность измерений теплопроводности составляет 3,2%. Аминов Ш.А. [113] на экспериментальных установках измерял теплопроводность, удельную изобарную теплоемкость и температуропроводность водных растворов пентэласта R-1161(1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%) в интервале температур (293-413) К при атмосферном давлении и в интервале давлений (0,101-29,25) МПа. Ш.А. Аминов, используя закон соответственных состояний и экспериментальные данные по теплофизическим характеристикам, получил ряд эмпирических уравнений, которые позволяют рассчитать выше перечисленные значения параметров неисследованных растворов [111].

2.5. Определение погрешности измерения теплофизических свойств веществ

Расчёты погрешности экспериментальных данных по тепло-, температуропроводности и теплоемкости веществ приводятся в работах [23, 40, 43, 53, 71, 77, 110], согласно которым нами рассчитана погрешность измерения теплопроводности и температуропроводности образцов.

Среднее арифметическое значение (выборочное среднее) результатов наблюдений определяется по формуле [71, 77, 110]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2.15)$$

где n -число наблюдений; y_i - результат i -го измерения.

Относительная $S_{\text{отн}}$ и абсолютная S величины выборочного среднеквадратичного отклонения результата одного наблюдения определяются по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.16)$$

$$S_{\text{отн}} = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\% . \quad (2.17)$$

Для расчёта абсолютной S_y и относительной $S_{y,\text{отн}}$ величин среднеквадратичного отклонения результата серии наблюдений использовались формулы:

$$S_y = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.18)$$

$$S_{y,\text{отн}} = \frac{S}{\bar{y}} 100\% \quad (2.19)$$

Доверительная граница случайной погрешности результата измерений $\Delta_{\text{сл}}$ вычисляется по выражению:

$$\Delta_{\text{сл}} = S \bar{y} \cdot t_{n-1, 1-\varepsilon/\alpha} . \quad (2.20)$$

Доверительная граница неисключенной систематической погрешности измерения определяется по формуле:

$$\theta = \kappa \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_j^2}, \quad (2.21)$$

где κ – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, равный 1,1; θ_j – граница i -й соответствующей неисключенной систематической погрешности [110].

Доверительную границу погрешности измерения можно определить по выражению:

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma} \quad (2.22)$$

Среднеквадратическое отклонение суммы систематических и случайных погрешностей (S_{Σ}) рассчитывается формулой:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_v^2 + S_{\bar{y}}^2}. \quad (2.23)$$

где, $S_v^2 = \frac{1}{3} \sum \theta_j^2$ – среднее квадратичное отклонение неисключенных систематических погрешностей.

Коэффициент t_{Σ} , зависящий от случайной и неисключенной погрешностей, определяется по формуле:

$$t_{\Sigma} = \frac{\theta + S_{\bar{y}} \cdot t_x}{S_v + S_{\bar{y}}}, \quad (2.24)$$

где t_x – коэффициент Стьюдента, который зависит от выбора доверительной вероятности α и числа наблюдений.

Доверительная граница погрешности результата косвенных измерений, являющая функцией $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ при $\alpha = 0,95$, определяется по выражению:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial y_1}\right)^2 (\Delta y_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y_2}\right)^2 (\Delta y_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial y_n}\right)^2 (\Delta y_n)^2}, \quad (2.25)$$

где $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ – доверительные границы погрешности результатов измерений величин y_1, y_2, \dots, y_n .

В относительной форме расчёт доверительной границы погрешности измерения производится по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\bar{y}} 100\%, \quad (2.26)$$

Доверительные границы погрешности результатов измерений температуропроводности (a) и теплопроводности (λ) определяются по формуле:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial R_1}\right)^2 (\Delta R_1)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial C'}\right)^2 (\Delta C')^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial \gamma}\right)^2 (\Delta \gamma)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial R_2}\right)^2 (\Delta R_2)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial B_{\text{ц}}}\right)^2 (\Delta B_{\text{ц}})^2}. \quad (2.27)$$

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x_0}\right)^2 (\Delta x_0)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial \pi}\right)^2 (\Delta \pi)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial l}\right)^2 (\Delta l)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial R}\right)^2 (\Delta R)^2} \quad (2.28)$$

Согласно формулам (2.1), (2.2), (2.13) и (2.14),

-для теплопроводности:

$$\frac{\partial\lambda}{\partial R_1} = \frac{2R_1 C' \gamma m \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2B_{\text{ц}}}; \quad \frac{\partial\lambda}{\partial C'} = \frac{R_1 \gamma m \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2B_{\text{ц}}}; \quad \frac{\partial\lambda}{\partial \gamma} = \frac{R_1 C' m \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2B_{\text{ц}}};$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial m} = \frac{R_1 C' \gamma \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2B_{\text{ц}}}; \quad \frac{\partial\lambda}{\partial R_2} = -\frac{C' \gamma m \ln R_2}{2B_{\text{ц}}}; \quad \frac{\partial\lambda}{\partial B_{\text{ц}}} = -\frac{R_1^2 C' \gamma m \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2B_{\text{ц}}^2};$$

-для температуропроводности:

$$\frac{\partial a}{\partial m} = \frac{R^2 l^2}{x_0^2 + \pi^2}; \quad \frac{\partial a}{\partial R} = \frac{2ml^2}{x_0^2 + \pi^2}; \quad \frac{\partial a}{\partial l} = \frac{2mR^2 l}{x_0^2 + \pi^2}; \quad \frac{\partial a}{\partial x_0} = 0; \quad \frac{\partial a}{\partial \pi} = 0.$$

Уравнения (2.27) и (2.28) дают возможность рассчитать погрешности измерений тепло- и температуропроводности в относительной форме при $\alpha = 0,95$.

Для определения методической погрешности измерения температуры опыта нами использована методика, предложенная в работах [110], а также учтена инструментальная погрешность при измерении ЭДС термопары потенциометром или микровольтнаноамперметром. Необходимая информация

для количественной оценки погрешности измерения тепло – и температуро-проводности содержится в таблице 2.3. и 2.4.

Расчёты показали, что доверительная граница погрешности измерений в относительной форме при $\alpha = 0,95$ для теплопроводности составляет 5,4 %, для температуропроводности – 4,2 % , методическая погрешность – 0,08 % и инструментальная погрешность – 0,03 %.

Таблица 2.3 – Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности измерения теплопроводности

№	Наименование	Величина
1	2	3
1	Величина внешнего радиуса внутреннего цилиндра R_1 , м	$15,95 \cdot 10^{-3}$
2	Погрешность определения радиуса внутреннего цилиндра R_1 , м	$5 \cdot 10^{-5}$
3	Удельная теплоёмкость измерительного цилиндра $C', \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	392
4	Погрешность измерения теплоёмкости измерительного цилиндра $C', \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	3,1
5	Теплопроводность толуола, Вт/(м К)	0,218
6	Погрешность измерения теплопроводности контрольных образцов	3,2%
7	Плотность материала измерительного цилиндра (медь) $\rho, \text{кг/м}^3$	8900
8	Погрешность измерения плотности материала измерительного цилиндра (медь) $\rho, \text{кг/м}^3$	0,5
9	Величина темпа охлаждения при методе регулярного теплового режима первого рода $m, 1/\text{с}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
10	Погрешность измерения темпа охлаждения $m, 1/\text{с}$	0,05
11	Величина внутреннего радиуса внешнего цилиндра R_2 , м	$21,2 \cdot 10^{-3}$
12	Значение константы $B_{\text{ц}}$	0,84

продолжение табл. 2.3.

1	2	3
13	Доверительная граница погрешности измерений в относительной форме при $\alpha = 0,95$, %	5,2
14	Методическая погрешность, %	0,11
15	Инструментальная погрешность %	0,05
16	Общая погрешность λ , %	5,4

Таблица 2.4 – Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности измерения температуропроводности

№	Наименование	Величина
1	Внутренний диаметр a -калориметра d , м	$3 \cdot 10^{-2}$
2	Погрешность определения диаметра a -калориметра Δd , м (нутромер индикаторный НИ-50А)	$5 \cdot 10^{-5}$
3	Высота цилиндрической полости l , м	$9,58 \cdot 10^{-2}$
4	Погрешность определения высоты цилиндрической полости Δl , м	$1 \cdot 10^{-3}$
5	Время регулярного охлаждения τ , с	138
6	Погрешность определения времени охлаждения $\Delta \tau$, с	0,2
7	Темп регулярного охлаждения $m, (1/c)$	$4,94 \cdot 10^{-3}$
8	Погрешность определения темпа регулярного охлаждения $\Delta m, (1/c)$	$0,08 \cdot 10^{-3}$
9	Доверительная граница погрешности измерения в относительной форме при $\alpha = 0,95$, %	3
10	Методическая погрешность, %	1,2
11	Инструментальная погрешность, %	1
12	Общая погрешность измерения α , %	5,2

2.6. Экспериментальная установка для определения коэффициента адсорбции и массоотдачи

Для исследования кинетики образцов нами разработана установка (рисунок 2.6), которая состоит из двух частей: 1) цилиндрического сосуда и сетки; 2) секундомера и электронных весов, точность измерения которых равна 0,001 г. Диаметр сосуда около 5 см, высота 8 см, диаметр сетки равен внутреннему диаметру сосуда, а площадь каждой ячейки сетки 1 мм². Вначале определяется вес сосуда с помощью весов. Затем в сосуд наливается вода, взвешивается и определяется её вес. Исследуемые образцы взвешиваются вместе с сеткой. Далее сетка с исследуемыми гранулами устанавливается в сосуд и секундомером засекается время увлажнения. Опыт повторяется через каждые 30 мин [85-89, 91, 94, 95, 98, 99, 103-106, 108, 110]:

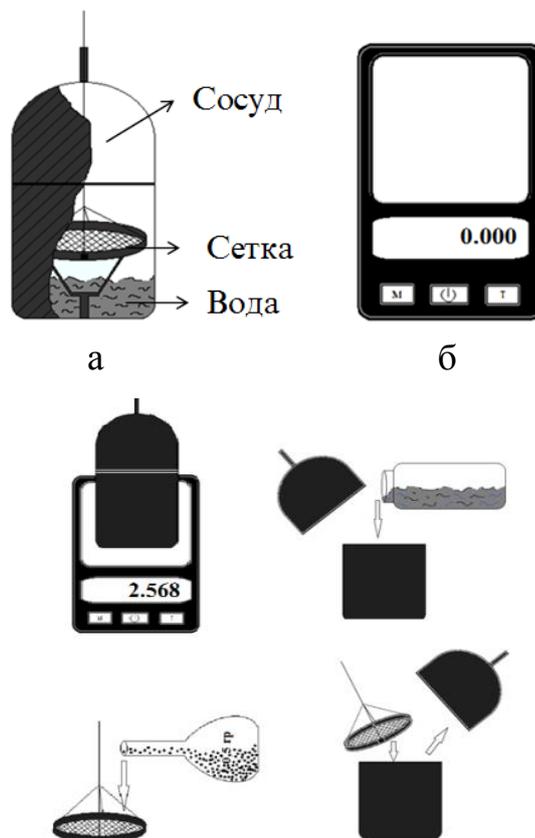


Рисунок 2.6 – Экспериментальная установка для определения коэффициента адсорбции и массоотдачи: а – установка; б – электронные весы.

Выводы к главе 2

1. Собрана экспериментальная установка, работающая по методу регулярного теплового режима (цилиндрический бикалориметр, α -калориметр), применяемая для измерений λ , α и C_p сложных композиционных и сыпучих материалов, которая хорошо воспроизводит результаты опытов, что позволяет получить относительно достоверные данные, также разработана и собрана установка для измерения коэффициента адсорбции сыпучих материалов (имеется малый патент Республики Таджикистан).

2. Показана возможность использования выбранных методик для измерения теплопроводности (λ), температуропроводности (α) и теплоемкости (C_p) композиционных материалов в широкой области температур. Анализ первичных опытных данных, оценка погрешности измерений теплопроводности (λ), температуропроводности (α) и теплоемкости (C_p) показывают, что эти установки собраны удачно и могут быть использованы для измерения λ , α и C_p оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия в вакууме и различных паровых средах при повышенных температурах.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ И АДсорбЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

3.1. Результаты экспериментального исследования изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде увлажнения при температуре 293 К и атмосферном давлении

Основные характеристики исследуемых катализаторов

Методом приготовления исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов (независимо от природы металла) является одно – или многократная пропитка пористых носителей водным раствором солей, содержащих активный компонент металла, в данном случае кобальта и иридия. Пропитанные носители термообрабатывают на воздухе или в среде инертного газа с целью разложения нанесенных солей и подвергают термообработке в водороде, в процессе которой разложенные соли восстанавливаются до металлов [6]. Конечные температуры разложения и восстановления нанесенных солей обычно составляют (523–773)К. Заключительной стадией приготовления катализаторов является пассивация восстановленного катализатора при температуре от 323К до комнатной азотом, содержащим не более 1% объемного кислорода. Стадия пассивации необходима для удаления с поверхности металла адсорбированного водорода и предотвращения неуправляемого процесса его окисления при выгрузке из реактора восстановления на воздух.

Кобальтовые катализаторы представляют собой диспергированный на поверхности носителя кобальт. Структурно – прочностные характеристики катализаторов определяются исходными характеристиками носителя.

Кобальтовые катализаторы имеют более низкую активность по сравнению с иридиевыми и используются в каталитических пакетах изделий Республики

Таджикистан в композициях с иридиевыми катализаторами либо самостоятельно с подогревом до (373 – 423) К.

Таблица 3.1 – Основные характеристики кобальтовых катализаторов

Концентрация металла, %	Удельная поверхность, м ² / г	Суммарный объем пор, см ³ / г	Насыпная плотность, г / м ³
11,4	105	0,26	1,162
15,7	85	0,24	1,277
19,4	83	0,21	1,376
25	72	0,15	1,459

Иридиевые катализаторы представляют собой диспергированный иридий, распределенный на поверхности носителей СНД, СНГ – 2 или НА – 1. Катализаторы, в основном, повторяют пористую структуру носителей за исключением области микропор, в которой распределяется иридий.

Механическая прочность катализаторов также определяется прочностью носителя. Иридиевые катализаторы обладают наивысшей каталитической активностью в реакции разложения гидразина и используются в каталитических реакторах различных двигателей и газогенераторах в Республики Таджикистан.

На основе иридия, как активного компонента, в НПО ГИПХ разработаны катализаторы марок К – 201 (30% мас. иридия), К – 210 (10% масс. иридия) на носителе НА – 1 и К – 201 м (30% масс. иридия), на носителе СНГ – 2.

Таблица 3.2 – Основные характеристики иридиевых катализаторов

Концентрация металла, %	Удельная поверхность, м ² / г	Суммарный объем пор, см ³ / г	Насыпная плотность, г / м ³
10	106	0,28	1,252
15	102	0,26	1,295

Из экспериментальных данных следует, что при повышении времени опыта масса оксида алюминия с различными фракциями изменяется, т.е. увеличивается.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.3 [86, 87, 89, 92, 93, 94, 95, 98, 102, 107, 108, 110].

Таблица 3.3 – Экспериментальные значения изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта в процессе адсорбции в питьевой воде при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	m _{со} , гр			
	Al ₂ O ₃ + 11,44% Со	Al ₂ O ₃ + 19,43% Со	Al ₂ O ₃ + 15,7% Со	Al ₂ O ₃ + 25% Со
1	2	3	4	5
0,5	0,513	0,51	0,508	0,506
1,0	0,519	0,515	0,513	0,51
1,5	0,525	0,52	0,517	0,514
2,0	0,53	0,525	0,52	0,517
2,5	0,535	0,529	0,524	0,521
3,0	0,539	0,533	0,528	0,524
3,5	0,543	0,536	0,531	0,527
4,0	0,546	0,54	0,535	0,53
4,5	0,548	0,542	0,537	0,533
5,0	0,55	0,544	0,539	0,535
5,5	0,551	0,546	0,54	0,537
6,0	0,552	0,547	0,542	0,539
6,5	0,553	0,548	0,543	0,540
7,0	0,553	0,548	0,543	0,540
7,5	0,553	0,548	0,543	0,540
8	0,553	0,548	0,543	0,540

Таблица 3.4 – Экспериментальные значения изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта в процессе адсорбции в авиационном керосине при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	m _{со} , гр			
	Al ₂ O ₃ + 11,44% Со	Al ₂ O ₃ + 19,43% Со	Al ₂ O ₃ + 15,7% Со	Al ₂ O ₃ + 25% Со
1	2	3	4	5
0,5	0,510	0,508	0,507	0,505
1,0	0,516	0,514	0,511	0,509
1,5	0,522	0,519	0,515	0,513
2,0	0,527	0,523	0,519	0,516
2,5	0,532	0,527	0,523	0,520
3,0	0,536	0,531	0,526	0,523
3,5	0,540	0,535	0,529	0,526
4,0	0,543	0,538	0,532	0,529

продолжение табл. 3.4.

1	2	3	4	5
4,5	0,546	0,540	0,534	0,531
5,0	0,548	0,542	0,536	0,533
5,5	0,549	0,544	0,538	0,535
6,0	0,550	0,545	0,540	0,537
6,5	0,551	0,546	0,541	0,538
7,0	0,551	0,546	0,541	0,538
7,5	0,551	0,546	0,541	0,538
8,0	0,551	0,546	0,541	0,538

Как видно из таблиц 3.3 и 3.4, в каждом зафиксированном времени пропитки образца, всасывая пары воды и авиационного керосина, изменяют свой вес. После полного всасывания паров гранулы теряют способность адсорбции. Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении, (таблица П. 3.1; 3.2).

3.2. Экспериментальное определение адсорбционных свойств пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде увлажнителя

В данной работе нами исследован коэффициент адсорбции кобальтового и иридиевого катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия, увлажненного питьевой водой и авиационным керосином. Для определения коэффициента адсорбции необходимо знать массу засыпки гранул при разных состояниях, т.е. при сухом и влажном состояниях. Масса засыпки гранул определяется с помощью разработанной нами экспериментальной установки, включающей в себя цилиндрический сосуд и электронные весы. С помощью электронных весов измеряем массу засыпки через каждые 30 минут и вычисляем временную зависимость коэффициента адсорбции исследуемых образцов (таблицы 3.3 и 3.4) [6].

Используя исходные данные из таблиц 3.3 и 3.4, определяем коэффициент адсорбции. Коэффициент адсорбции вычисляется формулой [4, 85 – 110]:

$$\Gamma = \left(\frac{\frac{\Delta m}{M_{\text{вод}}}}{m_1} \right), \quad (3.1)$$

где $\Delta m = m_2 - m_1$ – изменение массы увеличивающейся относительно начальной, гр; m_2 – изменение массы исследуемого образца за определенное время увлажнения, гр; m_1 – начальная масса сухого образца, гр; $M_{\text{вод}} = 18$ гр/мол – молярная масса воды. Для авиационного керосина молярная масса равна $M_{\text{ак}} = 500$ гр/мол.

Используя формулу (3.1) для каждого изменения массы образца при измерении в среде паров воды и авиационного керосина можно вычислить коэффициент адсорбции (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Зависимость коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта от времени в питьевой воде, при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	$\Gamma \cdot 10^{-3}$ мол/гр			
	Al ₂ O ₃ +11,44% Co	Al ₂ O ₃ +15,7% Co	Al ₂ O ₃ +19,43% Co	Al ₂ O ₃ +25% Co
0,5	1,44	1,11	0,888	0,666
1,0	2,11	1,66	1,44	1,11
1,5	2,77	2,22	1,88	1,55
2,0	3,33	2,77	2,22	1,88
2,5	3,88	3,22	2,66	2,33
3,0	4,33	3,66	3,11	2,66
3,5	4,77	4,00	3,44	3,00
4,0	5,11	4,44	3,88	3,33
4,5	5,33	4,66	4,11	3,66
5,0	5,55	4,88	4,33	3,88
5,5	5,66	5,11	4,44	4,11
6,0	5,77	5,22	4,66	4,33
6,5	5,88	5,33	4,77	4,44

Таблица 3.6 – Зависимость коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта от времени в авиационном керосине, при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	$\Gamma \cdot 10^{-3}$ мол/гр			
	Al ₂ O ₃ +11,44% Co	Al ₂ O ₃ +15,7% Co	Al ₂ O ₃ +19,43% Co	Al ₂ O ₃ +25% Co
0,5	0,040	0,032	0,028	0,020
1,0	0,064	0,056	0,044	0,036
1,5	0,088	0,076	0,060	0,052
2,0	0,108	0,092	0,076	0,064
2,5	0,128	0,108	0,092	0,080
3,0	0,144	0,124	0,104	0,092
3,5	0,160	0,140	0,116	0,104
4,0	0,172	0,152	0,128	0,116
4,5	0,184	0,160	0,136	0,124
5,0	0,192	0,168	0,144	0,132
5,5	0,196	0,176	0,152	0,140
6,0	0,200	0,180	0,160	0,148
6,5	0,204	0,184	0,164	0,152

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении, (таблицы П. 3.3 и 3.4).

Адсорбция-избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ твердым поглотителем, способным поглощать одно или несколько веществ из смеси. Количество вещества, поглощенного сорбентом, зависит от концентрации поглощаемого вещества в парогазовой смеси или растворе, а также от температуры, при которой осуществляется процесс адсорбции. В процессе адсорбции происходит выделение теплоты, что ведет к повышению температуры в системе и снижению активности адсорбентов. Количество поглощаемого вещества зависит от площади поверхности поглотителя, поэтому адсорбенты обладают чрезвычайно развитой поверхностью, что достигается за счет образования большого количества пор в твердом теле [42].

В процессе адсорбции при использовании различных методов измерения установлено, что свойства кинетики и динамики адсорбции водяного пара

активным глиноземом и силикагелем изучались с целью установления количественных закономерностей динамической адсорбции, необходимых для расчета адсорберов и проверки теоретических положений по динамике адсорбции.

Исследование кинетики адсорбции заключалось в определении количества водяного пара, поглощенного из тока воздуха слоем адсорбента в одно зерно через заданные промежутки времени или в большом объеме [42].

Физическая адсорбция возникает за счет Ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Она характеризуется обратимостью и уменьшением адсорбции при повышении температуры, т.е. экзотермичностью, причем тепловой эффект физической адсорбции обычно близок к теплоте сжижения адсорбата. Таковой является, например, адсорбция инертных газов на угле.

Химическая адсорбция (хемосорбция) осуществляется путем химического взаимодействия молекул адсорбента и адсорбата. Хемосорбция обычно необратима. Химическая адсорбция, в отличие от физической является локализованной, т.е. молекулы адсорбента не могут перемещаться по поверхности адсорбента. Следует подчеркнуть, что явления физической и химической адсорбции чётко различаются в очень редких случаях.

3.3. Экспериментальное определение коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия, с металлическими наполнителями в среде увлажнителя

В данной главе приводятся результаты экспериментального исследования коэффициента массоотдачи кобальтовых и иридиевых катализаторов при температуре 293К и давлении 0,101МПа. Для определения коэффициента массоотдачи образцов необходимо знать разность массы образца и время выдержки катализатора в процессе увлажнения. Погрешность расчета коэффициента массоотдачи зависит от погрешности исходных данных, входящих в расчетную формулу. Общая относительная погрешность измерения коэффициента массоотдачи при доверительной вероятности $\alpha=0,95$ равна 0,5 %.

Используя закон соответственных состояний и экспериментальные данные получено эмпирическое уравнение, позволяющее рассчитать коэффициент массоотдачи неисследованных систем.

Для определения коэффициента массоотдачи нужно знать массу засыпки в сухом состоянии и в среде увлажнения. Для определения значение массы зернистых материалов в разных средах, т. е. парах воды и авиационного керосина после каждых 30 минут взвешиваем образцы с помощью весов и определяем их массу. Коэффициент массоотдачи определяем по формуле [2, 85-110]:

$$\beta_{\text{Э}} = \frac{\Delta m}{t}, \frac{\text{гп}}{\text{с}}, \quad (3.2)$$

С помощью уравнения (3.2) в зависимости от времени находим коэффициент массоотдачи.

Таблица 3.7 – Опытные данные коэффициента массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия при различном времени увлажнения в среде паров воды

t, час	$\beta \cdot 10^{-6}$ гп/с			
	Al ₂ O ₃ +11,44% Co	Al ₂ O ₃ +15,7% Co	Al ₂ O ₃ +19,43% Co	Al ₂ O ₃ +25% Co
0,5	7,2	5,5	4,4	3,3
1,0	5,2	4,1	3,6	2,7
1,5	4,6	3,7	3,1	2,5
2,0	4,1	3,4	2,7	2,3
2,5	3,8	3,2	2,6	2,3
3,0	3,6	3,0	2,5	2,2
3,5	3,4	2,8	2,4	2,1
4,0	3,1	2,7	2,4	2,0
4,5	2,9	2,5	2,2	2,0
5,0	2,7	2,4	2,1	1,9
5,5	2,5	2,3	2,0	1,8
6,0	2,4	2,1	1,9	1,8
6,5	2,2	2,0	1,8	1,7

Как видно из таблицы 3.7. коэффициент массоотдачи изменяется каждые пол часа, т. е. уменьшается.

Причиной такого изменения формы графика является изменение массы в среде увлажнения и истечение времени. При увеличении времени выдержки коэффициент адсорбции медленно уменьшается. При этом уменьшается и коэффициент массоотдачи. Коэффициент массоотдачи связан с концентрацией наполнителя, т. е. чем меньше концентрация наполнителя, тем больше коэффициент массоотдачи.

Таблица 3.8 – Опытные данные коэффициента массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия при различном времени увлажнения в среде авиационного керосина

t, час	$\beta \cdot 10^{-6}$ гр/с			
	Al ₂ O ₃ +11,44% Co	Al ₂ O ₃ +15,7% Co	Al ₂ O ₃ +19,43% Co	Al ₂ O ₃ +25% Co
0,5	5,5	4,4	3,8	2,7
1,0	4,4	3,8	3,0	2,5
1,5	4,0	3,5	2,7	2,4
2,0	3,7	3,1	2,6	2,2
2,5	3,5	3,0	2,5	2,2
3,0	3,3	2,8	2,4	2,1
3,5	3,1	2,7	2,3	2,0
4,0	2,9	2,6	2,2	2,0
4,5	2,8	2,4	2,0	1,9
5,0	2,6	2,3	2,0	1,8
5,5	2,4	2,2	1,9	1,7
6,0	2,3	2,0	1,8	1,7
6,5	2,1	1,9	1,7	1,6

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении, (таблицы П. 3.5 и 3.6).

3.4. Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Теплопроводность один из физических параметров, который зависит от концентрации наполнителя, т. е. кобальта и иридия. Чем больше концентрация наполнителя, тем больше коэффициент теплопроводности.

