

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

П.В. Балабанов

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ
И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Часть 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Рекомендована научно-техническим советом
университета в качестве монографии*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 620.1.08
ББК Л113-1
Б20

Р е ц е н з е н т ы:

Заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Росхимзащита»
по науке и инновациям, кандидат технических наук

С.Б. Путин

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

В.Н. Чернышов

Балабанов, П.В.

Б20 Методы и средства исследования характеристик тепло- и массо-переноса регенеративных продуктов и поглотителей для систем жизнеобеспечения. Ч. 1: Методы и средства определения теплофизических характеристик : монография / П.В. Балабанов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 96 с. – 100 экз.

ISBN 978-5-8265-1115-2

Содержит теоретические и практические сведения о применении методов и средств измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов и поглотителей диоксида углерода.

Предназначена для научных работников, аспирантов, магистрантов и студентов, специализирующихся на применении теплофизических методов и приборов для исследования хемосорбентов, применяемых в коллективных и индивидуальных средствах защиты органов дыхания человека. Приведенные экспериментальные данные о теплофизических характеристиках хемосорбентов могут быть полезны для решения задач управления качеством процессов регенерации воздуха.

УДК 620.1.08

ББК Л113-1

ISBN 978-5-8265-1115-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

Усиливающееся негативное влияние химических факторов на человека вследствие физического износа оборудования, ошибок обслуживающего персонала, нарушения правил хранения, обращения и утилизации опасных веществ и материалов, активизации террористических проявлений в отношении опасных объектов и других причин, обусловили тот факт, что обеспечение химической и биологической безопасности является одним из важнейших направлений укрепления национальной безопасности Российской Федерации. В «Основах государственной политики в области обеспечения химической и биологической безопасности РФ» (от 04.12.2003 № ПР-2194) сказано, что одной из задач в области развития фундаментальной и прикладной науки, технологий и техники по обеспечению химической и биологической безопасности является «разработка и внедрение систем комплексной индивидуальной и коллективной защиты от опасных химических и биологических факторов...».

В случае возникновения чрезвычайных ситуаций, сопровождающихся образованием непригодной для дыхания человека атмосферы, для обеспечения жизнедеятельности используют коллективные и индивидуальные средства защиты (КиИСЗ). Область применения КиИСЗ чрезвычайно широка. Они используются на объектах ВМФ (подводных лодках, батискафах), востребованы в космосе, нашли широкое применение в командных пунктах ракетных войск, узлах связи, пунктах управления, убежищах ГО, в местах укрытия промышленных предприятий, АЭС, в пунктах управления газовой и нефтяной промышленности при возникновении аварийных ситуаций. Средствами индивидуальной защиты органов дыхания пользуются шахтеры, подразделения пожарных служб, горно- и газоспасатели, гражданское население, оказавшееся в непригодной для дыхания атмосфере, например в условиях задымления помещений. Этот список можно продолжить и далее, однако и приведенных примеров достаточно для того, чтобы оценить ту роль, которую играют КиИСЗ в укреплении национальной безопасности Российской Федерации.

Главной задачей средств коллективной и индивидуальной защиты является удаление диоксида углерода и других вредных примесей из очищаемого воздуха и обеспечение достаточного количества кислорода для дыхания человека. Эта задача решается путем применения в составе КиИСЗ сорбентов – регенеративных продуктов (РП) на основе супероксидов щелочных и щелочноземельных металлов, а также химических поглотителей (ХП) на основе гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Эффективное осуществление работ по проектированию новых КиИСЗ, прогнозирование времени их защитного действия, газового состава

ва защищаемого объекта, проведение сертификации средств защиты невозможно без знания теплофизических и сорбционных характеристик РП и ХП. Данная монография посвящена разработке методов исследования теплофизических характеристик (ТФХ) серийно выпускаемых РП и ХП.

В настоящее время известно огромное количество методов и средств измерения ТФХ твердых и сыпучих материалов, большая часть которых была разработана в прошлом веке. Это можно объяснить бурным развитием промышленности, внедрением технологий мирного атома, полетом человека в космос и, как следствие, необходимостью исследования теплопроводности, теплоемкости и других физических характеристик новых материалов, применяемых в тех или иных отраслях деятельности человека.

Возможно ли применение существующих методов для исследования теплофизических характеристик сорбентов, применяемых в системах жизнеобеспечения? Для ответа на этот вопрос в первой главе приводятся сведения о применяемых сорбентах, анализируются условия их применения в составе КиИСЗ, рассматриваются известные методы и средства измерения с позиции возможностей их использования для исследований ТФХ серийно выпускаемых РП и ХП. Необходимо отметить, что в процессе регенерации воздуха изменяется химический состав сорбентов, в случае насыпного слоя – порозность, что оказывает существенное влияние на значения теплопроводности и объемной теплоемкости. Поэтому во второй главе приведены теоретические основы новых методов исследования закономерностей изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации воздуха. Для исследований применяют специальные устройства, которые позволяют осуществлять продувку газо-воздушной смеси (ГВС), обогащенной диоксидом углерода, через слой сорбента с целью изменения химического состава, неразрушающим методом определяется степень его отработки, зависящая от времени продувки и параметров ГВС, после чего измеряются эффективные ТФХ слоя, свойства которого изменились. В третьей главе содержатся теоретические оценки погрешностей определения ТФХ сорбентов, даны рекомендации по определению рациональных режимных параметров проведения экспериментов, конструкционных размеров измерительных ячеек, что позволяет повысить точность измерения. Четвертая глава содержит описание технических средств, применяемых для реализации методов исследования, описание алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных установок для исследований теплофизических характеристик сорбентов. В пятой главе приведены результаты практического применения разработанных методов по исследованию теплофизических характеристик некоторых серийных регенеративных продуктов и новых перспективных материалов.

Работа выполнена по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» в соответствии с госконтрактом № 14.740.11.0141.

Глава 1

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТФХ СОРБЕНТОВ

1.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Для удаления диоксида углерода и других примесей из воздуха применяют адсорбционные, абсорбционные, ионообменные, методы низкотемпературного вымораживания, электрохимические методы [1 – 22]. Причем первые три из перечисленных методов предполагают наличие поглотителей – твердых или жидких. В качестве жидких поглотителей диоксида углерода могут выступать растворы едкого натра (NaOH) или едкого калия (KOH). В качестве адсорбентов для осуществления низкотемпературного (при температурах порядка 123...163 °K) процесса физической адсорбции применяют мелкопористые силикагели марки КСМ и КСК, при высоких давлениях применяют синтетические цеолиты NaX, NaA, CaA [8]. В ионообменных процессах применяют зерна ионитов, представляющих собой нерастворимые твердые вещества, способные обменивать содержащиеся в них ионы на другие ионы, присутствующие в газовой фазе (например анионит АВ-17 [15]). Однако наиболее широкое распространение в системах жизнеобеспечения приобрели твердые поглотители и регенеративные продукты на основе надпероксидов и гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов (калия, натрия, лития, кальция) и известковые химические поглотители. Эти вещества, в составе КиИСЗ, позволяют очищать воздух от примесей диоксида углерода и отравляющих веществ и обогащать его кислородом, что позволяет человеку в течении заданного времени находиться в герметичных или условно герметичных объектах – например в убежищах.

В зависимости от потребностей используют системы регенерации воздуха, реализующие отдельный метод регенерации (кислород получают, а диоксид углерода удаляют отдельными в пространстве и времени аппаратами), совмещенный способ регенерации воздуха (когда выделение кислорода и поглощение диоксида углерода производится в одном месте и в одно время), полусовмещенный (когда в одном аппарате производится поглощение диоксида углерода и выделение кислорода одновременно, а в другом аппарате производится только поглощение диоксида углерода).

Как правило, коллективные средства защиты, использующие хемосорбенты, применяют при невозможности использования наружного воз-

духа, в местах, где возможны пожары, сильная загазованность территории. К таким средствам, по данным сайта www.rhbz.ru, относят установки «Устройство 300», РУ-МК, РЭУ, АР-3, АР-3М, Ц64, Ц67 и др. Они используются для регенерации воздуха по кислороду и диоксиду углерода в помещениях вместимостью от 5 до 300 человек.

Для индивидуальной защиты органов дыхания, согласно ГОСТ 12.4.034–2001, применяют фильтрующие и изолирующие аппараты. В фильтрующих ИСЗ воздух для дыхания берется непосредственно из окружающей среды и очищается от вредных примесей при прохождении через слой адсорбента. Изолирующие средства предполагают либо использование сжатого воздуха или кислорода из баллонов, либо его подачу потребителю по шлангам от внешнего источника, либо генерацию кислорода, например за счет использования надпероксидов калия или натрия [23].

В настоящее время в России серийно выпускается множество индивидуальных изолирующих аппаратов с химически связанным кислородом [1]: СПИ-20, СПИ-50, УДС-15, ШСС-Т, ПДА-3, ИПК-1М, ПДУ-3 и др. Примерами зарубежных серийно выпускаемых изолирующих самоспасателей являются: SCRAM (США), S 15, ОХУcrew (Германия), СИ 15 (Украина), Biocell 1 Start (Франция).

Рассмотрим основные сведения о хемосорбентах, применяемых в составе систем жизнеобеспечения.

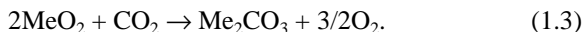
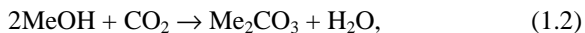
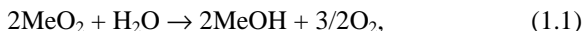
1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

В настоящее время для регенерации воздуха применяются хемосорбенты на основе надпероксидов щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca) в разнообразных формах: многоканальные блоки, таблетированные продукты, зерновые продукты, а также поглотители на основе гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Ca, Na, K) в виде блоков, гранул и цилиндров. Наиболее широкое применение получили сорбенты на основе надпероксидов калия и натрия.

Надпероксид калия представляет собой парамагнитное вещество [24], при комнатной температуре желтого цвета, которое взаимодействует с водой и различными газами с выделением кислорода. Это химическое соединение получают двумя способами: окислением в кислородной среде металлического калия и жидкофазной реакцией гидроксида калия с пероксидом водорода с последующей гидратацией полученного пероксосоединения различными способами [25 – 27].

Надпероксид натрия в качестве основного компонента регенеративного продукта применяется значительно реже надпероксида калия. Это связано с его относительно низкой термостойкостью, что не позволяет полностью реализовать высокую емкость продукта по диоксиду углерода в условиях работы средств защиты.

Надпероксиды калия и натрия в составе регенеративных продуктов взаимодействуют с диоксидом углерода и парами воды по следующему основному механизму (Me = Na, K) [28 – 31]:



Наряду с основным компонентом – надпероксидом щелочного металла, в состав регенеративного продукта входят различные добавки, улучшающие процесс регенерации и выполняющие функцию связующего. Например, в качестве армирующих структурообразующих добавок используют оксид кальция и асбест. Для увеличения скорости поглощения диоксида углерода вводят гидроксиды калия и катализаторы – соли тяжелых металлов (Cu, Co, Mo, Cr).

Технология изготовления регенеративного продукта в общем случае включает изготовление шихты, ее прессование в форме блоков, таблеток, пластин, при необходимости дробление и отсеив продукта.

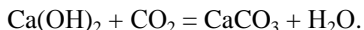
Таким образом, любой элемент шихты (блок, таблетка, гранула, пластина) хемосорбента представляет собой пористое тело с различными по диаметру порами, образующими определенный внутренний объем хемосорбента. Истинная плотность химических сорбентов составляет порядка $2,2 \text{ г/см}^3$, насыпная плотность – от $0,65$ до $1,7 \text{ г/см}^3$. Обычно объем пор составляет от $0,2$ до $0,7 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Определяющий размер пор около 1000 \AA .

К серийно выпускаемым отечественным регенеративным продуктам можно отнести зерновые продукты Б-2И, ОКЧ-2, ОКЧ-3, ОКЧ-3М, О-3, блокочные продукты РБ-Р, таблетированные ПРТ-9П, пластины.

Зерновые продукты обладают хорошими сорбционными свойствами, но при этом слой продукта создает достаточно ощутимое сопротивление дыханию в аппарате, которое возрастает по мере эксплуатации изолирующего аппарата. Данная проблема отчасти решается при использовании блокочных продуктов (рис. 1.1), имеющих каналы для движения газового потока.

Блокочные продукты, однако, уступают зерненым по своим хемосорбционным характеристикам. Кроме перечисленных зерновых и блокочных продуктов применяют таблетированные продукты, которые выпускаются не только в России, но и в Германии (фирмой Drager) и во Франции (Sperian Protection).

Для поглощения диоксида углерода в средствах регенерации воздуха применяется известковый поглотитель – гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, экзотермическая реакция взаимодействия которого с CO_2 имеет вид [25]:



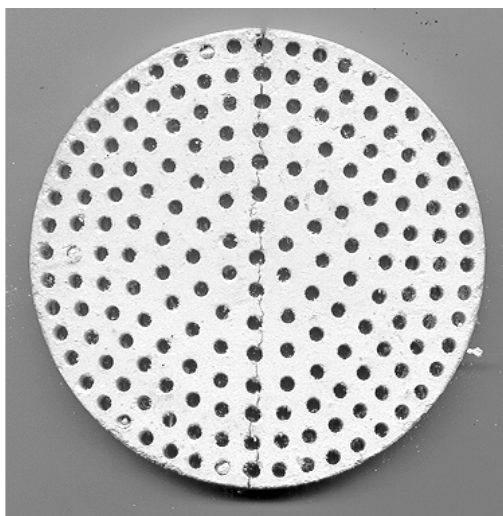
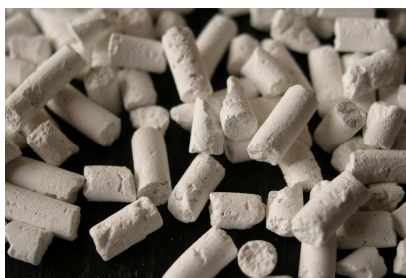


Рис. 1.1. РП в форме блока

Наиболее распространенным в России является поглотитель марки ХПИ (рис. 1.2, *а*) по ГОСТ 6755–88 с размерами зерен от 5,5 до 6,5 мм. В качестве добавок, улучшающих поглощение диоксида углерода, используют гидроксиды натрия и калия (например поглотитель ХПИ-К производства ОАО «Корпорация «Росхимзащита»).

Следует отметить, что в некоторых системах жизнеобеспечения применяют цеолиты [32, 33] (рис. 1.2, *б*). Цеолиты – алюмосиликаты, содержащие в своем составе окислы щелочных и щелочноземельных металлов и отличающиеся строго регулярной структурой пор. Их подразделяют на природные и синтетические. Природные цеолиты представлены главным образом клиноптилолитом, морденитом, эрионитом, шабазитом и др.



а)



б)

Рис. 1.2. Химический поглотитель ХПИ (*а*), цеолит NaX (*б*)



Рис. 1.3. Пластина регенеративного продукта на матрице

Синтетические цеолиты отличаются от других адсорбентов практически идеальной однородной микропористой структурой и способностью избирательно адсорбировать молекулы малых размеров при низких концентрациях адсорбируемого компонента. Молекулярные сита выпускаются различных марок КА, NaA, CaA, NaX, CaX [34].

Кроме перечисленных серийно выпускаемых сорбентов, разрабатываются так называемые регенеративные продукты нового поколения – вещества на основе надпероксида калия, полученные не в виде порошка, а на поверхности и в порах инертного носителя (матрицы) [25, 35] (рис. 1.3). Их получают путем пропитки матрицы раствором перексольвата калия с последующей ее осушкой. Химические поглотители на матрице получают путем нанесения растворов известкового молока на пористые материалы [36].

При каких условиях используются перечисленные сорбенты и какова степень изученности их теплофизических характеристик? Для ответа на первый вопрос проанализируем условия применения КиИСЗ.

Согласно [37] индивидуальные средства защиты применяются при температурах $-40...40$ °С, относительной влажности регенерируемого воздуха 90...98%, пульсирующем потоке со средней легочной вентиляцией 5...70 л/мин или постоянном потоке с объемным расходом 9...12 м³/ч и диапазоне концентраций диоксида углерода в регенерируемой ГВС 0,5...6%.

Коллективные средства защиты эксплуатируются [22] в диапазоне температур 0...50 °С и относительной влажности регенерируемой ГВС 40...98%. Основной температурный режим работы КСЗ – 15...35 °С. Имеются три общепринятых диапазона по концентрации диоксида углерода в регенерируемом воздухе: 0,2...0,8%, 0,8...1,5% и 1,5...3,5%. КСЗ применяются для регенерации воздуха в удельных объемах 0,2...100 м³/человек.

Все перечисленные выше условия характерны для следующих сфер деятельности и сооружений: космос, эксплуатация фортсооружений, подводные лодки, подводные аппараты, включая батискафы, командные пункты, узлы связи, убежища гражданской обороны, подвижные убежища, пункты спасения. При этом стоит заметить, что в случае функционирования средств защиты, температура сорбента резко повышается. И если, например, аппарат находится при комнатной температуре, то в слое РП или ХП в процессе работы температуры могут достигать сотни градусов.

Что касается степени изученности ТФХ, то найденная информация крайне ограничена. В литературе найдены [38 – 47] отдельные данные по теплофизическим характеристикам некоторых сорбентов, а также отдельных компонентов РП и ХП. В частности, в работе [38] приводится информация по теплоемкости силикагелей, составляющей 920 Дж/(кг·К), и теплопроводности при 30 °С, составляющей 0,2 Вт/(м·К). Для асбеста (одного из компонентов регенеративного продукта) известна теплоемкость – 840 Дж/(кг·К) и теплопроводность 0,151 Вт/(м·К) [39]. Для регенеративного продукта ОКЧ-3 в работе [40] приводятся следующие значения теплоемкости 1100 Дж/(кг·К) и теплопроводности 0,16 Вт/(м·К), полученные тепловым методом [41]. В работе [25] приводятся данные о зависимости теплоемкости щелочного раствора пероксида водорода в зависимости от содержания сухого вещества (в пересчете на надпероксид калия). Согласно приведенным данным теплоемкость меняется в диапазоне от 2800 до 1200 Дж/(кг·К) по мере увеличения концентрации надпероксида калия.

Таким образом, можно сделать вывод, что значения ТФХ сорбентов при комнатных температурах находятся в интервалах 0,1...0,3 Вт/(м·К) по теплопроводности, 500...1500 Дж/(кг·К) по удельной теплоемкости. Закономерности изменения ТФХ сорбентов от температуры мало изучены. Большой интерес представляют закономерности изменения ТФХ в процессе регенерации вследствие изменения химического состава сорбентов и порозности их насыпных слоев.

Проанализируем существующие методы с точки зрения возможности исследования с их помощью изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации.

1.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТФХ ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Сгруппируем все известные методы в зависимости от характера изменения во времени температур и тепловых потоков в три группы: стационарные, нестационарные и комплексные (или комбинированные) методы [48 – 51]. Это позволит системно проанализировать возможности применения методов, принадлежащих каждой группе, для решения задач исследования ТФХ хемосорбентов.

1.3.1. СТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В основу большинства стационарных методов положено определение теплового потока, проходящего через опытный образец заданных размеров, и перепада температур на его изотермических поверхностях при установившемся тепловом режиме [48 – 54]. Если, например, на одну из поверхностей твердого образца воздействовать постоянным тепловым потоком, а температуру противоположной поверхности поддерживать постоянной, то для вычисления искомой теплопроводности λ можно воспользоваться решением одномерного уравнения

$$\frac{d}{dr} \left(r^\Gamma \frac{dT(r)}{dr} \right) = 0, \quad R_1 < r < R_2$$

с граничными условиями: $\lambda \frac{dT(R_1)}{dr} = q = \text{const}, T(R_2) = T_2 = \text{const}$,

где r – поперечная координата одномерного образца; R_1, R_2 – координаты граничных поверхностей образца; T – температура; Γ – коэффициент формы образца ($\Gamma = 0, 1, 2$ – соответственно для плоской, цилиндрической и сферической систем координат); q – тепловой поток, подводимый к образцу на поверхности с координатой $r = R_1$; T_2 – температура, поддерживаемая постоянной на поверхности образца с координатой $r = R_2$.

Для тел простой геометрической формы искомую теплопроводность обычно определяют [48 – 52] по формуле

$$\lambda = \frac{q}{T_1 - T_2} K,$$

где $T_1 - T_2$ – перепад температур на изотермических поверхностях образцов; K – коэффициент формы исследуемого материала. Приведенная формула выведена в предположении, что теплопроводность не зависит от температуры.

Наибольшее распространение среди стационарных методов измерения получили методы плоского слоя (методы пластины) [48 – 62], цилиндрического слоя (методы трубы или цилиндра), а также методы шарового слоя (методы шара).

Стационарные методы плоского слоя в основном применяют для измерения теплопроводности и термического сопротивления строительных материалов и изделий. Например, в ГОСТ 7076–99 для реализации этого метода применяют приборы: а) собранные по асимметричной схеме, оснащенные одним тепломером, который расположен между испытываемым образцом и холодной плитой прибора или между образцом и горячей

плитой прибора (рис. 1.4, а); б) собранные по симметричной схеме, оснащенные двумя тепломерами, один из которых расположен между испытываемым образцом и холодной плитой прибора, а второй – между образцом и горячей плитой прибора (рис. 1.4, б); в) прибор, в котором плотность теплового потока, проходящего через испытываемый образец, определяют путем измерения электрической мощности, подаваемой на нагреватель зоны измерения горячей плиты прибора (прибор с горячей охранной зоной) (рис. 1.4, в).