В данной работе мы исследовали теплопроводность и коэффициент адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями. Для исследования теплопроводности катализаторов нами использован метод регулярного теплового режима первого рода [37]. Для определения коэффициента адсорбции нами разработана и собрана экспериментальная установка, работающая методом взвешивания [38]. После измерения массы образцов в сухом и во влажном состояниях, определили коэффициент адсорбции (3.1).

Эффективная теплопроводность увлажненных образцов в воздухе определялась при 293К (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Экспериментальные значения эффективной теплопроводности пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта и иридия в воздухе в зависимости от их концентрации при температуре 293К

Концентрация кобальта, n, %	11,44	15,7	19,43	25
Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	173	182	191	200
Концентрация иридия, n, %	10	15	30	33
Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	192	199	235	241

Согласно таблице 3.9 с ростом содержания металлического наполнителя теплопроводность оксида алюминия увеличивается. Несмотря на то, что кобальт и иридий, по сравнению с исследуемым оксидом алюминия, имеют

большую теплопроводность, увеличение количества кобальта и иридия на поверхности оксида алюминия влияет незначительно на её эффективную теплопроводность.

Используя данные таблиц 3.5, 3.6, и 3.9 построим графики зависимости $\lambda = f(\Gamma)$.

Из рисунков 3.1 и 3.2 видно, что при температуре 293 К теплопроводность образцов почти не изменяется, а с ростом концентрации Co увеличивается. Коэффициент адсорбции с ростом теплопроводности по линейному закону уменьшается.

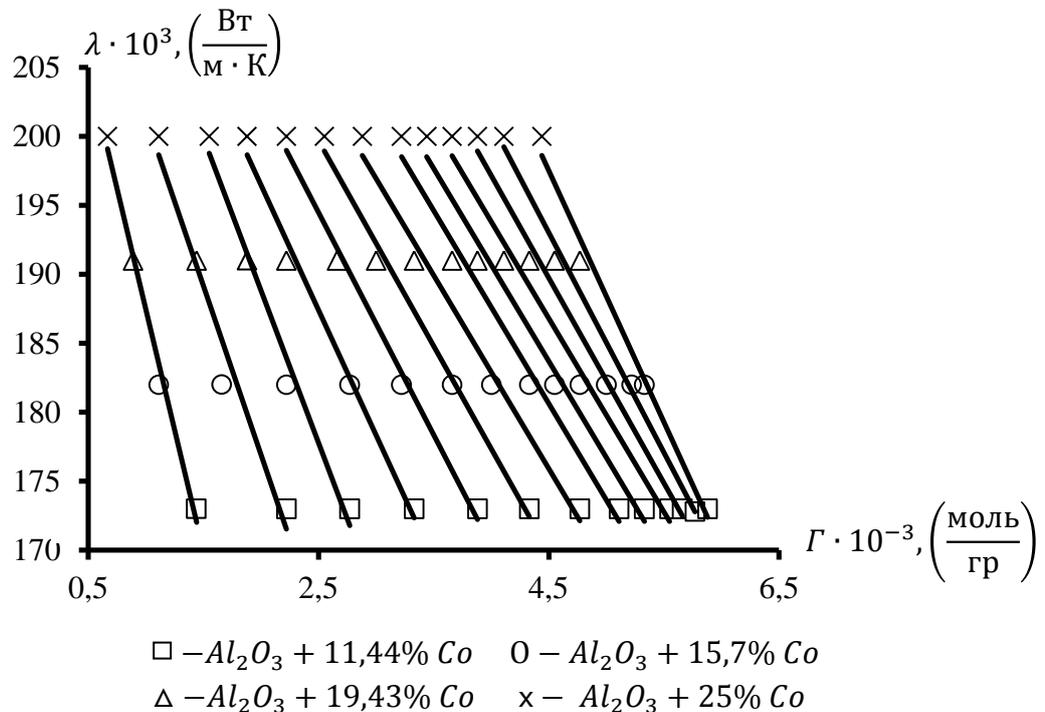


Рисунок 3.1 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта увлажненной в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

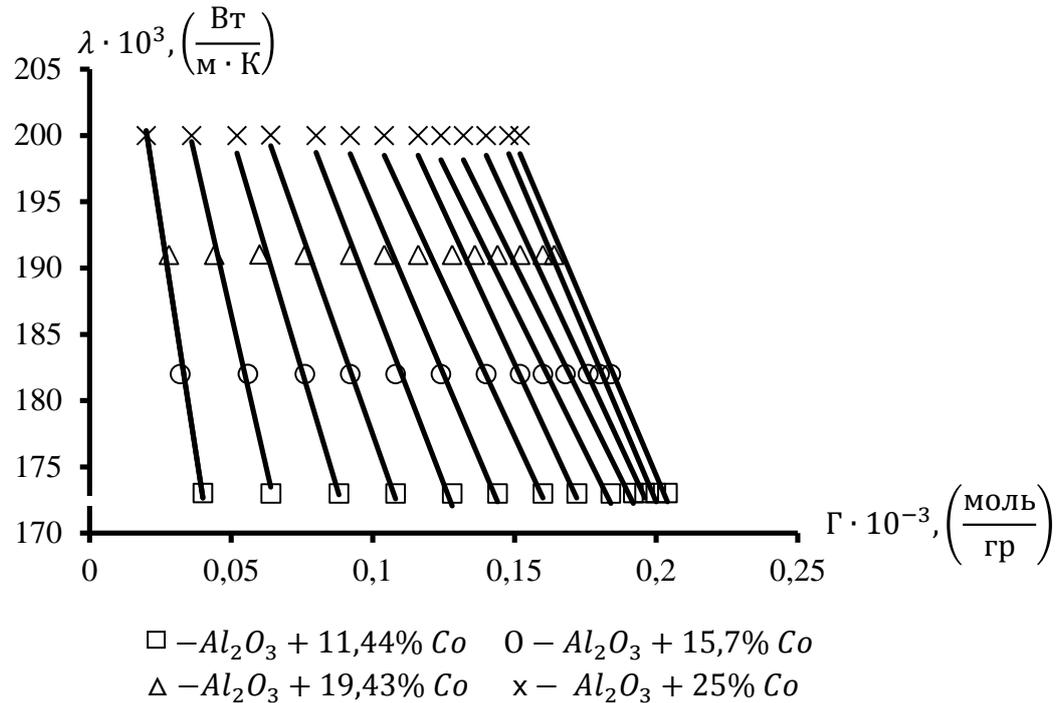


Рисунок 3.2 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении, (Рисунков П.3.1 и 3.2).

3.5. Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Используя данные таблиц 3.7. 3.8 и 3.9 построим графики зависимости $\lambda = f(\beta)$.

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении (рисунков П.3.3 и 3.4).

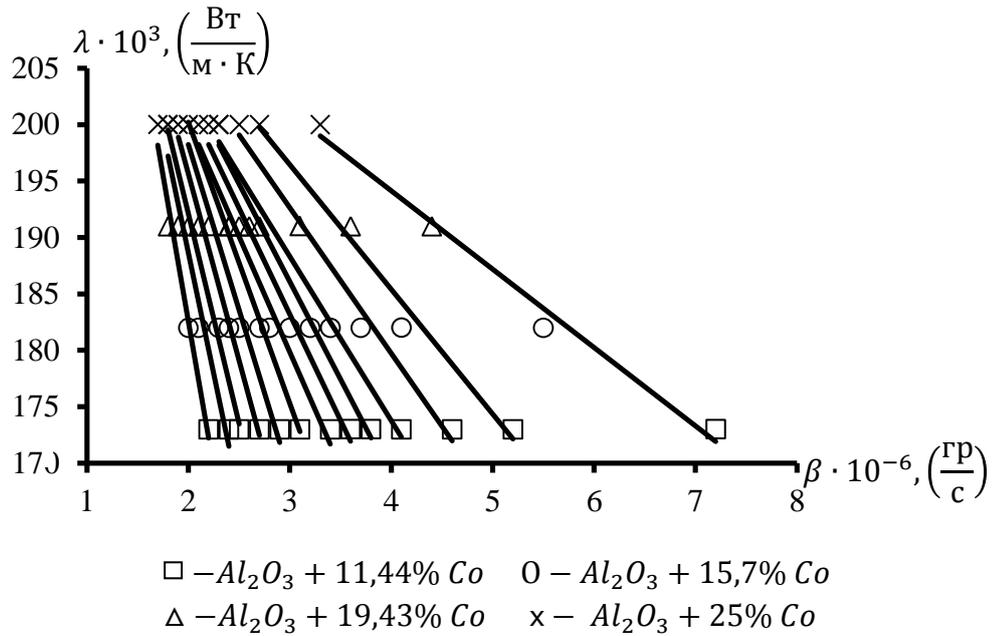


Рисунок 3.3 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

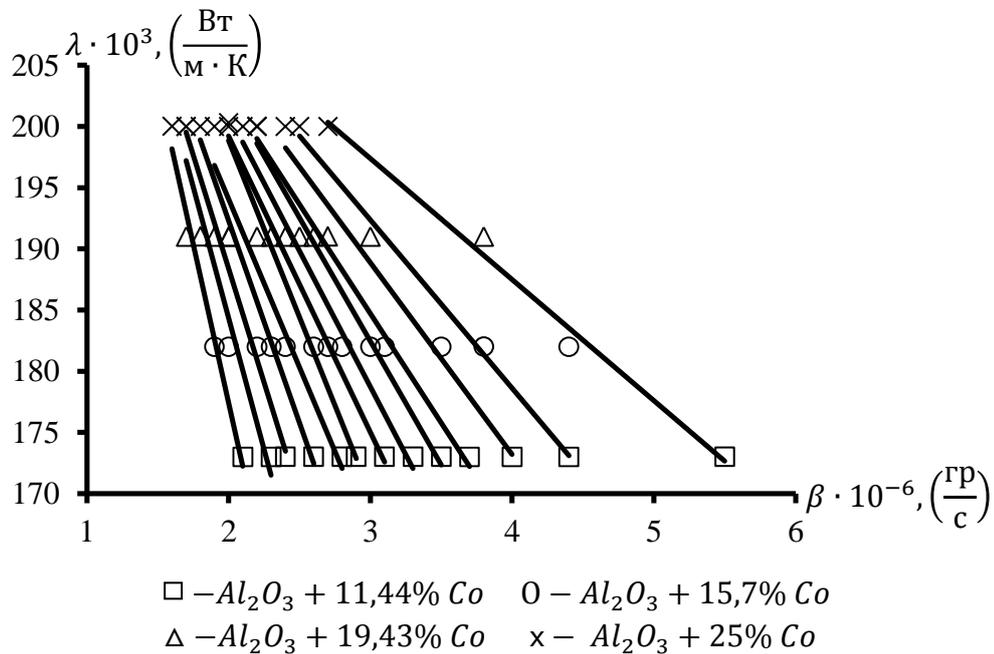


Рисунок 3.4 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

3.6. Корреляция между теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Для обобщения и обработки теплоемкости и коэффициента адсорбции исследуемых образцов нами использован график зависимости теплоемкости от коэффициента адсорбции катализаторов.

Теплоемкость один из физических параметров, который зависит от концентрации наполнителя, т. е. кобальта и иридия. Чем больше концентрация наполнителя, тем меньше коэффициент теплоемкости.

В данной работе мы исследовали теплоемкость и коэффициент адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями. Для исследования теплоемкости катализаторов нами использован метод регулярного теплового режима первого рода [37]. Для определения коэффициента адсорбции нами разработана и собрана экспериментальная установка, работающая методом взвешивания [38]. После измерения массы образцов в сухом и во влажном состояниях, определили коэффициент адсорбции (3.1).

Эффективная теплоемкость образцов, увлажненных в воздухе, определялась при 293К (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Экспериментальные значения эффективной теплоемкости пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта и иридия в воздухе в зависимости от их концентрации при температуре 293К

Концентрация кобальта, n, %	11,44	15,7	19,43	25
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	919	874	846	826
Концентрация иридий, n, %	10	15	30	33
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	867	803	737	710

Согласно таблице 3.10, с ростом содержания металлического наполнителя теплоемкость оксида алюминия уменьшается. Несмотря на то, что кобальт и иридий по сравнению с исследуемым оксидом алюминия имеют большую

теплоемкость, увеличение количества кобальта и иридия на поверхности оксида алюминия влияет незначительно на его эффективную теплоемкость.

Используя данные таблиц 3.5, 3.6, и 3.10 построим графики зависимости $C_p = f(\Gamma)$.

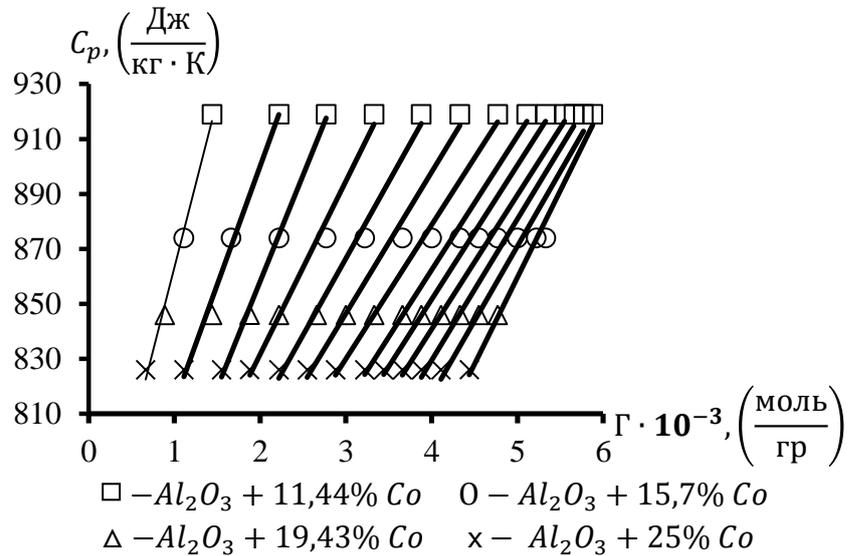


Рисунок 3.5 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

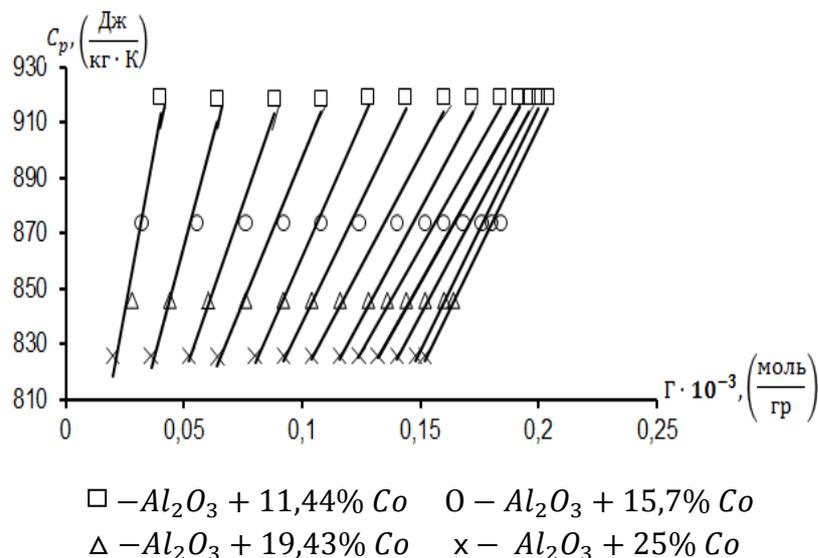


Рисунок 3.6 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

3.7. Корреляция между теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Для обобщения и обработки теплоемкости и коэффициента массоотдачи исследуемых образцов нами использован график зависимости теплоемкости от коэффициента массоотдачи катализаторов [85, 91, 92, 98, 100, 103, 107, 109, 110].

Используя данные таблиц 3.7 3.8 и 3.10 построим графики зависимости $C_p = f(\beta)$, представленные на рисунках 3.7 и 3.8.

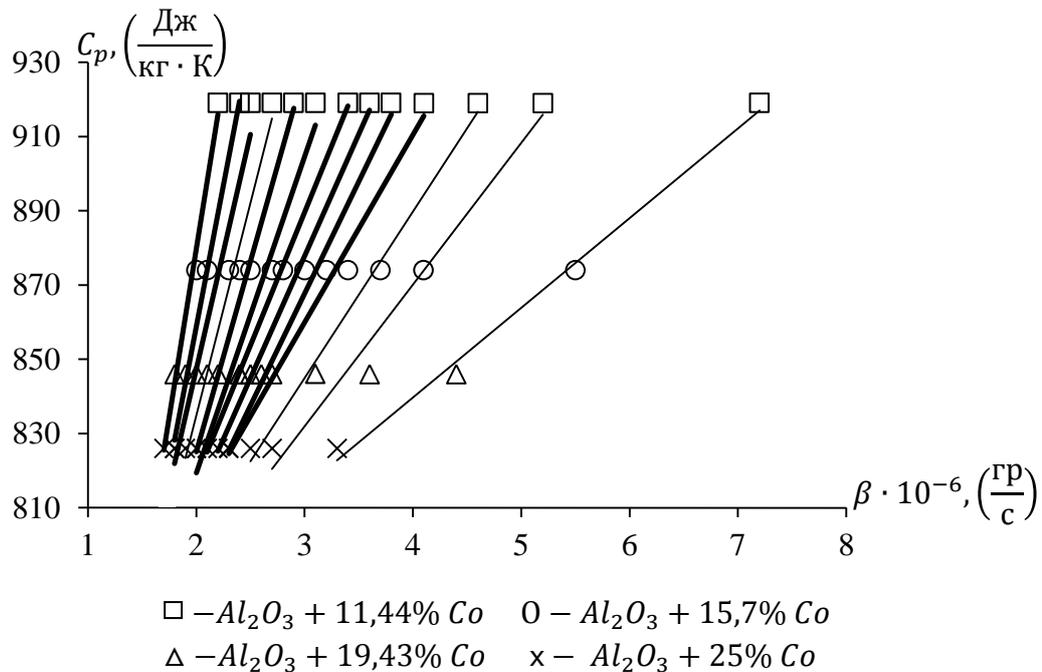


Рисунок 3.7 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

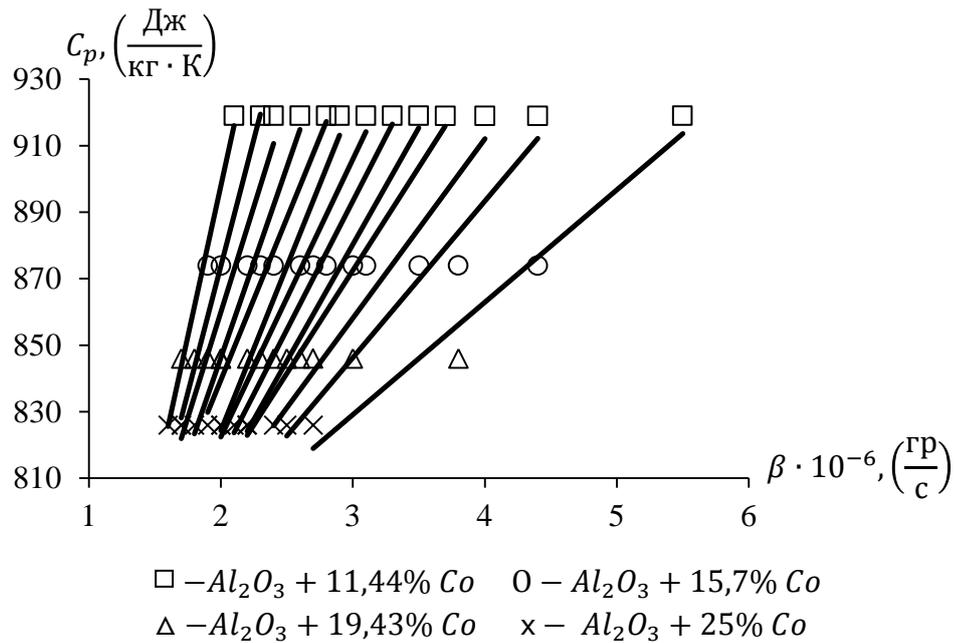


Рисунок 3.8 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении (П. 3.7 и 3.8).

3.8. Корреляция между температуропроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Для обобщения и обработки температуропроводности и коэффициента адсорбции исследуемых образцов нами использован график зависимости температуропроводности от коэффициента адсорбции катализаторов [110].

Температуропроводность один из физических параметров, который зависит от концентрации наполнителя, т. е. кобальта и иридия. Чем больше концентрация наполнителя, тем больше коэффициент температуропроводности.

В данной главе мы исследовали температуропроводность и коэффициент адсорбции. Для исследования температуропроводности катализаторов нами использован метод регулярного теплового режима первого рода [37]. Для

определения коэффициента адсорбции нами разработана и собрана экспериментальная установка, основанная на методе взвешивания [38]. После измерения массы образцов в сухом и во влажном состояниях, определили коэффициент адсорбции (3.1).

Эффективная температуропроводность образцов увлажненных в воздухе определялась при 293К (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Экспериментальные значения эффективной температуропроводности пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями кобальта и иридия в воздухе в зависимости от их концентрации при температуре 293К

Концентрация кобальта, n, %	11,44	15,7	19,43	25
Температуропроводность, $\alpha \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	1,62	1,63	1,64	1,66
Концентрация иридия, n, %	10	15	30	33
Температуропроводность, $\alpha \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	1,66	1,67	1,69	1,7

Согласно таблице 3.11, с ростом содержания металла температуропроводность оксида алюминия увеличивается. Несмотря на то, что кобальт и иридий по сравнению с исследуемым оксидом алюминия имеют большую температуропроводность, увеличение количества кобальта и иридия на поверхности оксида алюминия влияет незначительно на его эффективную температуропроводность.

Используя данные таблиц 3.5, 3.6, и 3.11 построим графики зависимости $\alpha = f(\Gamma)$.

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении (П. 3.9 и 3.10).

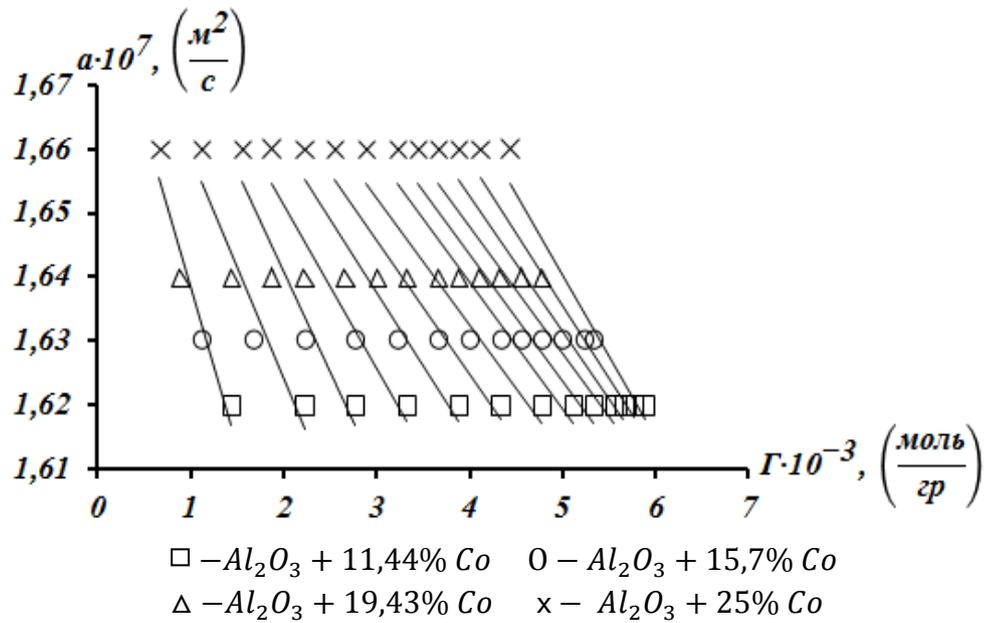


Рисунок 3.9 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

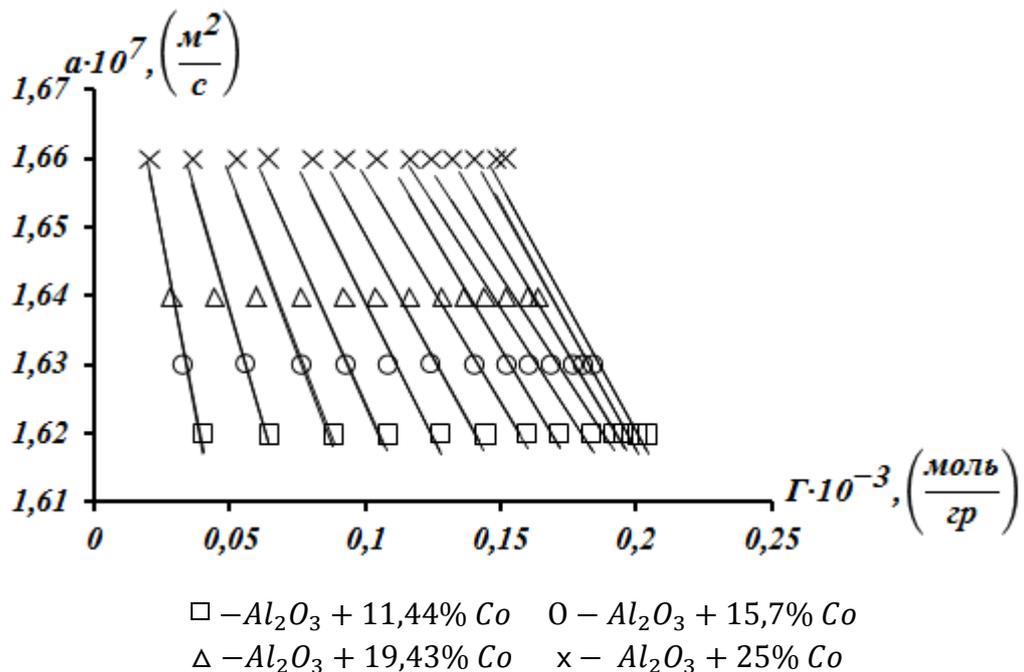


Рисунок 3.10 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

3.9. Корреляция между температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями в среде адсорбента

Для обобщения и обработки температуропроводности и коэффициента массоотдачи исследуемых образцов нами использован график зависимости температуропроводности от коэффициента массоотдачи катализаторов [92, 96, 98, 100, 101, 107, 109].

Используя данные таблиц 3.7 3.8 и 3.11 построим графики зависимости $C_p = f(\beta)$, которые представлены на рисунках 3.11 и 3.12.

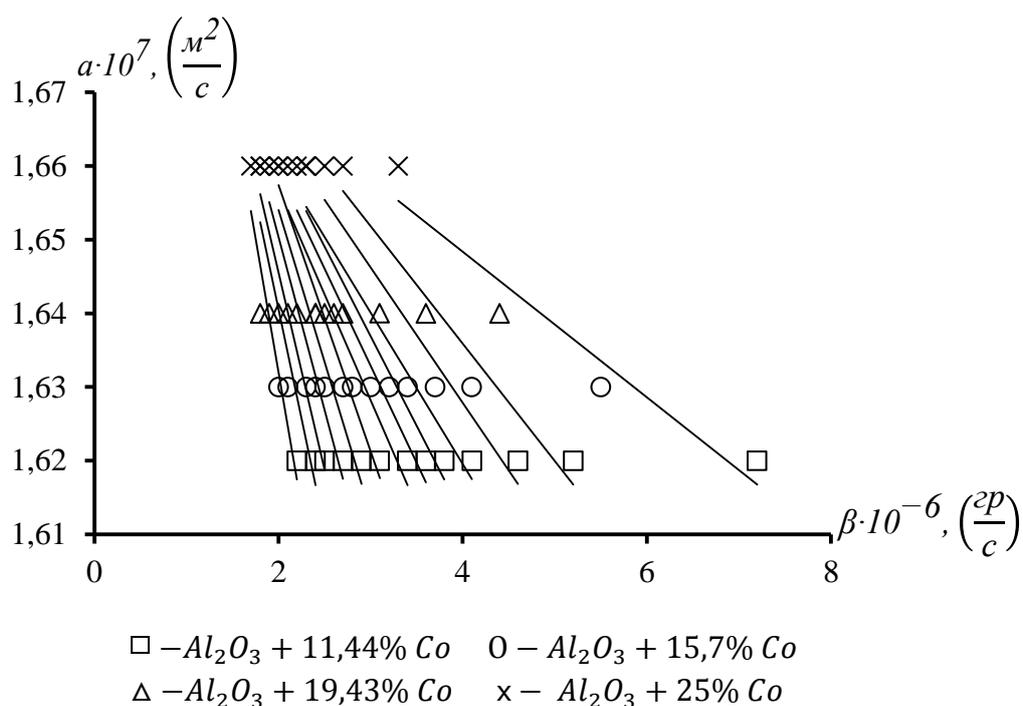


Рисунок 3.11 – Корреляция между эффективной температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

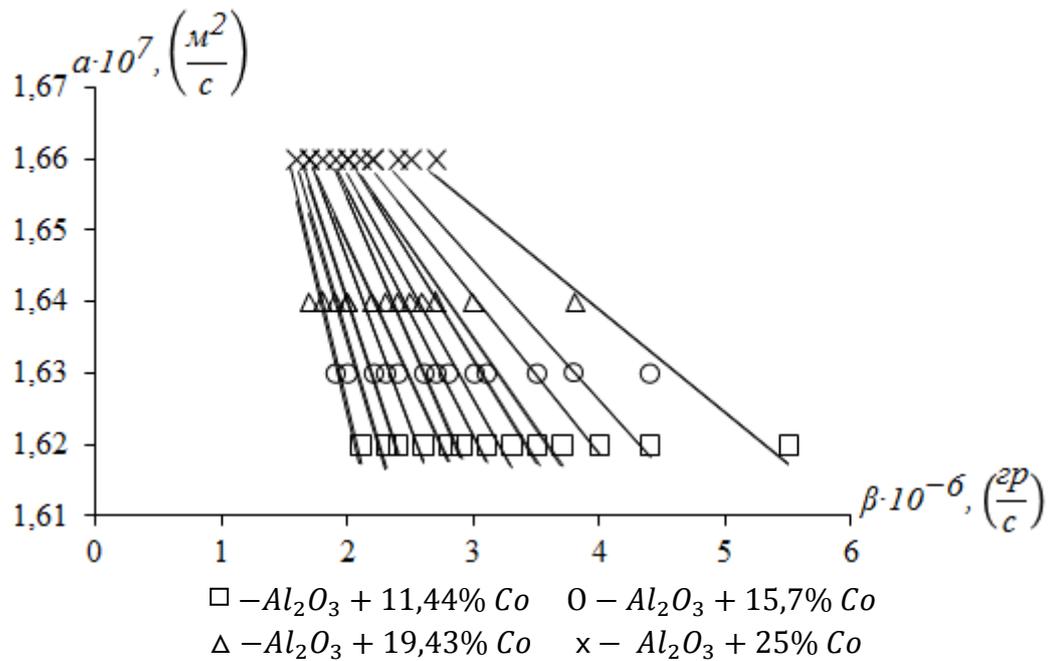


Рисунок 3.12 – Корреляция между эффективной температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

Результаты экспериментов для иридиевых катализаторов приведены в приложении (П. 3.11 и 3.12).

Заключение к 3 главе.

1. Измерены коэффициенты адсорбции, массоотдачи, теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности увлажненного пористого гранулированного оксида алюминия в зависимости от времени увлажнения. Изучено влияние кобальта (от 11,44 до 25%) на λ , C_p и a оксида алюминия в интервале температур 293К.
2. Экспериментально исследованы λ , C_p и a оксида алюминия, содержащего кобальт (11,44 – 25%) в различных фазовых средах при температуре 293К.
3. Измерены теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность оксида алюминия, содержащего от 10 до 33% иридия при комнатной температуре в воздухе.

ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА И ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО АДСОРБЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ ИСЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ И ИХ КОРРЕЛЯЦИЯ

4.1. Обработка и обобщение экспериментальных данных по коэффициенту адсорбции исследуемых катализаторов

Для обобщения экспериментальных данных по коэффициенту адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта при увлажнении в парах воды и авиационного керосина использовали следующую функциональную зависимость [85, 88, 89, 93, 95, 96, 99, 101, 104, 109, 110]:

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_1} = f\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (4.1)$$

где, Γ – коэффициент адсорбции при времени t ; Γ_1 – коэффициент адсорбции при времени t_1 ; t_1 – выбирается с таким расчетом, чтобы соответствовало среднему значению временного диапазона, в котором производится измерение λ . При таком выборе t разброс экспериментальных точек, относительно обобщающей прямой, получается наименьшим.

Проверка выражения (4.1) для исследованных нами образцов показала, что оно качественно и количественно описывает временную зависимость коэффициента адсорбции этих веществ [104, 109, 110].

Выполнимость зависимости (4.1) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.1. Как видно из этого рисунка, все экспериментальные точки хорошо укладываются вдоль общей кривой, которая описывается уравнением:

$$\Gamma = \left[-m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 + g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot \Gamma_1 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{моль}}{г} \quad (4.2)$$

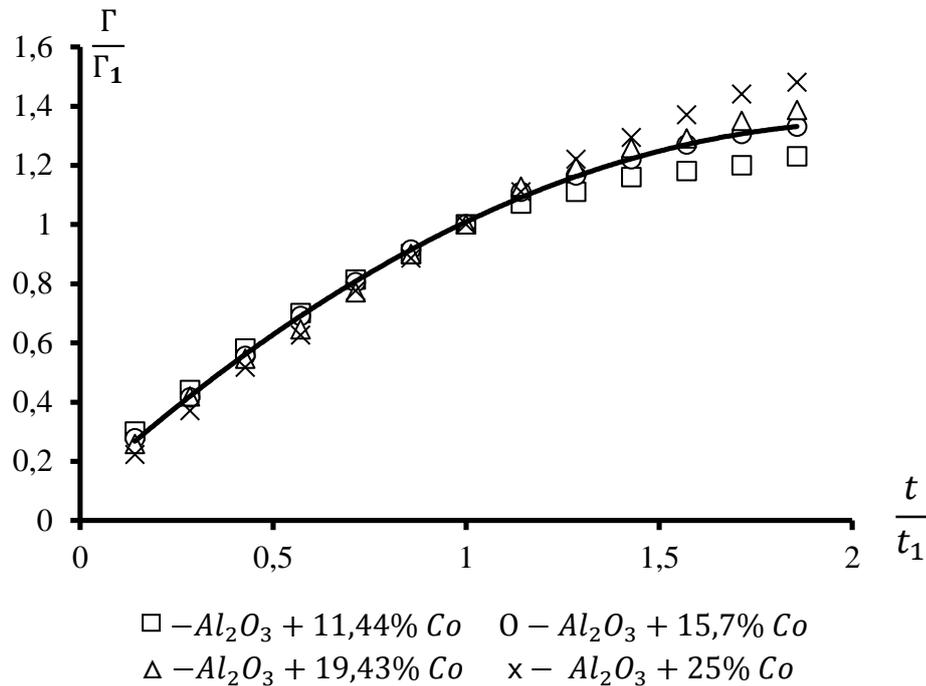


Рисунок 4.1 – Зависимость относительного коэффициента адсорбции увлажненного пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта (11,44; 15,7; 19,43; 25% Co) в питьевой воде от относительного времени.

Анализ значения Γ_1 показал, что оно является функцией концентрации наполнителя (рисунок 4.2). На этом рисунке многие точки совпадают, поэтому экспериментальные данные для некоторых образцов не показаны.

Уравнение (4.2), в основном с погрешностью 3,2 – 3,6%, описывает температурную зависимость коэффициента адсорбции исследуемых образцов при температуре 293 К.

С помощью уравнения (4.2) можно вычислить коэффициент адсорбции исследуемых образцов в зависимости от времени, если будет известно значение Γ_1 .

Представляло интерес установить связь Γ_1 в уравнении (4.3) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\Gamma_1 = f(n) \quad (4.3)$$

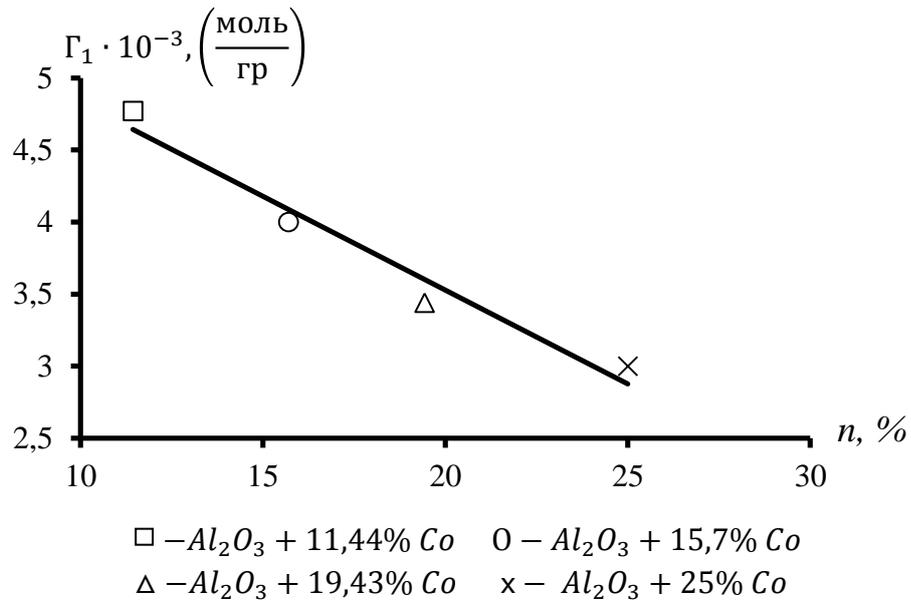


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта, увлажненного в питьевой воде от концентрации наполнителя Co.

Как видно из рисунка 4.2, с ростом процентного содержания металла Γ_1 уменьшается по линейному закону [85, 87, 89, 98, 102].

Используя рисунок 4.2. получаем уравнении 4.4.

$$\Gamma_1 = (-z \cdot n + q) \cdot 10^{-3}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Г}}, \quad (4.4)$$

где n – концентрация пористого гранулированного оксида алюминия с металлическим наполнителем.

Используя уравнения 4.2 и 4.4 получим уравнение 4.5:

$$\Gamma = \left[-m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 + g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q) \cdot 10^{-3}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Г}}, \quad (4.5)$$

С помощью уравнения (4.5) можно вычислить коэффициент адсорбции экспериментально неисследованного пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия, в зависимости от времени, концентрации наполнителя и плотности сорбента. Для этого необходимо располагать только значением процентного содержания металлического наполнителя, времени и плотности сорбента [82].

Таблица 4.1 – Коэффициенты уравнения (4.5) m, g, p, q, z для расчёта коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
m	g	p	z	q	m	g	p	z	q
0,2848	1,1897	0,1043	0,1303	6,133	0,2808	1,235	0,0424	0,0042	0,206
Наполнитель иридий									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
m	g	p	z	q	m	g	p	z	q
0,3404	1,2457	0,0976	0,0563	6,4832	0,3247	1,2909	0,0496	0,0597	6,2205

В приложении (П. 4.1 - 4.4) приводится сравнение вычисленных значений коэффициента адсорбции исследованных образцов при температуре 293 К и атмосферном давлении с экспериментальными данными. Сравнение показало, что уравнение (4.5) с погрешностью 3,2 – 3,6% описывает временную зависимость коэффициента адсорбции исследуемых образцов [101, 108, 109, 110].

4.2. Обработка и обобщение экспериментальных данных по коэффициенту массоотдачи исследуемых катализаторов

Для обобщения экспериментальных данных коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия при увлажнении водой и авиационным керосином использован закон соответственных состояний в виде следующей функциональной зависимости [85, 102, 108, 110]:

$$\frac{\beta}{\beta_1} = f\left(\frac{t}{t_1}\right), \quad (4.6.)$$

где β – коэффициент массоотдачи при времени t ; β_1 – коэффициент массоотдачи при времени t_1 ; ($t_1 = 3,5$ час). Это время выбирается с таким расчетом, чтобы оно соответствовало среднему значению временного диапазона, в котором производятся измерения β . При таком выборе β_1 разброс

экспериментальных точек относительно обобщающей прямой получается наименьшим.

Проверка выражения (4.6) для исследованных нами образцов показала, что оно качественно и количественно описывает временную зависимость коэффициента массоотдачи этих веществ.

Выполнимость зависимости (4.6) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.3.

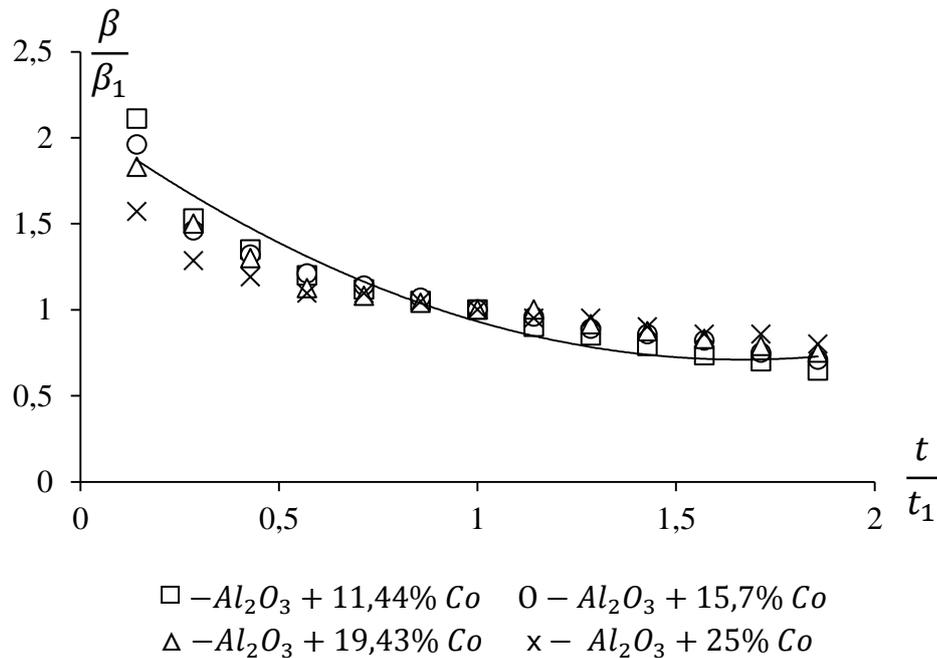


Рисунок 4.3 — Зависимость относительного коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем кобальта (11,44 % . . . 25 % Co) от относительного времени увлажнения в питьевой воде.

Используя рисунок 4.3 получаем такое уравнение:

$$\beta = \left[m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 - g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot \beta_1 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (4.7.)$$

Анализ значений β_1 показал, что оно является функцией концентрации наполнителя (рисунок 4.4).

Уравнение (4.7) с погрешностью 3,4 — 4% описывает временную зависимость коэффициента массоотдачи исследуемых образцов при температуре 293 К.

С помощью уравнения (4.7) можно вычислить коэффициент массоотдачи исследуемых образцов в зависимости от времени, если будет известно значение β_1 .

Представляло интерес установить связь β_1 в уравнении (4.8) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\beta_1 = f(n) \quad (4.8)$$

Как видно из рисунка 4.4 с ростом процентного содержания металла, β_1 во всех интервалах изменяется по линейному закону [85, 87, 89, 100, 101, 109]:

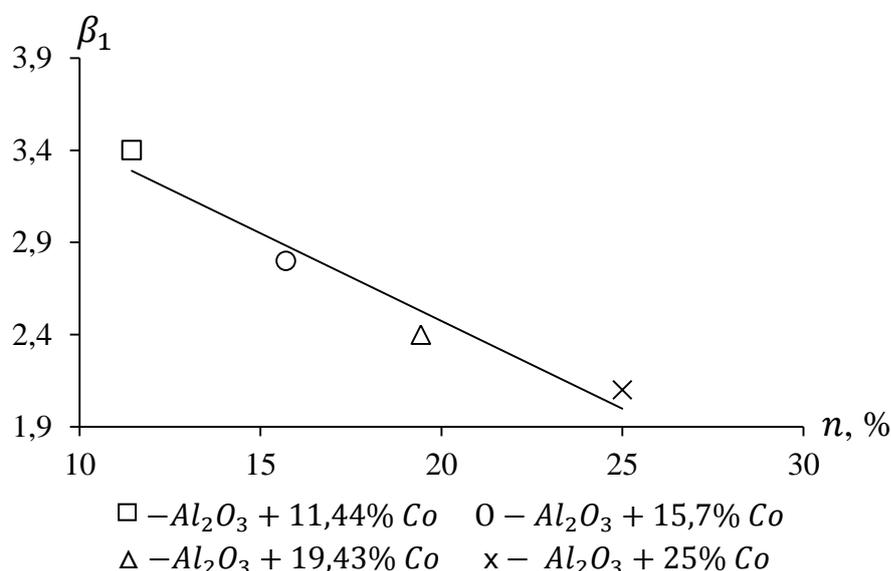


Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициента массоотдачи β_1 гранулированного пористого оксида алюминия, увлажненного в питьевой воде от концентрации кобальтового наполнителя.

Используя рисунок 4.4. получаем уравнение прямой линии:

$$\beta_1 = (-z \cdot n + q) \cdot 10^{-6}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (4.9)$$

где n – концентрация пористого гранулированного оксида алюминия с металлическими наполнителями. Из рисунка 4.4 уравнение для β_1 выводится аналогично.

Используя из уравнения (4.7) и (4.9) получим:

$$\beta = \left[m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 - g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q) \cdot 10^{-6}, \frac{кг}{с}, \quad (4.10.)$$

Таблица 4.2 – Коэффициенты уравнения (4.10) m, g, p, q, z для расчёта коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
m	g	p	z	q	m	g	p	z	q
0,3265	1,16	1,8021	0,0953	4,3795	0,2449	0,9019	1,6184	0,0823	3,997
Наполнитель иридий									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
m	g	p	z	q	m	g	p	z	q
0,349	1,2798	1,8982	0,038	4,2977	0,2014	0,8717	1,6701	0,0433	4,2266

В приложении (таблицы П. 4.5 - 4.8) приводится сравнение вычисленных значений коэффициента массоотдачи исследованных образцов при температуре 293 К и атмосферном давлении с экспериментальными данными. Сравнение показало, что уравнение (4.5) с погрешностью 3,4 – 4% описывает временную зависимость коэффициента адсорбции исследуемых образцов [101, 108, 109, 110].

4.3. Корреляция между коэффициентом теплопроводности и коэффициентом адсорбции исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия

Для получения уравнения корреляции между теплопроводностью и коэффициентом адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25 мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85-110]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1} \right), \quad (4.11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности при коэффициенте адсорбции Γ ; $\lambda_1 = 186 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – теплопроводность при коэффициенте адсорбции $\Gamma_1 = 1,058 \cdot 10^{-3}$ (моль/гр) пористого гранулированного оксида алюминия.

Как видно из рисунка 4.5 с ростом относительного коэффициента адсорбции, относительная теплопроводность исследуемых образцов увеличивается по линейному закону [82, 86, 110].

Выполнимость выражения (4.11) показана на рисунке 4.5. Прямые линии на этом рисунке описываются выражением:

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1} \right) + B \right] \cdot \lambda_1 \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}, \quad (4.12)$$

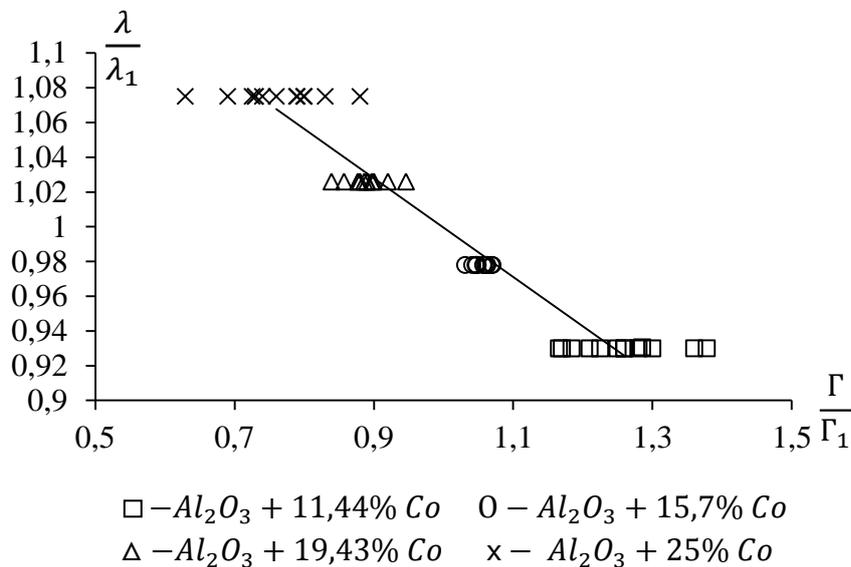


Рисунок 4.5 – Зависимость относительной эффективной теплопроводности от относительного коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

С помощью уравнения (4.12) можно вычислить теплопроводность исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 2 – 5%, если будут известны значения Γ , Γ_1 и λ_1 .

Представляло интерес связать λ_1 в уравнении (4.13) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\Gamma_1 = f(t) \quad (4.13)$$

Таблица 4.3 – Коэффициенты уравнения (4.15) А, В, С, D, Е для расчёта коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
А	В	С	D	Е	А	В	С	D	Е
0,2839	1,2833	0,08	1,2237	0,466	0,2796	1,2785	0,003	0,0457	0,0074
Наполнитель иридий									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
0,7563	1,7503	0,1246	1,7297	0,5726	0,6483	1,6457	0,1174	1,6976	0,2782

4.4. Обработка и обобщение (корреляция) экспериментальных данных по теплопроводности и коэффициенту массоотдачи исследуемых образцов

Для получения уравнения корреляции между теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25 мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85-99]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f\left(\frac{\beta}{\beta_1}\right), \quad (4.16)$$

где λ – теплопроводность при коэффициенте массоотдачи β ; $\lambda_1 = 186 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – теплопроводность при коэффициенте массоотдачи $\beta_1 = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ (кг/с)}$.

Выполнимость зависимости (4.16) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.7.

Выполнимость зависимости (4.16) для кобальтовых образцов независимо от концентрации металла во всех паровых средах показана на рисунке 4.7. Экспериментальные данные хорошо укладываются вдоль общей прямой, которая описывается уравнением:

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\beta}{\beta_1} \right) + B \right] \cdot \lambda_1 \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (4.17)$$

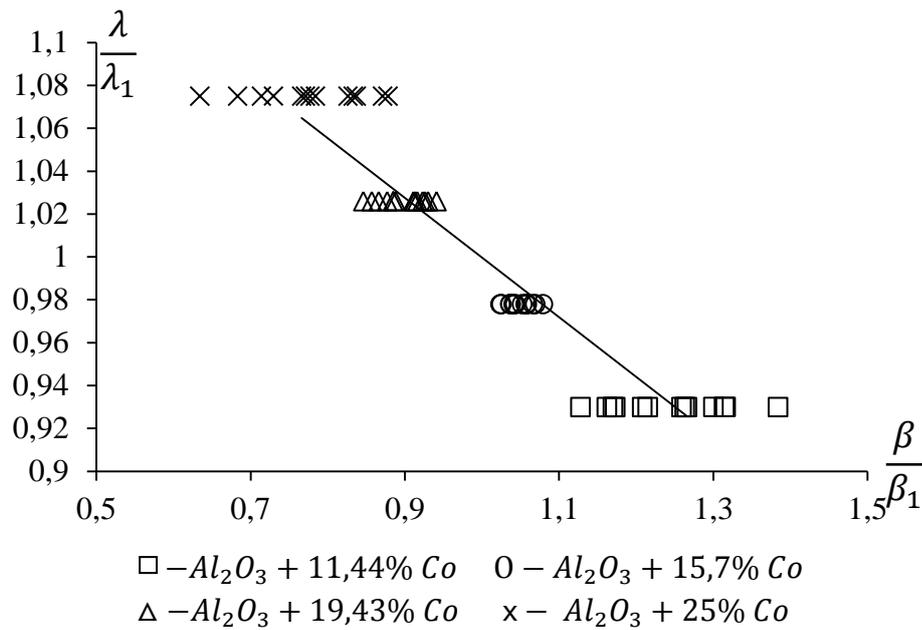


Рисунок 4.7 – Зависимость относительной эффективной теплопроводности от относительного коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

На рисунке 4.7 многие точки совпадают, поэтому экспериментальные данные для некоторых образцов в среде паров воды не показаны.