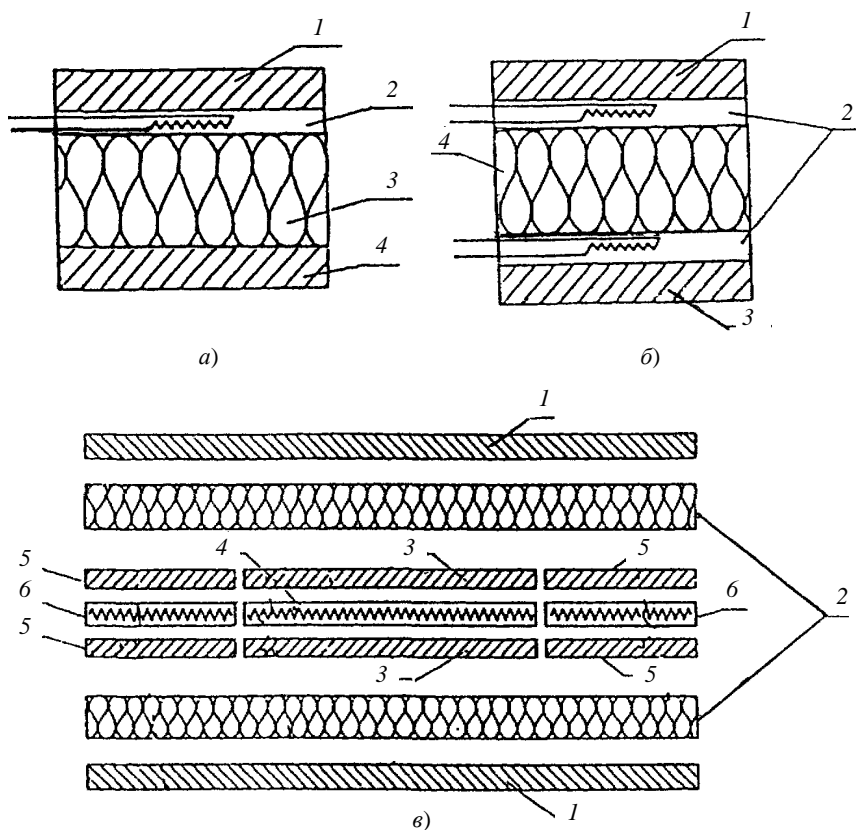


Рис. 1.4. Схемы приборов, реализующих метод пластины:

- а – схема с одним тепломером: 1 – нагреватель; 2 – тепломер; 3 – испытываемый образец; 4 – холодильник; б – схема прибора с двумя тепломерами: 1 – нагреватель; 2 – тепломеры; 3 – холодильник; 4 – испытываемый образец; в – схема прибора с горячей охранной зоной: 1 – холодильник; 2 – испытываемые образцы; 3 – плиты нагревателя зоны измерения; 4 – обмотка нагревателя зоны измерения; 5 – плиты нагревателя охранной зоны; 6 – обмотка нагревателя охранной зоны

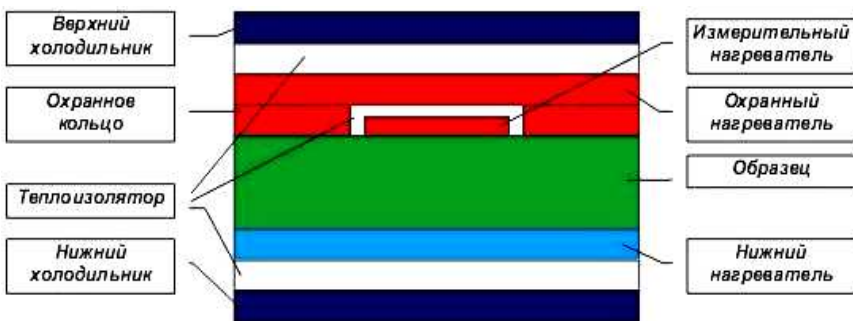


Рис. 1.5. Схема прибора ПИТ-2.1 для измерения теплоизоляционных материалов по методу стационарного плоского слоя

Существует немало серийно выпускаемых приборов (ИСК-У (НПЦ «ФИЗТЕХ»), ИТП-МГ4«100», ИТП-МГ4«250» (ООО «СКБ Стройприбор»), ИТС-1 (НПП «Интерприбор»), ПИТ-2.1 (ООО «ИзТех»), ИТ-4), реализующих метод неограниченного плоского слоя. На рисунке 1.5 представлена схема одного из них.

Кроме серийных приборов существует большое разнообразие единичных разработок [57 – 62], которые различаются технической реализацией, требованиями к размерам образцов, способами создания перепада температур по толщине образцов, способами измерения тепловых потоков и т.д.

При использовании методов цилиндрического и шарового слоя исследуемому материалу придается цилиндрическая и шаровая формы соответственно. Классическим примером реализации метода трубы служит при-

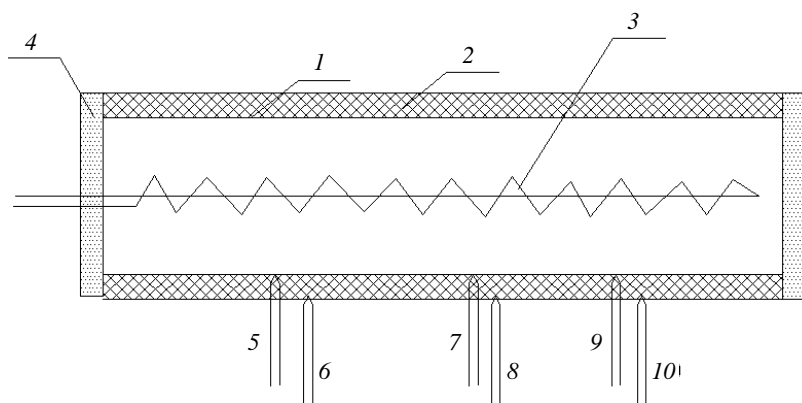


Рис. 1.6. Схема измерения по методу цилиндрического слоя:
 1 – труба; 2 – исследуемый материал; 3 – нагреватель;
 4 – тепловая изоляция; 5 – 10 – термомпары

бор [48], представляющий собой металлическую цилиндрическую трубу (рис. 1.6), на наружной поверхности которой помещается слой изоляционного материала. Внутри трубы заложен электрический нагреватель, создающий равномерный обогрев. В стационарном режиме измеряются мощность электрического нагревателя и температуры наружной и внутренней поверхностей изоляции. По этим данным рассчитывается теплопроводность изоляционных материалов. Похожие установки применялись и в работах В.В. Пустовалова, Д.М. Шахтина, И.И. Вишневого [63–64], А.И. Фесенко [65], В.В. Курепина [66] и ряда других авторов [67 – 69].

Примером реализации метода шарового слоя может служить прибор для исследования сыпучих изоляционных материалов (рис. 1.7), состоящий из двух медных шаров [48]. Наружный шар подвешен с помощью двух кернов. Внутри этого шара с помощью опоры центрирован другой шар. Межшаровое пространство заполняется исследуемым материалом. Во внутреннем шаре располагается электрический нагреватель. В стенках шаров заложены термопары, измеряющие температуру поверхностей исследуемого материала. В эксперименте определяется теплопроводность исследуемого материала.

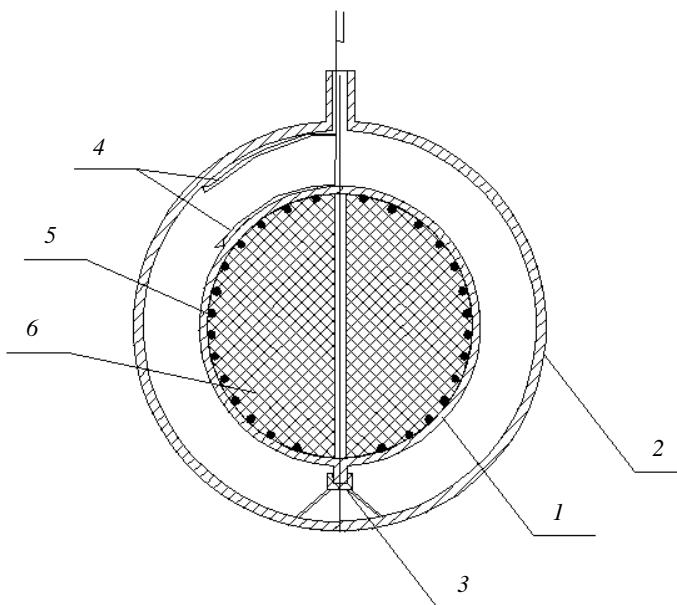


Рис. 1.7. Шаровой прибор для измерения теплопроводности изоляционных материалов:

1, 2 – внутренний и наружный шары; 3 – опора; 4 – термопары;
5 – нагреватель; 6 – ультраалегковес

Анализируя описанные выше методы, можно сделать следующие выводы: 1) стационарные методы могут быть применены для измерения теплопроводности сорбентов при условии, если исследуемые вещества рассматривать как обычные твердые и сыпучие материалы, в которых не протекает экзотермическая реакция; 2) с помощью рассмотренных методов представляется затруднительным исследовать закономерности изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации, а именно определять зависимости ТФХ от температуры и изменения химического состава и порозности.

1.3.2. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При исследовании ТФХ методами нестационарного теплового режима, в общем случае, пользуются [70 – 77] решениями нестационарного дифференциального уравнения

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, R_1 < r < R_2.$$

Обычно такие решения получают для тел простой геометрической формы и заданных начальных и граничных условий, например вида

$$T(r, 0) = T_0 = \text{const},$$

$$\lambda \frac{\partial T(R_1)}{\partial r} = q(\tau), T(R_2, \tau) = T_2(\tau),$$

где τ – время; T_0 – начальное значение температуры образца; $q(\tau)$, $T_2(\tau)$ – функции, определяющие закономерности изменения теплового потока и температуры на граничных поверхностях образца с координатами $r = R_1$ и $r = R_2$; a – теплопроводность образца.

Исследование ТФХ осуществляется при нагревании или остывании образца или его части. Нагрев можно вести непрерывно или периодической подачей тепла в тело [78 – 83].

Теория теплопроводности в основной (периодической) стадии процесса позволяет построить методики нахождения как отдельных тепловых характеристик, так и их комплексов.

Среди нестационарных методов наибольшее распространение приобрели методы регулярного режима первого, второго и третьего рода [81].

Для технической реализации методов регулярного режима первого рода разработано множество устройств [48 – 51, 84 – 86], отличающихся использованием образцов различной формы, дополнительного использования образцов сравнения. Классическими методами можно считать методы акалориметра, лямбда-калориметра, бикалориметра [87].

Акалориметр [48] представляет собой образец исследуемого материала, помещенный в цилиндрическую или сферическую металлическую оболочку из меди или латуни. Внутри этой системы размещен измеритель температуры. Акалориметр нагревается, а затем помещается в среду с более низкой температурой и постоянным коэффициентом теплоотдачи. В процессе остывания измеряют разность температур акалориметра и среды. По полученным данным определяют темп охлаждения, а затем вычисляют искомую теплопроводность.

Ламбда-калориметр состоит из двух сферических медных или латунных шаров, заполненных эталонным и исследуемым материалом. ТФХ эталонного материала известны. По данным измерений строят график охлаждения эталонного шара и испытуемого шара, определяют скорости охлаждения. Из опыта с эталонным шаром определяют значение коэффициента теплоотдачи. Зная значение коэффициента теплоотдачи и скорость охлаждения испытуемого шара, определяют теплопроводность.

В методе бикалориметра использовано свойство регулярного режима, благодаря которому поле температур в исследуемом теле остается все время подобным самому себе, т.е. отношение температур в двух произвольно взятых точках не зависит от времени охлаждения или нагревания.

Бикалориметр представляет собой сферическую оболочку, внутри которой имеется ядро – металлический шар. Между оболочкой и ядром находится исследуемый материал. Бикалориметр охлаждается в среде с постоянной температурой. В ходе опыта измеряется изменение температуры в центре ядра во времени. По данным опыта определяется скорость охлаждения и вычисляется теплопроводность. В настоящее время разработаны различные конструкции бикалориметров, имеющие шаровую, цилиндрическую и плоскую форму.

В отличие от рассмотренных ранее методов, методы регулярного режима второго рода позволяют в одном эксперименте измерить зависимость теплофизической характеристики от температуры, т.е. являются динамическими. Суть большинства методов сводится к нагреву (охлаждению) с постоянной скоростью (постоянным тепловым потоком на поверхности) тела в форме пластины, цилиндра или шара и измерению температуры в характерных точках образцов и тепловых потоков через исследуемые образцы [48, 50, 51, 88 – 90].

Регулярный режим второго рода характеризуется наличием линейного участка графика зависимости температуры от времени [48 – 50]. На практике, как правило, из-за наличия потерь теплоты, изменения теплофизических характеристик материалов от температуры применяют методы монотонного нагрева [91 – 97], практическая реализация которых представлена приборами марок ИТ- λ -200 (рис. 1.8), ИТ-с-20, ИТС- λ -20, ИТС-с λ -400, ИТС-с λ -10 и другими [98].

Регулярный тепловой режим третьего рода наступает, когда изменение температуры среды или поверхности тела во времени происходит по периодическому закону. Согласно [48, 99, 100], по истечении некоторого



a)



б)



в)

Рис. 1.8. Приборы для измерения ТФХ в монотонном режиме:

a – ИТ-λ-200; *б* – ИТ-с-20; *в* – ИТС-λа-20

промежутка времени, определяемого значением числа Фурье $Fo \geq 0,5$, влияние начального распределения температуры в теле перестает проявляться. Тогда температура в более глубоких слоях тела также начинает изменяться по закону гармонических колебаний около базового значения с тем же периодом времени, но со сдвигом по фазе и с уменьшенной максимальной амплитудой колебания. Величина сдвига фаз и амплитуда колебаний зависят от расстояния от обогреваемой поверхности и от коэффициента теплопроводности. Поэтому разработаны различные методы измерения, состоящие в нагреве образцов заданной формы внешним источником тепла по заданному закону гармонического колебания с заданной частотой. На разных расстояниях от обогреваемой поверхности измеряются температуры и разность фаз колебаний этих температур [101, 102], измеряются амплитуды температурных волн [103, 104]. С целью повышения точности при измерениях температурную волну регулируют до установления ее длины, кратной толщине образца.

Методам регулярного режима третьего рода присущи сложность создания в образцах гармонических колебаний заданных характеристик, достаточно сложное получение расчетных соотношений для вычисления искоемых теплофизических характеристик.

Таким образом, в отличие от стационарных методов, методы регулярного режима 1 – 3 рода позволяют определять комплекс ТФХ. Более того, имеется возможность исследовать закономерности изменения ТФХ

сорбентов от температуры (например, методами монотонного нагрева). Однако, измерительные устройства для рассмотренных методов не позволяют осуществлять продувку ГВС через слой сорбента, что затрудняет их применение в целях исследования изменения ТФХ в процессе сорбции.

Рассмотрим последнюю группу методов – комплексные или комбинированные.

1.3.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЛИ КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Комплексные методы позволяют в одном эксперименте (или на нескольких этапах одного эксперимента) измерить весь комплекс теплофизических свойств. К таким методам можно отнести: методы, базирующиеся на использовании пространственно-временных интегральных характеристик физических величин, измеряемых в ходе эксперимента [105 – 108], импульсные методы [109 – 118], использующие специальные зонды [119 – 123]. Например, в работе [105] описан зонд, выполненный в виде пустотелого прямоугольного параллелепипеда размерами $(35 \times 50 \times 90)$ мм³, открытого с одной стороны. Внутри зонда имеется плоский нагреватель в виде прямой полосы заданной ширины и две хромель-копелевые термопары, расположенные на расстоянии x_1 и x_2 от центральной оси нагревателя на прямой линии, образующей перпендикуляр к оси нагревателя. Источник стабилизированного напряжения служит для питания нагревателя, микровольтметр фиксирует показания термопар. При проведении эксперимента зонд помещается открытой стороной на поверхность исследуемого образца. С помощью вакуум-насоса внутри зонда создается разрежение, в результате чего зонд, а вместе с ним нагреватель и термопары с заданной силой прижимаются к образцу. В эксперименте в различные моменты времени измеряется температура в двух точках образца. Искомые теплопроводность и температуропроводность определяются по формулам метода измерения. Источники тепла (зонды) могут иметь плоскую, цилиндрическую, шаровую и другие формы. Они могут работать при самых различных тепловых режимах. Соответствующие расчетные зависимости имеют наиболее простую форму для случаев, когда собственная теплоемкость зондов является пренебрежимо малой величиной.

В работах [124, 125] предлагаются бесконтактные методы, заключающиеся в воздействии на поверхность исследуемого образца точечным подвижным источником тепла (лазером) и измерении избыточной предельной температуры нагреваемой поверхности движущимся термоприемником. Погрешность измерения ТФХ этим методом будет зависеть от обработки поверхности образца, степени черноты поверхности и параметров окружающей среды. Поэтому эти методы не пригодны для исследования зеренных сорбентов.

Таким образом, несмотря на большое разнообразие комплексных методов измерения, не были выявлены те из них, которые полностью удовлетворяют нашим потребностям, а именно – исследовать изменения ТФХ сорбентов в процессе поглощения диоксида углерода. Главной технической трудностью при реализации рассмотренных методов является отсутствие возможности продувки ГВС через слой исследуемого материала с целью изменения химического состава, пористости отдельных элементов шихты (зерен, гранул, таблеток) и порозности насыпного слоя. Также необходимо решить задачу количественной оценки степени отработки сорбента, которая зависит от времени продувки и параметров ГВС.

Выводы. Сорбенты на основе надпероксидов и гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов широко применяются в составе средств защиты органов дыхания при различных чрезвычайных ситуациях. Условия использования таких средств весьма разнообразны, что приводит к необходимости разработки широкого ассортимента хемосорбентов, различающихся химическим и гранулометрическим составом.

В процессе хемосорбции изменяется химический состав хемосорбентов, порозность их насыпных слоев, что приводит к изменению эффективных теплофизических характеристик. Знание зависимостей ТФХ от температуры и степени отработки регенеративного продукта очень важно для решения задач разработки конструкций аппаратов и алгоритмов управления их работой. Поэтому требуются современные, точные и надежные методы и средства измерения ТФХ хемосорбентов.

Анализ технической и патентной литературы показал, что для исследования зависимостей ТФХ от температуры возможно применение методов регулярного режима, например методов монотонного нагрева. Однако эффективно решить задачу по исследованию изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации воздуха существующие методы не позволяют. Именно вследствие отсутствия таких методов наблюдается недостаточность информации о зависимостях теплопроводности и объемной теплоемкости хемосорбентов диоксида углерода от степени их отработки.

Поэтому, в настоящей работе были решены следующие актуальные задачи: 1) разработаны теоретические основы методов исследования изменения ТФХ насыпных слоев зерновых сорбентов и сорбентов в форме блоков с каналами в процессе регенерации; 2) даны оценки погрешностей методов измерения и разработаны рекомендации по повышению точности определения ТФХ за счет выбора рациональных конструктивных размеров измерительных ячеек и параметров проведения экспериментов; 3) разработаны конструкции измерительных устройств, схемы автоматизированных измерительных установок, алгоритмическое и программное обеспечение; 4) разработанными методами исследованы закономерности изменения ТФХ некоторых серийно выпускаемых сорбентов в процессе регенерации, а также исследованы зависимости ТФХ сорбентов от температуры с использованием серийных установок, реализующих методы монотонного нагрева.

Глава 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

2.1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНЕННЫХ ХЕМОСОРБЕНТОВ

2.1.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО РЕШИТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДА

При разработке метода исследования необходимо решить следующие задачи: 1) разработать физическую модель измерительной ячейки, обеспечивающей возможность продувки ГВС через слой зерненого хемосорбента, что позволит изменять его химический состав и порозность слоя; 2) разработать математическую модель процессов теплопереноса при движении потока газа через слой сорбента в котором действуют внутренние источники теплоты; 3) на основании разработанной модели получить расчетные выражения для определения скорости поглощения диоксида углерода хемосорбентом, что позволит определять величину текущего поглощения CO_2 в зависимости от времени продувки; 4) поставить и решить прямую краевую задачу теплопереноса в измерительной ячейке для случая, когда на ее внешних поверхностях заданы постоянные условия теплообмена; 5) решить обратную задачу по нахождению искомым ТФХ по измеренным в процессе эксперимента температурам.

2.1.2. ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ МЕТОДА

Для исследования закономерностей изменения ТФХ насыпного слоя хемосорбента в процессе регенерации необходимо вначале подготовить пробу исследуемого материала. Для этого формируют насыпной слой и через него в течение заданного промежутка времени продувают ГВС с заданными параметрами. В ходе продувки содержащийся в ГВС диоксид углерода вступает в химическую реакцию с веществом сорбента, что приводит к изменению химического состава и порозности.

Рассмотрим плоскую симметричную систему (рис. 2.1), в которой слои 1, 3 образованы газопроницаемыми оболочками, выполненными из тонкой металлической сетки, между которой размещен насыпной слой исследуемого зерненого хемосорбента 2 [126].

Через систему продувается ГВС с заданными параметрами. Допустим, что толщина слоя 2 настолько мала, что изменением концентрации диоксида углерода в ГВС по длине слоя можно пренебречь. Тогда, можно считать, что источники теплоты, действующие в слое 2 вследствие экзотермической реакции поглощения диоксида углерода, распределены по толщине слоя равномерно. Уравнение теплопереноса для слоя 2 может быть записано в виде [127]

$$q_v(\tau) = c_{\text{ш}}(\tau) \frac{\partial T_{\text{ш}}(\tau)}{\partial \tau} + w c_{\text{г}} \frac{\partial T_{\text{г}}(\tau)}{\partial x}, \quad (2.1)$$

где $c_{\text{ш}}$, $c_{\text{г}}$ – объемные теплоемкости шихты хемосорбента и газа при температуре опыта; $T_{\text{ш}}$, $T_{\text{г}}$ – средние по объему температуры шихты и газа; w – скорость газа; x – продольная координата.

Уравнение (2.1) записано с учетом следующих допущений. Потери теплоты с торцевых сторон слоя пренебрежимо малы. Скорость ГВС постоянна, так как объем выделившегося кислорода за все время опыта значительно меньше суммарного объема продуваемой ГВС. Температура в любой точке шихты одинакова и равна $T_{\text{ш}}(\tau)$. Перенос теплоты конвективным потоком ГВС много больше переноса теплоты теплопроводностью.

Перейдя от частных производных к конечным приращениям, преобразуем выражение (2.1) к виду, удобному для практического вычисления мощности внутренних источников теплоты в момент времени τ_i

$$q_v(\tau_i) = c_{\text{ш}}(\tau_i) \frac{T_{\text{ш}}(\tau_{i+1}) - T_{\text{ш}}(\tau_{i-1})}{\tau_{i+1} - \tau_{i-1}} + w c_{\text{г}} \frac{T_{\text{г}}^{\text{ВЫХ}}(\tau_i) - T_{\text{г}}^{\text{ВХ}}(\tau_i)}{h}, \quad (2.2)$$

где $T_{\text{г}}^{\text{ВЫХ}}$, $T_{\text{г}}^{\text{ВХ}}(\tau_i)$ – температура ГВС на выходе и входе в слой; h – суммарная толщина слоев 1 – 3.