С помощью уравнения (4.17) можно вычислить теплопроводность всех исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 1,5-5%, если будут известны β , β_1 и λ_1 . Интересно установить связь λ_1 в уравнении (4.17) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия [109]:

$$\beta_1 = f(t), \quad (4.18)$$

Как видно из рисунка 4.8, с ростом процентного содержания металла, λ_1 увеличивается по линейному закону. Кривая линия, представленная на этом рисунке, описывается выражением:

$$\beta_1 = [C(t)^2 - D \cdot t + E] \cdot 10^{-6}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (4.19)$$

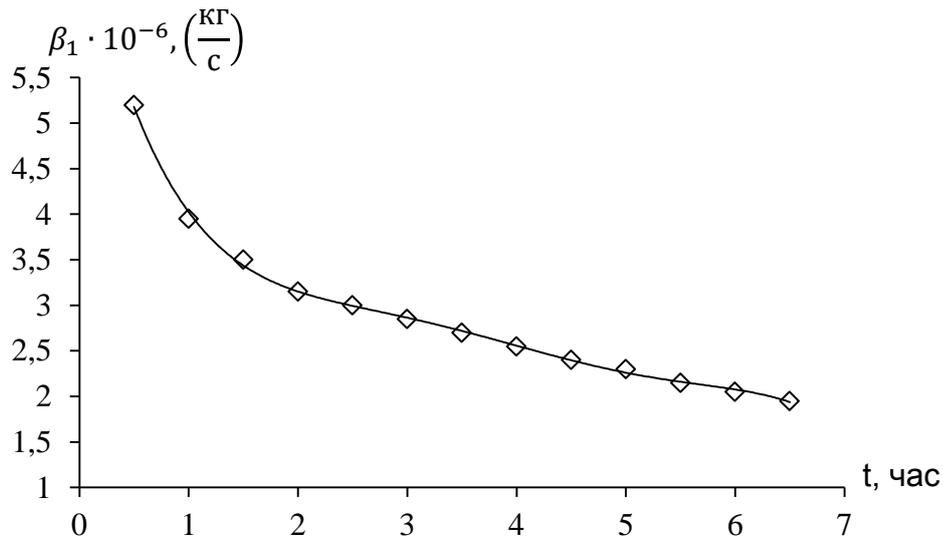


Рисунок 4.8 – Зависимость эффективного коэффициента массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия от времени увлажнения в питьевой воде.

Используя уравнения 4.17 и 4.19 получим:

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\beta}{[C(t)^2 - D \cdot t + E]} \right) + B \right] \cdot \lambda_1 \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (4.20)$$

где t – время, час; λ_1 – среднее значение теплопроводности катализаторов, $\lambda_1=186 \cdot 10^3$, Вт/(м·К) – для кобальтовых катализаторов, $\lambda_1=216 \cdot 10^3$, Вт/(м·К) – для иридиевых катализаторов.

С помощью уравнения 4.20 можно вычислить теплопроводность экспериментально исследованного гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия, в зависимости от коэффициента массоотдачи, концентрации наполнителя.

Таблица 4.4 – Коэффициенты уравнения (4.20) А, В, С, D, Е для расчёта коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина.

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
А	В	С	D	Е	А	В	С	D	Е
0,2781	1,2779	0,0906	1,0568	5,1755	0,3085	1,3052	0,0464	0,6508	4,2133
Наполнитель иридий									
0,8916	1,8939	0,0979	1,3042	6,8799	0,5456	1,5481	0,0541	0,8323	5,5687

4.5. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по теплоемкости и коэффициентом адсорбции исследуемых кобальтовых и иридиевых катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия

Для получения уравнения корреляции между теплоемкостью и коэффициентом адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25 мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85, 91, 98, 103, 108, 109, 110]:

$$\frac{C_p}{C_{p1}} = f\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1}\right), \quad (4.21)$$

где C_p – теплоемкость при коэффициенте адсорбции Γ ; $C_{p1}=873$ Дж/(кг·К) – теплоемкость при коэффициенте адсорбции $\Gamma_1=1,08 \cdot 10^{-3}$ (моль/гр).

Выполнимость зависимости (4.21) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.9.

Как видно из рисунка 4.9, с ростом относительного коэффициента адсорбции, относительная теплоемкость исследуемых образцов увеличивается по линейному закону [82, 86, 109, 110].

Выполнимость выражения (4.21) показана на рисунке 4.9. Прямая линия на этом рисунке описывается выражением:

$$C_p = \left[K \cdot \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1} \right) + F \right] \cdot C_{p1}, \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}, \quad (4.22)$$

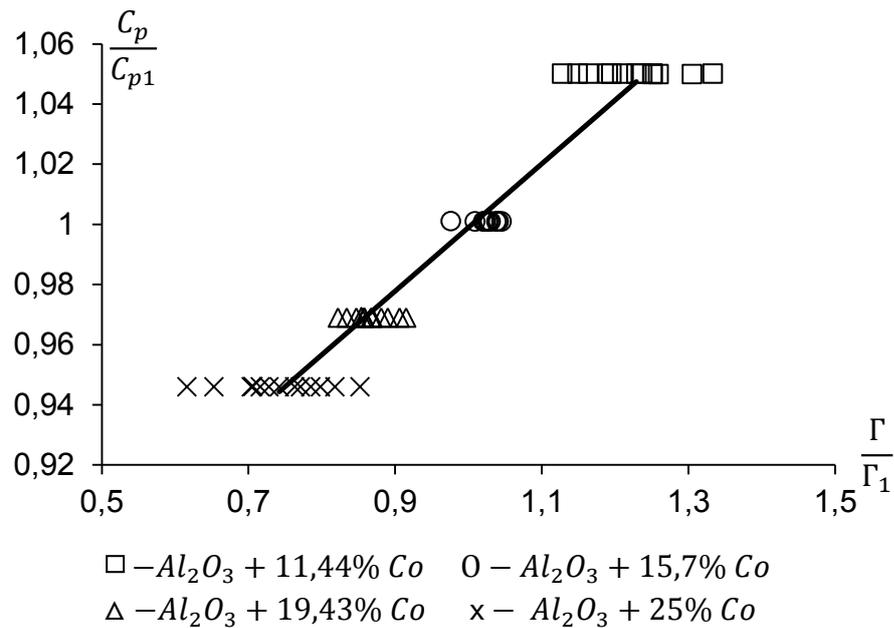


Рисунок 4.9 – Зависимость относительной эффективной теплоемкости от относительного коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

С помощью уравнения (4.22) можно вычислить теплоемкость исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 1,5 – 4,5%, если будут известны значения Γ , Γ_1 и C_{p1} .

Представляло интерес связать C_{p1} в уравнении (4.23) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\Gamma_1 = f(t), \quad (4.23)$$

Как видно из рисунка 4.10, с ростом процентного содержания металла C_{p1} уменьшается по линейному закону. Кривая линия, представленная на этом рисунке, описывается выражением:

$$\Gamma_1 = [-X(t)^2 + Y \cdot t + Z] \cdot 10^{-3}, \frac{\text{МОЛЬ}}{(\text{ГР})}, \quad (4.24)$$

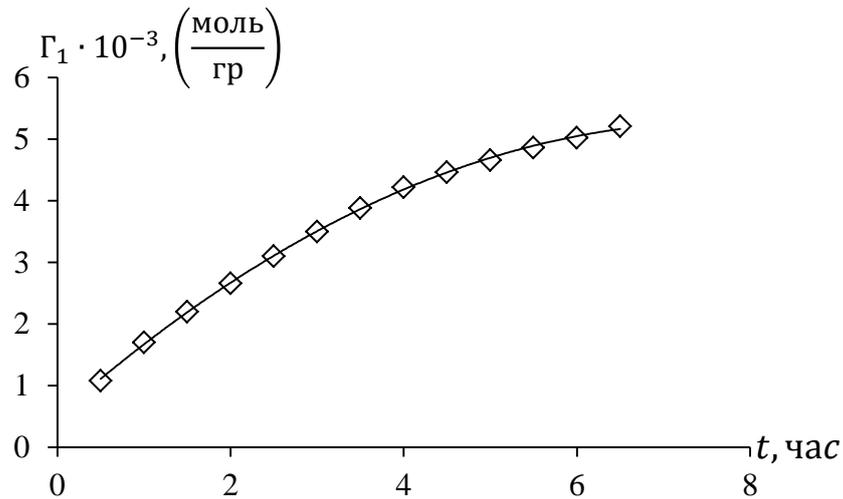


Рисунок 4.10 – Зависимость эффективного коэффициента адсорбции кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия от времени увлажнения в питьевой воде.

Используя уравнения 4.22 и 4.24 получим:

$$C_p = \left[K \left(\frac{\Gamma}{[-X(t)^2 + Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{p1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.25)$$

где t – время, час; C_{p1} – среднее значение теплоемкости катализаторов, $C_{p1}=873$ Дж/(кг·К) – для кобальтовых катализаторов, $C_{p1}=780$ Дж/(кг·К) – для иридиевых катализаторов.

С помощью уравнения (4.25) можно вычислить теплоемкость экспериментально исследованного гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия, в зависимости от коэффициента адсорбции, концентрации катализаторов.

Таблица 4.5 – Коэффициенты уравнения (4.25) K , F , X , Y , Z для расчёта коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
K	F	X	Y	Z	K	F	X	Y	Z
0,2118	0,7872	0,0808	1,2413	0,5096	0,2315	0,7672	0,0031	0,0466	0,0085
Наполнитель иридий									
0,6819	0,317	0,122	1,7153	0,5605	0,5328	0,4659	0,1159	1,6892	0,2722

4.6. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по теплоемкости и коэффициентом массоотдачи опытных образцов

Для получения уравнения корреляции между теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85, 108-110]:

$$\frac{C_p}{C_{p1}} = f\left(\frac{\beta}{\beta_1}\right), \quad (4.26)$$

где C_p – теплоемкость при коэффициенте массоотдачи β ; $C_{p1}=873$ Дж/(кг·К) – теплоемкость при коэффициенте массоотдачи $\beta_1=5,375 \cdot 10^{-6}$ (кг/с).

Выполнимость зависимости (4.26) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.11.

Выполнимость зависимости (4.26) для кобальтовых образцов независимо от концентрации металла во всех паровых средах показана на рисунке 4.11. Видно, что экспериментальные данные хорошо укладываются вдоль общей прямой, которая описывается уравнением:

$$C_p = \left[K \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_1} \right) + F \right] \cdot C_{p1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.27)$$

На рисунке 4.11 многие точки совпадают, поэтому экспериментальные данные для некоторых образцов в среде паров воды не показаны.

С помощью уравнения (4.27) можно вычислить теплоемкость всех исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 1,5-5%, если будет известна C_{p1} . Интересно установить связь C_{p1} в уравнении (4.27) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\beta_1 = f(t), \quad (4.28)$$

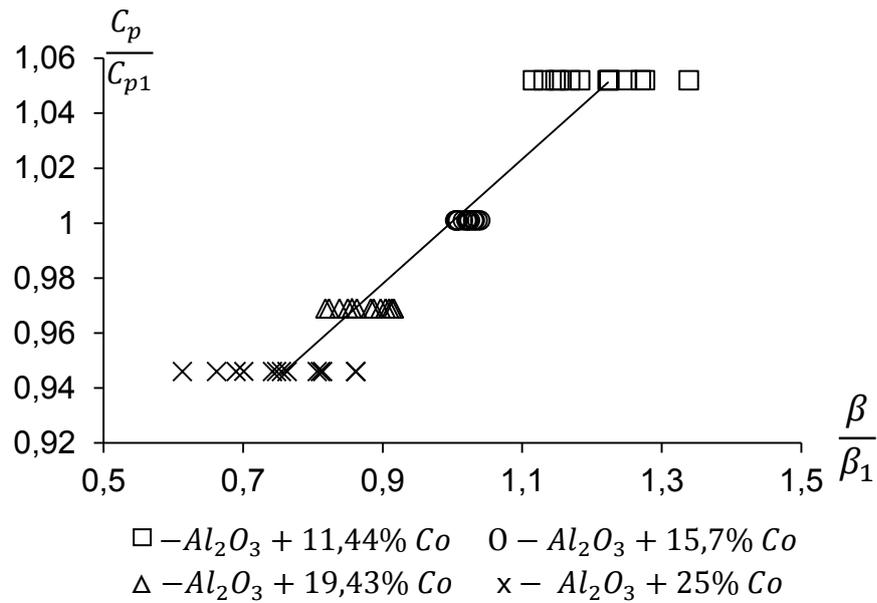


Рисунок 4.11 – Зависимость относительной эффективной теплоемкости от относительного коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

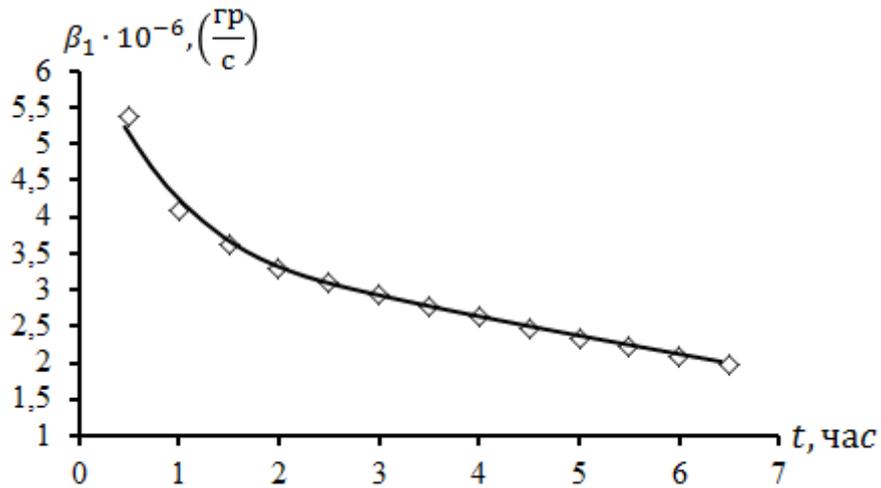


Рисунок 4.12 – Зависимость эффективного коэффициента массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия от времени увлажнения в питьевой воде.

Как видно, из рисунка 4.12, с ростом процентного содержания металла, C_{p1} увеличивается по линейному закону. Кривая линия, представленная на этом рисунке, описывается выражением [86-111]:

$$\beta_1 = [X (t)^2 - Y \cdot t + Z], \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (4.29)$$

Используя уравнения 4.27 и 4.29 получим:

$$C_P = \left[K \cdot \left(\frac{\beta}{[X(t)^2 - Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{P1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (4.30)$$

где t – время, час; C_{P1} – среднее значение теплоемкости катализаторов, $C_{P1}=873$ Дж/(кг·К) – для кобальтовых катализаторов, $C_{P1}=780$ Дж/(кг·К) – для иридиевых катализаторов.

С помощью уравнения 4.30 можно вычислить теплоемкость экспериментально исследованного гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия в зависимости от коэффициента массоотдачи, концентрации наполнителя.

Таблица 4.6 – Коэффициенты уравнения (4.30) K, F, X, Y, Z для расчёта коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
K	F	X	Y	Z	K	F	X	Y	Z
0,2269	0,7737	0,0918	1,0865	5,3472	0,2473	0,7519	0,0491	0,6824	4,3396
Наполнитель иридий									
0,6281	0,3707	0,0927	1,2529	6,7584	0,5207	0,4779	0,0564	0,8472	5,52

4.7. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по температуропроводности и коэффициентом адсорбции исследуемых образцов

Для получения уравнения корреляции между температуропроводностью и коэффициентом адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25 мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85-110]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = f\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1}\right), \quad (4.31)$$

где α – температуропроводность при коэффициенте адсорбции Γ ; $\alpha_1=1,63710^7$ ($\text{м}^2/\text{с}$) – температуропроводность при коэффициенте адсорбции $\Gamma_1=1,03 \cdot 10^{-3}$ (моль/гр).

Выполнимость зависимости (4.31) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.13.

Как видно из рисунка 4.13, с ростом относительного коэффициента адсорбции, относительная температуропроводность исследуемых образцов увеличивается по линейному закону [82, 86, 109, 110].

Выполнимость выражения (4.31) показана на рисунке 4.13. Прямая линия на этом рисунке описывается выражением:

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_1} \right) + j \right] \cdot \alpha_1, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (4.32)$$

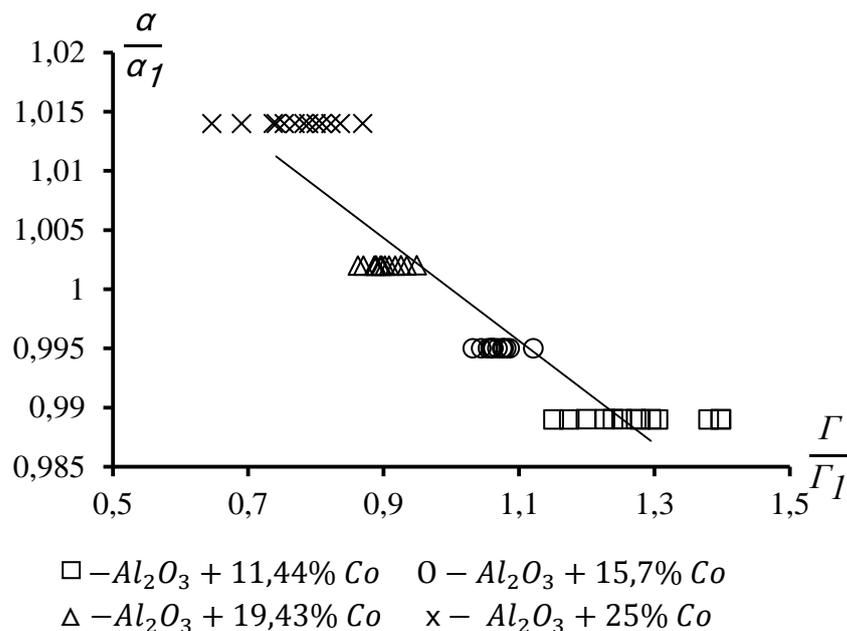


Рисунок 4.13 – Зависимость относительной эффективной температуропроводности от относительного коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

С помощью уравнения (4.32) можно вычислить температуропроводность исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 1,2 – 3%, если будут известны значения Γ , Γ_1 и α_1 .

Представляло интерес связать α_1 в уравнении (4.33) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\Gamma_1 = f(t), \quad (4.33)$$

Как видно, из рисунка 4.14, с ростом процентного содержания металла, α_1 увеличивается по линейному закону. Кривая линия, представленная на этом рисунке, описывается выражением [85-110]:

$$\Gamma_1 = [-w(t)^2 + v \cdot t + h], \frac{\text{МОЛЬ}}{(\text{ГР})}, \quad (4.34)$$

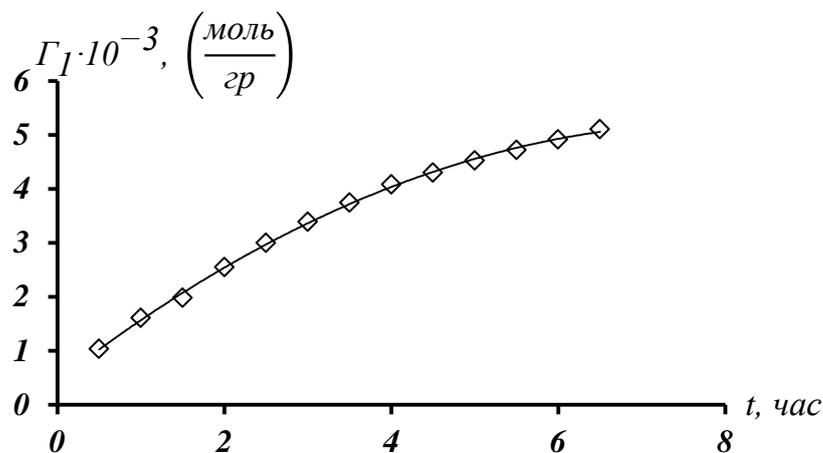


Рисунок 4.14 – Зависимость эффективного коэффициента адсорбции кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия от времени увлажнения в питьевой воде.

Используя уравнения 4.32 и 4.34 получим:

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\Gamma}{[-w(t)^2 + v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot \alpha_1 \cdot 10^7, \frac{\text{М}^2}{\text{С}}, \quad (4.35)$$

где t – время, час; α_1 – среднее значение температуропроводности катализаторов, $\alpha_1 = 1,637 \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$ – для кобальтовых катализаторов, $\alpha_1 = 1,68 \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$ – для иридиевых катализаторов.

С помощью уравнения (4.35) можно вычислить температуропроводность экспериментально исследованного гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия, в зависимости от коэффициента адсорбции, концентрации катализаторов.

Таблица 4.7 – Коэффициенты уравнения (4.35) r , j , w , v , h для расчёта коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
r	j	w	v	h	r	j	w	v	h
0,0434	1,0434	0,0753	1,1991	0,4455	0,0537	1,0537	0,0029	0,0447	0,0085
Наполнитель иридий									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
0,0807	1,0807	0,122	1,7153	0,5605	0,0608	1,0605	0,1159	1,6892	0,2722

4.8. Обработка и обобщение результатов корреляции между экспериментальными данными по температуропроводности и коэффициентом массоотдачи исследуемых образцов

Для получения уравнения корреляции между температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия (0,85-1,25 мм) при различных концентрациях кобальта и иридия нами использована следующая функциональная зависимость [85, 101-110]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = f\left(\frac{\beta}{\beta_1}\right), \quad (4.36)$$

где α – температуропроводность при коэффициенте массоотдачи β ; $\alpha_1=1,637 \cdot 10^7$ (м²/с) – температуропроводность при коэффициенте массоотдачи $\beta_1=5,1 \cdot 10^{-6}$ (кг/с).

Выполнимость зависимости (4.36) для чистого оксида алюминия, а также содержащего различное количество кобальта показана на рисунке 4.15.

Выполнимость зависимости (4.36) для кобальтовых образцов, независимо от концентрации металла, во всех паровых средах показана на рисунке 4.15. Видно, что экспериментальные данные хорошо укладываются вдоль общей прямой, которая описывается уравнением:

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_1} \right) + j \right] \cdot \alpha_1 \cdot 10^7 \frac{m^2}{c}, \quad (4.37)$$

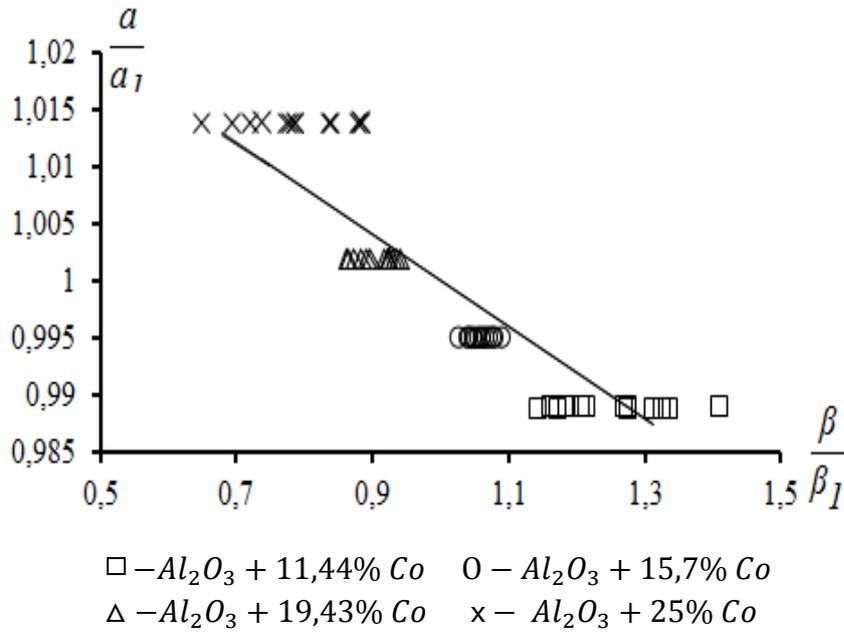


Рисунок 4.15 – Зависимость относительной эффективной температуропроводности от относительного коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми наполнителями, увлажненного в питьевой воде.

Выполнимость зависимости (4.36) для кобальтовых образцов, независимо от концентрации металла, во всех паровых средах показана на рисунке 4.15. Видно, что экспериментальные данные хорошо укладываются вдоль общей прямой, которая описывается уравнением:

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_1} \right) + j \right] \cdot \alpha_1 \cdot 10^7 \frac{m^2}{c}, \quad (4.37)$$

На рисунке 4.15 многие точки совпадают, поэтому экспериментальные данные для некоторых образцов в среде паров воды не показаны.

С помощью уравнения (4.37) можно вычислить температуропроводность всех исследуемых образцов в атмосфере влажного воздуха с погрешностью 1-25%, если будет известна α_1 . Интересно установить связь α_1 в уравнении (4.37) с процентным содержанием металла в оксиде алюминия:

$$\beta_1 = f(t), \quad (4.38)$$

Как видно из рисунка 4.16, с ростом процентного содержания металла, α_1 увеличивается по линейному закону. Кривая линия, представленная на этом рисунке, описывается выражением:

$$\beta_1 = [w(t)^2 - v \cdot t + h], \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (4.39)$$

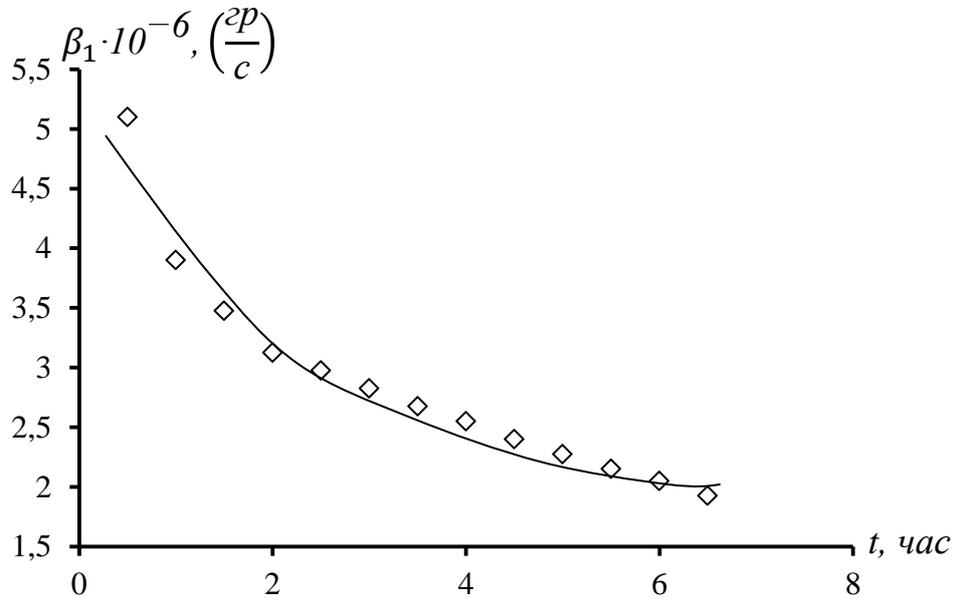


Рисунок 4.16 – Зависимость эффективного коэффициента массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия от времени увлажнения в питьевой воде.

Используя уравнения 4.37 и 4.39 получим:

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\beta}{[w(t)^2 - v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot \alpha_1 \cdot 10^7 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (4.40)$$

где t – время, час; α_1 – среднее значение температуропроводности катализаторов, $\alpha_1 = 1,637 \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$ – для кобальтовых катализаторов, $\alpha_1 = 1,68 \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$ – для иридиевых катализаторов.

С помощью уравнения 4.40 можно вычислить температуропроводность экспериментально исследованного гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия, в зависимости от коэффициента массоотдачи, концентрации катализаторов.

В приложении (П. 4.9 - 4.32) приводится сравнение вычисленных значений коэффициента теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности исследованных образцов при температуре 293 К и атмосферном давлении с экспериментальными данными.