Для слоя круглого сечения диаметром D скорость ГВС определяют по измеренному расходу G

$$w = 4G / (\pi D^2).$$

Мощность внутренних источников теплоты естественным образом связана со скоростью поглощения диоксида углерода [128]

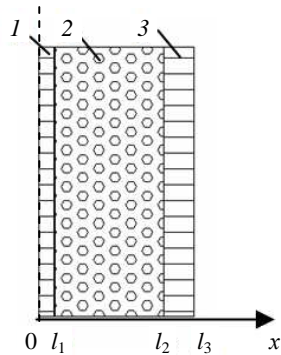


Рис. 2.1. Физическая модель измерительной ячейки при исследовании ГФХ насыпного слоя

$$q_v(\tau) = \frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial \tau} H_{\Sigma}, \quad (2.3)$$

где H_{Σ} – суммарный тепловой эффект реакций (1.1) – (1.3) образования MeOH из MeO_2 , Me_2CO_3 из MeOH , а также тепловой эффект поглощения паров воды.

Из последнего уравнения можно вычислить скорость поглощения диоксида углерода

$$\frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial \tau} = q_v(\tau) / H_{\Sigma}. \quad (2.4)$$

Интегрирование выражения (2.4) в интервале времени от начала τ_0 до конца τ_k продувки позволяет определить текущее поглощение CO_2

$$\varphi = \int_{\tau_0}^{\tau_k} \frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (2.5)$$

Следует отметить, что уравнением (2.3) можно пользоваться при температурах до 200...250 °С, так как при более высоких температурах в процессе регенерации могут появиться дополнительные источники и стоки тепла, обусловленные взаимодействием продуктов реакции, например, эндотермическое взаимодействие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и KO_2 , не учитываемые уравнениями (1.1) – (1.3).

В момент времени τ_k останавливают продувку и переходят к измерению ТФХ. Измерения проводят в два этапа. Рассмотрим теоретические основы метода определения ТФХ на первом этапе [129]. Пусть к моменту окончания продувки в слое хемосорбента достигнута некоторая температура T_0 . Термостатируют внешние поверхности газопроницаемых оболочек 3.

С учетом симметричности плоской системы (рис. 2.1) относительно координаты $x=0$ математическую модель процесса распространения теплоты можно представить только для правой части системы ($0 \leq x \leq l_3$) в виде уравнения

$$\frac{\partial \Theta(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \text{Fo}} = \frac{a(\bar{x})}{a_3} \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, \text{Fo})}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad \text{Fo} > 0, \quad (2.6)$$

с начальными условиями

$$\Theta(\bar{x}, 0) = 1, \quad (2.7)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta\left(\frac{l_i}{l_3} - 0, Fo\right) = \Theta\left(\frac{l_i}{l_3} + 0, Fo\right), \\ \lambda_i \left(\frac{\partial \Theta\left(\frac{l_i}{l_3} - 0, Fo\right)}{\partial \bar{x}} \right) = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial \Theta\left(\frac{l_i}{l_3} + 0, Fo\right)}{\partial \bar{x}} \right), \quad i = 1, 2, \end{array} \right. \quad (2.9)$$

$$\Theta(1, Fo) = 0, \quad (2.10)$$

где $\bar{x} = x/l_3$, $Fo = a_3\tau/l_3^2$, $\Theta = (T(x, \tau) - T_c)/(T_0 - T_c)$, T_c , T_0 – температура среды и начальная температура;

$$a(\bar{x}) = \begin{cases} a_1, & \text{при } 0 < \bar{x} < l_1/l_3; \\ a_2 & \text{при } l_1/l_3 < \bar{x} < l_2/l_3; \\ a_3 = a_1 & \text{при } l_2/l_3 < \bar{x} < 1, \end{cases}$$

λ_i , a_i – теплопроводность и температуропроводность; l_i – координата границы i -го слоя системы; $T(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ .

Решение задачи (2.6) – (2.10) методом разделения переменных имеет вид

$$\Theta(\bar{x}, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\varepsilon_n^2 Fo) \psi_n(\bar{x}), \quad (2.11)$$

а для стадии регулярного теплового режима первого рода

$$\Theta(\bar{x}, Fo) \approx A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo) \psi_1(\bar{x}), \quad (2.12)$$

где A_1 – константа, ε_1^2 , $\psi_1(\bar{x})$ – первое собственное значение и первая собственная функция задачи Штурма-Лиувилля:

$$\psi_1''(\bar{x}) + \varepsilon_1^2 a_3 / a(\bar{x}) \psi_1(\bar{x}) = 0, \quad (2.13)$$

$$\psi_1'(0) = 0, \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} \psi_1\left(\frac{l_i}{l_3}-0\right) = \psi_1\left(\frac{l_i}{l_3}+0\right) \\ \lambda_i \psi_1'\left(\frac{l_i}{l_3}-0\right) = \lambda_{i+1} \psi_1'\left(\frac{l_i}{l_3}+0\right) \end{cases}, \quad i=1, 2 \quad (2.15)$$

$$\psi_1(1) = 0. \quad (2.16)$$

Если в ходе первого этапа эксперимента регистрировать температуру $T(0, \tau)$ и температуру среды T_c , то можно определить значение ε_1^2 задачи (2.13) – (2.16), которое имеет смысл тангенса угла наклона прямолинейного участка зависимости $\ln \Theta(0, Fo) \approx A_1 \psi_1(0) - \varepsilon_1^2 Fo$ (рис. 2.2), получаемой из (2.12).

Задаваясь значениями λ_2 из диапазона $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$ можно определить зависимость $a_2 = f_1(\lambda_2)$ из решения задачи (2.13) – (2.16). Граничные значения интервала $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$ задают исходя из предположительных значений теплопроводности исследуемого материала.

После определения зависимости $a_2 = f_1(\lambda_2)$ проводят второй этап. Для этого термостатируют исследуемый материал и газопроницаемые оболочки при температуре T_0 , после чего их охлаждают при температуре T_c и постоянных условиях теплообмена, характеризуемых коэффициентом теплоотдачи α .

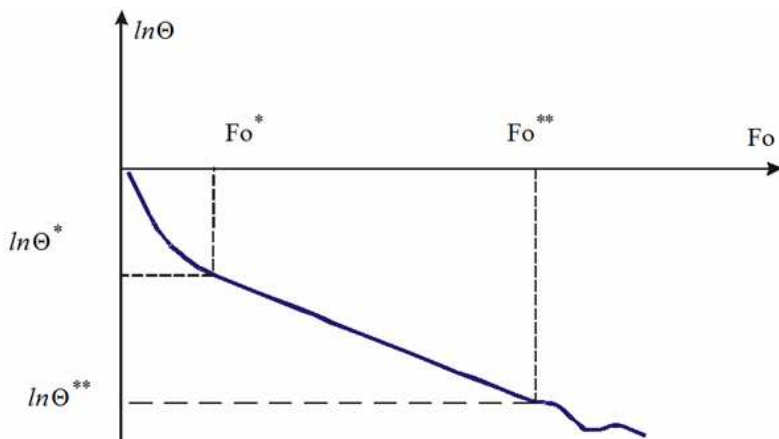


Рис. 2.2. График зависимости $\ln \Theta = f(Fo)$ ($\ln \Theta^*, Fo^*$), ($\ln \Theta^{**}, Fo^{**}$) – координаты граничных точек прямолинейного участка

Для предотвращения контакта хемосорбента с воздухом, внешние воздухопроницаемые оболочки приводят в тепловой контакт по плоскости с оболочками из материала, ТФХ которого известны (например оргстекло). В этом случае физическая модель измерительной ячейки (ИЯ) будет иметь вид, представленный на рис. 2.3.

При охлаждении четырехслойной системы в среде с постоянными условиями теплообмена, краевой задаче теплопроводности в этой системе будет соответствовать задача Штурма-Лиувилля

$$\psi_1''(\bar{x}) + \varepsilon_1^2 a_4 / a(\bar{x}) \psi_1(\bar{x}) = 0, \quad (2.17)$$

$$\psi_1'(0) = 0, \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} - 0\right) = \psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} + 0\right), \\ \lambda_i \psi_1'\left(\frac{l_i}{l_4} - 0\right) = \lambda_{i+1} \psi_1'\left(\frac{l_i}{l_4} + 0\right), \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.19)$$

$$\psi_1'(1) + \text{Bi} \psi_1(1) = 0, \quad (2.20)$$

где $\text{Bi} = \alpha l_4 / \lambda_4$.

При известном значении ε_1^2 , определяемом из эксперимента, и известном Bi (методика определения которого будет изложена ниже) можно путем численного решения задачи (2.17) – (2.20) определить вторую зависимость $\beta_2 = f_2(\lambda_2)$.

a_2

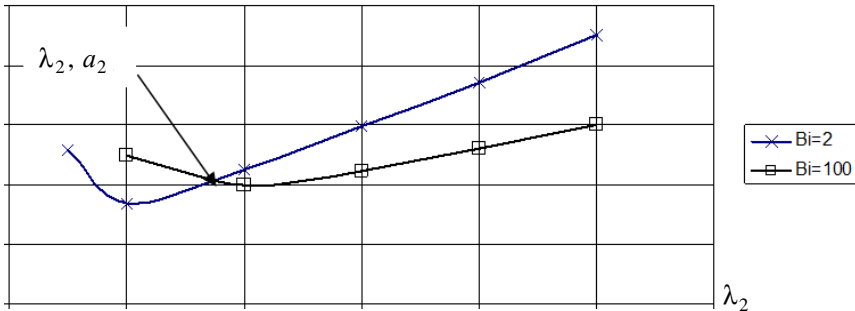


Рис. 2.4. Иллюстрация графического отыскания искомого ТФХ

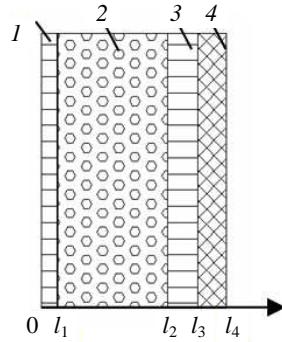


Рис. 2.3. Физическая модель ИЯ на втором этапе измерения ТФХ:
1, 3 – газопроницаемые оболочки; 2 – сорбент; 4 – защитная оболочка

Отметим, что в части определения ТФХ описанный метод не отличается от известного метода двух альфа (или двух Био) [50]. На рисунке 2.4 показаны графики зависимостей $a_2 = f(\lambda_2)$, построенные по данным первого и второго этапов, координаты точки пересечения которых будут определять значения ТФХ исследуемого материала.

Далее рассмотрим, методику определения значений чисел Био в эксперименте.

2.1.3. ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА БИО ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ СО СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

Для определения значения числа Био необходимо измерить коэффициент теплоотдачи в опыте со сравнительной ячейкой (СЯ). Сравнительная ячейка изготавливается из материала с известными ТФХ (эталонного материала). Ее геометрические размеры должны в точности совпадать с размерами измерительной ячейки. Это необходимо для того, чтобы условия теплообмена на их внешних поверхностях были идентичными. При проведении второго этапа эксперимента, наряду с измерением температуры в центре ИЯ дополнительно регистрируют температуру в центре сравнительной ячейки, которую помещают в те же условия, что и измерительную ячейку.

Краевая задача теплопереноса в материале сравнительной ячейки имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta_3(\bar{x}, Fo_3)}{\partial Fo_3} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\frac{\partial \Theta_3(\bar{x}, Fo_3)}{\partial \bar{x}} \right], \quad 0 < \bar{x} < 1, \quad Fo_3 > 0, \quad (2.21)$$

с начальным условием

$$\Theta_3(\bar{x}, 0) = 1, \quad (2.22)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \Theta_3(0, Fo_3)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \Theta_3(1, Fo_3)}{\partial \bar{x}} + Bi_3 \Theta_3(1, Fo_3) = 0, \quad (2.24)$$

где $\Theta_3 = (T_3(x, \tau) - T_c) / (T_0 - T_c)$ – безразмерная температура; $T_3(x, \tau)$ – функция распределения температуры в СЯ; $Fo_3 = a_3 \tau / l_4^2$ – число Фурье; a_3 – температуропроводность эталонного материала.

Решение задачи (2.21) – (2.24) на стадии регулярного режима 1 рода хорошо известно и имеет вид

$$\Theta_{\text{э}}(\bar{x}, \text{Fo}_{\text{э}}) \approx B_1 \exp(-\varepsilon_{\text{э}1}^2 \text{Fo}_{\text{э}}) \Psi_{\text{э}1}(\bar{x}),$$

где B_1 – постоянный множитель; $\varepsilon_{\text{э}1}^2$ – первое собственное значение; $\Psi_{\text{э}1}(\bar{x})$ – первая собственная функция задачи Штурма-Лиувилля:

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[\frac{d\Psi_{\text{э}1}(\bar{x})}{d\bar{x}} \right] + \varepsilon_{\text{э}1}^2 \Psi_{\text{э}1}(\bar{x}) = 0, \quad (2.25)$$

$$\Psi'_{\text{э}1}(0) = 0, \quad (2.26)$$

$$\Psi'_{\text{э}1}(1) + \text{Bi}_{\text{э}} \Psi_{\text{э}1}(1) = 0. \quad (2.27)$$

Определив по данным эксперимента с СЯ величину $\varepsilon_{\text{э}1}^2$, найденное значение подставляют в задачу (2.25) – (2.27) и, решая ее численным методом, подбирают такое $\text{Bi}_{\text{э}}$, которое удовлетворяет граничному условию (2.27).

После этого вычисляют коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \text{Bi}_{\text{э}} \lambda_{\text{э}} / l_4,$$

где $\lambda_{\text{э}}$ – теплопроводность эталонного материала.

По известному значению коэффициента теплоотдачи α , определяют величину Bi , характеризующую условия теплообмена на внешней поверхности ИЯ, по формуле

$$\text{Bi} = \alpha l_4 / \lambda_4. \quad (2.28)$$

2.1.4. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ И АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод исследования [126] включает циклически повторяющиеся этапы подготовки пробы и последующего измерения искомым характеристик.

На этапе подготовки пробы через слой хемосорбента продувают ГВС с заданными параметрами (по расходу, температуре, влажности, концентрации CO_2). В результате этого изменяется химический состав исследуемого материала и его порозность. Продолжительность этого этапа определяется в зависимости от требуемой степени отработки хемосорбента, которая контролируется в ходе осуществления этапа. После этого переходят к этапам измерения ТФХ.

Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных этапов.

Этап подготовки пробы

Измерительную ячейку с исследуемым хемосорбентом помещают в установку подготовки пробы (рис. 2.5).

ИЯ состоит из фторопластового корпуса 4 с закрепленной в центре воздухопроницаемой оболочкой 1, по обе стороны которой размещают тонким слоем (3...4 мм) исследуемый материал, который закрывают сверху воздухопроницаемыми оболочками 6 и 7. На воздухопроницаемых оболочках размещены медные термометры сопротивления ТС (рис. 2.6), таким образом, что они не перекрывают ячейки Я оболочки. Через слои хемосорбента посредством побудителя расхода 11 продувают ГВС из камеры 10. Для большей равномерности отработки слоев хемосорбента предусмотрена возможность смены направлений продувки за счет использования электромагнитных клапанов К1...К4. На рисунке 2.5 стрелками показано одно из двух возможных направлений потока ГВС. При этом клапаны К2, К3 открыты, К1, К4 закрыты. Для равномерного распределения потока по площади поверхности хемосорбента предусмотрено наличие обечаек 8, 9. Сигналы U_1 , U_2 , U_3 с выхода мостовой схемы 12 пропорциональны температурам T_1 , T_2 , T_3 , измеряемым термометрами 5, 7, 6 соответственно.

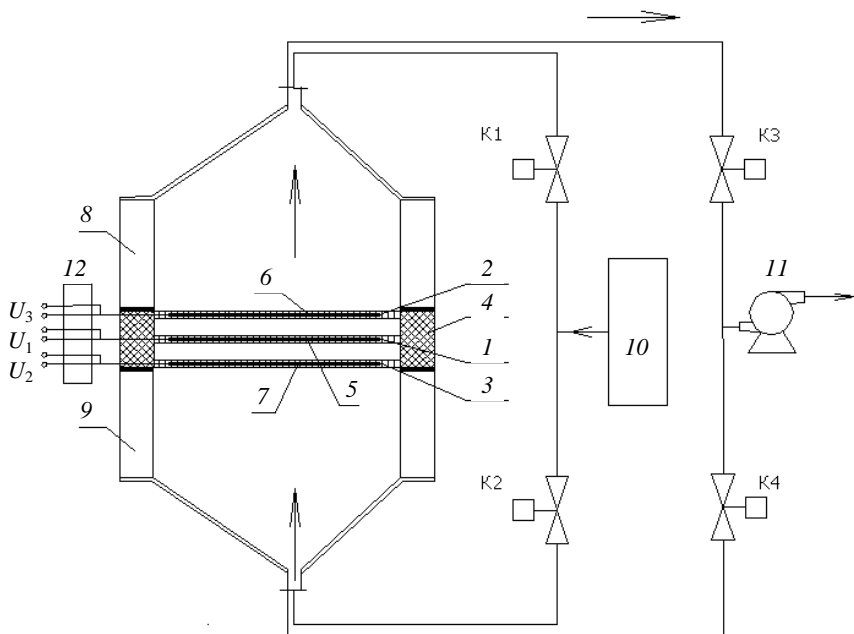


Рис. 2.5. Схема измерительной установки на этапе подготовки пробы

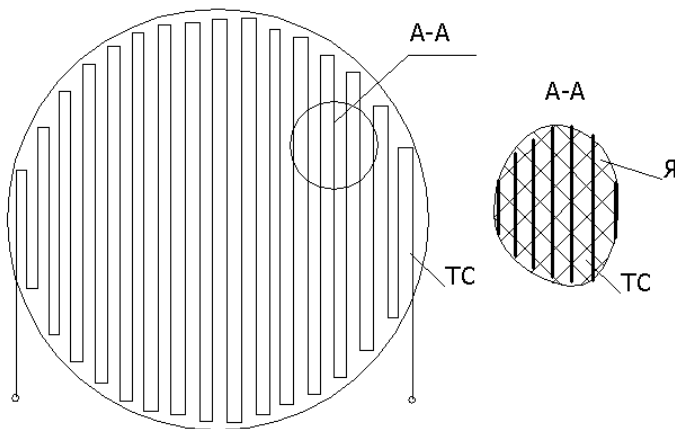


Рис. 2.6. Схема размещения ТС на воздухопроницаемой оболочке

Продолжительность текущего подготовительного этапа должна быть небольшой, что позволит считать, что за время его осуществления изменение порозности и химического состава слоя практически не повлияют на его теплоемкость. С учетом этого, в уравнении (2.2) теплоемкость шихты (на протяжении этапа подготовки пробы) можно считать постоянной, а мощность внутренних источников теплоты, действующих в слое хемосорбента в текущий момент времени τ_i , вычисляется по формуле

$$q_v(\tau_i) = c_{\text{ш}} \frac{T_1(\tau_{i+1}) - T_1(\tau_{i-1})}{\tau_{i+1} - \tau_{i-1}} + wc_{\Gamma} \frac{T_3(\tau_i) - T_2(\tau_i)}{h}, \quad (2.29)$$

где $\tau_i \in [0; \tau_k]$, τ_k – конечный момент времени этапа подготовки.

Скорость поглощения диоксида углерода вычислим по формуле

$$\frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial \tau} = q_v(\tau) / (H_{\Sigma} \cdot \rho_{\text{CO}_2}), \quad (2.30)$$

а величину φ текущего поглощения CO_2 , характеризующую степень отработки хемосорбента, определяют путем интегрирования выражения (2.30) в интервале времени от начала текущего этапа до его окончания

$$\varphi = \varphi_0 + \int_0^{\tau_k} \frac{\partial \varphi(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (2.31)$$

где φ_0 – количество CO_2 , поглощенного единицей объема хемосорбента на предыдущих этапах подготовки пробы.

Этапы измерения ТФХ

После окончания продувки ГВС переходят к этапам измерения ТФХ. Измерения осуществляют в два этапа.

Первый этап. После окончания этапа подготовки пробы термостатируют внешние воздухопроницаемые оболочки ИЯ при температуре $T_0 - T_c = 7..10$ °С с использованием жидкостных теплообменников, через которые с большим расходом прокачивается теплоноситель при постоянной температуре T_c . Значение T_0 соответствует конечной температуре, достигнутой на этапе подготовки пробы. Регистрируют температуру $\Theta_1 = (T_1 - T_c) / (T_0 - T_c)$ в моменты времени $Fo = a_3 \tau / l_3^2$. Определяют тангенс ε_1^2 угла наклона прямолинейного участка зависимости $\ln \Theta_1 = f(Fo)$ и, задаваясь значениями теплопроводности λ_2 из диапазона $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$, численно решают относительно температуропроводности a_2 задачу Штурма–Лиувилля (2.13) – (2.16).

В результате решения задачи получают зависимость $a_2 = f_1(\lambda_2)$.

Второй этап. После окончания первого этапа внешние воздухопроницаемые оболочки ИЯ приводят в тепловой контакт с защитными оболочками 4 (рис. 2.4) из полиметилметакрилата. ИЯ термостатируют при температуре T_0 , а затем посредством воздушного термостата задают на внешних поверхностях ИЯ постоянные условия теплообмена, характеризуемые числом Bi и постоянной температурой T_c . По экспериментальным данным определяют значение ε_1^2 как тангенса угла наклона прямолинейного участка графика зависимости $\ln \Theta_1 = f(Fo)$, где $Fo = a_4 \tau / l_4^2$. Численно решают в интервале $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$ относительно a_2 задачу Штурма–Лиувилля (2.17) – (2.20).

Значение Bi определяют из опыта с эталонной ячейкой, изготовленной из материала с известными ТФХ по методике, изложенной в разделе 2.1.3. В результате решения получают вторую зависимость $a_2 = f_2(\lambda_2)$.

Численным методом определяют координаты a_2 и λ_2 точки пересечения полученных зависимостей.

После окончания второго этапа при необходимости повторяют весь цикл эксперимента, начиная с этапа подготовки пробы. При этом в уравнении (2.29) в качестве значения объемной теплоемкости $c_{\text{шт}}$ используют величину λ_2 / a_2 , определенную в предыдущем эксперименте, а в качестве ϕ_0 используют величину ϕ , вычисленную по формуле (2.31).

2.2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХЕМОСОРБЕНТОВ В ФОРМЕ БЛОКОВ С КАНАЛАМИ

2.2.1. ОСНОВНЫЕ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЛОКОВ ОТ НАСЫПНЫХ СЛОЕВ ЗЕРНЕННЫХ ХЕМОСОРБЕНТОВ И ВОЗНИКАЮЩИЕ ЗАДАЧИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

В реальных аппаратах толщина блоков составляет не менее 32 мм при диаметре порядка 116 мм. Для измерений ТФХ необходимо использовать два блока, между которыми размещают датчики температуры. Таким образом, общая толщина двух блоков составит не менее 64 мм. В этом случае необходимо решать достаточно сложные двухмерные краевые задачи теплопроводности в системе двух блоков с целью определения температурных полей и последующего получения расчетных зависимостей для ТФХ. Поэтому, для упрощения метода определения ТФХ для исследований формируют блоки толщиной не более 8 мм. При совокупной толщине двух блоков 16 мм и диаметре 116 мм можно считать систему двух блоков неограниченной пластиной, что позволит записать для такой системы одномерную краевую задачу теплопроводности.

При продувке ГВС через слой, составленный из двух блоков толщиной по 8 мм, хемосорбент в блоках будет отрабатывать неравномерно. На начальном этапе продувки более активно будет отрабатывать хемосорбент в первом блоке, что приведет к тому, что химический состав и пористость первого блока будут отличаться от второго блока. Следует отметить, что в отличие от насыпного слоя зеренных сорбентов, блоки в процессе регенерации сохраняют свою форму. Таким образом, возникает необходимость и возможность (так как блок, в отличие от насыпного слоя можно извлечь из устройства подготовки пробы без разрушения целостности) подготавливать к исследованию ТФХ каждый из блоков по отдельности [130]. После подготовки каждого из двух блоков их помещают в измерительную ячейку для определения ТФХ. Так как в конструкции ИЯ уже нет необходимости предусматривать возможность продувки ГВС, то, в отличие от насыпного слоя, можно применить другую методику проведения эксперимента [131–132]. Два образца приводят в тепловой контакт по плоскости с плоским нагревателем, другие поверхности образцов термостатируют. Подводят постоянную мощность на нагреватель и на стадии стационарного теплового режима определяют теплопроводность. После чего выключают нагреватель и на стадии регулярного режима первого рода определяют температуропроводность. По сравнению с предыдущим, этот метод более оперативный, так как не предусматривает предварительного термостатирования образцов и проведения двух экспериментов.

Таким образом при разработке метода исследования ТФХ хемосорбентов в форме блоков с каналами необходимо решить следующие задачи: 1) разработать методику экспериментального определения степени отработки хемосорбента в блоке в зависимости от времени продувки через него ГВС; 2) поставить и решить прямую стационарную задачу теплопроводности в измерительной ячейке для определения ТФХ; 3) на основании решения прямой стационарной задачи теплопроводности получить расчетные зависимости для определения теплопроводности; 4) поставить и решить прямую краевую нестационарную задачу теплопроводности в измерительной ячейке; 5) на основании решения, полученного для стадии регулярного режима первого рода, получить расчетные зависимости для определения температуропроводности.

2.2.2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ОТРАБОТКИ ХЕМОСОРБЕНТА

Разместим блок *1* (рис. 2.7) в цилиндрической ячейке *2* на тонкой металлической воздухопроницаемой сетке (на рисунке не показана). В каналы блока вводят термомпары *3* таким образом, чтобы горячие спаи одних термомпар были бы при температуре хемосорбента, а других – при температуре ГВС в канале. Термомпары закреплены на крышке *4* с отверстиями

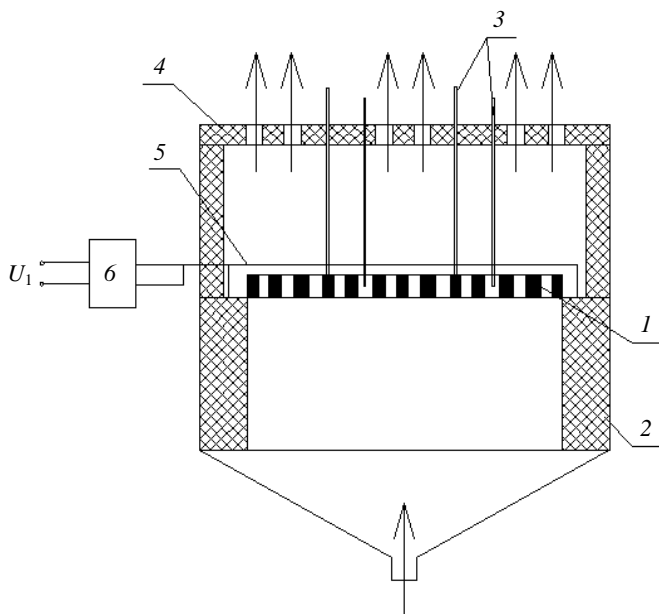


Рис. 2.7. Устройство подготовки пробы

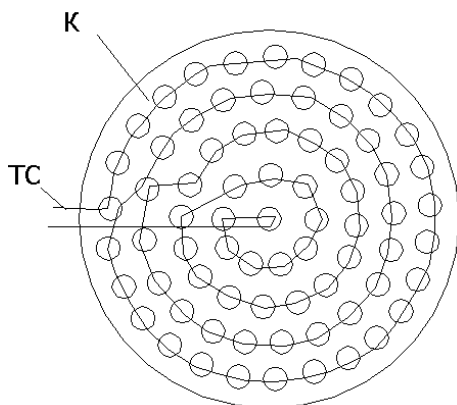


Рис. 2.8. Крышка с каналами К в которых размещен ТС

для ГВС. Сверху блока 1 размещают воздухопроницаемую тонкую металлическую крышку 5 с малой теплоемкостью, на которой размещен термометр сопротивления ТС (рис. 2.8), подключенный к мостовой схеме 6 и измеряющий температуру ГВС на выходе из блока. Показания всех термопар программно усредняются.

Через блок в направлении, показанном стрелками, продувается ГВС с заданными параметрами. В результате экзотермической реакции хемосорбции температура блока повышается, что регистрируется термопарами (рис. 2.9). Полученная температурная кривая позволяет определить интервал времени $[0, \tau_k]$, в течение которого протекает реакция хемосорбции и происходит обработка хемосорбента [130].

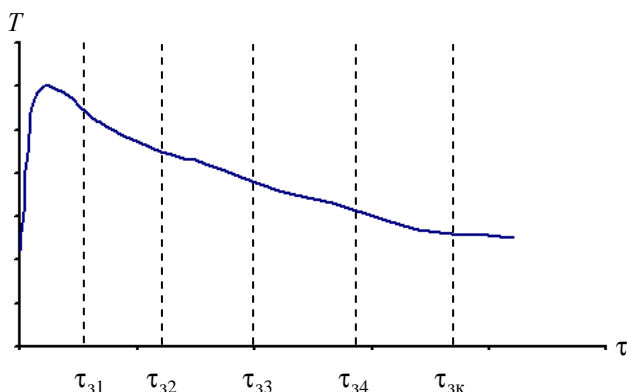


Рис. 2.9. Усредненные показания термопар при продувке ГВС

После определения интервала времени $[0, \tau_k]$ берут два идентичных блока и через каждый продувают ГВС с теми же параметрами, что и на предварительном этапе, но в течение заданного времени $\tau_{zi} < \tau_k$. При этом получают блоки с определенной степенью отработки сорбента, соответствующей заданному времени процесса хемосорбции. После чего измеряют ТФХ полученных таким образом блоков.

2.2.3. ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ МЕТОДА

2.2.3.1. Физическая модель измерительной ячейки

Для реализации метода определения ТФХ используется измерительная ячейка, физическая модель которой (рис. 2.10) представляет собой плоскую, многослойную, симметричную систему [131].

Первый слой 1 системы – плоский нагреватель и термометр сопротивления. Использование термометра сопротивления большой площади и малой толщины позволяет исключить погрешности, которые могли бы возникнуть при попадании малогабаритного датчика температуры (например термопары) в канал блока РП. Термометром сопротивления измеряется среднеинтегральная температура первого слоя.

Первый слой помещен между идентичными исследуемыми образцами, составляющими слои 4 и $4'$. Для механической защиты нагревателя и термометра сопротивления используют металлические защитные оболочки 3 и $3'$, отделенные от первого слоя тонкой электроизоляцией 2 и $2'$.

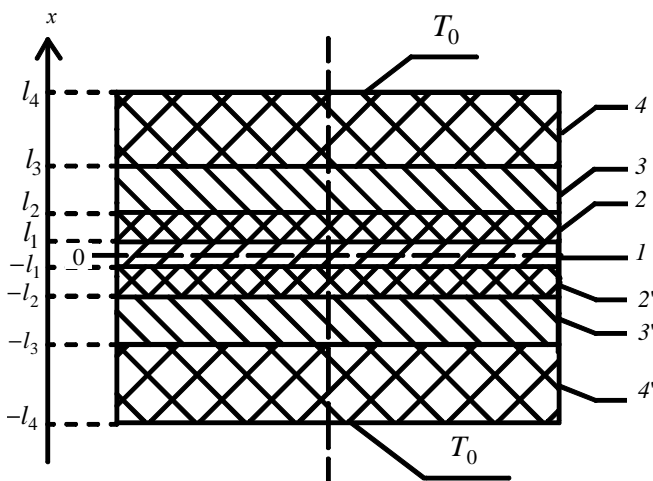


Рис. 2.10. Физическая модель измерительной ячейки

Температура T_0 внешних плоскостей исследуемых образцов (при $x = \pm l_4$) поддерживается постоянной на протяжении всего эксперимента.

2.2.3.2. Постановка и решение стационарной краевой задачи теплопроводности в измерительной ячейке с целью получения расчетной зависимости для определения теплопроводности

Теплопроводность исследуемого материала измеряется на стационарной стадии теплопереноса, на которой температура в первом слое модели (рис. 2.10) не изменяется во времени. Первый этап эксперимента по определению ТФХ проводят в следующей последовательности [131]. Подводят постоянную мощность W_1 к нагревателю, а температуру внешних поверхностей исследуемых образцов термостатируют при температуре T_0 . При наступлении стационарного теплового состояния измеряется среднеинтегральная температура первого слоя. По измеренной среднеинтегральной температуре вычисляется теплопроводность λ_4 исследуемого материала.

Для упрощения записи математической модели температурного поля в ИЯ сформулированы следующие допущения: а) температурное поле в многослойной системе считается одномерным; б) температура T_0 на внешних границах плоской системы поддерживается постоянной; в) термические сопротивления на поверхностях контакта слоев отсутствуют; г) теплофизические характеристики всех слоев системы считаются постоянными величинами, не зависящими от изменения температуры в ходе эксперимента; д) боковые утечки тепла отсутствуют; е) объемная мощность внутренних источников теплоты 1-го слоя является постоянной величиной, равномерно распределенной по всему объему первого слоя; ж) ТФХ исследуемого материала не зависят от координат.

С учетом симметричности многослойной системы относительно координаты $x=0$ и сформулированных допущений, математическую модель процесса распространения тепла на стационарной стадии теплопереноса можно представить для половины системы ($0 \leq x \leq l_4$) в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности с соответствующими граничными условиями:

$$a(x) \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{W(x)}{cp(x)} = 0, \quad 0 < x < l_4, \quad (2.32)$$

$$T'(0) = 0, \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} T(l_i - 0) = T(l_i + 0), \\ \lambda_i \frac{dT(l_i - 0)}{dx} = \lambda_{i+1} \frac{dT(l_i + 0)}{dx}, \end{cases} \quad i = \overline{1, 3} \quad (2.34)$$

$$T(l_4) = T_0 = \text{const}, \quad (2.35)$$

где $a(x)$ – функция температуропроводности, равная a_1, a_2, a_3, a_4 для 1 – 4 слоев соответственно; $cp(x)$ – функция объемной теплоемкости, равная $c_1\rho_1, c_2\rho_2, c_3\rho_3, c_4\rho_4$ для 1 – 4 слоев соответственно;

$$W(x) = \begin{cases} W_1, & \text{при } 0 < x < l_1, \\ 0, & \text{при } l_1 < x < l_4. \end{cases}$$

В результате решения прямой задачи теплопроводности (2.32) – (2.35) получаем систему уравнений, описывающих температурное поле в каждом слое многослойной системы при стационарном тепловом состоянии

$$\begin{cases} T(x) = -\frac{W_1}{\lambda_1} \frac{x^2}{2} + C_1x + C_2, & 0 < x < l_1, \\ T(x) = C_3x + C_4, & l_1 < x < l_2, \\ T(x) = C_5x + C_6, & l_2 < x < l_3, \\ T(x) = C_7x + C_8, & l_3 < x < l_4. \end{cases} \quad (2.36)$$

В системе уравнений (2.36) коэффициенты $C_1 \dots C_8$ есть постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий задачи (2.32) – (2.35).

После подстановки значений C_1 и C_2 в первое уравнение системы (2.36) получим выражение, описывающее распределение температуры в первом слое многослойной системы

$$T_1(x) = -\frac{W_1}{\lambda_1} \frac{x^2}{2} + T_0 + \frac{W_1 l_1^2}{\lambda_1} + \frac{W_1 l_1}{\lambda_2} \left\{ l_2 - l_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} [l_3 - l_2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_4} (l_4 - l_3)] \right\}. \quad (2.37)$$

Выражение для вычисления среднеинтегральной стационарной температуры первого слоя имеет вид

$$\overline{T}_{1\infty} = \int_{x=0}^{x=l_1} T_1(x) dx \Big/ \int_{x=0}^{x=l_1} dx, \quad (2.38)$$

а с учетом (2.37) после несложных преобразований получим формулу для вычисления теплопроводности исследуемого материала

$$\lambda_4 = \frac{h_4}{\frac{2(T_{1\infty} - T_0)}{W_1 h_1} - \frac{1}{6} \frac{h_1}{\lambda_1} - \frac{h_2}{\lambda_2} - \frac{h_3}{\lambda_3}}, \quad (2.39)$$

где $h_1 = 2l_1$, $h_2 = (l_2 - l_1)$, $h_3 = (l_3 - l_2)$, $h_4 = (l_4 - l_3)$ – толщины соответственно первого слоя, изоляции (второго слоя), металлической пластины (третьего слоя), исследуемого образца (четвертого слоя).

2.2.3.3. Постановка и решение нестационарной краевой задачи теплопроводности в измерительной ячейке с целью получения расчетной зависимости для определения температуропроводности

Для определения искомой температуропроводности после достижения стационарного распределения температур, описываемого системой уравнений (2.36), прекращают подвод мощности к источнику теплоты и начинают второй этап эксперимента (рис. 2.11).

На втором этапе эксперимента термостатируют внешние поверхности исследуемых образцов и измеряют с постоянным шагом во времени значение разности среднеинтегральной температуры первого слоя и температуры термостатирования [131].

Рассмотрим математическую модель нестационарного процесса теплопереноса в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \beta(\bar{x}) \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 < \bar{x} < 1, \quad Fo > 0, \quad (2.40)$$

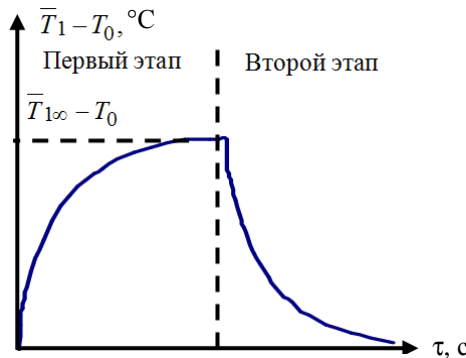


Рис. 2.11. Изменение среднеинтегральной температуры первого слоя многослойной системы в течение эксперимента

$$\Theta(\bar{x}, 0) = \Theta(\bar{x}), \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, \text{Fo})}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta\left(\frac{l_i}{l_4} - 0, \text{Fo}\right) = \Theta\left(\frac{l_i}{l_4} + 0, \text{Fo}\right), \\ \lambda_i \left(\frac{\partial \Theta\left(\frac{l_i}{l_4} - 0, \text{Fo}\right)}{\partial \bar{x}} \right) = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial \Theta\left(\frac{l_i}{l_4} - 0, \text{Fo}\right)}{\partial \bar{x}} \right), \end{array} \right. \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.43)$$

$$\Theta(1, \text{Fo}) = 0, \quad (2.44)$$

где $\bar{x} = \frac{x}{l_4}$ – безразмерная координата; $\text{Fo} = \frac{a_3 \tau}{l_4^2}$ – число Фурье;

$\Theta(\bar{x}, \text{Fo}) = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_{1\infty} - T_0}$ – безразмерная температура; $\Theta(\bar{x})$ – распределе-

ние безразмерной температуры в многослойной системе, полученное на стационарной стадии теплопереноса (в конце первого этапа эксперимента), вычисляемое по формулам

$$\Theta(\bar{x}) = \frac{T(x) - T_0}{T_{1\infty} - T_0}, \quad (2.45)$$

$T(x)$ – функция распределения температуры в i -м слое многослойной системы, определяемая по формулам (2.36); безразмерный параметр β , имеющий вид

$$\beta(\bar{x}) = \begin{cases} a_1 / a_3, & \text{при } 0 < x < l_1, \\ a_2 / a_3, & \text{при } l_1 < x < l_2, \\ 1, & \text{при } l_2 < x < l_3, \\ a_4 / a_3, & \text{при } l_3 < x < l_4. \end{cases}$$

Решение задачи (2.40) – (2.44), полученное на стадии регулярного режима первого рода методом разделения переменных имеет вид

$$\Theta(\bar{x}, \text{Fo}) \approx A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 \text{Fo}) \psi_1(\bar{x}), \quad (2.46)$$

где A_1 – постоянный множитель, определяемый из выражения

$$A_1 = \int_0^1 \Theta(\bar{x}) \psi_1(\bar{x}) d\bar{x} / \int_0^1 \psi_1^2(\bar{x}) d\bar{x}, \quad (2.47)$$

ε_1^2 – первое собственное значение; $\psi_1(\bar{x})$ – первая собственная функция задачи Штурма–Лиувилля:

$$\psi_1''(\bar{x}) + \varepsilon_1^2 / \beta(\bar{x}) \psi_1(\bar{x}) = 0, \quad (2.48)$$

$$\frac{d\psi_1(0)}{d\bar{x}} = 0, \quad (2.49)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} - 0\right) = \psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} + 0\right), \\ \lambda_i \left(\frac{d\psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} - 0\right)}{d\bar{x}} \right) = \lambda_{i+1} \left(\frac{d\psi_1\left(\frac{l_i}{l_4} + 0\right)}{d\bar{x}} \right), \quad i = \overline{1, 3}, \end{array} \right. \quad (2.50)$$

$$\psi_1(1) = 0. \quad (2.51)$$

На втором этапе эксперимента регистрируют среднеинтегральную температуру первого слоя многослойной системы. Теоретическое выражение для ее вычисления, с учетом (2.46) и (2.47) можно записать в виде

$$\bar{\Theta}_1(\text{Fo}) \approx \int_0^{l_1/l_4} \Theta(\bar{x}, \text{Fo}) d\bar{x} / \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x} = A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 \text{Fo}) \int_0^{l_1/l_4} \psi_1(\bar{x}) d\bar{x} / \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x}.$$

В последнем выражении, введя обозначение

$$B_1 = A_1 \int_0^{l_1/l_4} \psi_1(\bar{x}) d\bar{x} / \int_0^{l_1/l_4} d\bar{x}, \text{ получим } \bar{\Theta}_1(\text{Fo}) \approx B_1 \exp(-\varepsilon_1^2 \text{Fo}).$$

Прологарифмировав последнее выражение, получим уравнение прямой

$$\ln \bar{\Theta}_1(\text{Fo}) = -\varepsilon_1^2 \text{Fo} + \ln B_1, \quad (2.52)$$

тангенс угла наклона которой равен первому собственному значению ε_1^2 задачи (3.48) – (3.51), определяемому из эксперимента.

Подставив полученное значение ϵ_1^2 в задачу (3.48) – (3.51), и решая последнюю численно, подбирают значение параметра β_4 , удовлетворяющее граничным условиям. Искомую температуропроводность a_4 вычисляют по формуле

$$a_4 = \beta_4 a_3. \quad (2.53)$$

Таким образом, в главе рассмотрены теоретические основы методов исследования изменения ТФХ насыпных слоев зеренных сорбентов диоксида углерода и сорбентов в форме блоков с каналами. При разработке методов использовалось свойство хемосорбентов выделять тепло при поглощении диоксида углерода, что дает возможность путем контроля температур исследуемого материала определять степень его отработки. Для измерения ТФХ насыпных слоев зерен и блоков рекомендуется использовать два различных метода, в основе которых лежат решения соответствующих задач теплопроводности на стадии регулярного режима первого рода.

Следует отметить, что ТФХ сорбентов на матрице также могут быть исследованы показанными в главе методами.

Прежде чем перейти к описанию практической реализации разработанных методов необходимо решить ряд важнейших задач, связанных с оценкой погрешностей определения ТФХ, определением рациональных конструктивных размеров измерительных ячеек, определением рациональных режимов проведения экспериментов. Решению перечисленных задач посвящена следующая глава.

Глава 3

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При практической реализации методов измерения теплофизических характеристик РП и ХП важно предварительно определить рациональные параметры проведения экспериментов и конструкционные размеры измерительных устройств, что позволит, в конечном счете, провести измерения искомым характеристикам с наименьшими погрешностями. В данной главе проведем анализ возможных источников погрешностей, количественно оценим эти погрешности и разработаем рекомендации, направленные на повышение точности измерения.

3.1. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ ЗЕРНЕННЫХ СОРБЕНТОВ

3.1.1. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ

К основным погрешностям определения ТФХ и причинам их возникновения можно отнести [133–134]: 1) погрешности, возникающие вследствие того, что заданные в математических моделях ТФХ материалов слоев измерительной ячейки отличаются от действительных значений ТФХ; 2) погрешности измерения толщин слоев ИЯ; 3) погрешности измерения температур; 4) погрешности определения условий теплообмена (погрешности измерения коэффициентов теплоотдачи); 5) погрешности, вызванные не учетом наличия контактных термических сопротивлений на границах слоев; 6) погрешности, связанные с пренебрежением утечками тепла в окружающую среду; 7) погрешности определения первых собственных значений краевых задач Штурма–Лиувилля.