Таблица 4.8 – Коэффициенты уравнения (4.40) r , j , w , v , h для расчёта коэффициента массоотдачи пористого гранулированного оксида алюминия с кобальтовыми и иридиевыми наполнителями в среде паров воды и авиационного керосина

Наполнитель кобальт									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
r	j	w	v	h	r	j	w	v	h
0,0406	1,0406	0,0863	1,0168	5,0788	0,0526	1,0526	0,0446	0,63	4,1378
Наполнитель иридий									
Среда паров воды					Среда авиационного керосина				
0,0748	1,0745	0,0927	1,2529	6,7584	0,0614	1,0611	0,0564	0,8472	5,52

4.9. Метод расчета теплопроводности пористых зернистых и композиционных материалов с металлическим наполнителем в процессе увлажнения

Для исследования процессов переноса тепла в пористых зернистых и композиционных материалах предложена модель структуры и на ее основе разработан метод расчета теплопроводности. Расчет выполняется на модели в виде засыпки из зерен (шаров) одинакового диаметра; сами зерна имеют пористую структуру, а в стенках пор и на их поверхности вкраплены частички металла (рисунок 4.17), [27, 33, 44, 111, 110].

Процессы переноса теплоты через такую структуру будем рассматривать по этапно.

На первом этапе оценим теплопроводность пористого зерна из оксида алюминия без частичек металла, предполагая, что в порах находится газ. Используем известную модель трещиноватого материала, компоненты которого образуют взаимопроникающую решетку (рисунок 4.17).

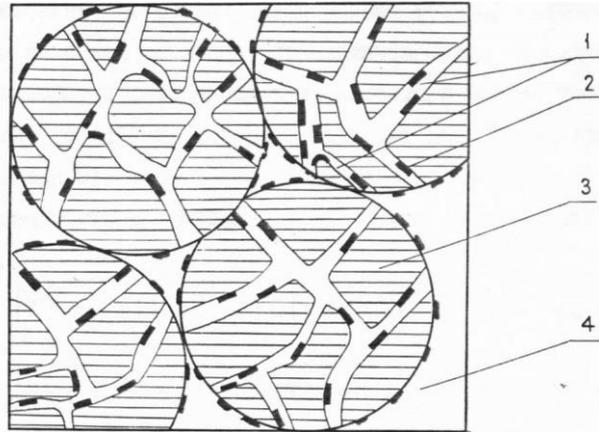


Рисунок 4.17 – Структура и модель засыпки пористого гранулированного оксида алюминия, 1-трещины; 2-металлические включения; 3 - основа (зерна Al_2O_3); 4 – поры.

Теплопроводность трещиноватого материала определяется по формуле [27, 44, 112]:

$$\lambda' = \lambda_{Al_2O_3} [C^2 M + \nu(1 - C)^2 + 2\nu C(1 - C) / (\nu C + 1 - C)], \quad (4.41)$$

Где, $C = 0,5 + A \cos \left(2\pi - \arccos \frac{\varphi}{3} \right) \begin{cases} m_2 \leq 0,5; A = -1; \varphi = 1 - 2m_2 \\ m_2 \geq 0,5; A = 1; \varphi = 2m_2 - 1 \end{cases}$

$$\nu = \frac{\lambda_{пор}}{\lambda_{Al_2O_3}}$$

M - параметр, характеризующий трещиноватость материала.

Параметр C однозначно связан с объемной пористостью материала, представленной на рисунке 4.19.

Теплопроводность пор определяется лучистым λ_l и молекулярным переносом теплоты λ_m и равна [33, 44, 110]:

$$\lambda_{пор} = \lambda_l + \lambda_m \quad (4.42)$$

Лучистая составляющая теплопроводности оценивается по формуле для лучистого теплообмена между двумя параллельными пластинами, степень черноты которых ε , а расстояние между ними (размер пор) δ [27, 33, 110]:

$$\lambda_l = \sigma_0 (T/100)^3 \varepsilon_{np} \delta, \quad (4.43)$$

где, σ_0 - постоянная Стефан-Больцмана; $\varepsilon_{np} = \varepsilon / (2 - \varepsilon)$

Молекулярная составляющая теплопроводности зависит от многих параметров и определяется по формуле [27, 33, 111]:

$$\lambda_M = \frac{\lambda}{1 + B/(H\delta)}, \quad B = \frac{4(C_p/C_v)}{(C_p/C_v)+1} \cdot \frac{2-a}{a} \cdot \Lambda H_0 \text{Pr}^{-1} \quad (4.44)$$

$$H_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

где Λ - длина свободного пробега молекул паров-наполнителей; H - давление паров-наполнителей; C_p/C_v - отношение изобарной и изохорной теплоемкостей наполнителей; α - коэффициент аккомодации молекулы газа к окружающему веществу. Pr - критерий Прандтля.

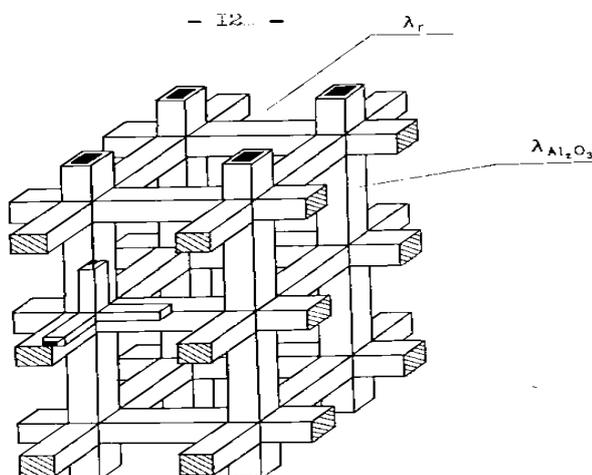


Рисунок 4.18 – Модель трещиноватого материала, компоненты которого образуют взаимопроникающую решетку: λ_r – теплопроводность адсорбента; $\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ - теплопроводность твердого каркаса.

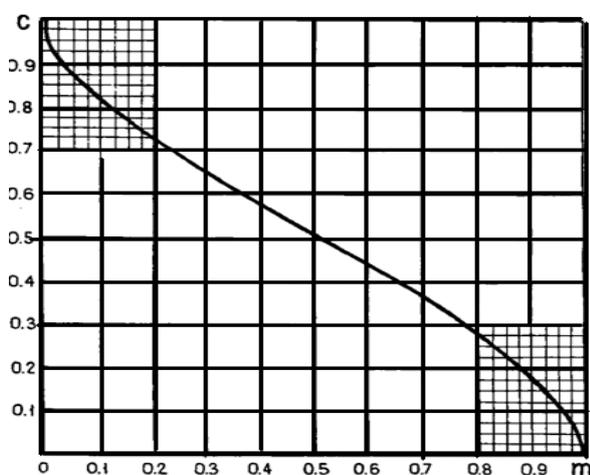


Рисунок 4.19 – Зависимость параметра C от объемной пористости материала зерен m_2 .

На втором этапе оценим теплопроводность материала гранул λ'' , т.е. трещиноватого пористого материала с вкраплениями металла. Такие гранулы будем считать двухкомпонентным материалом, один компонент которого пористый оксид алюминия с теплопроводностью λ , второй компонент - металл с теплопроводностью $\lambda_{мет}$. Структуру материала описываем моделью с изолированными включениями, а ее теплопроводность рассчитывается по формуле [27, 33, 44, 111]:

$$\lambda'' = \lambda' \left[1 - m_{мет} / \left((1 - \nu')^{-1} - (1 - m_{мет}) / 3 \right) \right] \quad (4.45)$$

где, $\nu' = \lambda_{мет} / \lambda'$ $m_{мет}$ - объемная концентрация металла, связанная с весовой концентрацией зависимостью [27] :

$$m_{мет} = n_{мет} \left[\rho_{мет} \left(n_{мет} / \rho_{мет} + (1 - n_{мет}) / \rho_{Al_2O_3} \right) \right]^{-1}, \quad (4.46)$$

где, $\rho_{Al_2O_3}$ - общие плотности металлических частиц и пористого оксида алюминия; $n_{мет}$ - массовая концентрация металлических частиц.

На завершающем *третьем этапе* проводим расчет теплопроводности λ зернистой системы, зерна которой имеют теплопроводность λ'' , а между ними находятся пары жидкостей. Кладка зерен (их координационное число \mathbf{N}) определяется пористостью m_2^{-1} , приходящейся на межзерновое пространство. Она связана с общей пористостью m и пористостью материала зерен m_2 соотношением, полученным из следующих преобразований:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ m_2^1 &= \frac{V_1}{V}, \quad m_1 = \frac{V_3}{V}, \quad m = \frac{V_1 + V_2}{V} \\ m_1 + m &= 1, \quad m = \frac{V_1 + V_2}{V}, \\ m &= \frac{V \cdot m - V_2}{V} = m - \frac{V_2}{V - V_1} \cdot \frac{V - V_1}{V} = m - m_2(1 - m_2^1); \\ m_2^1 &= \frac{m - m_2}{1 - m_2} \end{aligned}$$

где, V_1 - объем пор, расположенных между зернами; V_2 - объем трещин в зернах; V_3 - объем зерен.

Теплопроводность зернистой системы определяется по методу, предложенному в [27, 33, 44]:

$$\lambda = \lambda'' \left(\left(\frac{Y_1^2}{(0,5h_m + (1 - 0,5h_m)\Phi)} + \left(\frac{D}{Y_3^2} + \frac{A}{1 - 0,5h_m - B + \frac{0,5h_m}{V_{м3}}} \right) + \frac{2V_r \left(D - F + \omega \ln \left(\frac{\omega - D}{\omega - F} \right) \right)}{(1 - V_r)^{-1})^{-1}} + \frac{V_{2сп} E}{Y_4^2} \right) \right), \quad (4.47)$$

Где, $Y_2^2 = Y_1^2$; $F = \sqrt{1 - Y_2^2}$; $D = \sqrt{1 - Y_3^2}$; $E = Y_4^2 - Y_3^2$;

$$\omega = \left[1 - V_{сз} \sqrt{1 - Y_3^2} + \frac{B}{(Hd)} \right] (1 - V_{сз})^{-1}; \quad d = 2r;$$

$$V_{сз} = \frac{\lambda_{сз}}{\lambda_1}; \quad V_{2сп} = \frac{\lambda_{2сп}}{\lambda_1}; \quad h_m = 0; \quad V_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_1}.$$

где λ_r -теплопроводность газа-наполнителя (пары продуктов); $\lambda_{сз}$ -теплопроводность газа в зазоре; $\lambda_{2сп}$ -теплопроводность газа в сквозных порах; λ - эффективная теплопроводность; λ_1 -теплопроводность материала зерен; h_m -высота микрошероховатостей поверхности зерен; Φ - функция, учитывающая изменение теплового потока (сопротивления) [27, 33, 44, 111].

Лучистая и молекулярная составляющие теплопроводности рассчитываются по формулам, аналогичным (4.31), (4.32) с учетом иных размеров зазора. Расчет геометрических параметров системы приведен в [27], он проводится на модели элемента с усредненными параметрами (рисунок 4.69). Размеры элемента определялись по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= r_1/r; & y_2 &= r_2/r; \\
 y_3 &= r_3/r = 2 \sqrt{N_3 - 1/N_k}; \\
 y_4 &= r_4/r = y_3 \sqrt[3]{1 - m_2^1}; \\
 N_k &= \frac{(m_2^1 + 3 + \sqrt{(m_2^1)^2 - 10m_2^1 + g})}{2m_2^1}, \tag{4.48}
 \end{aligned}$$

где r, r_1, r_2, r_3, r_4 - радиусы пятен контакта в модели усредненного элемента.

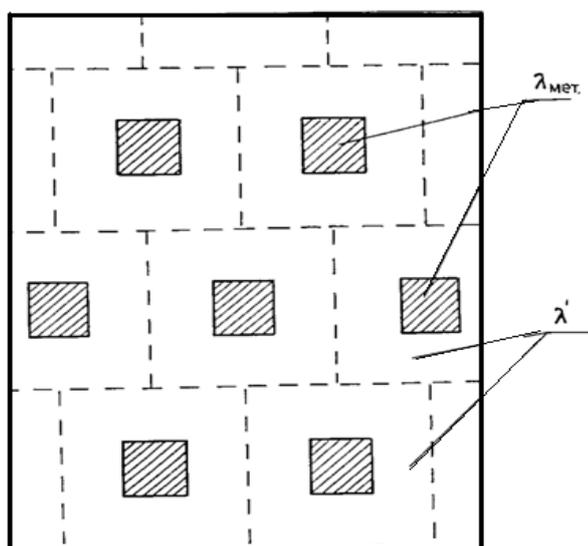


Рисунок 4.20 – Модель материала с изолированными включениями: λ' – теплопроводность трещиноватого материала; $\lambda_{мет}$ - теплопроводность металлических вкраплений.

По предложенной выше методике были проведены расчеты теплопроводности пористого гранулированного оксида алюминия, содержащего различные массовые концентрации кобальта в среде паров наполнителей (воды, авиационного керосина), находящихся при нормальном давлении и в вакууме. Теплофизические характеристики и другие данные, необходимые для расчета, заимствованы из литературы [21,83, 84].

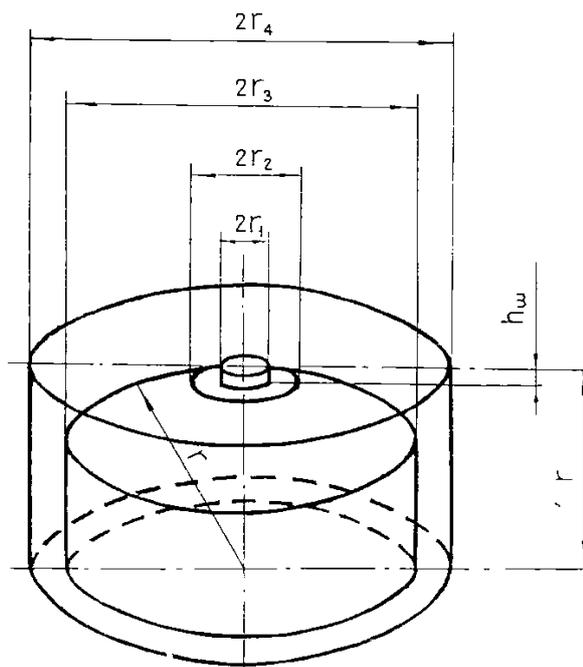


Рисунок 4.21 – Элемент хаотической структуры с усредненными параметрами.

Из сопоставления можно сделать вывод, что по предложенной методике можно рассчитывать теплопроводность описанных выше структур с погрешностью, соизмеримой с погрешностью задания исходных данных. Так как погрешность метода расчета теплопроводности сложных систем, как и погрешность метода расчета теплопроводности зернистых систем [27], составляет, приблизительно 15-20%, в то время как погрешность задания исходных данных колеблется от 5 до 100% (погрешность справочных величин: λ_r , ε , Λ , C_p/C_v , α , Pr , $\alpha_{мет}$ – 5% для газов и 10% для твердых материалов; теплопроводность оксида алюминия, по литературным данным, в пределах 50-100%; размер зерен засыпки – 100%), то совпадение расчета с экспериментом можно считать вполне удовлетворительным как качественно, так и количественно.

Поскольку расчеты и методика их выполнения опираются на теорию разработанную профессором Г.Н. Дульневым и сотрудниками Института Точной механики и Оптики (ИТМО), то очевидно совпадение экспериментальных и расчетных данных подтверждает правильность основных положений построения теории и возможности их использования для

теоретических расчетов исследованных нами образцов также возможности использования этой теории для объяснения механизма переноса тепла в зернистых структурах.

Таким образом, по предложенному методу с достаточной точностью можно вычислить теплопроводность подобных зернистых материалов с металлическими наполнителями, не проводя длительные трудоемкие экспериментальные измерения. По вышеизложенному методу нами был выполнен расчет теплопроводности ряда катализаторов на основе оксида алюминия с различными металлическими наполнителями и различными размерами гранул, которые используются в ГИПХ (Государственном институте прикладной химии г. Санкт Петербурга) в качестве справочных данных.

4.10. Внедрение результатов исследований

Полученные экспериментальные данные по физико-химическим свойствам оксида алюминия, содержащего различное количество кобальта и иридия внедрены в Таджикском Государственном педагогическом университете имени С. Айни и Научно – исследовательском Институте промышленности, Министерства промышленности и новых технологий Республики Таджикистан.

Заключение к 4 главе.

1. Установлено, что с ростом содержания кобальта и иридия на поверхности оксида алюминия коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости линейно увеличиваются. Наличие влажности приводит к значительному увеличению λ , α и C_p .
2. Установлено, что передача тепла, в основном, осуществляется через молекулы паров воды и авиационного керосина, заполняющие поры и свободное пространство между их гранулами и в значительно меньшей степени через контакты твердой фазы гранулы образцов.
3. Коэффициент теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости исследуемых образцов существенно зависят от заполнения их внутреннего

пористого объема газом и в меньшей степени определяется наличием среды заполняющего пространство между гранулами.

4. При одинаковом содержании количества металла в гранулах λ , α и C_p засыпки, содержащие кобальта несколько больше, чем λ , α и C_p засыпки, содержащие иридий.

5. В результате обработки и обобщения опытных данных по теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, коэффициенту адсорбции и массоотдачи получены следующие расчетные уравнения:

$$\Gamma = \left[-m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 + g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q), 10^{-3}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ГР}}$$

$$\beta = \left[m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 - g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q), 10^{-6}, \frac{\text{КЭ}}{\text{С}}$$

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\Gamma}{[-C(t)^2 + D \cdot t + E]} \right) + B \right] \cdot \lambda_1, 10^3, \frac{\text{Вт}}{(\text{М} \cdot \text{К})}$$

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\beta}{[C(t)^2 - D \cdot t + E]} \right) + B \right] \cdot \lambda_1, 10^3, \frac{\text{Вт}}{(\text{М} \cdot \text{К})}$$

$$C_p = \left[K \left(\frac{\Gamma}{[-X(t)^2 + Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{p1}, \frac{\text{ДЖ}}{(\text{КГ} \cdot \text{К})}$$

$$C_p = \left[K \cdot \left(\frac{\beta}{[X(t)^2 - Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{p1}, \frac{\text{ДЖ}}{(\text{КЭ} \cdot \text{К})}$$

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\Gamma}{[-w(t)^2 + v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot \alpha_1 \cdot 10^7, \frac{\text{М}^2}{\text{С}}$$

$$\alpha = \left[-r \cdot \left(\frac{\beta}{[w(t)^2 - v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot \alpha_1, 10^7, \frac{\text{М}^2}{\text{С}}$$

Разработана модель структуры, проведен анализ процесса теплопереноса и на его основе предложен метод расчета теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости пористых зернистых материалов с металлическими наполнителями. Показано, что расчетные величины теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости имеют хорошую сходимость с полученными экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. Модернизированы и изготовлены экспериментальные установки для измерения физико – химических свойств (теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости) гранулированных и композиционных материалов в широком интервале температур в различных газовых средах и парах органических жидкостей.
2. Впервые получены экспериментальные данные по теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости пористого гранулированного оксида алюминия на линии увлажнения с различными концентрациями металлических наполнителей – кобальта и иридия.
3. Разработана модель структуры, проведен анализ процесса теплопереноса и на его основе предложен метод расчета теплопроводности пористых зернистых материалов с металлическими наполнителями. Показано, что расчетные величины теплопроводности имеют хорошую сходимость с полученными экспериментальными данными.
4. Установлено, что на процесс теплопереноса исследуемых материалов большое влияние оказывает паровая среда, заполняющая поровые пространства материала.
5. В результате обработки и обобщения опытных данных по теплопроводности, теплоемкости, коэффициенту адсорбции и масоотдачи получены следующие корреляционные уравнения:

$$\Gamma = \left[-m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 + g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q), 10^{-3}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{ГР}}$$

$$\beta = \left[m \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 - g \left(\frac{t}{t_1} \right) + p \right] \cdot (-z \cdot n + q), 10^{-6}, \frac{\text{КЭ}}{\text{С}}$$

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\Gamma}{[-C (t)^2 + D \cdot t + E]} \right) + B \right] \cdot \lambda_1, 10^3, \frac{\text{Вт}}{(\text{М} \cdot \text{К})}$$

$$\lambda = \left[-A \left(\frac{\beta}{[C(t)^2 - D \cdot t + E]} \right) + B \right] \cdot \lambda_1, 10^3, \frac{Bm}{(M \cdot K)}$$

$$C_P = \left[K \left(\frac{\Gamma}{[-X(t)^2 + Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{P1}, \frac{Дж}{(кг \cdot K)}$$

$$C_P = \left[K \cdot \left(\frac{\beta}{[X(t)^2 - Y \cdot t + Z]} \right) + F \right] \cdot C_{P1}, \frac{Дж}{(кг \cdot K)}$$

$$a = \left[-r \cdot \left(\frac{\Gamma}{[-w(t)^2 + v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot a_1 \cdot 10^7, \frac{M^2}{c}$$

$$a = \left[-r \cdot \left(\frac{\beta}{[w(t)^2 - v \cdot t + h]} \right) + j \right] \cdot a_1, 10^7, \frac{M^2}{c}$$

Показана хорошая корреляция между теоретическими и эмпирическими зависимостями.

6. Полученные научные результаты внедрены в Таджикский Государственный педагогический университет имени С. Айни и Научно – исследовательский Институт промышленности, Министерства промышленности и новых технологий Республики Таджикистан.

Литература

1. Godbee, H.W., Ziegler W.T. Thermal Conductivities of MgO, Al₂O₃ and ZrO₂ powder to 850⁰C // Journal of applied physics. – 1966.- V.37.- №1.- P.56–65.
2. Joseph, L.W., William G.S. Thermal Conductivity of Granular Beds Filled with Compressed Gases // Industrial and Engineering chemistry. – 1951. – V.43. - №5. – P.1229-1233.
3. Kunii, D., Smith J.M. Heat transfer characteristics of Porous Rocks // A.J. Ch.E. Journal.– 1990. - №1. –P.71-78.
4. Laubits, M.J. Thermal Conductivities of powders – Canadian // Journal of Physics. – 1959. – V.37. – P.798-808.
5. Poltz, H. Die ä wärmeleitfähigkeit von flüssigkeiten III. Abhängigkeit der wärmeleitfähigkeit von der Schichieke dei organishen flüssigkeiten // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1985. – Bd.8. – N4. – S. 609 – 620.
6. Swift, D.L. The Thermal Conductivities of spherical metal powders including the effect of an oxide coating // J. Heat Mass Transfer. – 1966. – V.9. – P. 1061-1074.
7. Woodside, W., Messmar J.H. Thermal Conductivities of porous media // Journal of applied physics. – 1961.- V.32.- №9.- P.1688-1706.
8. Weqlowski, S. Phasetransitions of Cd₃AS₂ and Zn₃AS₂. /S. Weqlowski, K. Lukaszewicz // Acad.Polon.Ser.Chim.1968,V.16, p177.
9. Агеев, Н.В. Физико–химическое соединение фаз с никель-арсенидной структурой в системах Fe–Sb, Co-Sb и Ni–Sb». /Н.В.Агеев, Е.С.Макарев. //Изв. АН СССР. отд. хим. наук.,1943,С. 87-98.
- 10.Ащеулов, А.А. Выращивание, электрические и термоэлектрические свойства эвтектической композиции CdSb-NiSb. /А.А. Ащеулов, В.Ф. Пономарев А.Ф. Семизоров и др. //Тезисы докл. У Всесоюзного координационного совещания по полупроводниковым соединениям. А^{II}В^V. - 1982. – С. 37.

11. Адливанкина, М.А. Массоперенос в капиллярно-пористых телах при физической адсорбции / М.А. Адливанкина, К.З. Бочавер, А.А. Старцев // Теоретические основы химической технологии. – 1979. – Т. 13, – №3. – С.347 – 354.
12. Адливанкина, М.А. Массопроводность при физической абсорбции / М. А. Адливанкина, К.З. Бочавер А.А. Старцев // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – Т. 9, – №6. – С.916 – 920.
13. Бегункова, А.Ф. Влияние контактных тепловых сопротивлений для шариковой изоляции // Теплоэнергетика. – 1958. - №12. – С. 85-86.
14. Васильев, Л.Л., Фрайман Ю.Б. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. – Минск: Наука и техника, 1967. – С. 174.
15. Васильев, Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – С. 267.
16. Васильев, Л.Л., Боброва Г.И., Танаева С.А. Пористые материалы в криогенной технике. – Минск: Наука и техника, 1979. – С. 221.
17. Васильев, А.П., Полехина Т.К. Исследование теплопроводности дроби из свинца и чугуна в зависимости от температуры // Атомная энергия. – 1969. – Т.26. - №3. – С. 296-297.
18. Васильев, Л.Л., Танаева С.А., Шнырев А.Д. Комплексное исследование теплофизических характеристик веществ в интервале температур 10-400 К // Исследование теплофизических свойств материалов: Сб.– Минск. – 1971. – С. 84-89.
19. Васильев, Л.Л., Танаева, С.А. Исследование эффективной теплопроводности многокомпонентных пористых материалов // Теплофизические свойства веществ при низких температурах: Сб. – Минск, 1972. – С. 89-92.
20. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева // Минск Наука и техника. – 1971. – С. 267.
21. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ: (Справочник) – М.-Л.: Госэнергоздат, 1956. – С. 367.

22. Голубев, И.Ф. Бикалориметр для определения теплопроводности газов и жидкостей при высоких давлениях и различных температурах // Теплоэнергетика, - 1963,- №12. – С. 78-82.
23. Гылманов, А.А. Некоторые вопросы регулярного теплового режима и определение теплопроводности жидкостей и газов: Автореф. дисс...канд. физ.-мат. Наук. – 1964. – С. 20.
24. Глазнев, И.С. Динамика поглощения воды в зерне и слое сорбентов CaCl_2 / силикагель и CaCl_2 / окис алюминия: дис...канд. тех. наук: 02.00.04 / Глазнев Иван Сергеевич. – 2006. – С. 143.
25. Галимов, Ж.Д., Дубинина Г.Г., Масагутов Р.М. Методы анализа катализаторов нефтепереработки, М.: Химия. – 1973. – С. 94.
26. Голубоев, И.Ф., Назиев Я.М. Теплопроводность газообразных предельных углеводородов при атмосферном давлении и различных температурах // Изв. АН Азерб. СССР. Сер. Физ.– мат. и тех. наук.–1961.-№5.– С. 97-103.
27. Дульнев, Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – С. 264.
28. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей с взаимопроникающими компонентами // Инженерно-физический журнал. – 1970. – Т.19. - №3. – С. 562-577.
29. Дульнев, Г.Н., Заричняк Ю.П., Муратова Б.Л. Теплопроводность зернистых и слабоспеченных материалов // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т.16. - №6. – С. 1019-1028.
30. Дульнев, Г.Н., Заричняк Ю.П., Муратова Б.Л. Теплопроводность твердых пористых увлажненных материалов // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т.31. - №1. – С. 278-283.
31. Дульнев, Г.Н., Новиков В.В. Эффективный коэффициент проводимости системы с взаимопроникающими компонентами // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т.32. - №2. – С. 271-274.
32. Дульнев, Г.Н., Еремеев М.А., Заричняк Ю.П. Теплопроводность связанных систем // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т.25. - №1. – С. 55-62.