Искомые теплофизические характеристики λ_2, a_2 являются параметрами задач (2.13) – (2.16) и (2.17) – (2.20), что математически можно выразить в виде

$$a_2 = f((\epsilon_1^2)^I, (\epsilon_1^2)^II, Bi^I, Bi^II, l_1, l_2, l_3, l_4, \lambda_1, \lambda_3, \lambda_4, a_1, a_3, a_4),$$

где индексы I, II – определяют номер эксперимента, в котором определяется величина ϵ_1^2 .

Применяя традиционные подходы теории погрешностей измерений, получим выражение для вычисления среднеквадратичной погрешности определения температуропроводности

$$\left(\frac{\Delta a_2}{a_2}\right)_{\text{СК}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\text{II}} \left(\frac{\partial a_2}{\partial (\varepsilon_1^2)^j} \Delta (\varepsilon_1^2)^j\right)^2 + \sum_{j=1}^{\text{II}} \left(\frac{\partial a_2}{\partial \text{Bi}^j} \Delta \text{Bi}^j\right)^2} + \Omega, \quad (3.1)$$

$$\text{где } \Omega = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial a_2}{\partial l_i} \Delta l_i\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial \lambda_1} \Delta \lambda_1\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial \lambda_3} \Delta \lambda_3\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial \lambda_4} \Delta \lambda_4\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial a_1} \Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial a_3} \Delta a_3\right)^2 + \left(\frac{\partial a_2}{\partial a_4} \Delta a_4\right)^2.$$

Величина Ω включает в себя погрешности измерения геометрических размеров ИЯ и погрешности задания ТФХ ее конструктивных элементов (слоев). Поэтому можно считать, что Ω является постоянной для конкретной ИЯ величиной, которая может быть уменьшена за счет введения поправок в результаты измерения ТФХ. Значения поправок можно определить из экспериментов с веществами, теплофизические характеристики которых хорошо изучены. Поэтому целесообразно оценить вклад погрешностей определения первых собственных значений $(\varepsilon_1^2)^{\text{I}}$, $(\varepsilon_1^2)^{\text{II}}$ и чисел Био Bi^{I} , Bi^{II} в общую погрешность определения a_2 .

Для оценки погрешностей определения чисел Био необходимо проанализировать методику их экспериментального определения. Она состоит (см. раздел 2.1.3) в том, что в экспериментах по измерению ТФХ наряду с измерительной ячейкой дополнительно охлаждается сравнительная ячейка. Причем, для того, чтобы условия теплообмена на внешних поверхностях ИЯ и СЯ можно было считать одинаковыми, их размеры должны совпадать ($l_3 = l_4$), а теплофизические характеристики материала сравнительной ячейки (λ_3 , a_3) и материала внешней оболочки измерительной ячейки должны быть одинаковы. При выполнении этих условий коэффициент теплоотдачи будет определяться как $\alpha = \text{Bi}_3 \lambda_3 / l_3$, а число Био, характеризующее условия теплообмена на поверхности измерительной ячейки будет вычисляться из выражения $\text{Bi} = \text{Bi}_3 \lambda_3 l_4 / (\lambda_4 l_3)$ или $\text{Bi} = \text{Bi}_3$. В ходе эксперимента с эталонным образцом регистрируют температуру $T_3(0, \tau)$ в его центре, вычисляют безразмерную температуру $\Theta_3(0, \text{Fo}) = (T_3(0, \tau) - T_c) / (T_0 - T_c)$ и определяют первое собственное значение ε_{31}^2 , имеющее смысл тангенса угла наклона прямолинейного участка графика зависимости $\ln \Theta_3(0, \text{Fo}) = f(a_3 \tau / l_3^2)$.

Зависимости чисел Bi_3 от первых собственных значений ε_{31}^2 для СЯ в форме пластины имеют вид [70]

$$Bi_3 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{31}^2}}{\operatorname{ctg} \sqrt{\varepsilon_{31}^2}}, \quad (3.2)$$

Из приведенного выражения получим формулу для вычисления среднеквадратичных погрешностей определения чисел Био [133]

$$\left(\frac{\Delta Bi_3}{Bi_3} \right)_{\text{ск}} = \sqrt{0,25 \left(\frac{\Delta \varepsilon_{31}^2}{\varepsilon_{31}^2} \right)^2 + \frac{\varepsilon_{31}^2}{0,25 \sin^2 \sqrt{\varepsilon_{31}^2} \cos^2 \sqrt{\varepsilon_{31}^2} \left(\frac{\Delta \varepsilon_{31}^2}{\varepsilon_{31}^2} \right)^2}.$$

Подобные зависимости нетрудно получить для СЯ в форме цилиндра и шара. Анализ таких зависимостей позволяет сделать вывод, что при относительно малых числах Био ($Bi \leq 1,5$) среднеквадратичные погрешности определения чисел Био для образцов различной геометрической формы не превысят 3...6% (рис. 3.1).

Дальнейшее увеличение числа Био приводит к росту величины $\left(\frac{\Delta Bi_3}{Bi_3} \right)_{\text{ск}}$, что негативно скажется на точности последующего определения теплофизических характеристик. Отметим, что первый эксперимент проводится при условии $Bi \rightarrow \infty$ (на практике при термостатировании внешних поверхностей газопроницаемых оболочек), что позволяет исключить необходимость измерения числа Био в одном из двух экспериментов.

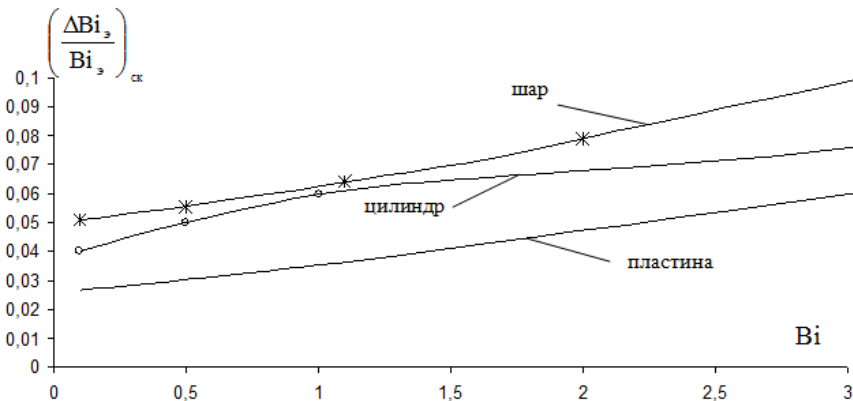


Рис. 3.1. Графики зависимости $\left(\frac{\Delta Bi_3}{Bi_3} \right)_{\text{ск}} = f(Bi)$

Для оценки среднеквадратичной погрешности определения величины ε_1^2 предположим, что в качестве граничных точек прямолинейного участка зависимости $\ln \Theta(0, Fo) = f(Fo)$ (рис. 2.2) можно считать точки с координатами $(\ln \Theta^*, Fo^*)$, $(\ln \Theta^{**}, Fo^{**})$. Следовательно величину ε_1^2 можно вычислить по формуле

$$-\varepsilon_1^2 = \frac{\ln \Theta^{**}(0, Fo^{**}) - \ln \Theta^*(0, Fo^*)}{Fo^{**} - Fo^*}, \quad (3.3)$$

где Fo^* соответствует времени τ^* достижения в точке измерения температуры регулярного режима первого рода.

Из последнего выражения нетрудно получить формулу для расчета среднеквадратичной погрешности определения ε_1^2

$$\left(\frac{\Delta \varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2} \right)_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\ln \frac{\Theta^*}{\Theta^{**}} \right)^2} \left\{ \left(\frac{\Delta \Theta}{\Theta^*} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \Theta}{\Theta^{**}} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\Delta l_i}{l_i} \right)^2 + \left(\frac{\Delta a_i}{a_i} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau^{**} - \tau^*} \right)^2}, \quad (3.4)$$

где $i = 3, 4$ на первом и втором этапах эксперимента соответственно.

Проведем анализ полученного выражения. Будем определять такой диапазон экспериментальных данных $\Theta^{**} \leq \Theta \leq \Theta^*$, в котором погрешность определения величины ε_1^2 стремится к минимуму. Безразмерная температура Θ^* может быть вычислена по формуле [133]

$$\Theta^* = A_k \left(-0,01 \frac{A_k}{A_{k+1}} \right)^{\frac{-\varepsilon_k^2}{\varepsilon_k^2 - \varepsilon_{k+1}^2}}, \quad k = 1, \quad (3.5)$$

где A_k равна для неограниченной пластины [70]

$$A_k = (-1)^{k+1} \frac{2Bi \sqrt{Bi^2 + \varepsilon_k^2}}{\varepsilon_k (Bi^2 + Bi + \varepsilon_k^2)}. \quad (3.6)$$

Первое и второе собственные значения вычисляются из уравнения [70]:

$$\text{ctg} \varepsilon_k = \frac{1}{Bi} \varepsilon_k.$$

Отметим, что при использовании ИЯ в форме цилиндра или шара, выражения для вычисления A_k и ε_k примут вид [70]:

– для неограниченного цилиндра

$$A_k = \frac{2\text{Bi}}{J_0(\varepsilon_k)(\text{Bi}^2 + \varepsilon_k^2)}, \quad (3.7)$$

$$\frac{J_0(\varepsilon_k)}{J_1(\varepsilon_k)} = \frac{1}{\text{Bi}} \varepsilon_k, \quad (3.8)$$

– для шара

$$A_k = (-1)^{k+1} \frac{2\text{Bi}\sqrt{(\text{Bi}-1)^2 + \varepsilon_k^2}}{\text{Bi}^2 - \text{Bi} + \varepsilon_k^2}, \quad (3.9)$$

$$\text{tg}\varepsilon_k = -\frac{1}{\text{Bi}-1} \varepsilon_k. \quad (3.10)$$

Таким образом, значение Θ^* зависит от условий проведения эксперимента, характеризуемых числом Bi (рис. 3.2).

Значение Θ^{**} будем определять по следующей методике. Запишем выражение для вычисления среднеквадратичной погрешности определения безразмерной температуры [134]

$$\left(\frac{\Delta\Theta}{\Theta}\right)_{\text{ск}} = \frac{\Delta T}{(T_0 - T_c)} \frac{\sqrt{\Theta^2 + 1}}{\Theta},$$

где ΔT – абсолютная погрешность измерения температур в эксперименте.

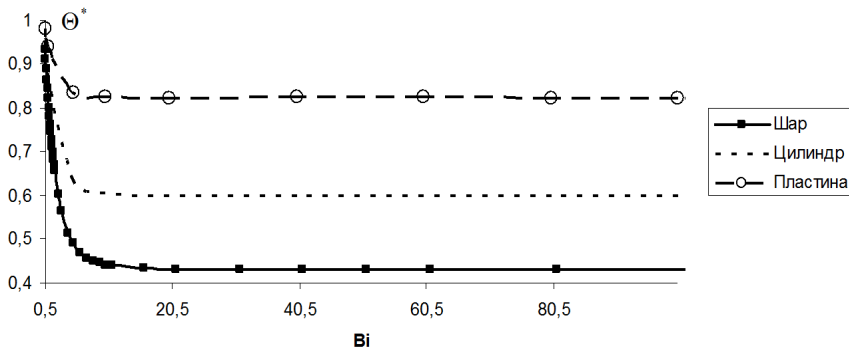


Рис. 3.2. Графики зависимости $\Theta^* = f(\text{Bi})$

Введем обозначения

$$K_1 = \left(\frac{\Delta l_n}{l_n} \right)^2 + \left(\frac{\Delta a_n}{a_n} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau^{**} - \tau^*} \right)^2, \quad n = 3, 4$$

$$\Theta^* = f_1(\text{Bi}) = A_k \left(-0,01 \frac{A_k}{A_{k+1}} \right)^{\frac{-\varepsilon_k^2}{\varepsilon_k^2 - \varepsilon_{k+1}^2}},$$

$$\frac{\Delta \Theta}{\Theta^*} = f_2(\text{Bi}) = \frac{\Delta T}{(T_0 - T_c)} \sqrt{1 + \frac{1}{(f_1(\text{Bi}))^2}},$$

$$\left(\frac{\Delta \Theta}{\Theta^{**}} \right)^2 = K_2 \left(1 + \frac{1}{(\Theta^{**})^2} \right),$$

$$K_2 = \left(\frac{\Delta T}{(T_0 - T_c)} \right)^2,$$

и запишем уравнение (3.4) в виде

$$\left(\frac{\Delta \varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2} \right)_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\ln \frac{f_1(\text{Bi})}{\Theta^{**}} \right)^2} \left\{ (f_2(\text{Bi}))^2 + K_2 \left(1 + \frac{1}{(\Theta^{**})^2} \right) \right\}} + K_1. \quad (3.11)$$

Продифференцируем (3.11) по переменной Θ^{**}

$$\frac{dy}{d\Theta^{**}} = \frac{1}{2y(\Theta^{**})} \left[\frac{2(f_2(\text{Bi}))^2 + 2K_2}{\Theta^{**} \left(\ln \frac{f_1(\text{Bi})}{\Theta^{**}} \right)^3} + K_2 \left(\frac{-2}{(\Theta^{**})^3 \left(\ln \frac{f_1(\text{Bi})}{\Theta^{**}} \right)^2} + \frac{2}{(\Theta^{**})^3 \left(\ln \frac{f_1(\text{Bi})}{\Theta^{**}} \right)^3} \right) \right], \quad (3.12)$$

где $\left(\frac{\Delta \varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2} \right)_{\text{ск}} = y(\Theta^{**})$.

Искомое значение Θ^{**} определяют из решения уравнения

$$\frac{dy}{d\Theta^{**}} = 0. \quad (3.13)$$

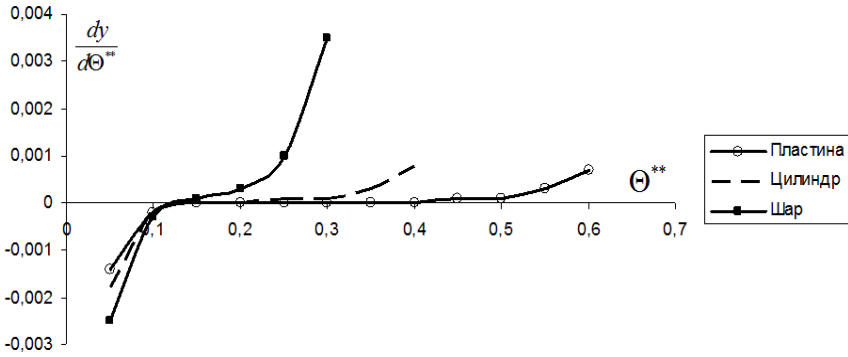


Рис. 3.3. Графики зависимости $\frac{dy}{d\Theta^{**}} = f(\Theta^{**})$ при $Bi \geq 10$

Например, на рис. 3.3 показано, что при условиях проведения эксперимента, характеризуемых числами Био большими 10, для образцов в форме пластины величина Θ^{**} составит 0,15...0,4, а для цилиндрических и сферических образцов 0,2 и 0,15 соответственно.

Анализ выражения (3.4) (рис. 3.4, 3.5) показывает, что с целью определения первого собственного значения ε_1^2 с наименьшей погрешностью необходимо использовать экспериментальные данные из диапазона

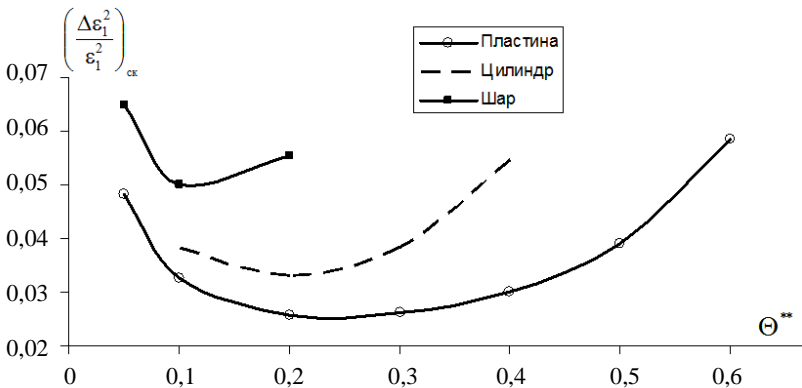


Рис. 3.4. Графики зависимости $\left(\frac{\Delta\varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2}\right)_{ск} = f(\Theta^{**})$ при $Bi \geq 10$,
для пластины $\Theta^* = 0,8$; для цилиндра $\Theta^* = 0,6$; для шара $\Theta^* = 0,4$

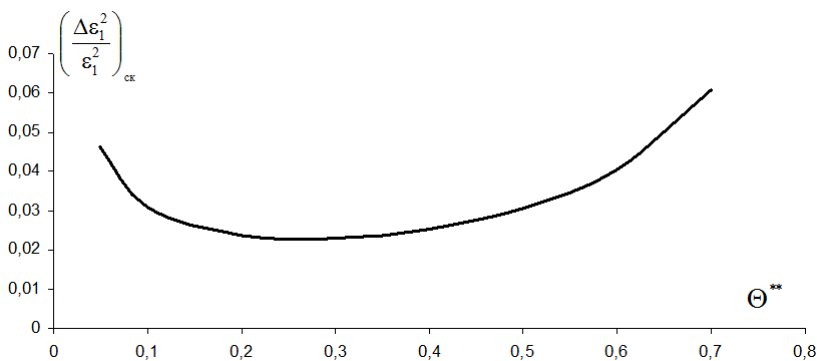


Рис. 3.5. Графики зависимости $\left(\frac{\Delta \varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2}\right)_{\text{ск}} = f(\Theta^{})$ при $Bi \leq 0,5$,
для пластины, цилиндра и шара $\Theta^* = 0,9$**

$\Theta^{**} \leq \Theta \leq \Theta^*$, причем при определении значений Θ^* и Θ^{**} необходимо учитывать геометрические размеры и форму исследуемого материала, а также условия проведения эксперимента, которые характеризуются числом Bi и перепадом температур $T_0 - T_c$ в ходе эксперимента.

Таким образом, в результате анализа расчетных зависимостей для оценки среднеквадратичных погрешностей определения чисел Био и первых собственных значений разработаны следующие рекомендации [133]:

1) первый эксперимент необходимо проводить при условиях, характеризуемых числом Био $Bi^I > 100$, а второй эксперимент при $Bi^{II} < 1,5$.

2) при определении первых собственных значений $(\varepsilon_1^2)^I$, $(\varepsilon_1^2)^{II}$ необходимо использовать экспериментальные данные из диапазонов $\Theta^* \leq \Theta \leq \Theta^{**}$, где значения Θ^* определяют по (3.5), а Θ^{**} – из уравнения (3.11) в зависимости от формы исследуемых образцов и условий проведения эксперимента.

При выполнении рекомендаций среднеквадратичные погрешности определения числа Bi^{II} не превысят 3...6%, первых собственных значений $(\varepsilon_1^2)^I - 2,5...3\%$ и $(\varepsilon_1^2)^{II} - 2,5...5\%$ для образцов различной геометрической формы. Далее не трудно вычислить, что при подстановке параметров $(\varepsilon_1^2)^I$, $(\varepsilon_1^2)^{II}$ и Bi^{II} в задачи (2.13) – (2.16) и (2.17) – (2.20) и численном их решении относительно искомого ТФХ с учетом указанных погрешностей, погрешности определения искомой теплопроводности не превысят 15%, а безразмерной температуропроводности – 10%.

3.1.2. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ СЛОЕВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Будем рассматривать трехслойную плоскую систему (рис. 3.6) с двумя вариантами выбора материалов этой системы:

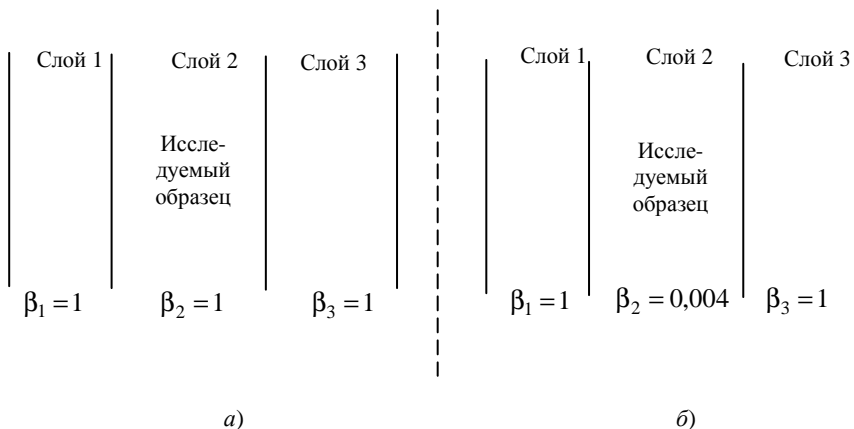


Рис. 3.6. Варианты выбора материалов слоев трехслойной плоской системы

В варианте *a* – свойства слоев 1, 2, 3 одинаковы, в варианте *б* – температуропроводность слоя 2 значительно меньше температуропроводности слоев 1 и 3. Вариант *a* может быть реализован при изготовлении слоев 1, 3 из тонкой нержавеющей сетки, так как ТФХ такой сетки, как установлено экспериментально, близки по своим значениям к характеристикам оргстекла и исследуемого материала. В варианте *б* слои 1, 3 изготовлены из металлической сетки с высокой теплопроводностью (алюминий, медь). Путем математического моделирования были определены возможные зависимости $\varepsilon_1^2 = f(Vi)$ (рис. 3.7).

Из графиков видно, что для варианта *a* выбора материалов вероятные значения ε_1^2 в опытах составят 0,5...2,3, а в варианте *б* ε_1^2 – 0,01...0,015. Поэтому в случае *б*, необходимо будет определять первое собственное значение с точностью до 4–5 знаков после запятой, а следовательно и при решении соответствующих задач Штурма–Лиувилля потребуются такая же точность при определении параметра β_2 , что весьма затруднительно при программной реализации метода.

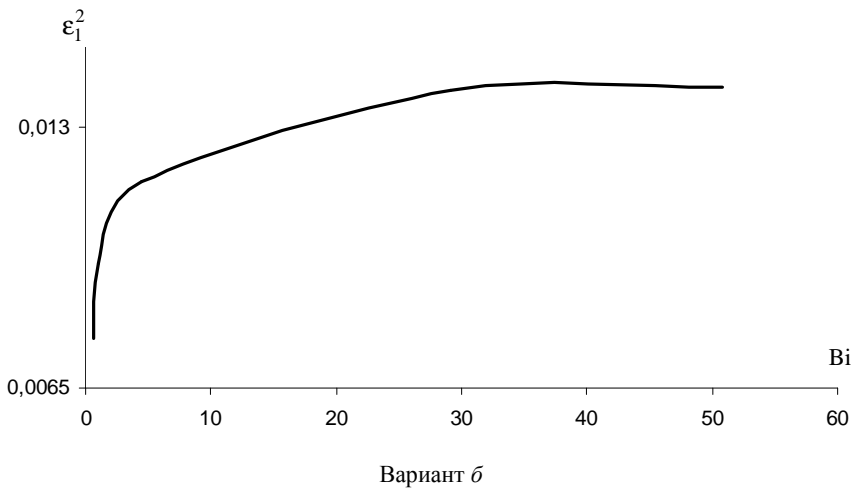
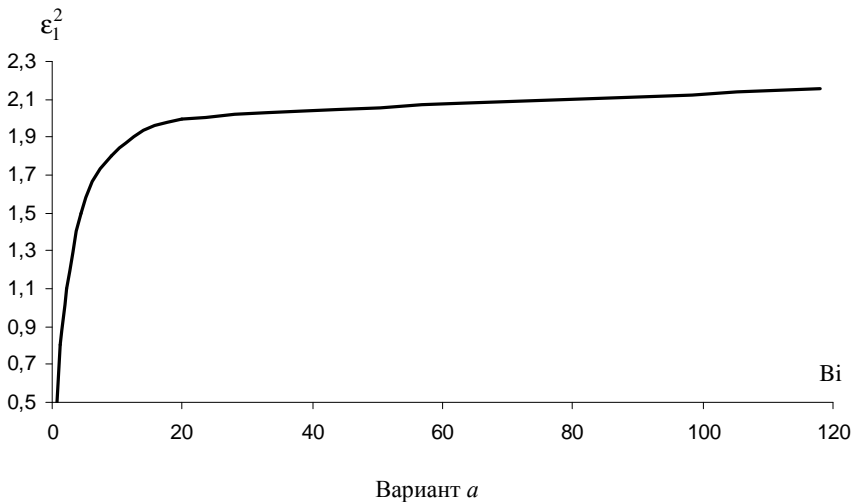


Рис. 3.7. Графики зависимости $\varepsilon_1^2 = f(Bi)$ для трехслойной плоской системы

Таким образом, наиболее целесообразно при изготовлении измерительной ячейки использовать в качестве первого и третьего слоев сетку из нержавеющей стали.

3.2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ В ФОРМЕ БЛОКОВ С КАНАЛАМИ

3.2.1. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ

К погрешностям метода можно отнести [135]: погрешности задания ТФХ материалов слоев ИЯ; погрешности измерения толщин слоев многослойных систем; погрешности измерения разности среднеинтегральной температуры первого слоя и температуры термостатирования; погрешность измерения мощности источников теплоты, расположенных в первом слое ИЯ; погрешности, вызванные допущениями, позволяющими упростить запись математической модели температурного поля в измерительной ячейке и дальнейшее решение стационарной и нестационарной задач теплопроводности, а именно: а) погрешности, связанные с колебанием температуры T_0 термостатирования внешних поверхностей исследуемых образцов; б) погрешности, вызванные учетом наличия контактных термических сопротивлений на границах слоев; в) погрешности, вызванные отличием между теоретическим распределением теплового потока и его реальным распределением. Одной из причин отличия между теоретическим и реальным распределениями тепловых потоков может быть наличие боковых утечек тепла в окружающую среду; погрешности определения первого собственного значения ε_1^2 краевой задачи Штурма–Лиувилля; погрешности численного решения краевой задачи (2.48) – (2.51).

3.2.2. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Для оценки среднеквадратичной погрешности определения теплопроводности используется выражение [135]

$$(\Delta\lambda_4 / \lambda_4)_{\text{ск}} = \sqrt{\left[\frac{\Delta h_4}{h_4} \right]^2 + \frac{1}{F_1^2} E_1}, \quad (3.14)$$

которое получено путем применения теории погрешностей к расчетному выражению (2.39). В формуле (3.14) введены следующие обозначения

$$E_1 = \left[\frac{\partial F_1}{\partial (T_{1\infty} - T_0)} \Delta(\bar{T}_{1\infty} - T_0) \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial W_1} \Delta W_1 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial h_1} \Delta h_1 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial h_2} \Delta h_2 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial h_3} \Delta h_3 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial \lambda_1} \Delta \lambda_1 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial \lambda_2} \Delta \lambda_2 \right]^2 + \left[\frac{\partial F_1}{\partial \lambda_3} \Delta \lambda_3 \right]^2,$$

$$F_1 = \frac{2(\bar{T}_{1\infty} - T_0)}{W_1 h_1} - \frac{1}{6} \frac{h_1}{\lambda_1} - \frac{h_2}{\lambda_2} - \frac{h_3}{\lambda_3}.$$

Соответствующие частные производные вычисляются по формулам:

$$\frac{\partial F_1}{\partial (\bar{T}_{1\infty} - T_0)} = \frac{2}{W_1 h_1}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial W_1} = -\frac{2(\bar{T}_{1\infty} - T_0)}{W_1^2 h_1}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial h_1} = -\frac{2(\bar{T}_{1\infty} - T_0)}{W_1 h_1^2} - \frac{1}{6\lambda_1};$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial h_2} = -\frac{1}{\lambda_2}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial h_3} = -\frac{1}{\lambda_3}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_1} = \frac{h_1}{6\lambda_1^2}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_2} = \frac{h_2}{\lambda_2^2}; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_3} = \frac{h_3}{\lambda_3^2}.$$

Если допустить, что погрешности измерения толщин слоев, задания свойств слоев, измерения мощности W_1 источников теплоты являются постоянными, то $(\Delta\lambda_4 / \lambda_4)_{\text{СК}}$ есть функция от $(\bar{T}_{1\infty} - T_0)$ (рис. 3.8).

Расчеты проведены для интервала температур $0,5^\circ\text{C} \leq (\bar{T}_{1\infty} - T_0) \leq 10^\circ\text{C}$ при следующих исходных данных: $\lambda_1 = 190 \pm 10$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 0,15 \pm 0,01$ Вт/(м·К); $\lambda_3 = 42 \pm 3$ Вт/(м·К), $h_1 = 0,3 \pm 0,01$ мм; $h_2 = 0,3 \pm 0,01$ мм; $h_3 = 1 \pm 0,01$ мм; $h_4 = 8 \pm 0,01$ мм; $W_1 = 585\,340 \pm 49\,000$ Вт/м³; $\Delta(\bar{T}_{1\infty} - T_0) = 0,07^\circ\text{C}$.

Из графиков видно, что в интервале температур $(\bar{T}_{1\infty} - T_0)_{\text{min}} \leq \bar{T}_{1\infty} - T_0 \leq (\bar{T}_{1\infty} - T_0)_{\text{max}}$ погрешность определения тепло-

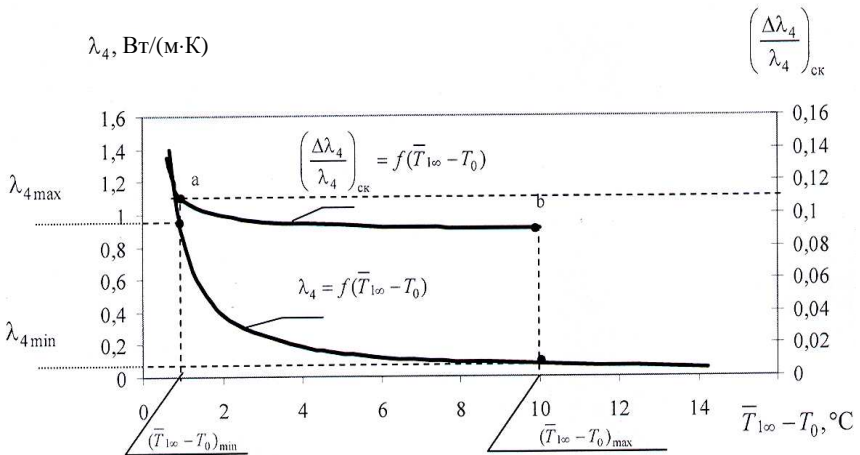


Рис. 3.8. К оценке погрешности определения теплопроводности

проводности находится в диапазоне $9,5\% \leq \left(\frac{\Delta\lambda_4}{\lambda_4} \right)_{\text{ск}} \leq 11,5\%$. Не рекомендуется превышать максимальное значение перепада температур $(\bar{T}_{1\infty} - T_0)$, приблизительно равное 10°C из-за возможного возникновения нелинейности в записи уравнений теплопроводности, описывающих температурные поля в ИЯ [136].

Анализируя графики, приведенные на рис. 3.8, можно сделать вывод, что если в конце первого этапа эксперимента получена стационарная разность температур, которая меньше $(\bar{T}_{1\infty} - T_0)_{\text{min}}$, то мощность, подводимую к источнику теплоты, следует увеличить и провести повторный эксперимент. Увеличение мощности источника теплоты приведет к увеличению стационарной разности температур $(\bar{T}_{1\infty} - T_0)$ и попаданию этой разности температур в диапазон $[(\bar{T}_{1\infty} - T_0)_{\text{min}}, (\bar{T}_{1\infty} - T_0)_{\text{max}}]$. При этом относительная погрешность определения теплопроводности попадет в диапазон [9,5%; 11,5%].

Следует отметить, что полученная теоретическая оценка содержит систематические погрешности, которые могут быть устранены путем введения поправок в результаты измерения. Значения поправок могут быть определены в экспериментах с веществами с известными ТФХ.

3.2.3. ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения задачи автоматизации эксперимента на первом этапе программа, управляющая ходом эксперимента, должна определить момент времени (рациональный момент окончания 1 этапа эксперимента), когда тепловой процесс с заданной точностью можно считать стационарным и прекратить подвод мощности к нагревателю. С этой целью в ходе первого этапа эксперимента контролируют значение динамического параметра γ , вычисляемого по формуле [132]

$$\gamma = \frac{(\bar{T}_{1,1} - \bar{T}_{1,0}) - (\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{1,j-1})}{(\bar{T}_{1,1} - \bar{T}_{1,0})} = 1 - \frac{(\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{1,j-1})}{(\bar{T}_{1,1} - \bar{T}_{1,0})}, \quad (3.15)$$

где $\bar{T}_{1,0}, \bar{T}_{1,1}$ – среднеинтегральные температуры первого слоя, измеренные при $\tau = 0$ и на первом шаге измерения, соответственно; $\bar{T}_{1,j}, \bar{T}_{1,j-1}$ – среднеинтегральные температуры первого слоя, измеренные на текущем j -м и предыдущем $j - 1$ шагах измерения.

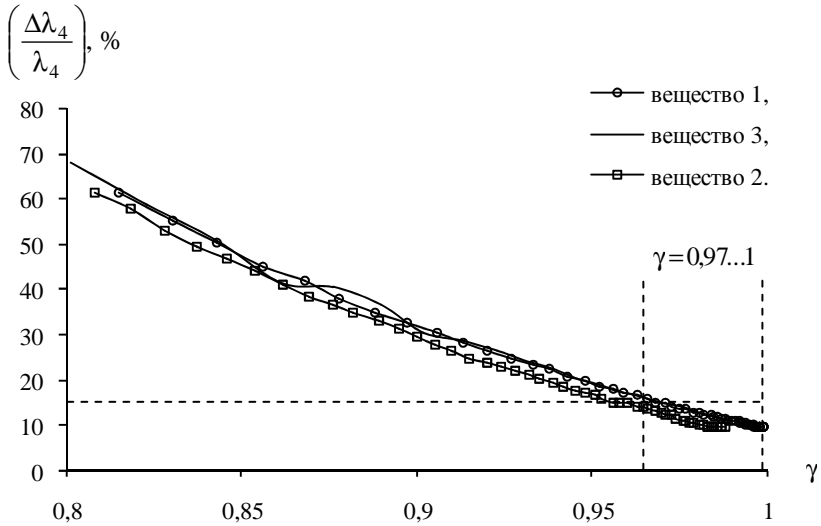


Рис. 3.9. Графики функции $\left(\frac{\Delta\lambda_4}{\lambda_4}\right) = f(\gamma)$

Для определения значения динамического параметра, при котором следует прекращать проведение первого этапа эксперимента, проводили эксперименты с веществами, свойства которых хорошо изучены: органическое стекло (вещество 1), полистирол (вещество 2) и текстолит (вещество 3). Вычисляли погрешности определения ТФХ в зависимости от текущего значения параметра γ (рис. 3.9).

Из графиков видно, что погрешность измерения теплопроводности не превысит 15% при условии окончания первого этапа эксперимента при $\gamma = 0,97$.

3.2.4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

Прологарифмируем, а затем продифференцируем выражение (2.53). Получим выражение [137]

$$\frac{da_4}{a_4} = \frac{d\beta_4}{\beta_4} + \frac{da_3}{a_3},$$

Которое с учетом того, что $\beta_4 = f(\epsilon_1^2, l_1, l_2, l_3, l_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, a_1, a_2, a_3)$, примет вид

$$\frac{da_4}{a_4} = \frac{1}{\beta_4} \left\{ \frac{\partial \beta_4}{\partial \varepsilon_1^2} d\varepsilon_1^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \beta_4}{\partial l_i} dl_i + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \beta_4}{\partial \lambda_i} d\lambda_i + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \beta_4}{\partial a_i} da_i \right\} + \frac{da_3}{a_3}.$$

Численное моделирование показало, что членами $\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\partial \beta_4}{\partial l_i} \Delta l_i \right]$,

$$\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\partial \beta_4}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i \right], \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial \beta_4}{\partial a_i} \Delta a_i \right]$$
 можно пренебречь в силу того, что сумма их

значений много меньше суммы значений остальных членов представленной зависимости. Перейдя от дифференциалов к конечным разностям, получим предельную оценку погрешности определения температуропроводности в виде зависимости

$$\left(\frac{\Delta a_4}{a_4} \right)_{\text{пр}} = \frac{1}{\beta_4} \left\{ \frac{\partial \beta_4}{\partial \varepsilon_1^2} \Delta \varepsilon_1^2 \right\} + \frac{\Delta a_3}{a_3}.$$

Считая, что координаты граничных точек прямолинейного участка зависимости (2.52) равны соответственно $(\ln \Theta^*, Fo^*)$ и $(\ln \Theta^{**}, Fo^{**})$, получим выражение

$$\varepsilon_1^2 = \frac{\ln \bar{\Theta}_1^* - \ln \bar{\Theta}_1^{**}}{Fo^{**} - Fo^*} = \frac{l_4^2 \ln \bar{\Theta}_1^* / \bar{\Theta}_1^{**}}{a_3 (\tau^{**} - \tau^*)},$$

из которого следует

$$\frac{d(\varepsilon_1^2)}{\varepsilon_1^2} = \frac{1}{\ln \left[\frac{\bar{\Theta}_1^*}{\bar{\Theta}_1^{**}} \right]} \left[\frac{d\bar{\Theta}_1^*}{\bar{\Theta}_1^*} - \frac{d\bar{\Theta}_1^{**}}{\bar{\Theta}_1^{**}} \right] + 2 \frac{dl_4}{l_4} - \frac{da_3}{a_3} - \frac{d(\tau^{**} - \tau^*)}{(\tau^{**} - \tau^*)}.$$

Перейдя от дифференциалов к конечным разностям и, заменив знаки «-» на «+», получим выражение для расчета среднеквадратичной погрешности определения температуропроводности

$$\left(\frac{\Delta a_4}{a_4} \right)_{\text{ск}} = \sqrt{\left[\frac{\Delta a_3}{a_3} \right]^2 + \left[\frac{\varepsilon_1^2}{\beta_4} \right]^2 \cdot \left[\frac{\partial \beta_4}{\partial \varepsilon_1^2} \right]^2 \cdot \left\{ E_3 + \left[\frac{\Delta l_4}{l_4} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \tau}{\tau^{**} - \tau^*} \right]^2 + \left[\frac{\Delta a_3}{a_3} \right]^2 \right\}}, \quad (3.16)$$

$$\text{где } E_3 = \frac{1}{\left[\ln \frac{\bar{\Theta}_1^*}{\bar{\Theta}_1^{**}} \right]^2} \left[\left[\frac{\Delta \bar{\Theta}_1^*}{\bar{\Theta}_1^*} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \bar{\Theta}_1^{**}}{\bar{\Theta}_1^{**}} \right]^2 \right].$$

Анализ полученного выражения позволяет сделать вывод, что погрешности определения температуропроводности на втором этапе зависят от геометрических размеров (толщины) и свойств слоев ИЯ, от погрешности измерения температуры и от погрешности определения первого собственного значения ε_1^2 задачи Штурма–Лиувилля.

Очевидно, что погрешности задания свойств слоев и измерения толщины слоев имеют систематический характер, а погрешность определения ε_1^2 является величиной случайной, зависящей от выбора граничных точек прямолинейного участка графика функции $\ln \bar{\Theta}_1(\text{Fo})$ (рис. 3.10) [135, 137].

На рисунке 3.10 в качестве ТФХ для веществ 1 – 3 были взяты свойства оргстекла, полистирола, текстолита.

Как видно из рисунка, если для вычисления величины ε_1^2 использовать экспериментальные данные из диапазона $\bar{\Theta}_1 \in [0,4; 0,1]$, то погрешность определения температуропроводности не превысит 10%.

Таким образом, на втором этапе эксперимента рекомендуется контролировать значение динамического параметра $\bar{\Theta}_1$. Эксперимент следует заканчивать в тот момент времени (рациональный момент окончания 2 этапа), когда текущее значение динамического параметра $\bar{\Theta}_1$ станет меньше 0,1. Далее рассмотрим технические средства, алгоритмическое и программное обеспечение для реализации методов исследования ТФХ сорбентов.

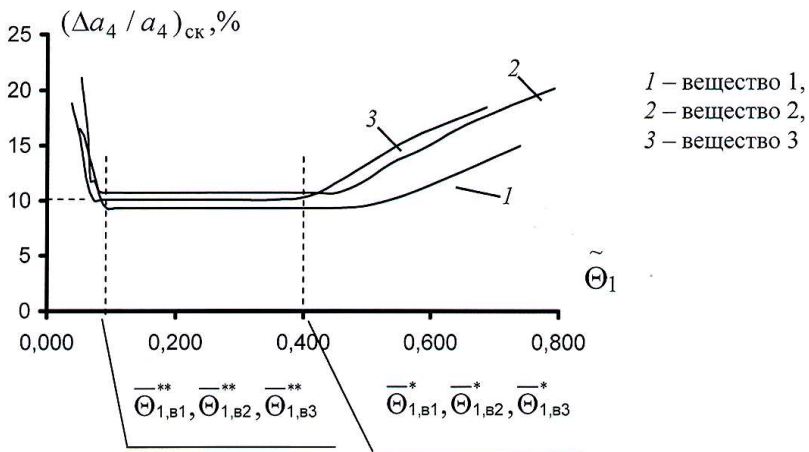


Рис. 3.10. Графики функции $\left(\frac{\Delta a_4}{a_4} \right)_{\text{СК}} = f(\bar{\Theta}_1)$

Глава 4

ТЕХНИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ

4.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Структурная схема автоматизированной установки (АИУ) для исследований ТФХ сорбентов представлена на рис. 4.1.

Измерительная установка включает две измерительные ячейки ИЯ1, ИЯ2, предназначенные для определения ТФХ зерновых сорбентов и сорбентов в форме блоков с каналами соответственно. Сигналы первичных измерительных преобразователей (термометров сопротивления) измерительных ячеек, включенных в мостовые схемы МСиУ, усиливаются и вводятся в компьютер через плату сбора данных стандарта РС1. Для задания условий опыта применяют жидкостный ЖТ и воздушный ВТ термостаты. Для определения коэффициента теплоотдачи используют сравнительную ячейку СЯ.

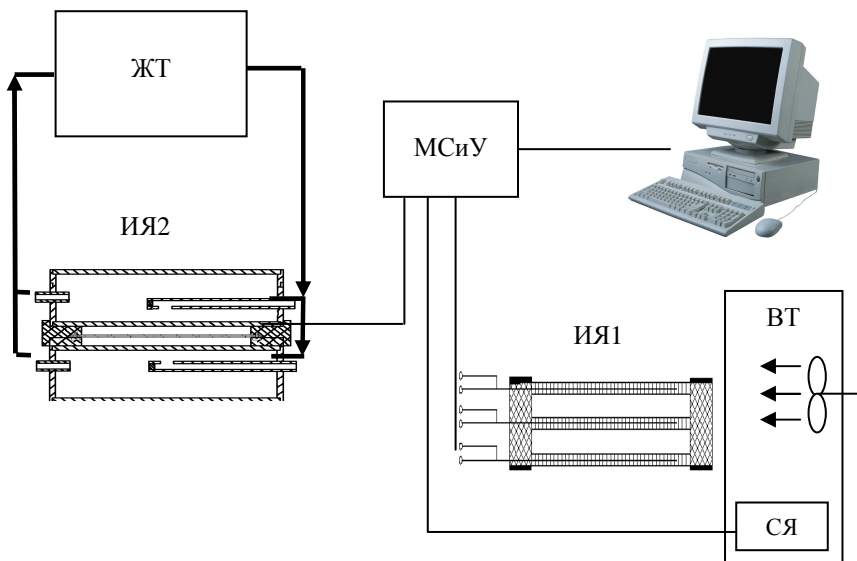


Рис. 4.1. Структурная схема АИУ

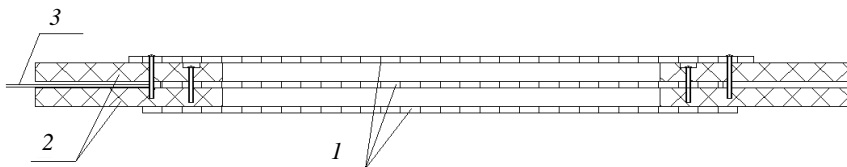


Рис. 4.2. Конструкция измерительной ячейки 1

Для исследований ТФХ зеренных сорбентов используется ИЯ1, конструкция которой представлена на рис. 4.2.