33. Дульнев Г.Н, Муратова Б. Л, Трибель Т. В, Маджидов Х, Сафаров М. М. Метод расчета теплопроводности пористой гранулированной окиси алюминия в зависимости от концентрации меди и температуры в различных средах // ИФЖ. Т. 50, №1. Деп.- 1986.- №4471 – 85.- С. 11.
34. Душенко, В.П. О некоторых аспектах температурной зависимости сорбции водяных паров капиллярно-пористыми телами / В.П. Душенко, М.С. Панченко, С.Ф. Дьяченко // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. 16,– №1. – С. 67 – 71.
35. Забродский, С.С., Антонишин В.Н., Никитин В.Б. Об эффективной теплопроводности дисперсного слоя при повышенных температурах // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Т.14. - №5. – С. 877-881.
36. Кржижановский, Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы). – 1973,- С. 333.
37. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – 1954.– С. 408.
38. Кондратьев, Г.М. Тепловые измерения. – 1957. – С. 244.
39. Каганер, Г.М. Тепловая изоляция в технике низких температур. – 1966. – С. 275.
40. Кондратьев, Г.М., Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Тр. Ленинградской Института точной механика и оптика. – 1956. – С. 85.
41. Козак, М.И. Теплопроводность некоторых порошков при высоких температурах // Журнал технической физики. – 1952. – Т.22. – С. 78-76.
42. Коган, А.М., Гальперин И.И., Пушной А.С. Влияние теплопроводности материала зерен на эффективную теплопроводность неподвижного зернистого слоя // Тр. ГИАП Химия и технология продуктов органического синтеза. – 1972. – Вып.13. – С. 143-149.
43. Краев, О.А. Простой метод измерения температуропроводности теплоизоляторов // Теплоэнергетика. – 1958. - №4. – С. 81 – 82.
44. Дульнев, Г. Н, Муратова, Б. Л, Требель Т. В, Маджидов Х, Сафаров М. М. Теплопроводность окиси алюминия в зависимости от концентрации

- кобальта и температуры в различных газовых средах. ТВТ. Т. 25. – 1987. - №4. - С. 684 – 688.
45. Кафаров, В.В. Основы массопередачи: учебник для студентов вузов / В.В. Кафаров. - 1979. – С. 439.
46. Лунев, В.Д. К вопросу о переносе сорбируемого вещества в неподвижном слое сорбента /В.Д. Лунев, М.И. Курочкина//Теоретические основы химической технологии. – 1975. – №2. – С. 278 – 281.
47. Лыков, А.В. Теплообмен (Справоч.) – 1972. – С. 560.
48. Мустафаев, Р.А.– Теплофизические свойства углеводородов при высоких параметрах состояний. – 1980. – С. 296.
49. Маджидов, Х., Сафаров М.М., Гайдей Т.П. Исследование эффективного коэффициента теплопроводности оксиды алюминия, содержащей различные количества металла в газовых средах и вакууме // Журнал физической химии. – 1984. – Т.58, Вып. 1, С. 75-79.
50. Маджидов, Х., Сафаров М.М. Исследование температуропроводности оксиды алюминия, содержащей различные количества металла в газовых средах и вакууме // Теплофизика высоких температур. – 1983. - №4. – Т.21. – С. 693-696.
51. Морозов, С.Б. Влияние пористости на контактирование шероховатых поверхностей. / С.Б. Морозов. – М.: Машиностроение, 1991. – 264 с.
52. Морачевский, А.Г. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (экспериментальные данные и методы расчета): Справ. изд. / А.Г. Морачевский, И.Б. Сладков. – 2-ое изд. пераб. и доп. – СПб.: Химия. – 1996. – С. 312.
53. Мень, А.А. Сергеев О.А. Лучисто-кондуктивный теплообмен в среде с селективными оптическими свойствами // Теплофизика высоких температур. – 1971. – Т. 9. – вып. 2. – С. 353 – 359.
54. Маджидов, Х., Сафаров М.М., Гайдей Т.П. Исследование теплофизических свойств оксиды алюминия, содержащей различные количества металла в

- газовых средах и вакууме: Тез. Основ. Докл.7 Всесоюзной конференции. – 1982. – С. 296.
55. Мирзомамадов, А.Г. Взаимосвязь между теплопроводностью и адсорбцией пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнителями меди в процессе увлажнения / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров // Вестник педагогического университета. – 2015. - №2 (63-2). – С. 3-7.
56. Мирзомамадов, А.Г. Взаимосвязь между теплопроводностью и адсорбцией пористой гранулированной оксиды алюминия с наполнителями никеля в процессе увлажнения / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров // Вестник таджикского национального университета. – 2015. - №1/5 (188). – С. 89-93.
57. Мирзомамадов, А.Г. Теплопроводность и адсорбция увлажненных медных катализаторов на основе нанопористой гранулированной оксиды алюминия / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, И.Ш. Тауров // Вестник Таджикского технического университет им акад. М. Осими. – 2015. - № 3 (31). - С. 23-27.
58. Мирзомамадов, А.Г. Адсорбционные свойства катализатора на основе гранулированного оксида алюминия / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, С.С. Абдуназаров // Сборник тезисов докладов научной конференции «Актуальные проблемы современной науки». – 2015. – С. 79-80.
59. Мирзомамадов, А.Г. Адсорбционные и теплофизические свойства наноструктурной пористой гранулированной оксиды алюминия с различными фракциями / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, А. Неъматов // Сборник материалов. Международная научно - практическая конференция, посвященная 1150-летию персидско-таджикского учёного энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибни Закария Рази. – 2015. – С. 125-128.
60. Мирзомамадов, А.Г. Влияние наноструктурных частиц на изменение термодинамических и адсорбционных свойств на линии увлажнения / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, М.А. Зарипова, А.С. Назруллоев и др. // Тезисы докладов 10-го Всероссийского симпозиума с международным

- участием, Термодинамика и материаловедение. Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, РАН. – 2015. – С. 42.
61. Мирзомамадов, А.Г. Экспериментальные данные теплопроводности и коэффициента массопередачи катализаторов на основе пористой гранулированной оксиды алюминия в среде азота / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, С.С. Абдуназаров // Международная молодежная научная школа – семинар, “Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования”. – 2015.
62. Никитин, В.С. Исследование эффективной теплопроводности засыпок дисперсного материала при повышенных температурах. – Автореф.-дисс...кан. тех. наук. – 1969. – С. 20.
63. Никитин, В.С., Забродский С.С., Антонишин Н.В. О теплопроводности засыпок дисперсного материала в различных газовых средах при повышенных температурах // Вестн. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук. – 1968. - №2. – С.51-53.
64. Никитин, В.С., Антонишин Н.В. О переносе тепла в засыпке дисперсного материала // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т.17. - №1. – С. 248-253.
65. Никитин, В.С., Забродский С.С., Антонишин Н.В. О влиянии степени разрежения на эффективную теплопроводность засыпок дисперсного материала // Вестн. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук. – 1968. - №4. – С.115-118.
66. Никитин, В.С., Забродский С.С., Антонишин Н.В. О теплопроводности засыпок дисперсного материала при высоких температурах в вакууме // Вестн. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук.–1968.- №1.– С.82-85.
67. Никитин, В.С., Забродский С.С., Антонишин Н.В. О теплообмене излучением в засыпке дисперсного материала // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Т.15. - №14. – С. 726-730.

68. Поляков, В.П. Моделирование процесса водоочистки в загрузке адсорбера / В.П. Поляков // Докл. НАН Украины.–2012.– № 5.–С. 63–71.
69. Поляков, В.П. Теоретический анализ действия зерна адсорбента / В.П. Поляков // Докл. НАН Украины. – 2012. – № 4. – С. 63 – 70.
70. Павлов, В.П., Костадинова В.И. Задача о процессе стационарного тепло- и массообмена от сферической поверхности к безграничной окружающей среде с учетом эффекта термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 1976. – Т. 13, – №5. – С. 756 – 759.
71. Рудобашта, С.П., Плановский А.Н. Кинетика процессов сорбции – десорбции водяного пара на зернах технических адсорбентов // Теоретические основы химической технологии. – 1976. – Т. 13, – №5. – С. 756 – 759.
72. Симонова И.А. Композитные сорбенты воды $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ / силикагель и LiNO_3 /силикагель: дис....канд. тех. наук: 02.00.04 /Симонова Ирина Александровна. – 2009. – С. 130.
73. Семихин В.И., Малюгин Р.В. Исследование адсорбции хлоридов калия и натрия природными адсорбентами: песком и торфом // Вестник Тюменского государственного университета. – 2013.– №3. – С. 134-142.
74. Сафаров М.М. Устройство и способ комплексного свойства жидкостей. /М.М. Сафаров, Ш.З. Наджмидинов, М.А. Зарипова, М.С. Махмадиев, С.А. Тагоев, М.Д. Пирмадов, Ш.Т. Юсупов. //Патент Республики Таджикистан. – 2017. - №Tj С. 100.
75. Танаева, С.А. Теплопроводность влажных пористых засыпок // Процессы переноса энергии и вещества при низких температурах в вакууме. - 1973. – С. 141-147.
76. Танаева, С.А. Исследование эффективной теплопроводности пористых материалов // Процессы переноса энергии и вещества при низких температурах в вакууме. - 1973. – С. 148-158.
77. Тимофеев, А.М. Методы и результаты исследования тепломассообменных свойств и температурно-влажностного режима многокомпонентных систем

- с фазовыми переходами: Дис...д-ра тех. наук: 01.04.14 / Тимофеев Анатолий Михайлович. – 2006. – С. 316.
78. Устрицкий, С.Н., Гайдей Т.П., Тюрязев И.Я. О возможности применения нового химического поглотителя кислорода для очистки технического азота // Технология синтеза органических соединений. – 1983. – С. 40-44.
79. Филиппов, Л.П. О применении теории подобия к описанию свойств жидкости / Л.П. Филиппов // МГУ, Сер физ -мат наук.–1956 - №1.- С. 111-126.
80. Хушвактов, А.А. Повышение рабочего ресурса агрегатов пароводяного тракта ТЭС путем воздушной консервации с использованием силикагеля: дисс...канд. тех. наук: 01.04.14, 05.14.14 / Хушвактов Алишер Асанович. – 2014. – С. 161.
81. Харламов, А.Г. Теплопроводность засыпки керамической дроби // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т.29. - №1. – С. 48-53.
82. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. /А.Ф. Чудновский. - 1962. – С. 456.
83. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники (справочник). - 1968. – С. 484.
84. Шапкина, Л.В., Фрайдман Ю.Е. Исследование эффективной теплопроводности дисперсных систем в различных газовых средах при нормальном давлении // Вестн. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук. – 1970. - №1. – С. 95-100.
85. Мирзомамадов, А.Г. Адсорбционные и теплофизические свойства наноструктурной пористой гранулированной оксиды алюминия с различными фракциями./ А.Г. Мирзомамадов, М.М. Сафаров, С.С. Абдуназаров, М.А. Зарипова, А.С и др // Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 115 – летию персидского – таджикского ученого – энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакри Мухаммада ибн Закария Розы. – 2015. - С. 125 – 128.

86. Абдуназаров, С.С. Экспериментальные данные теплопроводности и коэффициента массоотдачи катализаторов на основе пористой гранулированной оксиди алюминия в среде азота / С. С. Абдуназаров, А. Г. Мирзомамадов, М. М. Сафаров // Международная молодежная научная школа – семинар, «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования». – 2015. - С. 45 – 47.
87. Абдуназаров, С.С. Адсорбционные свойства катализаторов на основе гранулированного оксида алюминия / С. С. Абдуназаров, М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, М. А. Зарипова // Сборник тезисов докладов научной конференции «Актуальные проблемы современной науки» посвященной 70 – летию победы в Великой Отечественной Войне. - 2015. - С. 79 – 80.
88. Абдуназаров, С.С. Взаимосвязь между коэффициентами теплопроводности и адсорбции пористой гранулированной оксиди алюминия в процессе увлажнения / С. С. Абдуназаров, М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов // Материалы Республиканской научно – практической конференции «Экономическое развитие энергетики в Республике Таджикистан». - 2015. - С. 51 – 56.
89. Абдуназаров, С.С. Зависимость коэффициента адсорбции от времени для пористой гранулированной оксиди алюминия с наполнителями кобальта в процессе увлажнения / С. С. Абдуназаров, М. М. Сафаров // Материалы Республиканской научно – практической конференции «Экономическое развитие энергетики в Республике таджикистан». - 2015. - С. 122 – 126.
90. Абдуназаров, С.С. Теплопроводность гранулированной оксиди алюминия с различной фракцией / С. С. Абдуназаров, М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, З. Ю. Норов // Первые Международные Лыковский научные чтения. Посвященной 105 – летию академика А. В. Лыкова. «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе». - 2015. - С. 477 – 482.

91. Сафаров М.М. Влияние наноструктурных частиц на изменение термодинамических и адсорбционных свойств на линии увлажнения/. М. М. Сафаров, М. А. Зарипова, А. С. Назруллоев, М. М. Гуломов, Н. Б. Давлатов, А. Г. Мирзомамадов, **С. С. Абдуназаров**, З. Ю. Норов//. Тезисы докладов 10-го Всероссийского симпозиума с международным участием, Термодинамика и материаловедение. Физико – технический институт имени А. Ф. Иоффе. - 2015. - С. 42.
92. Абдуназаров, С.С. Коэффициент массоотдачи кобальтовых катализаторов в среде авиационного керосина / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук. – 2015. - 1/6 (134). - С. 68 – 73.
93. Абдуназаров, С.С. Влияние авиационного керосина на изменение коэффициента адсорбции кобальтовых катализаторов / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров, Дж. А. Зарипов // Вестник Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими . – 2015. - №4 (134). - С. 18 – 24.
94. Абдуназаров, С.С. Влияние питьевой воде на изменение коэффициента адсорбции кобальтовых катализаторов / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров // Материалы Международной научно – практической конференции «Инновации в технике , технологии и теплотехнике». – 2015. - С. 272 – 280.
95. Абдуназаров, С.С. Взаимосвязь между теплопроводностью и коэффициентом адсорбции кобальтовых катализаторов в среде авиационного керосина / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики Казанский государственный энергетический университет. – 2015. - №11 – 12. - С. 30 – 38.
96. Сафаров, М.М. Тепло- и массоотдача катализаторов на основе пористой гранулированной оксиди алюминия / М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, З. Ю. Норов, **С. С. Абдуназаров** и др // Центр научного сотрудничества «Международные научные исследования». Международная научно –

- практическая конференция «Проблемы и перспективы современной науки»
Вып. – 2015. - №1. - С. 57 – 63.
97. Сафаров, М.М. Теплопроводность, коэффициент теплоотдачи и адсорбция увлажнённых катализаторов на основе гранулированной пористой оксиды алюминия / М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, С. С. Абдуназаров, З. Ю. Норов, Б. М. Махмадиев, Дж. А. Зарипов.// 15 Минский Международный форум по тепло –и массообмену. - 2016. - С. 34 – 38.
98. Сафаров, М.М. Теплофизические, кинетические свойства, коэффициента массоотдачи гранулированной пористой оксиды алюминия с металлическими наполнителями и их компонентов / М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, **С. С. Абдуназаров**, З. Ю. Норов, Б. М. и др // Физика, Научный журнал, Институт физико – технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики. - 2016. - С. 67 – 74.
99. Абдуназаров, С.С. Взаимосвязь теплопроводности и коэффициента адсорбции кобальтовых катализаторов / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров, А. Наъматов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2016. - 1/1 (192). - С. 146 – 150.
100. Абдуназаров, С.С. Коэффициент массоотдачи иридиевых катализаторов на основе гранулированной пористой оксиды алюминия / **С.С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров // Сборник научных трудов международной научно – технической конференции, посвященной 105 – летию со дня рождения А. Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях». (МНТК ПЛАНОВСКИЙ - 2016). - 2016. - Т.2. - С. 196 – 200.
101. Абдуназаров, С.С. Взаимосвязь теплопроводности и коэффициента массоотдачи иридиевых катализаторов на основе гранулированной оксиды алюминия / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров, Х. Х. Назаров, Д. Ш. Хакимов и др // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2016. - 1/4 (216). - С. 56 – 61.

102. Сафаров М. М. Влияние влажности на изменение теплопроводности металлических катализаторов на основе гранулированной пористой оксиди алюминия / М. М. Сафаров, А. Г. Мирзомамадов, **С. С. Абдуназаров**, З. Ю. Норов и др // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. - 2016. - 1/4 (216). - С. 71 – 76.
103. Safarov, M.M. Influence of carbon nanotubes, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , nanometallic to exchange thermo physical and thermo dynamics of hydrazinehydrate (rocket fuel) in dependence temperature and pressures./ М. М. Safarov, Kh. H. Nazarov, S. A. Tagoev, H. A. Zoirov, M. A. Zaripova, T. R. Tilloeva, A. S. Narzulloev, S. G. Rizeev, A. G. Mirzomamadov, **S. S. Abdunazarov**, Z. U. Norov, D. Sh. Hakimov, D. A. Nazirmadov, B. M. Mahmadiyev, S. S. Rafiev, D. S. Juraev, M. M. Kholikov, N. B. Davlatov, Iman Bahromi Manish.// Conference book, 10ICTP, 3 – 8 october 2016, «Thermophysical properties measurements in the quality control of substances, materials and produkts». - 2016. - P. 201 – 218.
104. Абдуназаров, С.С. Взаимосвязь теплопроводности и коэффициента адсорбции иридиевых катализаторов на основе гранулированной пористой оксиди алюминия / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров, Ш. А. Аминов, Д. А. Назирмадов, А. Г. Мирзомамадов и др // Материалы 10 международной теплофизической школы 3–8 октября 2016 г. «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». - 2016. - С. 301 – 308.
105. Абдуназаров, С.С. Исследование коэффициента адсорбции иридиевых катализаторов / **С. С. Абдуназаров**, М. М. Сафаров // Материалы 10 международной теплофизической школы 3 – 8 октября 2016 г. «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». - 2016. - С. 520 – 523.
106. Абдуназаров, С.С. Исследование коэффициента адсорбции иридиевых катализаторов / М. М. Сафаров, **С. С. Абдуназаров** // Материалы 8 международной научно-практической конференции «Перспективы развития

- науки и образования» посвященной 25 – летию государственной независимости Республики Таджикистан и 60 – летию ТГУ имени академик М. С. Осими. – 2016. - С. 190 – 193.
107. Абдуназаров, С.С. Коэффициент массоотдачи кобальтовых катализаторов на основе пористой гранулированной оксиди алюминия в среде авиационного керосина / С. С. Абдуназаров, М. М. Сафаров // Вестник филиала Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в г. Душанбе (научный журнал). Серия естественных наук, 1(1) 2017. С. 74 – 80.
108. Сафаров, М.М. Способ обобщение коэффициента адсорбции зернистых материалов (способ Сафаров М. М) / М. М. Сафаров, С. С. Абдуназаров, Х. Х. Назаров, М. А. Зарипова, С. А. Тагоев и др // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2016. - 1/4 (216). - С. 71 – 76.
109. Dulnev, G. N, Muratova, B. L, Trebel, T. B, Majidov, Kh, Safarov, M. M. Method of calculating the thermal conductivity of porous granular materials with metal filler in deferent media. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 1987. - Т. 51. - №2. - P.940 – 943.
110. Сафаров, М.М. Теплофизические свойства оксиди алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах / Махмадали Махмадиевич Сафаров // Дис...к.т. н. - 1986. – С. 198.
111. Аминов, Ш.А. Теплофизические, электрофизические и термодинамические свойства системы «вода+ герметик (пентэласт R - 116)» в зависимости от температуры и давления / Шамсулло Асоевич Аминов // Дис. к.т.н. – 2014. – С. 161.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение к глава 3.

Таблица П.3.1 – Экспериментальные значения изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями иридия в процессе адсорбции в питьевой воде при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	m _{Ir} , гр			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
0,5	0,515	0,513	0,511	0,510
1,0	0,523	0,52	0,518	0,516
1,5	0,531	0,527	0,524	0,522
2,0	0,538	0,533	0,53	0,527
2,5	0,544	0,538	0,535	0,531
3,0	0,549	0,543	0,539	0,535
3,5	0,553	0,547	0,543	0,539
4,0	0,556	0,551	0,547	0,542
4,5	0,559	0,555	0,55	0,545
5,0	0,561	0,557	0,553	0,548
5,5	0,563	0,559	0,555	0,550
6,0	0,565	0,561	0,556	0,551
6,5	0,566	0,562	0,557	0,551
7,0	0,567	0,562	0,557	0,551
7,5	0,567	0,562	0,557	0,551
8,0	0,567	0,562	0,557	
8,5	0,567			

Таблица П.3.2 – Экспериментальные значения изменения массы пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями иридия в процессе адсорбции в авиационном керосине при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	m _{Ir} , гр			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
1	2	3	4	5
0,5	0,513	0,511	0,509	0,507
1,0	0,520	0,518	0,516	0,513
1,5	0,528	0,525	0,522	0,518
2,0	0,535	0,530	0,527	0,522
2,5	0,541	0,535	0,532	0,527
3,0	0,546	0,540	0,536	0,531
3,5	0,550	0,544	0,540	0,535
4,0	0,554	0,548	0,544	0,539
4,5	0,557	0,553	0,548	0,543

продолжение табл. П.3.2.

1	2	3	4	5
5,0	0,560	0,556	0,551	0,546
5,5	0,562	0,558	0,553	0,548
6,0	0,563	0,559	0,554	0,549
6,5	0,564	0,560	0,555	0,549
7,0	0,565	0,560	0,555	0,549
7,5	0,565	0,560	0,555	
8,0	0,565			

Таблица П.3.3 – Зависимость коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями иридия от времени увлажнения в питьевой воде при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	$\Gamma \cdot 10^{-3}$ мол/гр			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
0,5	1,66	1,44	1,22	1,11
1,0	2,55	2,22	2,00	1,77
1,5	3,44	3,00	2,66	2,44
2,0	4,22	3,66	3,33	3,00
2,5	4,88	4,22	3,88	3,44
3,0	5,44	4,77	4,33	3,88
3,5	5,88	5,22	4,77	4,33
4,0	6,22	5,66	5,22	4,66
4,5	6,55	6,11	5,55	5,00
5,0	6,77	6,33	5,88	5,33
5,5	7,00	6,55	6,11	5,55
6,0	7,22	6,77	6,22	5,66
6,5	7,33	6,88	6,33	5,66
7,0	7,44	6,88	6,33	5,66

Таблица П.3.4 – Зависимость коэффициента адсорбции пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителями иридия от времени увлажнения в авиационном керосине при температуре 293 К и атмосферном давлении

t, час	$\Gamma \cdot 10^{-3}$ мол/гр			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
1	2	3	4	5
0,5	1,44	1,22	1,00	0,777
1,0	2,22	2,00	1,77	1,44
1,5	3,11	2,77	2,44	2,00
2,0	3,88	3,33	3,00	2,44
2,5	4,55	3,88	3,55	3,00
3,0	5,11	4,44	4,00	3,44
3,5	5,55	4,88	4,44	3,88

продолжение табл. П.3.4.

1	2	3	4	5
4,0	6,00	5,33	4,88	4,33
4,5	6,33	5,88	5,33	4,77
5,0	6,66	6,22	5,66	5,11
5,5	6,88	6,44	5,88	5,33
6,0	7,00	6,55	6,00	5,44
6,5	7,11	6,66	6,11	5,44
7,0	7,22	6,66	6,11	5,44

Таблица П.3.5 – Опытные данные для расчета коэффициента массоотдачи иридиевых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия при различном времени увлажнения в среде паров воды

t, час	$\beta \cdot 10^{-6}$ гр/с			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
0,5	8,3	7,2	6,1	5,5
1,0	6,3	5,5	5,0	4,4
1,5	5,7	5,0	4,4	4,0
2,0	5,2	4,5	4,1	3,7
2,5	4,8	4,2	3,8	3,4
3,0	4,5	3,9	3,6	3,2
3,5	4,2	3,7	3,4	3,0
4,0	3,8	3,5	3,2	2,9
4,5	3,6	3,3	3,0	2,7
5,0	3,3	3,1	2,9	2,6
5,5	3,1	2,9	2,7	2,5
6,0	3,0	2,8	2,5	2,3
6,5	2,8	2,6	2,4	2,1
7,0	2,6	2,4	2,2	2,0

Таблица П.3.6 – Опытные данные для расчета коэффициента массоотдачи иридиевых катализаторов на основе гранулированного пористого оксида алюминия при различном времени увлажнения в среде авиационного керосина

t, час	$\beta \cdot 10^{-6}$ гр/с			
	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
1	2	3	4	5
0,5	7,2	6,1	5,0	3,8
1,0	5,5	5,0	4,4	3,6
1,5	5,1	4,6	4,0	3,3
2,0	4,8	4,1	3,7	3,0
2,5	4,5	3,8	3,5	3,0
3,0	4,2	3,7	3,3	2,8
3,5	3,9	3,4	3,1	2,7
4,0	3,7	3,3	3	2,7
4,5	3,5	3,2	2,9	2,6

продолжение табл. 3.6.