ИЯ1 состоит из трех металлических сеток *1*, которые крепятся к фторопластовым кольцам *2* посредством винтов. Толщина сетки выбирается исходя из диаметра слоя – чем больше диаметр, тем толще сетка. Это позволяет предотвращать ее деформацию при засыпке сорбента и в ходе опыта. На практике, при диаметре слоя 70...80 мм используется сетка из нержавеющей металла толщиной до 0,5 мм. На центральной сетке размещен термометр сопротивления – медная проволока, концы которой *3* выводятся наружу и подключаются к мостовой схеме. Наружные сетки *1* съемные, что позволяет размещать между ними и центральной сеткой тонкий слой исследуемого сорбента. Перед засыпкой сорбента и после измерительная ячейка взвешивается, что позволяет определять насыпную плотность исследуемого материала в ячейке до начала опыта. Во фторопластовых кольцах дополнительно предусмотрены резьбовые отверстия под винты (на рисунке не показаны), предназначенные для крепления внешних защитных оболочек из оргстекла.

Конструкция измерительной ячейки ИЯ2 представлена на рис. 4.3 [132].

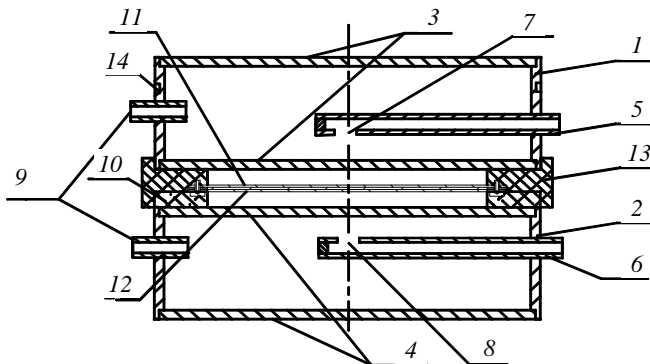


Рис. 4.3. Конструкция измерительной ячейки 2

ИЯ2 включает в свой состав верхний и нижний теплообменники, образованные полыми цилиндрическими деталями 1 и 2, с торцевых сторон закрытых крышками 3 и 4. Теплообменники предназначены для поддержания постоянной температуры T_0 на внешней поверхности исследуемого вещества. В каждый теплообменник вставлены трубки 5 и 6, предназначенные для подачи теплоносителя (воды). Трубки 5 и 6 запаяны с одного конца, а в каждой трубке сбоку сделаны отверстия 7 и 8, предназначенные для направления потока теплоносителя на рабочие поверхности теплообменников. Для отвода теплоносителя используются трубки 9.

На нижнем теплообменнике крепится кольцо 10 из теплоизоляционного материала. Деталь 11 представляет собой металлическую пластину с приклеенной к его поверхности полиэтиленерефтолатной пленкой, на которую приклеивается медная проволока (термометр сопротивления, измеряющий температуру \bar{T}_1) и нагреватель из манганиновой проволоки). Деталь 12 также представляет собой металлическую пластину с приклеенной к его поверхности полиэтиленерефтолатной пленкой. Детали 11 и 12 скрепляются между собой и с кольцом 13 винтами. Кольцо 13 изготовлено из теплоизоляционного материала. Пространство, образованное верхней поверхностью нижнего теплообменника, внутренней поверхностью кольца 10 и нижней поверхностью диска 12, заполняется исследуемым материалом. Аналогично, пространство, образованное нижней поверхностью верхнего теплообменника, внутренней поверхностью кольца 13 и верхней поверхностью диска 11, заполняется исследуемым материалом. В кольцевой канавке 14 верхнего теплообменника намотана медная проволока, выполняющая функцию термометра сопротивления, измеряющего температуру теплообменника T_0 .

Конструкция СЯ плоской формы приведена на рис. 4.4.

Сравнительная ячейка образована двумя пластинами 1 из оргстекла. В одной из пластин делается углубление не более 0,5 мм в котором размещают плоский термометр сопротивления 2, толщиной не более 0,08 мм. Поверхность нижней пластины выравнивают путем нанесения на поверхность термометра сопротивления, расположенного в углублении, жидкого полиметилметакрилата, а затем склеивают пластины между собой. Электрические провода термометра сопротивления выводят наружу, подключая к разъему 3, который дополнительно используют для подвешивания СЯ в термостате.

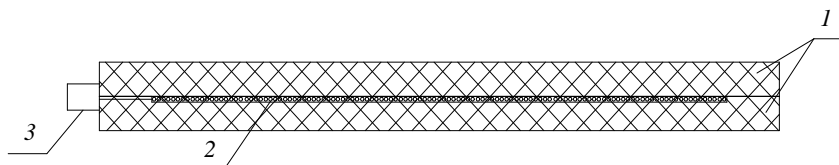


Рис. 4.4. Сравнительная ячейка

4.2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

4.2.1. АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ТФХ ЗЕРНЕННЫХ СОРБЕНТОВ

Последовательность операций по исследованию изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации следующая:

1) ИЯ1 с зерненым сорбентом помещают в устройство подготовки пробы (рис. 2.5) и начинают этап подготовки пробы. На этом этапе продувают ГВС через сорбент и регистрируют температуры T_1 , T_2 , T_3 . Продолжительность продувки задается оператором, проводящим опыт. По формулам (2.29) – (2.31) вычисляется количество ϕ поглощенного диоксида углерода за время продувки.

2) По истечении заданного времени начинают первый этап эксперимента по определению ТФХ. Продувку прекращают и посредством жидкостных теплообменников термостатируют внешние поверхности ИЯ при заданной температуре T_c .

3) Регистрируют температуру $\Theta_1 = (T_1 - T_c)/(T_0 - T_c)$ в моменты времени $Fo = a_3 \tau / l_3^2$.

4) Первый этап эксперимента проводят до тех пор, пока $\Theta_1 \geq 0,15$.

Определяют ε_1^2 как тангенс угла наклона прямолинейного участка зависимости $\ln \Theta_1 = f(Fo)$ и, задаваясь значениями теплопроводности λ_2 из диапазона $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$, численно решают относительно температуропроводности a_2 задачу Штурма–Лиувилля (2.13) – (2.15). В результате решения задачи получают зависимость $a_2 = f_1(\lambda_2)$.

5) На втором этапе внешние газопроницаемые оболочки ИЯ1 приводят в тепловой контакт по плоскости с пластинами из оргстекла и термостатируют ИЯ при температуре T_0 используя жидкостный термостат.

6) Помещают ИЯ1 в воздушный термостат и регистрируют температуры $\Theta_1 = (T_1 - T_c)/(T_0 - T_c)$ в моменты времени $Fo = a_4 \tau / l_4^2$. Параллельно регистрируют температуры $\Theta_3 = (T_3(0, \tau) - T_c)/(T_0 - T_c)$ в моменты времени $Fo_3 = a_3 \tau / l_4^2$ в сравнительной ячейке.

7) Второй этап эксперимента проводят до тех пор, пока $\Theta_1 \geq 0,15$.

Определяют ε_1^2 как тангенс угла наклона прямолинейного участка зависимости $\ln \Theta_1 = f(Fo)$ и, задаваясь значениями теплопроводности λ_2 из диапазона $[\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$, численно решают относительно температу-

ропроводности a_2 задачу Штурма–Лиувилля (2.17) – (2.20). В результате решения задачи получают зависимость $a_2 = f_2(\lambda_2)$.

8) Искомые ТФХ определяют как координаты точки пересечения графиков зависимостей $a_2 = f_1(\lambda_2)$ и $a_2 = f_2(\lambda_2)$, определенных по данным первого и второго этапов эксперимента.

9) Вычисляют объемную теплоемкость $c_{ш} = \lambda_2 / a_2$, задают $\varphi_0 = \varphi$ и, задаваясь временем продувки, повторяют весь цикл измерительных операций, начиная с п. 1.

4.2.2. АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ В ФОРМЕ БЛОКОВ С КАНАЛАМИ

Для опытов необходимо взять три идентичных блока сорбента. Последовательность операций по исследованию изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации следующая:

1) Помещают блок сорбента в устройство подготовки (рис. 2.7) и начинают предварительный этап, на котором через блок продувают ГВС. В ходе этапа регистрируют температуры, измеряемые термопарами, расположенными в блоке. Программно усредняют показания термопар и определяют интервал времени $[0, \tau_k]$, в котором вначале наблюдается нагрев шихты блока, а затем и остывание. Считают, что в интервале времени $[0, \tau_k]$ при заданных условиях продувки происходит практически полная отработка сорбента.

2) Начинают этап подготовки пробы. Для этого через каждый из двух идентичных блоков в течение времени $\tau_{3i} < \tau_k$ продувают ГВС с теми же параметрами, что и на предварительном этапе.

3) Подготовленные блоки помещают в ИЯ2 и начинают первый этап эксперимента на котором к нагревателю ИЯ2 подводят постоянное напряжение, а через теплообменники ИЯ2 прокачивают теплоноситель с постоянной температурой. Контролируют значение параметра γ (формула 3.13) и при условии $\gamma \geq 0,97$ прекращают первый этап. Вычисляют теплопроводность.

4) Начинают второй этап. Прекращают подвод напряжения к нагревателю и регистрируют температуру $\bar{\Theta}_1$ до тех пор, пока $\bar{\Theta}_1 \geq 0,1...0,15$. Вычисляют ε_1^2 по экспериментальным данным из диапазона $\bar{\Theta}_1 \in [0,4; 0,1]$. Определяют температуропроводность из решения задачи (2.48) – (2.51).

5) Извлекают блоки из измерительной ячейки, помещают их в устройство подготовки пробы и повторяют измерительные операции, начиная с п. 2.

Для реализации описанных алгоритмов было разработано программное обеспечение автоматизированной измерительной установки.

4.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Для автоматизации эксперимента, обработки экспериментальных данных разработано программное обеспечение. При запуске программы пользователю предлагается выбрать вид исследуемого материала – блоки или зерненный сорбент (рис. 4.5).

Рассмотрим пример, когда требуется исследовать ТФХ сорбентов в форме блоков. В этом случае пользователь при помощи мыши нажимает кнопку «Исследование блоков». После чего появляется информационное окно, представленное на рис. 4.6. Оно содержит описание используемой измерительной ячейки. При нажатии кнопки «Далее» появляется возможность задать параметры мостовой схемы, массу и толщину образца (рис. 4.7). При нажатии кнопки «Далее» появляется панель управления ходом эксперимента (рис. 4.8). Нажатием кнопки «Включить нагреватель» к нагревателю измерительной ячейки подводится постоянное напряжение и начинается первый этап эксперимента. Разность между среднеинтегральной температурой первого слоя и температурой термостатирования отображается в реальном времени на диаграмме. Пользователь имеет возможность в любой момент остановить эксперимент, начать второй этап эксперимента или обработать экспериментальные данные.

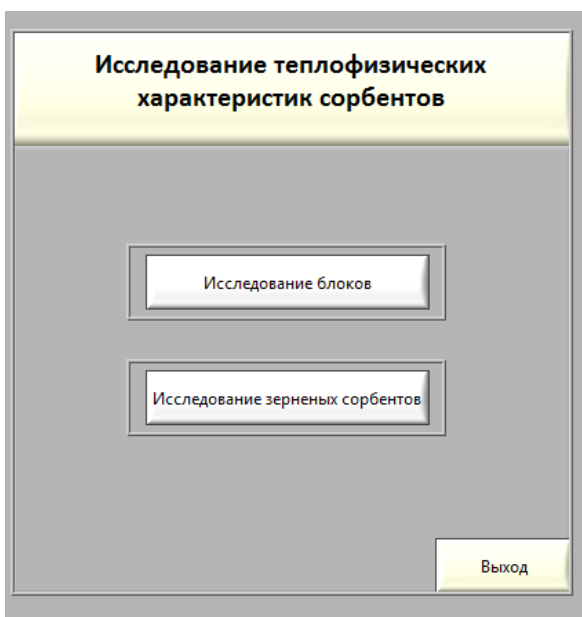


Рис. 4.5. Лицевая панель программы

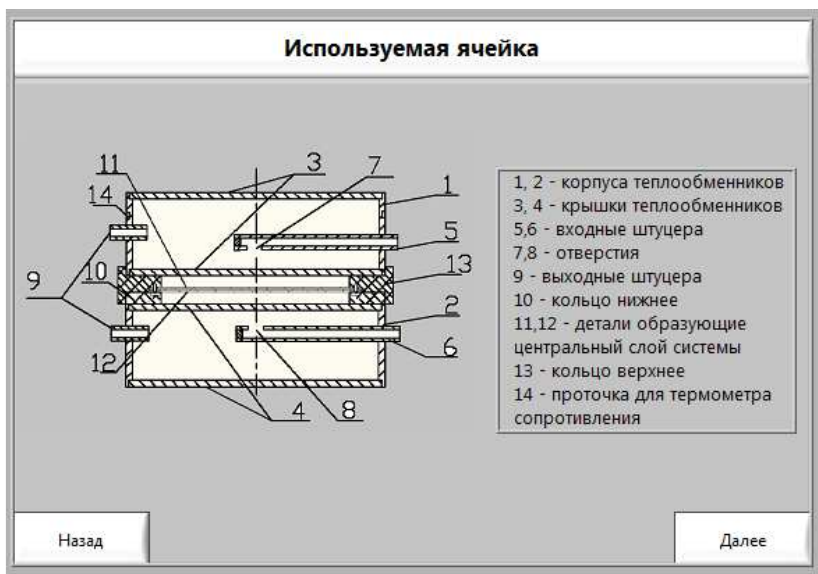


Рис. 4.6. Вид окна при нажатии кнопки «Исследование блоков»

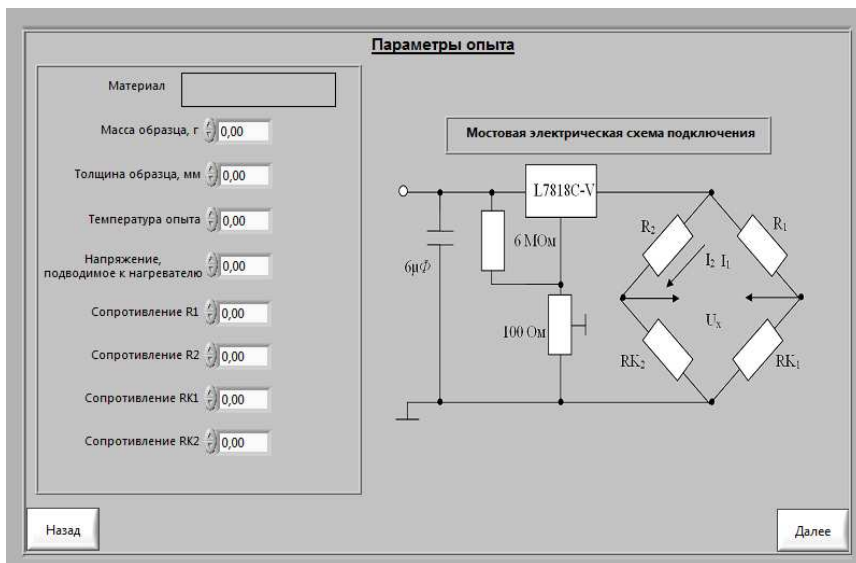


Рис. 4.7. Окно задания параметров опыта

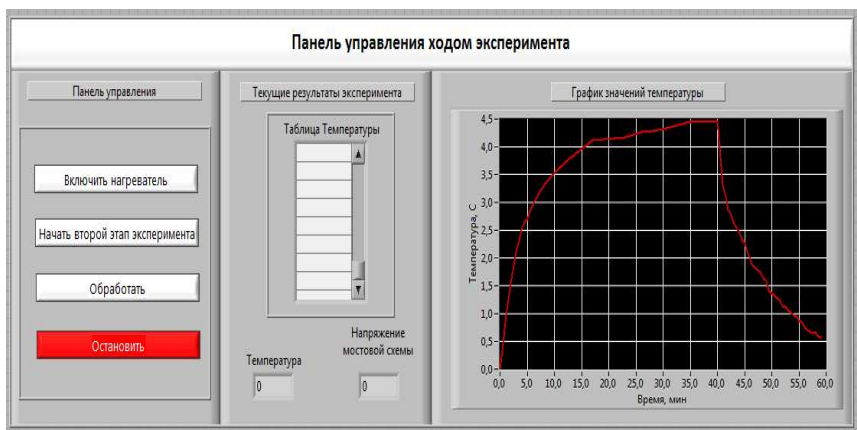


Рис. 4.8. Окно управления ходом эксперимента

При исследовании зерновых сорбентов необходимо на лицевой панели программы (рис. 4.5) нажать кнопку «Исследование зерновых сорбентов». При этом также появится информационное окно с описанием измерительной ячейки, после чего можно задать толщину слоя исследуемого сорбента и параметры ГВС, продуваемой через слой (рис. 4.9). Момент окончания подготовительного этапа по продувке ГВС через сорбент определяется оператором на основе визуального наблюдения за температурой в слое сорбента (рис. 4.10) и собственного опыта.

Рис. 4.9. Окно задания параметров ГВС



Рис. 4.10. Окно наблюдения за температурой сорбента

После нажатия кнопки «Остановить» осуществляется переход в окно измерения ТФХ.

4.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ

Оценка погрешностей определения ТФХ разработанными методами и средствами производилась на основе экспериментальных данных, полученных из опытов с материалами, свойства которых хорошо изучены [135, 129]. В дальнейшем по тексту, для краткости, такие материалы будем называть эталонными. В качестве эталонных материалов использовалось оргстекло, текстолит и полистирол.

Справочные свойства этих веществ приведены в табл. 4.1.

Для измерений изготавливали плоские идентичные образцы, которые помещали в измерительные ячейки и исследовали их ТФХ при комнатных температурах.

На рисунке 4.11 в качестве примера приведены температурные кривые, полученные по данным первого и второго этапов экспериментов с образцами оргстекла и текстолита. Для исследований применялся комбинированный метод и измерительная ячейка ИЯ2.

4.1. Свойства исследуемых веществ при температуре 20 °С

Вещество	ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	Температуропроводность $a \cdot 10^7$, м ² /с
Оргстекло	15809–70	1180	0,195	1,56	1,06
Текстолит	2910–74	1300	0,318	1,72	1,21
Полистирол	9440–60	1060	0,11	1,39	0,77

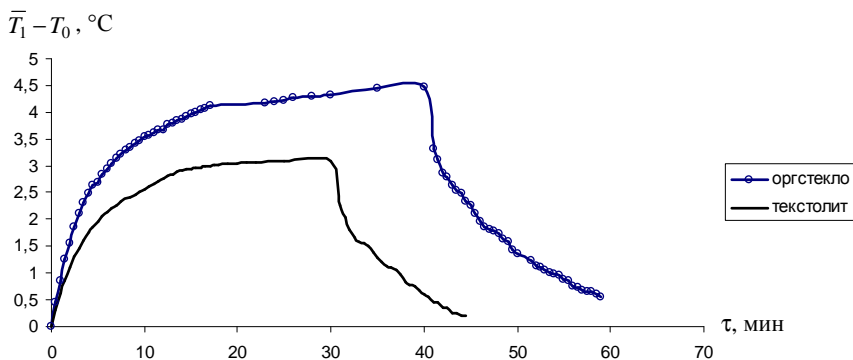


Рис. 4.11. Температурные кривые, полученные из калибровочных опытов с ячейкой ИЯ2

С целью исключения промахов, с образцами каждого исследуемого материала проводилось по 15 опытов. По полученным экспериментальным данным вычислялись средние значения ТФХ исследуемых материалов. Например, в результате обработки кривых, приведенных на рис. 4.11, получены следующие средние значения ТФХ оргстекла (теплопроводность – 0,214 Вт/(м·К), температуропроводность – $1,32 \cdot 10^{-7}$ м²/с), текстолита (теплопроводность – 0,338 Вт/(м·К), температуропроводность – $1,4 \cdot 10^{-7}$ м²/с).

Отметим, что результаты измерения ТФХ содержат систематические погрешности, которые могут быть уменьшены введением поправок. Например, для используемой ИЯ2 поправка в результаты измерения теплопроводности составила $P_\lambda = -0,02$ Вт/(м·К), температуропроводности – $P_a = -0,23 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Метрологическая оценка исправленных результатов (после введения поправок) определения ТФХ представлена в табл. 4.2.

Введение поправок осуществляется по формулам

$$\lambda_{4и} = \lambda_4 + P_\lambda, \quad a_{4и} = a_4 + P_a,$$

где λ_4 , a_4 – измеренные значения теплопроводности и температуропроводности, $\lambda_{4и}$, $a_{4и}$ – исправленные результаты.

4.2. Результаты метрологической обработки

Вещество	Среднее арифметическое значение		Средние квадратические отклонения			
	$\bar{\lambda}_4$, Вт/(м·К)	\bar{a}_4 , м ² /с	Единичного результата		Среднего арифметического	
			S_{λ_4} , Вт/(м·К)	S_{a_4} , м ² /с	$S_{\bar{\lambda}_4}$, Вт/(м·К)	$S_{\bar{a}_4}$, м ² /с
Оргстекло	0,192	$1,04 \cdot 10^{-7}$	0,0083	$0,034 \cdot 10^{-7}$	0,0021	$0,009 \cdot 10^{-7}$
Текстолит	0,312	$1,24 \cdot 10^{-7}$	0,0081	$0,045 \cdot 10^{-7}$	0,0021	$0,012 \cdot 10^{-7}$
Полистирол	0,106	$0,75 \cdot 10^{-7}$	0,0076	$0,024 \cdot 10^{-7}$	0,0019	$0,001 \cdot 10^{-7}$
Вещество	Доверительный интервал при $P = 95\%$					
	Единичного результата			Среднего арифметического		
	$t_p S_{\lambda_4}$, Вт/(м·К)	$t_p S_{a_4}$, м ² /с	$t_p S_{\bar{\lambda}_4}$, Вт/(м·К)	$t_p S_{\bar{a}_4}$, м ² /с		
Оргстекло	0,0177	$0,073 \cdot 10^{-7}$	0,0045	$0,0197 \cdot 10^{-7}$		
Текстолит	0,0173	$0,094 \cdot 10^{-7}$	0,0046	$0,025 \cdot 10^{-7}$		
Полистирол	0,021	$0,052 \cdot 10^{-7}$	0,0058	$0,018 \cdot 10^{-7}$		

Глава 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ

5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТФХ СОРБЕНТОВ

В процессе сорбции поглощаемого компонента происходит выделение теплоты, что приводит к разогреву сорбента до температур 180...250 °С. Целью исследований являлось установление закономерностей изменения ТФХ регенеративных продуктов и поглотителей от температуры. Для исследований температурных зависимостей ТФХ РП и ХП использовались серийные приборы ИТ-с-400 для измерения теплоемкости и ИТ-λ-400 для измерения теплопроводности.