1	2	3	4	5
5,0	3,3	3,1	2,8	2,5
5,5	3,1	2,9	2,6	2,4
6,0	2,9	2,7	2,5	2,2
6,5	2,7	2,5	2,3	2,0
7,0	2,5	2,3	2,1	1,9

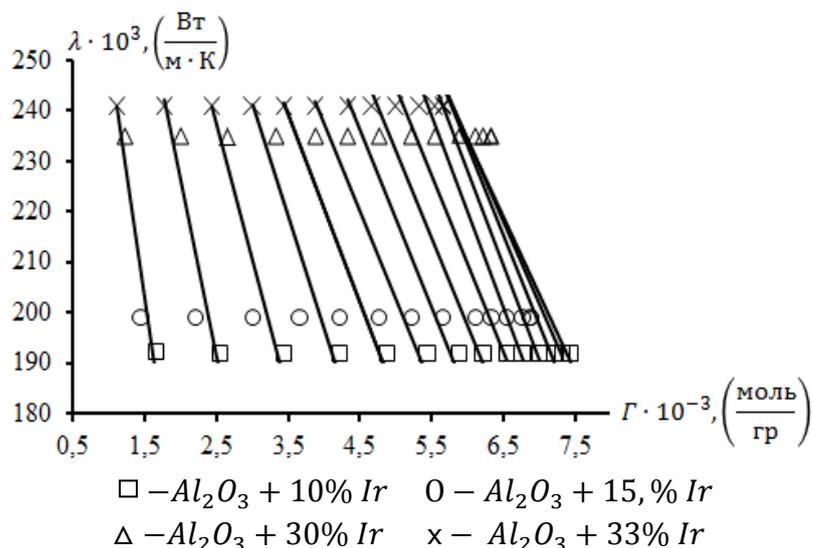


Рисунок П.3.1 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

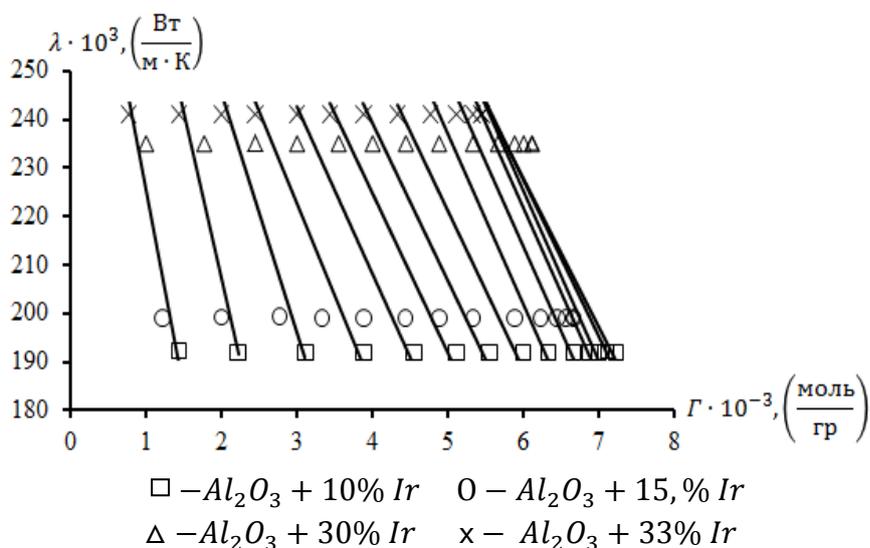


Рисунок П.3.2 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

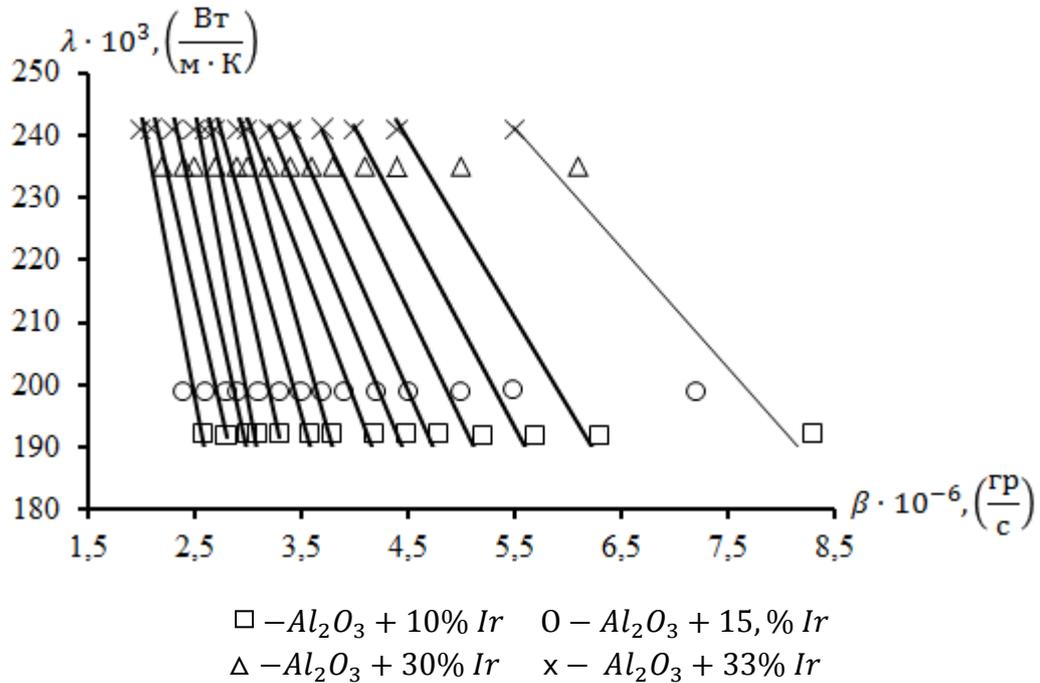


Рисунок П.3.3 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

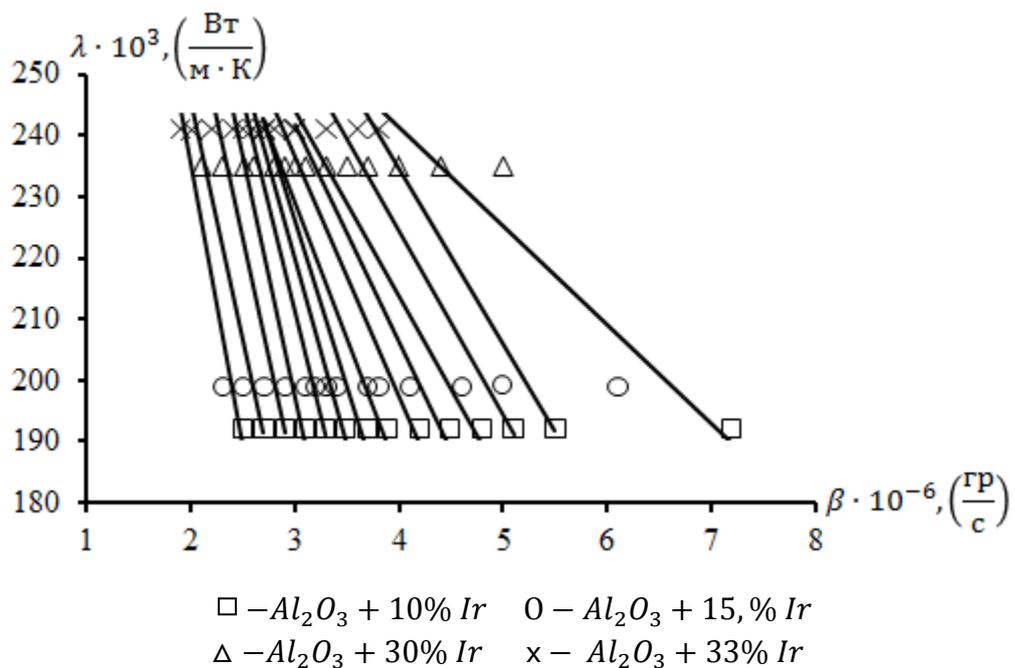


Рисунок П.3.4 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

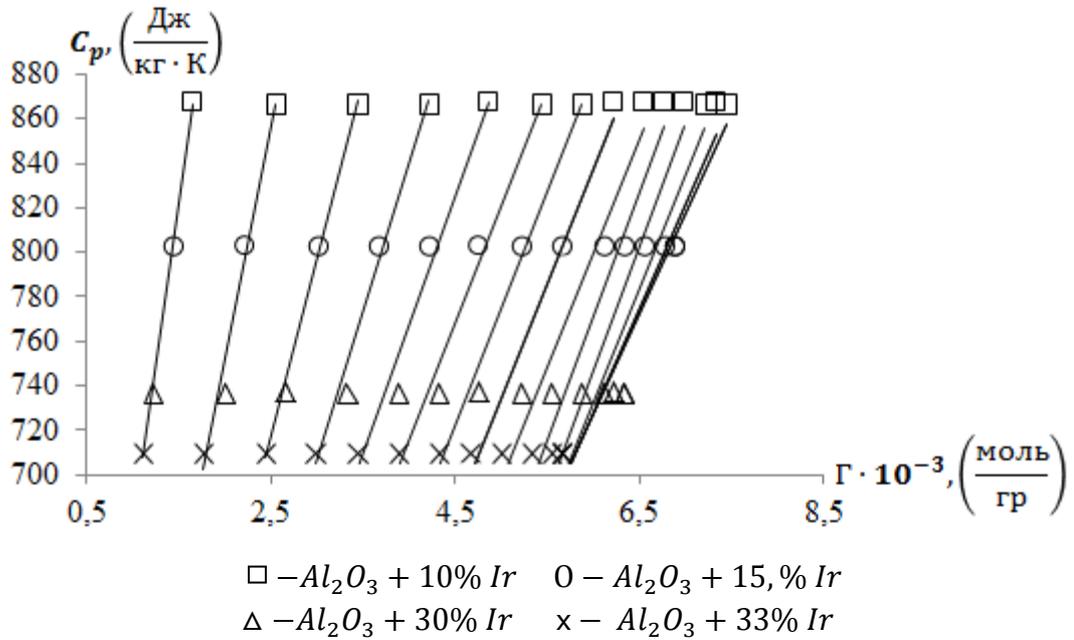


Рисунок П.3.5 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

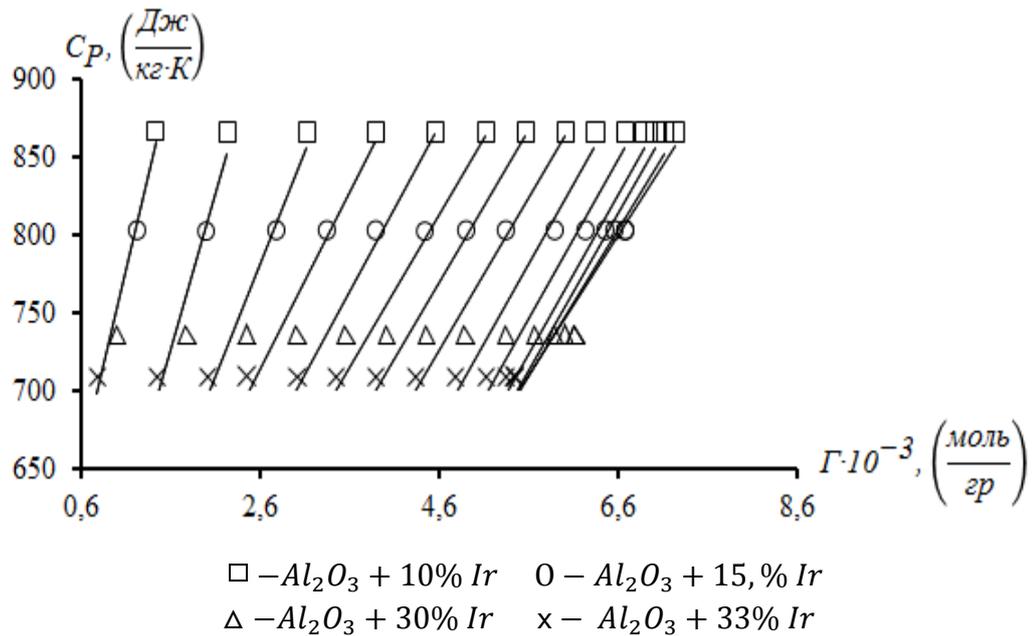


Рисунок П.3.6 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

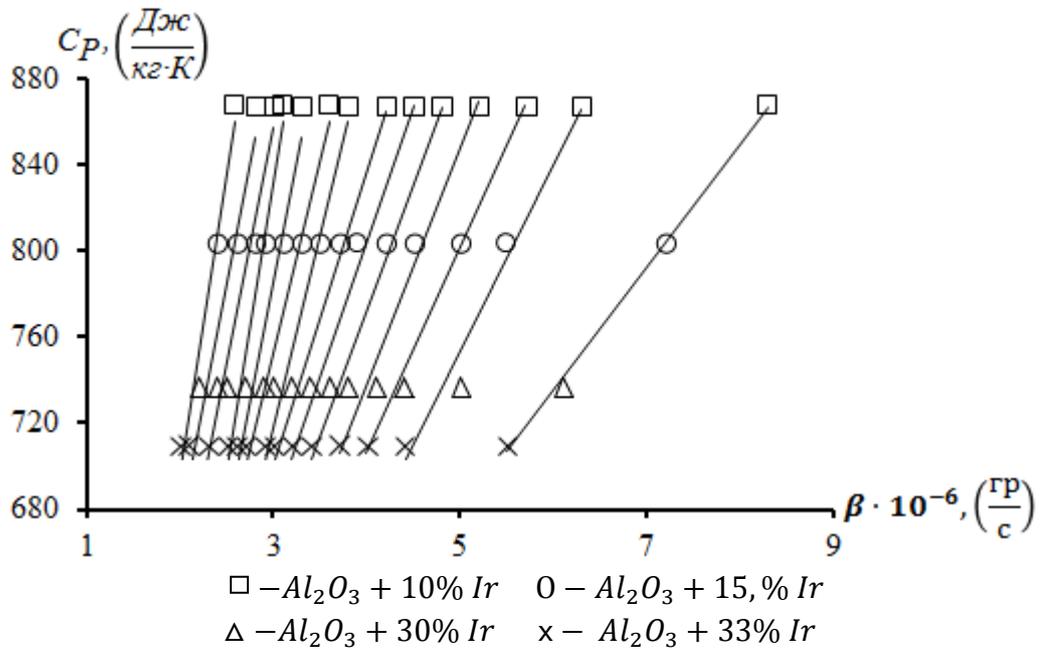


Рисунок П.3.7 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

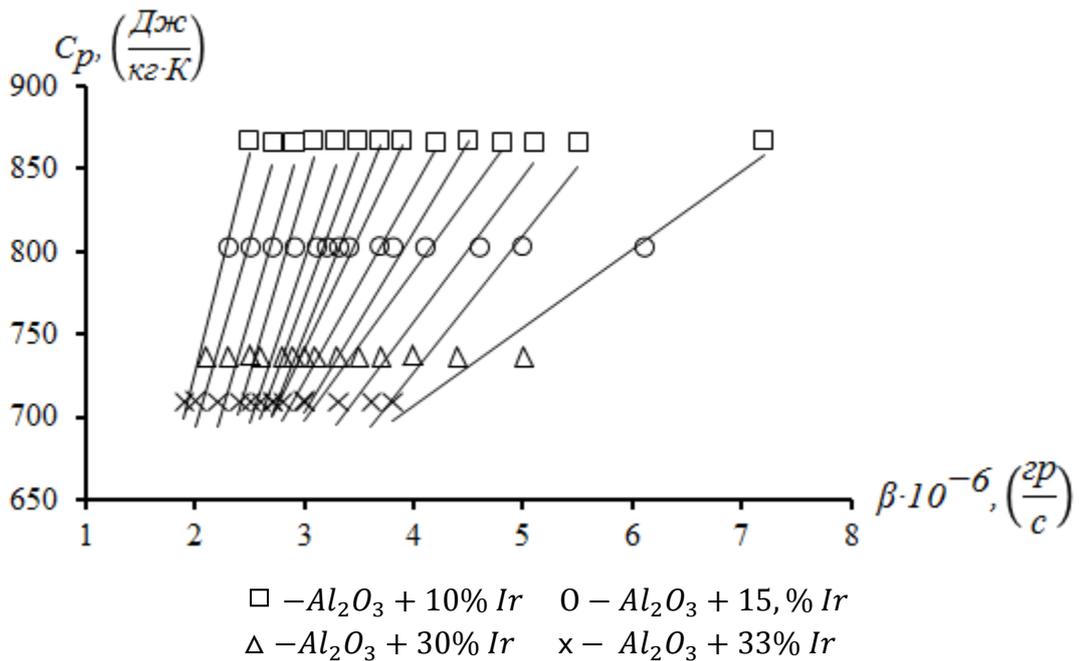


Рисунок П.3.8 – Корреляция между эффективной теплоемкостью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

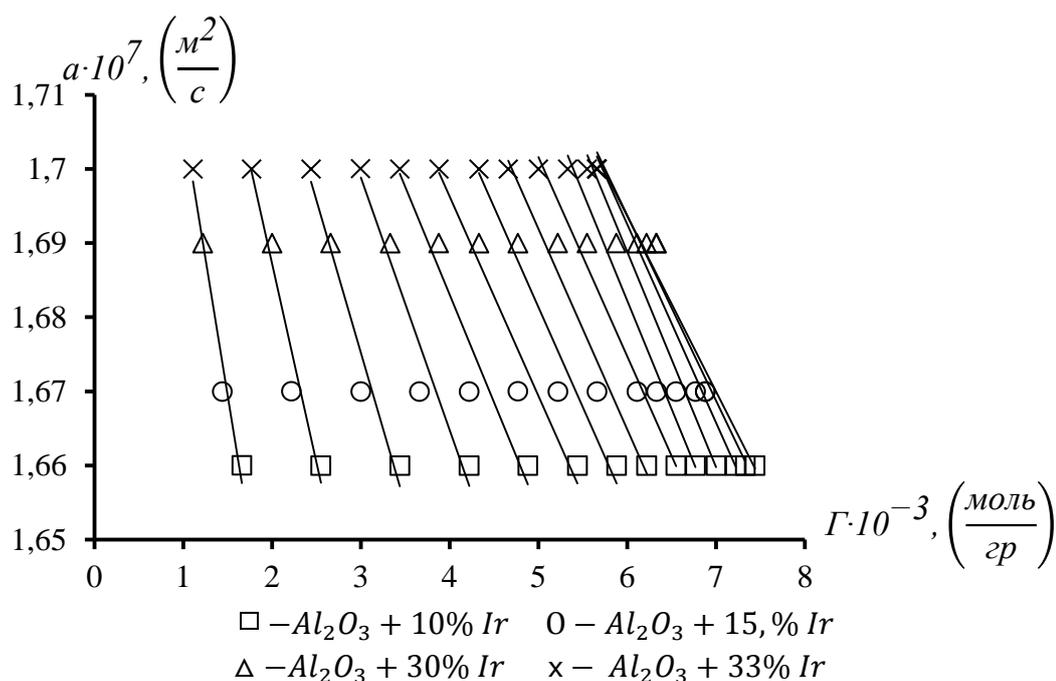


Рисунок П.3.9 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

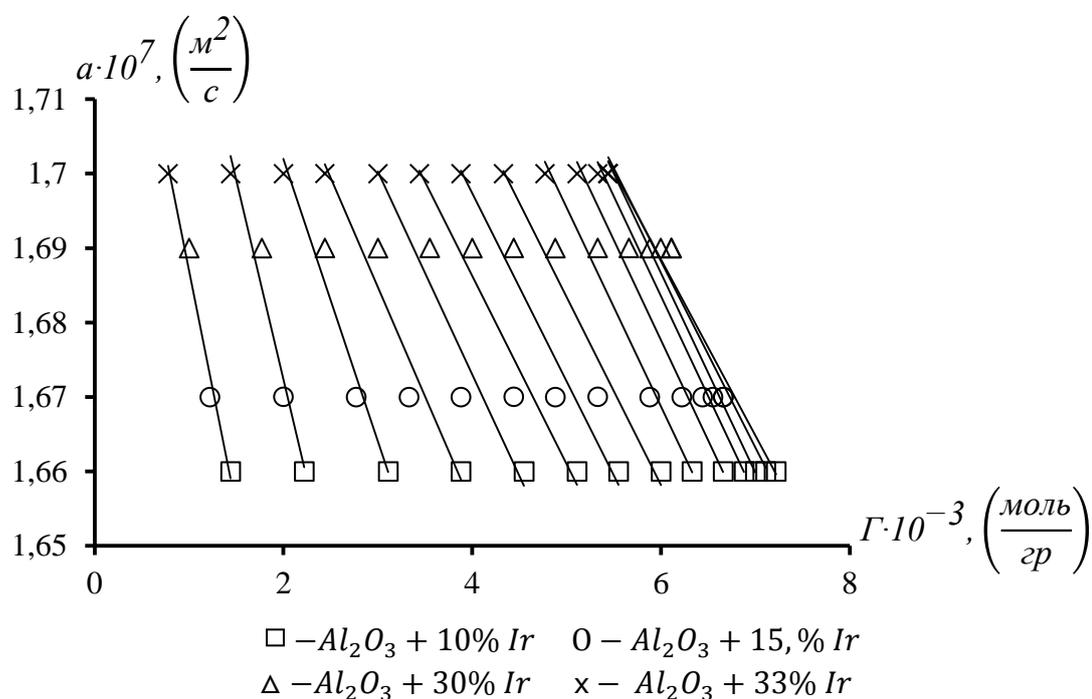


Рисунок П.3.10 – Корреляция между эффективной теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

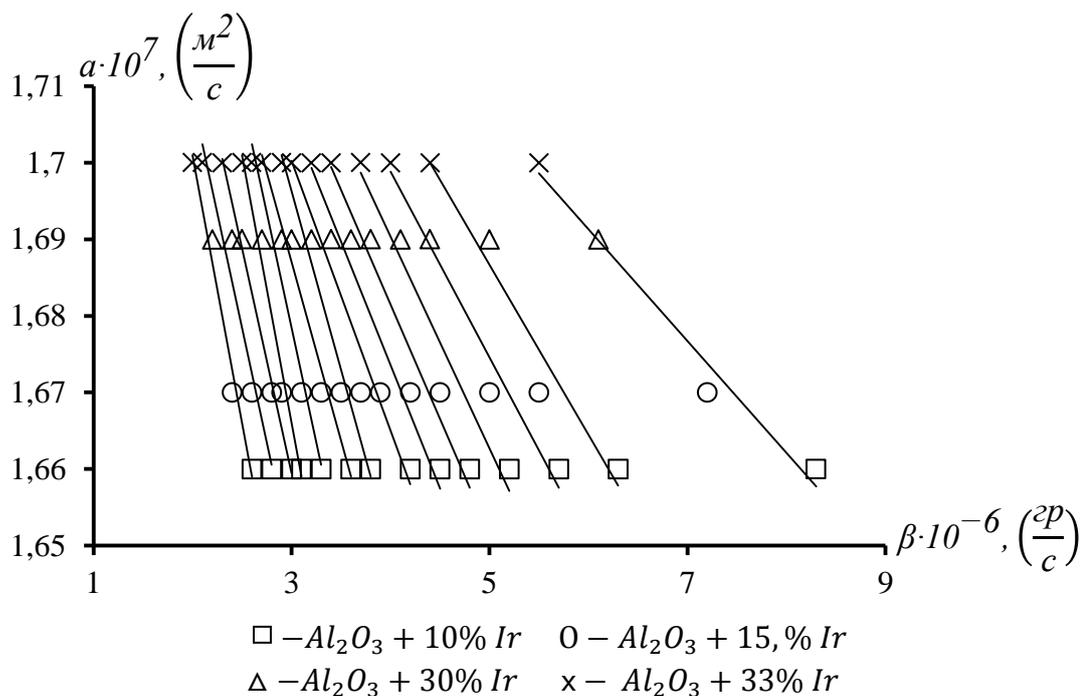


Рисунок П.3.11 – Корреляция между эффективной температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в питьевой воде при температуре 293К и атмосферном давлении.

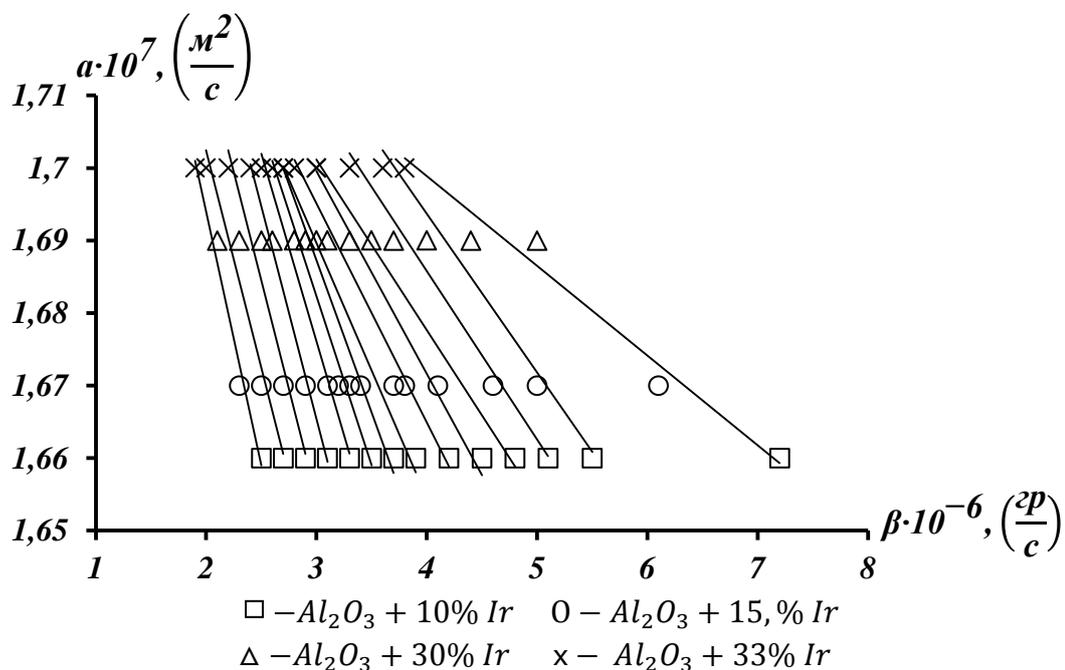


Рисунок П.3.12 – Корреляция между эффективной температуропроводностью и коэффициентом массоотдачи для пористого гранулированного оксида алюминия с наполнителем иридия, увлажненного в авиационном керосине при температуре 293К и атмосферном давлении.

Приложение к главе 4.

Таблица П.4.1 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

$\Gamma_{\text{экс}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Gamma_{\text{выч}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Delta = \frac{\Gamma_{\text{э}} - \Gamma_{\text{выч}}}{\Gamma_{\text{э}}} \cdot 100\%$			
Al_2O_3+11 4,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co	Al_2O_3+1 1,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co	Al_2O_3+1 1,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co
1,44	1,11	0,888	0,666	1,243	1,09	0,96	0,772	13	1,8	-8,1	-15,9
2,22	1,66	1,44	1,111	1,954	1,72	1,5	1,21	11,9	-3,6	-4,16	-8,9
2,77	2,22	1,88	1,55	2,6	2,29	2	1,62	6	-3,1	-6,38	-4,5
3,33	2,77	2,22	1,88	3,2	2,8	2,48	1,99	3,9	-1,08	-11,7	-5,85
3,88	3,22	2,66	2,22	3,72	3,28	2,88	2,31	4	-1,86	-8,2	-4
4,33	3,66	3	2,55	4,18	3,69	3,24	2,6	3,46	-0,8	-8	-1,96
4,77	4	3,33	2,88	4,69	4,13	3,63	2,9	1,67	-3,25	-9	-0,69
5,11	4,33	3,66	3,22	5,07	4,47	3,9	3,15	0,78	-3,23	-6,55	2,17
5,33	4,55	3,88	3,44	5,4	4,768	4,18	3,36	-1,3	-4,8	-7,73	-6,4
5,55	4,77	4,11	3,66	5,69	5	4,4	3,54	-2,5	-4,82	-7	3,27
5,66	5	4,33	3,88	5,92	5,2	4,58	3,68	-4,6	-4	-5,77	5,15
5,77	5,22	4,55	4,11	6	5,33	4,68	3,76	-3,98	-2,1	-2,85	8,5
5,88	5,33	4,77	4,44	6,18	5,45	4,78	3,847	-5,1	-2,25	-0,2	13,3

Таблица П.4.2 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в авиационном керосине с экспериментальными данными

$\Gamma_{\text{экс}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Gamma_{\text{выч}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Delta = \frac{\Gamma_{\text{э}} - \Gamma_{\text{выч}}}{\Gamma_{\text{э}}} \cdot 100\%$			
Al_2O_3+1 1,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co	Al_2O_3+1 1,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co	Al_2O_3+1 1,44% Co	Al_2O_3+1 5,7% Co	Al_2O_3+1 9,43% Co	Al_2O_3+2 5% Co
0,04	0,032	0,028	0,02	0,033	0,03	0,026	0,021	17,5	6,25	7	-5
0,064	0,056	0,044	0,036	0,058	0,052	0,045	0,037	9,37	7,14	-2,27	-2,77
0,088	0,076	0,06	0,052	0,082	0,0726	0,064	0,052	6,8	4,47	-6,66	0
0,108	0,092	0,076	0,064	0,103	0,0918	0,08	0,066	4,63	0,2	-5,26	-3
0,128	0,108	0,092	0,08	0,123	0,109	0,096	0,078	3,9	-0,92	-4,34	2,5
0,144	0,124	0,104	0,092	0,141	0,125	0,11	0,09	2	-0,8	-5,77	2,17
0,16	0,14	0,116	0,104	0,157	0,139	0,123	0,1	1,87	0,7	-6	3,84
0,172	0,152	0,128	0,116	0,17	0,152	0,13	0,109	1,16	0	-1,56	6
0,184	0,16	0,136	0,124	0,184	0,163	0,14	0,117	0	-1,87	-2,94	5,64
0,192	0,168	0,144	0,132	0,194	0,17	0,15	0,124	-1,04	-1,19	-4,16	6
0,196	0,176	0,152	0,14	0,2	0,18	0,16	0,13	-2	-2,27	-5,26	7
0,2	0,18	0,16	0,148	0,21	0,186	0,165	0,134	-5	-3,33	-3	9,46
0,204	0,184	0,164	0,152	0,215	0,19	0,169	0,138	-5,4	-3,26	-3,04	9,2

Таблица П.4.3 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего иридий и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

$\Gamma_{\text{экс}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Gamma_{\text{выч}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Delta = \frac{\Gamma_{\text{э}} - \Gamma_{\text{выч}}}{\Gamma_{\text{э}}} 100\%$			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$
1,66	1,44	1,22	1,11	1,52	1,448	1,23	1,18	8,43	-0,55	-0,8	-6,3
2,55	2,22	2	1,77	2,368	2,25	1,916	1,84	7,13	-1,35	4,2	-3,95
3,44	3	2,66	2,44	3,2	3,04	2,58	2,49	6,97	-1,33	3	-2
4,22	3,66	3,33	3	3,9	3,72	3,16	3,05	7,78	-1,39	5,1	-1,66
4,88	4,22	3,88	3,44	4,59	4,37	3,7	3,58	5,94	-3,55	4,6	-4
5,44	4,77	4,33	3,88	5,18	4,938	4,2	4	4,78	-3,52	3	-3
5,88	5,22	4,77	4,33	5,7	5,43	4,6	4,449	3,06	-4	3,56	-2,74
6,22	5,66	5,22	4,66	6,14	5,85	4,97	4,79	1,28	-3,35	4,78	-2,79
6,55	6,11	5,55	5	6,52	6,2	5,278	5,09	0,46	-1,47	4,9	-1,8
6,77	6,33	5,88	5,33	6,8	6,5	5,52	5,326	-0,44	-2,68	6,12	0,075
7	6,55	6,11	5,55	7,05	6,72	5,7	5,5	-0,7	-2,6	6,7	0,9
7,22	6,77	6,22	5,66	7,2	6,87	5,84	5,63	0,277	-1,47	6,1	0,53
7,33	6,88	6,33	5,66	7,3	6,95	5,91	5,7	0,4	-1	6,6	-0,7
7,44	6,88	6,33	5,66	7,3	6,96	5,92	5,71	1,88	-1,16	6,47	-0,88

Таблица П.4.4 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего иридий и увлажненного в авиационном керосине с экспериментальными данными

$\Gamma_{\text{экс}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Gamma_{\text{выч}} \cdot 10^{-3}$, (моль/гр)				$\Delta = \frac{\Gamma_{\text{э}} - \Gamma_{\text{выч}}}{\Gamma_{\text{э}}} 100\%$			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$
1,44	1,22	1,00	0,777	1,21	1,14	0,95	0,9	15,9	6,55	5	-15,8
2,22	2,00	1,77	1,44	2,08	1,96	1,63	1,57	6,3	2	7,9	-9
3,11	2,77	2,44	2,00	2,88	2,73	2,27	2,18	7,4	1,44	6,96	-9
3,88	3,33	3,00	2,44	3,62	3,43	2,85	2,74	6,7	-3	5	-12,3
4,55	3,88	3,55	3,00	4,3	4,07	3,38	3,25	5,5	-4,89	4,78	-8,3
5,11	4,44	4,00	3,44	4,91	4,65	3,87	3,7	3,9	-4,72	3,25	-7,5
5,55	4,88	4,44	3,88	5,45	5,16	4,3	4,12	1,8	-5,73	3,15	-6,18
6,00	5,33	4,88	4,33	5,93	5,62	4,68	4,49	1,16	-5,44	4,09	-3,69
6,33	5,88	5,33	4,77	6,35	6	5	4,8	-0,31	-2,04	6,19	-0,62
6,66	6,22	5,66	5,11	6,7	6,34	5,28	5,07	-0,6	-1,92	6,7	0,78
6,88	6,44	5,88	5,33	6,99	6,6	5,51	5,28	-1,59	-2,48	6,29	0,93
7,00	6,55	6,00	5,44	7,21	6,8	5,68	5,45	-3	-3,8	5,33	-0,18
7,11	6,66	6,11	5,44	7,37	6,97	5,8	5,57	-3,65	-4,65	5,07	-2,38
7,22	6,66	6,11	5,44	7,46	7,06	5,88	5,64	-3,32	-6	3,76	-3,67

Таблица П.4.5 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

$\beta_{\text{экс}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\beta_{\text{выч}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\Delta = \frac{\beta_{\text{э}} - \beta_{\text{выч}}}{\beta_{\text{э}}} 100\%$			
Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co	Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co	Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co
7,2	5,5	4,4	3,3	5,4	4,72	4,1	3,275	25	14	6,8	0,757
5,2	4,1	3,6	2,7	4,926	4,3	3,74	2,99	5,27	-4,87	-3,88	-10
4,6	3,7	3,1	2,5	4,49	3,93	3,4	2,72	2,4	-6,2	-9,67	-8,8
4,1	3,4	2,7	2,3	4,09	3,58	3,11	2,48	0,24	-5,3	-15	-7,82
3,8	3,2	2,6	2,3	3,75	3,28	2,85	2,27	1,3	-2,5	-9,6	1,3
3,6	3	2,5	2,2	3,443	3	2,617	2,09	4,36	0	-4,68	5
3,4	2,8	2,4	2,1	3,185	2,79	2,42	1,934	6,32	0,357	-0,83	7,9
3,1	2,7	2,4	2	2,97	2,6	2,25	1,8	4,19	3,7	6,25	10
2,9	2,5	2,2	2	2,795	2,448	2,125	1,697	3,62	2,08	3,4	15
2,7	2,4	2,1	1,9	2,668	2,338	2,028	1,62	1,18	2,58	3,42	14
2,5	2,3	2	1,8	2,58	2,26	1,96	1,567	-3,2	1,74	2	13
2,4	2,1	1,9	1,8	2,54	2,22	1,93	1,543	-5,83	-5,7	-1,57	14
2,2	2	1,8	1,7	2,53	2,21	1,925	1,537	-15	-10,5	-6,94	9,58

Таблица П.4.6 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в авиационном керосине с экспериментальными данными

$\beta_{\text{экс}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\beta_{\text{выч}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\Delta = \frac{\beta_{\text{э}} - \beta_{\text{выч}}}{\beta_{\text{э}}} 100\%$			
Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co	Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co	Al ₂ O ₃ +1 1,44% Co	Al ₂ O ₃ +1 5,7% Co	Al ₂ O ₃ +1 9,43% Co	Al ₂ O ₃ +2 5% Co
5,5	4,4	3,8	2,7	4,56	4	3,57	2,89	17	9	6	-7
4,4	3,8	3	2,5	4,2	3,726	3,3	2,67	4,54	1,94	-10	-6,8
4	3,5	2,7	2,4	3,89	3,448	3	2,47	2,75	1,48	-11	-2,9
3,7	3,1	2,6	2,2	3,6	3,19	2,8	2,29	2,7	-2,9	-7,69	-4
3,5	3	2,5	2,2	3,35	2,96	2,6	2,13	4,28	1,33	-4	3
3,3	2,8	2,4	2,1	3,12	2,76	2,45	1,987	5,45	1,428	-2	5,38
3,1	2,7	2,3	2	2,928	2,59	2,29	1,86	5,548	4	0,43	7
2,9	2,6	2,2	2	2,745	2,43	2,15	1,74	5,34	6,5	2,27	13
2,8	2,4	2	1,9	2,62	2,32	2,05	1,68	6,428	3,33	-2,5	11,6
2,6	2,3	2	1,8	2,53	2,24	1,98	1,6	2,69	2,6	1	11
2,4	2,2	1,9	1,7	2,44	2,16	1,9	1,55	-1,66	1,8	0	8,8
2,3	2	1,8	1,7	2,4	2,13	1,89	1,535	-4,35	-6,5	-5	9,7
2,1	1,9	1,7	1,6	2,4	2,1	1,88	1,53	-14	-10	-10,6	4,37

Таблица П.4.7 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего иридий и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

$\beta_{\text{экс}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\beta_{\text{выч}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\Delta = \frac{\beta_{\text{э}} - \beta_{\text{выч}}}{\beta_{\text{э}}} 100\%$			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$
8,3	7,2	6,1	5,5	6,78	6,45	5,46	5,2	18	10,4	10,5	5,45
6,3	5,5	5	4,4	6,17	5,87	4,97	4,74	2	-6,7	0,6	-7,7
5,7	5	4,4	4	5,63	5,35	4,53	4,32	1,22	-7	-2,95	-8
5,2	4,5	4,1	3,7	5,14	4,89	4,14	3,94	1,15	-8,66	-0,97	-6,48
4,8	4,2	3,8	3,4	4,7	4,46	3,78	3,6	2,08	-6,19	0,52	-5,88
4,5	3,9	3,6	3,2	4,289	4	3,45	3,29	4,68	-2,56	4,16	-2,8
4,2	3,7	3,4	3	3,94	3,74	3,17	3,02	6,19	-1,08	6,76	-0,66
3,8	3,5	3,2	2,9	3,63	3,46	2,93	2,79	4,47	1,14	8,4	3,8
3,6	3,3	3	2,7	3,38	3,2	2,72	2,595	6,11	3,03	9,33	3,88
3,3	3,1	2,9	2,6	3,2	3,02	2,55	2,43	3	2,58	12	6,5
3,1	2,9	2,7	2,5	3,02	2,87	2,43	2,3	2,58	1,03	10	8
3	2,8	2,5	2,3	2,89	2,75	2,33	2,22	3,66	1,78	6,8	3,47
2,8	2,6	2,4	2,1	2,84	2,7	2,29	2,18	-1,428	-3,84	4,58	-3,8
2,6	2,4	2,2	2	2,83	2,697	2,28	2,175	-8,8	-12	-3,63	-8,75

Таблица П.4.8 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего иридий и увлажненного в авиационном керосине с экспериментальными данными

$\beta_{\text{экс}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\beta_{\text{выч}} \cdot 10^{-6}$, (кг/с)				$\Delta = \frac{\beta_{\text{э}} - \beta_{\text{выч}}}{\beta_{\text{э}}} 100\%$			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$
7,2	6,1	5	3,8	5,9	5,56	4,54	4,34	18	8,85	9,2	-14
5,5	5	4,4	3,6	5,5	5,18	4,24	4,05	0	-3,6	3,63	-12,5
5,1	4,6	4	3,3	5,13	4,83	3,95	3,7	-0,58	-5	1,25	-12
4,8	4,1	3,7	3	4,78	4,5	3,68	3,5	0,4	9,75	0,54	-16
4,5	3,8	3,5	3	4,46	4,2	3,44	3,28	0,88	-10,5	1,7	-9,3
4,2	3,7	3,3	2,8	4,17	3,9	3,2	3	0,7	-5,4	3	-7
3,9	3,4	3,1	2,7	3,9	3,68	3	2,87	0	-8,2	3,2	-6,3
3,7	3,3	3	2,7	3,67	3,46	2,83	2,7	0,8	-4,8	5,6	0
3,5	3,2	2,9	2,6	3,46	3,26	2,67	2,55	1,14	-1,87	7,9	1,92
3,3	3,1	2,8	2,5	3,28	3	2,528	2,41	0,6	3,2	9,7	3,6
3,1	2,9	2,6	2,4	3,12	2,94	2,4	2,3	-0,64	-1,38	7,7	4,16
2,9	2,7	2,5	2,2	2,99	2,8	2,3	2,2	-3,1	-3,7	8	0
2,7	2,5	2,3	2	2,89	2,7	2,23	2,13	-7	-8	3	-6,5
2,5	2,3	2,1	1,9	2,8	2,65	2,17	2	-12	-15	-3,3	-5,26

Таблица П.4.9 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента теплопроводности в зависимости от коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	$\lambda_{\text{экс}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$				$\lambda_{\text{выч}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$				$\Delta, \%$			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со
0,5	173	182	191	200	163	180	191,8	203	5,78	1	-0,4	-1,5
1	173	182	191	200	165	184	191	202	4,6	-1	0	-1
1,5	173	182	191	200	165,5	180	189	197,7	4,33	1	1	1,15
2	173	182	191	200	171	182	193,6	200	1,15	0	-1,36	0
2,5	173	182	191	200	170,4	182	191,9	199,6	1,5	0	-0,47	0,2
3	173	182	191	200	171,4	181,9	192	199	0,92	0,05	-0,52	0,5
3,5	173	182	191	200	171,7	182,6	192	198	0,75	-0,33	-0,52	1
4	173	182	191	200	171,2	181,5	190	196	1	0,27	0,52	2
4,5	173	182	191	200	174	183	191,6	197	-0,57	-0,55	-0,3	1,5
5	173	182	191	200	174,7	183,7	191	196,5	-0,98	-0,93	0	1,75
5,5	173	182	191	200	176	183	190,7	195,7	-1,73	-0,55	0,15	2,15
6	173	182	191	200	176,8	182,7	189,9	194,6	-2,19	-0,38	0,57	2,7
6,5	173	182	191	200	176,6	182	188	191,8	-2	0	1,57	4,1

Таблица П.4.10 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента теплопроводности в зависимости от коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	$\lambda_{\text{экс}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$				$\lambda_{\text{выч}} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$				$\Delta, \%$			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со
0,5	173	182	191	200	157,9	176,8	189	201	8,7	2,85	1	-0,5
1	173	182	191	200	173	187	193	204,5	0	-2,74	-1	-2,25
1,5	173	182	191	200	175	187	195	203,6	-1,15	-2,74	-2	-1,8
2	173	182	191	200	175,7	186	197	203	-1,56	-2,2	-3,14	-1,5
2,5	173	182	191	200	174	184	194	199	-0,578	-1	-1,57	0,5
3	173	182	191	200	171,7	182	192	197	0,75	0	-0,52	1,5
3,5	173	182	191	200	169,7	181,7	189,7	195,7	1,9	0,16	0,68	2,15
4	173	182	191	200	171	179	186	194,5	1,156	1,64	2,6	2,75
4,5	173	182	191	200	171	180	187	192	1,156	1	2	4
5	173	182	191	200	173	180	187	192	0	1	2	4
5,5	173	182	191	200	176	181	188,5	193	-1,73	0,55	1,3	3,5
6	173	182	191	200	178	186	190,8	193	-2,89	-2,2	0,1	3,5
6,5	173	182	191	200	184	189	194	196	-6,35	-3,84	-1,57	2

Таблица П.4.11 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента теплоемкости в зависимости от коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	С _{р.экс} , Дж/(кг·К)				С _{р.выч} , Дж/(кг·К)				Δ, %			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со
0,5	919	874	846	826	927	872	835	798	-0,87	0,22	1,3	3,38
1	919	874	846	826	933	871	846,6	810	-1,52	0,34	-0,07	1,93
1,5	919	874	846	826	921	874,7	846	818	-0,2	-0,08	0	0,96
2	919	874	846	826	918	879	841	817	0,1	-0,57	0,59	1
2,5	919	874	846	826	918,6	879	845,8	819,6	0,04	-0,57	0,02	0,77
3	919	874	846	826	916	880	845,7	822	0,32	-0,68	0,03	0,48
3,5	919	874	846	826	915,7	878,8	846,7	825	0,35	-0,54	-0,08	0,12
4	919	874	846	826	913	878,6	849	829,6	0,65	-0,52	-0,35	-0,43
4,5	919	874	846	826	908	875,9	848	829,8	1,2	-0,2	-0,23	-0,46
5	919	874	846	826	905,7	875	849	831	1,44	-0,11	-0,35	-0,6
5,5	919	874	846	826	901	876	851	833,9	1,95	-0,22	-0,59	-0,95
6	919	874	846	826	900,6	880	855	839	2	-0,68	-1	-1,57
6,5	919	874	846	826	898	878	858	846	2,28	-0,45	-1,4	-2,42

Таблица П.4.12 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента теплоемкости в зависимости от коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	С _{р.экс} , Дж/(кг·К)				С _{р.выч} , Дж/(кг·К)				Δ, %			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3+ 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3+ 25% Со
0,5	919	874	846	826	971	901	856	811	-5,65	-3	-1,18	1,8
1	919	874	846	826	912	862	839	798	0,76	1,37	0,82	3,38
1,5	919	874	846	826	908	862	832	802	1,19	1,37	1,65	2,9
2	919	874	846	826	905	865	826	804	1,52	1	2,36	2,66
2,5	919	874	846	826	910	873	836	817	0,97	0,11	1,18	1
3	919	874	846	826	921	880	846	825	-0,21	-0,68	0	0,12
3,5	919	874	846	826	928	883	853	831	-0,97	-1	-0,82	-0,6
4	919	874	846	826	944	909	883	848	-2,72	-0,04	-4,37	-2,66
4,5	919	874	846	826	925	890	865	847	-0,65	-0,02	-2,24	-2,54
5	919	874	846	826	918	891	864	846	0,1	-1,94	-2,12	-2,42
5,5	919	874	846	826	906	887	859	841	1,4	-1,48	-1,53	-0,01
6	919	874	846	826	898	870	852	842	2,28	0,45	-0,7	-1,93
6,5	919	874	846	826	877	858	840	831	4,57	1,83	0,7	-0,6

Таблица П.4.13 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента температуропроводности в зависимости от коэффициента адсорбции гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	$\alpha_{\text{ЭКС}} \cdot 10^7, (\text{M}^2/\text{C})$				$\alpha_{\text{ВЫЧ}} \cdot 10^7, (\text{M}^2/\text{C})$				$\Delta, \%$			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со
0,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,6	1,62	1,64	1,66	1,23	0,61	0	0
1	1,62	1,63	1,64	1,66	1,6	1,63	1,64	1,65	1,23	0	0	0,6
1,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,6	1,62	1,64	1,65	1,23	0,61	0	0,6
2	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
2,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
3	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
3,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
4	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
4,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,65	0	0	0	0,6
5,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,65	0	0	0	0,6
6	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,64	0	0	0	1,2
6,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,64	0	0	0	1,2

Таблица П.4.14 – Результаты сравнения вычисленных значений коэффициента температуропроводности в зависимости от коэффициента массоотдачи гранулированного пористого оксида алюминия, содержащего кобальт и увлажненного в питьевой воде с экспериментальными данными

Час Ы	$\alpha_{\text{ЭКС}} \cdot 10^7, (\text{M}^2/\text{C})$				$\alpha_{\text{ВЫЧ}} \cdot 10^7, (\text{M}^2/\text{C})$				$\Delta, \%$			
	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со	Al ₂ O ₃ + 11,44 % Со	Al ₂ O 3 + 15,7 % Со	Al ₂ O ₃ + 19,43 % Со	Al ₂ O 3 + 25% Со
0,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,59	1,62	1,64	1,65	1,85	0,61	0	0,6
1,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,66	0	0	0	0
1,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,66	0	0	0	0
2,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,65	1,65	0	0	-0,6	0,6
2,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
3,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
3,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,64	1,65	0,61	0	0	0,6
4,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,62	1,63	1,64	0,61	0,61	0,6	1,2
4,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,63	1,64	0,61	0	0,6	1,2
5,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,61	1,63	1,63	1,64	0,61	0	0,6	1,2
5,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,62	1,637	1,64	0	0,61	0,18	1,2
6,0	1,62	1,63	1,64	1,66	1,62	1,63	1,64	1,64	0	0	0	1,2
6,5	1,62	1,63	1,64	1,66	1,63	1,64	1,64	1,65	-0,61	-0,61	0	0,6

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН
ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

УДОСТОВЕРЕНИЕ

Гражданин **Абдуназаров С.С.**

Является автором изобретения **СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
АДСОРБЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.**

На изобретение выдан малый патент №ТJ **824**

Патентообладатель **Сафаров М.М.**

Страна **Республика Таджикистан**

Соавторы **Сафаров М.М., Джураев Д.С., Холиков М.М., Тагоев С.А., Тиллоева Т.Р.,
Ризоев С.Г., Зарипова М.А., Мирзомаматов А.Г., Норов З.Ю.,
Махмадиев Б.М.**

Приоритет изобретения **17.03.2016**

Дата подачи заявки **17.03.2016**

Заявка № **1601017**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Республики Таджикистан

25 января 2017

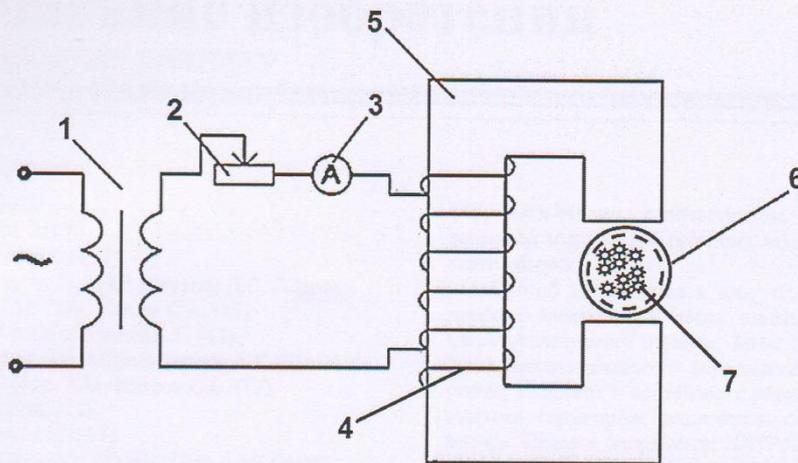
Малый действителен с **17 марта 2016**
Патент

г. по **17 марта 2026**

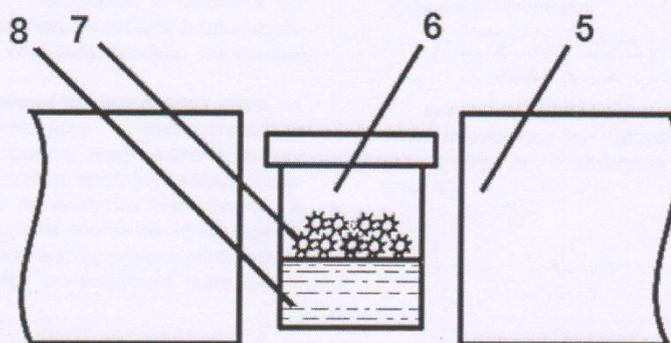
Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот,
установленных действующим законодательством



СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АДСОРБЦИИ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Фиг. 1



Фиг. 2

Компьютерный набор: Фатхуллова М.С.

Заказ

Тираж

Подписное

Национальный патентно-информационный центр РТ
734042, г. Душанбе, ул. Айни, 14а

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН
ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

УДОСТОВЕРЕНИЕ

Гражданин **Абдуназаров С.С.**

Является автором изобретения СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
АДСОРБЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ
АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ
На изобретение выдан малый патент №ТJ **825**

Патентообладатель **Сафаров М.М.**

Страна **Республика Таджикистан**

Соавторы **Сафаров М.М., Джураев Д.С., Холиков М.М., Тагоев С.А., Тиллоева Т.Р.,
Ризоев С.Г., Зарипова М.А., Мирзомамадов А.Г., Норов З.Ю.,
Махмадиев Б.М.**

Приоритет изобретения **17.03.2016**

Дата подачи заявки **17.03.2016**

Заявка № **1601018**

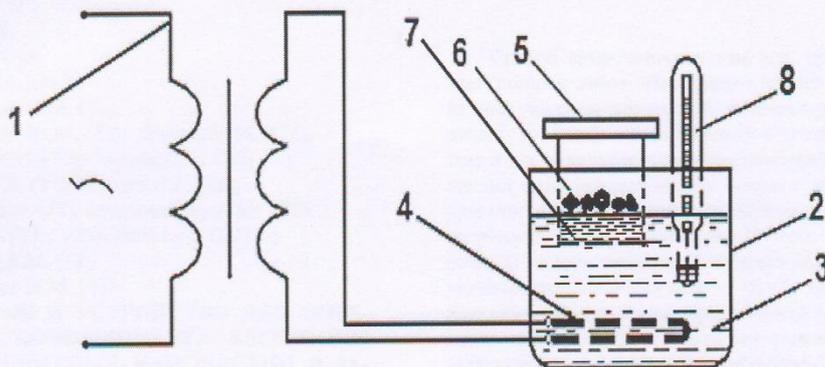
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Республики Таджикистан **25 января 2017**

Малый действителен с **17 марта 2016** г. по **17 марта 2026**
Патент

Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот,
установленных действующим законодательством



СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АДСОРБЦИИ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУР ПРИ
АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ



Фиг. 1

Компьютерный набор: Фатхуллаева М.С.

Заказ

Тираж

Подписное

Национальный патентно-информационный центр РТ
734042, г. Душанбе, ул. Айни, 14а