Результаты исследований поглотителей NaX в виде порошка, в виде пластин с добавкой 7% фторопласта марки Ф-42В, серийных РП на основе надпероксида калия марок ПРЗ и ОКЧ-ЗУМ приведены на рис. 5.1 и 5.2 [138]. При исследовании теплопроводности в приборе ИТ-λ-400 из шихты сорбента прессованием формировали плоский образец толщиной 3,5 мм. Следует отметить, что результаты измерения теплопроводности образцов, имеющих различную плотность, значительно отличались друг от друга. Однако принципиальный вид закономерностей изменения ТФХ от температуры оставался одним и тем же.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в диапазоне температур, при которых эксплуатируются серийные РП и ХП, не наблюдается значительного изменения их ТФХ.

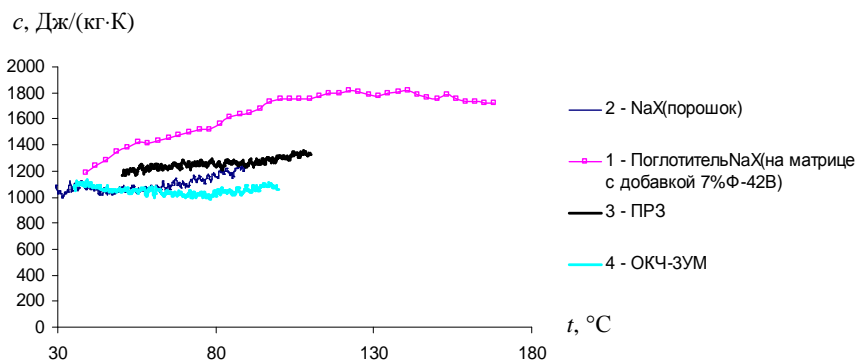


Рис. 5.1. Закономерности изменения теплоемкости сорбентов от температуры

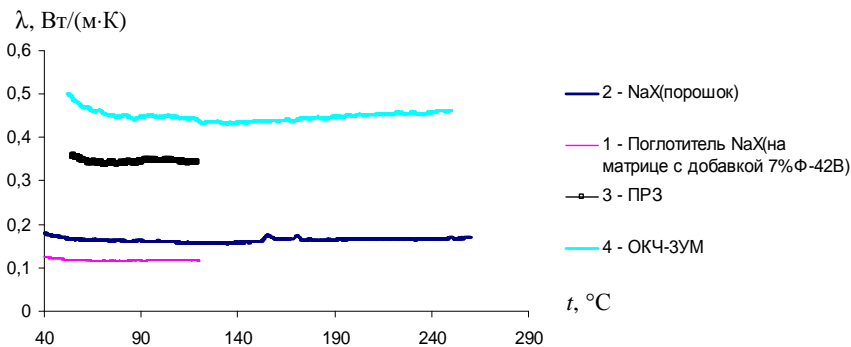


Рис. 5.2. Закономерности изменения теплопроводности сорбентов от температуры

5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА

Для исследования закономерностей изменения ТФХ сорбентов от степени обработки использовались продукты зернением 2...3 мм. Начальная насыпная плотность в опытах составляла около 1100 кг/м³. На подготовительном этапе через исследуемый материал продувалась ГВС с расходом 1,5 л/мин, концентрацией диоксида углерода 2% и относительной влажностью 68...70%. Толщина слоя составляла 3,5 мм. Результаты определения ТФХ приведены на рис. 5.3 и в табл. 5.1 [126].

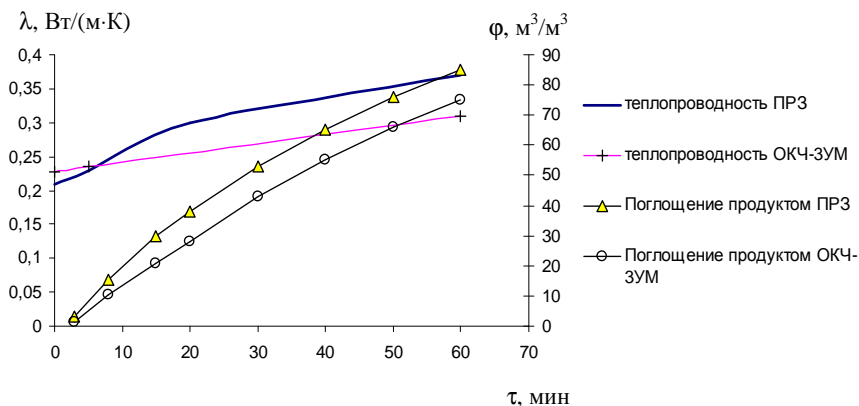


Рис. 5.3. Изменение теплопроводности насыпного слоя в зависимости от текущего поглощения CO₂

5.1. Результаты определения ТФХ зерненного сорбента ПРЗ

Продукт ПРЗ			
τ , мин	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$, м ² /с
0	1100	0,21	1,74
5	1179	0,23	1,58
20	1446	0,3	1,65
60	2054	0,37	1,43

5.2. Результаты определения ТФХ зерненного сорбента ОКЧ-ЗУМ

Продукт ОКЧ-ЗУМ			
τ , мин	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$, м ² /с
0	1162	0,227	1,77
5	1162	0,235	1,84
60	1311	0,31	2,15

Результаты исследований ТФХ блоков ОКЧ-3 приведены на рис. 5.4. На этапе подготовки через блок продувалась ГВС с концентрацией CO₂ равной 1,8%, влажностью $\phi = 65\%$ и температурой $t = 14^\circ\text{C}$. Расход ГВС составлял $G = 10$ л/мин.

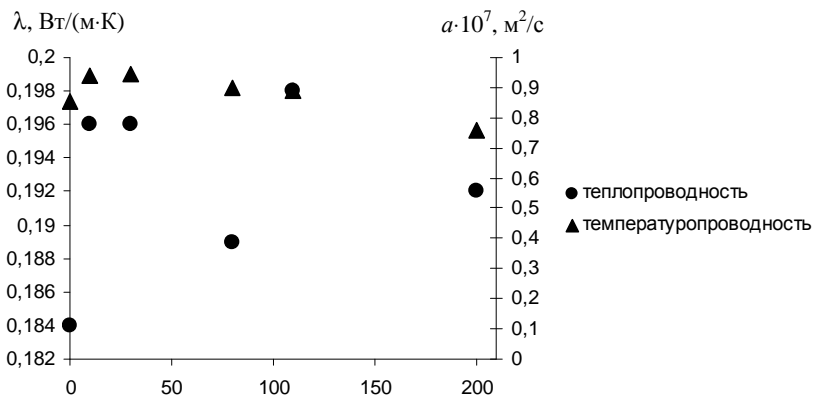


Рис. 5.4. Изменение ТФХ блоков ОКЧ-3 в зависимости от времени продувки ГВС

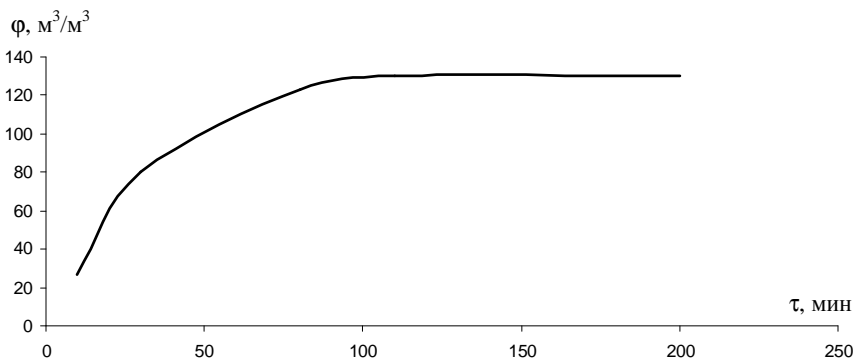


Рис. 5.5. Текущее поглощение CO_2 блоком ОКЧ-3

Экспериментальные данные, представленные на рис. 5.4 свидетельствуют о том, что ТФХ блоков в течение времени регенерации остаются практически постоянными. Это позволяет непрерывно исследовать текущее поглощение диоксида углерода в зависимости от времени продувки. Используя методику, описанную в разделе 2.2.2, получили кривую (рис. 5.5) изменения во времени текущего поглощения диоксида углерода при заданных условиях опыта.

Результаты исследований ТФХ применяются в математических моделях теплопереноса для коллективных и индивидуальных средств защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в монографии методы позволяют исследовать комплекс теплофизических характеристик сорбентов в зависимости от степени их обработки в процессе регенерации воздуха. Кроме теплофизических характеристик, в ходе экспериментов измеряется текущее поглощение диоксида углерода (путем определения мощности внутренних источников теплоты, действующих в сорбенте в ходе экзотермической реакции), что важно при исследовании кинетики процесса и определении массообменных и емкостных характеристик сорбентов. Следует отметить, что в отличие от традиционных химических методов анализа проб вещества, тепловой метод позволяет непрерывно во времени измерять величину текущего поглощения.

Результаты исследования теплофизических характеристик сорбентов нашли применение в ОАО «Корпорация Росхимзащита» при разработке новых перспективных материалов на матрице, при моделировании процессов теплопереноса в индивидуальных аппаратах средств защиты, а также в аппаратах в составе коллективных систем жизнеобеспечения.

Отметим, что еще более важное значение при разработке КиИСЗ имеет знание сорбционных характеристик сорбентов – вида и параметров уравнения кинетики поглощения диоксида углерода, емкости сорбентов по поглощаемому компоненту. Проблема исследования указанных характеристик при условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации сорбентов в системах жизнеобеспечения, полностью не решена. Поэтому предполагается выход следующей монографии, посвященной решению указанной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новое поколение систем жизнеобеспечения и защиты человека в чрезвычайных ситуациях техногенного и природного характера (к 145-летию со дня рождения академика Н.Д. Зелинского, изобретателя угольного противогаса) : сб. тр. российской науч. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 304 с.
2. Стратегия развития научно-производственного комплекса Российской Федерации в области разработки и производства систем жизнеобеспечения и защиты человека в условиях химической и биологической опасности : материалы российской науч. конф. 14 окт. 2009 г. – Тамбов : Изд. дом ТГУ им. Державина, 2009. – 202 с.
3. Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг : материалы Седьмой международной теплофизической школы : в 2 ч.; Тамбов, 20 – 25 сент. 2010 г. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – 312 с.
4. Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы Шестой международной теплофизической школы : в 2 ч.; Тамбов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 232 с.
5. Лукин, В.Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности / В.Д. Лукин, М.И. Курочкина. – Л. : Химия, 1980. – 232 с.
6. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
7. Страус, В. Промышленная очистка газов / Вернер Страус ; пер. с англ. Ю.Я. Косога. – М. : Химия, 1981. – 616 с.
8. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование : в 2 т. / под ред. В. И. Епифановой и Л. С. Аксельрода. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. Т. 1: Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздухоразделительных установок. – 468 с.
9. Очистка технологических газов / под ред. Т.А. Семеновой и И.Л. Лейтеса. – М. : Химия, 1977. – 488 с.
10. Высокоэффективная очистка воздуха / под ред. П. Уайта и С. Смита ; пер. с англ. ; под ред. Б.И. Мягкова. – М. : Атомиздат, 1967. – 310 с.
11. Путилов, А.В. Адсорбционно-каталитические методы очистки газовых сред в химической технологии / А.В. Путилов, С.Л. Кудрявцев, Н.В. Петрухин. – М. : Химия, 1989. – 48 с.
12. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки : учебник для вузов / В.В. Белоусов. – М. : Металлургия, 1988. – 256 с.
13. Романков, П.Г. Непрерывная адсорбция паров и газов / П.Г. Романков, В.Н. Лепилин. – Л. : Химия, 1968. – 228 с.

14. Серпионова, Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров : учеб. пособие для студентов химико-технологических специальностей вузов / Е.Н. Серпионова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1969. – 414 с.
15. Богатырев, В.Л. Иониты в смешанном слое / В.Л. Богатырев. – Л. : Химия, 1968. – 212 с.
16. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование : в 2 т. / под ред. В.И. Епифановой и Л.С. Аксельрода. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. Т. 2: Промышленные установки, машинное и вспомогательное оборудование. – 568 с.
17. Герш, С.Я. Разделение газов методом глубокого охлаждения / С.Я. Герш. – М.-Л. : ГОСТОПТЕХ-Издат, 1947. – 127 с.
18. Гельперин, И.И. Справочник по разделению газовых смесей методом глубокого охлаждения / И.И. Гельперин, Г.М. Зеликсон, Л.Л. Рапорт ; под общ. ред. И.И. Гельперина. – М. : ГХИ (гос. науч. тех. изд-во хим. лит-ры), 1963. – 512 с.
19. Дытнерский, Ю.И. Мембранное разделение газов / Ю.И. Дытнерский, В.П. Быков, Г.Г. Каграманов. – М. : Химия, 1991. – 341 с.
20. Аширов, А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов / А. Аширов. – Л. : Химия, 1983. – 293 с.
21. Воронин, Г.И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей / Г.И. Воронин, А.И. Поливода. – М. : Машиностроение, 1967. – 211 с.
22. Путин, С.Б. Математическое моделирование и управление процессом регенерации воздуха / С.Б. Путин. – М. : Машиностроение, 2008. – 176 с.
23. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учебное пособие / С.В. Гудков [и др.]. – М. : Машиностроение, 2008. – 188 с.
24. Нейдинг, А.Б. Магнитная восприимчивость надперекисей натрия, калия, рубидия / А.Б. Нейдинг, И.А. Казарновский // Журнал физической химии. – 1950. – Т. 24. – С. 1407.
25. Гладышев, Н.Ф. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратурное оформление / Н.Ф. Гладышев [и др.]. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2007. – 156 с.
26. Ферапонтов, Ю.А. Синтез супероксида калия и исследование хемосорбционных свойств регенеративного продукта на его основе / Ю.А. Ферапонтов, Д.В. Жданов, Н.Ф. Гладышев // Актуальные проблемы теории адсорбции, модифицирования поверхности и разделения веществ : материалы VII Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых. – М. : РАН, 2002. – 68 с.
27. Ферапонтов, Ю.А. Разработка экологически безопасной технологии синтеза надперекисей щелочных металлов. Синтез надперекиси калия из перекиси водорода и гидроксида калия / Ю.А. Ферапонтов, Н.Ф. Гла-

дышев, С.И. Симаненков // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 422 – 430.

28. Фирсова, Т.П. О температуре плавления надперекиси калия / Т.П. Фирсова, А.Н. Молодкина, Т.Г. Морозова // Изв. АН СССР. ОХН. – 1965. – № 9. – С. 1678 – 1679.

29. Мельников, А.Х. Исследование взаимодействия надперекиси калия с водяным паром и углекислым газом / А.Х. Мельников, Т.И. Фирсова, А.Н. Молодкина // Журнал неорганической химии. – 1962. – Т. 7, № 6. – С. 1228 – 1236.

30. Вольнов, И.И. Перекиси, надперекиси и озониды щелочных и щелочноземельных металлов / И.И. Вольнов. – М. : Наука, 1983. – 135 с.

31. Исследование взаимодействия надперекиси калия с сероводородом / Т.П. Фирсова, Л.А. Мохов, Н.Я. Шуинова, И.С. Мареева // Изв. АН СССР. – 1968. – № 8. – С. 1685.

32. Акулов, А.К. Моделирование разделения бинарных газовых смесей методом адсорбции с колеблющимся давлением : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / А.К. Акулов. – СПб., 1996. – 40 с.

33. Матвейкин, В.Г. Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин и др. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2007. – 140 с.

34. Лукин, В.Д. Регенерация адсорбентов / В.Д. Лукин, И.С. Анцыпович. – Л. : Химия, 1983. – 216 с.

35. Гладышев, Н.Ф. Интенсификация процесса получения регенеративного продукта на матрице / Н.Ф. Гладышев [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4А. – С. 1057 – 1065.

36. Гладышев, Н.Ф. Исследование возможности нанесения гидроксида кальция на пористые материалы / Н.Ф. Гладышев [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4А. – С. 1065 – 1071.

37. ГОСТ Р 12.4.220–2001. СИЗОД. Аппараты изолирующие автономные с химически связанном кислородом (самоспасатели). Общие технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2002-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 56 с.

38. Путилов, А.В. Адсорбционно-каталитические методы очистки газовых сред в химической технологии / А.В. Путилов, С.Л. Кудрявцев, Н.В. Петрухин. – М. : Химия, 1989. – 48 с.

39. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 8-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1976. – 552 с.

40. Кримштейн, А.А. Исследование процесса взаимодействия углекислого газа и водяного пара с регенеративными надперекисными продуктами применительно к индивидуальным изолирующим средствам за-

щиты : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.15: защищена 03.05.69: утв. 15.09.69 / А.А. Кримштейн. – Тамбов, 1969. – 275 с.

41. Лычкин, И.И. Тепловой метод измерения динамики адсорбции и десорбции влаги силикагелем / И.И. Лычкин, З.М. Ризов, О.М. Тодес // ЖПХ. – 1961. – Т. XXXIV, № 5. – С. 1225 – 1231.

42. Яргин, В.С. Вязкость паров щелочных металлов / В.С. Яргин // Теплофизические свойства веществ и материалов. – М. : ГСССД; сер.: Физические константы и свойства веществ, 1978. – Вып. 12. – С. 6 – 17.

43. Теплопроводность твердых тел : справочник / А.С. Охотина, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский ; под ред. А.С. Охотина. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

44. Теплофизические свойства веществ : справочник / под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

45. Теплофизические исследования : сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики ; под ред. С.С. Кутателадзе. – Новосибирск : Ин-т теплофизики, 1977. – 182 с.

46. Теплофизические свойства веществ и материалов : сб. науч. тр. / под ред. С.С. Кутателадзе. – Новосибирск, 1979. – 155 с.

47. Комаров, В.С. Адсорбенты и их свойства / В.С. Комаров; АН БССР, Ин-т общей и неорганической химии. – Минск : Наука и техника, 1977. – 248 с.

48. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М. : Энергия, 1969. – 391 с.

49. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. – М. : Машгиз, 1962. – 245 с.

50. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография: в 2 кн. / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 1. – 204 с.

51. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / под ред. С.В. Пономарева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

52. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

53. Крейт, О. Основы теплопередачи / О. Крейт, У. Блек ; пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – 256 с.

54. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.

55. Пономарев, С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 1997. – 249 с.

56. Кондратьев, Г.М. Тепловые измерения / Г.М. Кондратьев. – М. : Машгиз, 1956. – 253 с.

57. А. с. 1032381 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов / Высочанский Е.А., Гуревич А.Г., Славский Б.А. и др. (СССР). – № 3294485/18-25 ; заявл. 02.06.81 ; опубл. 17.06.83, Бюл. № 28. – 4 с. : ил.

58. А. с. 1337749 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ измерения теплопроводности / Буре Д.А., Буйко Г.В., Марквявичюс С.А. и др. (СССР). – № 4000355/29-25 ; заявл. 30.12.85 ; опубл. 23.07.87, Бюл. № 34. – 6 с. : ил.

59. А. с. 1073664 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов / Гуревич А.Г. (СССР). – № 3502702/18-25 ; заявл. 25.10.82 ; опубл. 13.01.84, Бюл. № 6. – 5 с. : ил.

60. А. с. 1086379 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности твердых тел / Щербаков А.В., Ройзен Л.И. (СССР). – № 3527693/18-25 ; заявл. 27.12.82 ; опубл. 06.03.84, Бюл. № 14. – 6 с. : ил.

61. А. с. 1111084 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов / Осипов Э.В., Шевченко А.И. (СССР). – № 3632854/18-25 ; заявл. 12.08.83 ; опубл. 23.07.85, Бюл. № 32. – 8 с. : ил.

62. А. с. 1130786 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Устройство для определения теплофизических свойств в стационарном режиме / Дурович А.П., Лычников Д.С., Павлин А.В. (СССР). – № 3463092/24 ; заявл. 05.07.82 ; опубл. 22.11.84, Бюл. № 47. – 4 с. : ил.

63. Пустовалов, В.В. Теплопроводность магнизиальных огнеупоров / В.В. Пустовалов // Огнеупоры. – 1957. – № 7. – С. 25 – 34.

64. Шахтин, Д.М. Определение теплопроводности огнеупоров в вакууме / Д.М. Шахтин, И.И. Вишневецкий // Заводская лаборатория. – 1957. – № 8. – С. 43 – 52.

65. Фесенко, А.И. Цифровые устройства для определения теплофизических свойств материалов / А.И. Фесенко. – М. : Машиностроение, 1981. – 238 с.

66. Курепин, В.В. Принципы построения рядов промышленных теплофизических приборов / В.В. Курепин // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 3 – 10.

67. А. с. 1038852 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов и устройство для его осуществления / Темирбаев Д.Ж. (СССР). – № 3422654/18-25 ; заявл. 15.04.82 ; опубл. 18.07.83, Бюл. № 32. – 3 с. : ил.

68. А. с. 1562819 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материала / Коваль Г.М., Прядко И.И., Новиков Н.Н. и др. (СССР). – № 4337623/31-25 ; заявл. 04.12.87 ; опубл. 12.02.90, Бюл. № 17. – 4 с. : ил.

69. А. с. 1059493 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Устройство для определения теплофизических характеристик неэлектропроводных материалов / Сендерович Р.Б. (СССР). – № 3433897/18-25 ; заявл. 14.05.82 ; опубл. 31.10.83, Бюл. № 45. – 5 с. : ил.

70. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
71. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер ; пер. с англ. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
72. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с. : ил.
73. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – Киев : Наукова думка, 1965. – 304 с.
74. Цедерберг, Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей / Н.В. Цедерберг. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
75. Филиппов, Л.П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах / Л.П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1967. – 325 с.
76. Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей / Л.П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1970. – 239 с.
77. Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков [и др.]. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
78. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности : в 2 ч. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1982. – 671 с.
79. Бойков, Г.П. Определение теплофизических свойств строительных материалов / Г.П. Бойков, Ю.В. Видин, В.Н. Журавлев. – Красноярск : Изд-во Красноярского университета, 1992. – 172 с.
80. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля : справочник / В.П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – 240 с.
81. Кондратьев, Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. – М. : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
82. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
83. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – М. : Наука, 1975. – 228 с.
84. А. с. 1460684 СССР, МКИ⁴ G 01 N 25/18. Способ определения температуропроводности материалов / Конышев В.П. (СССР). – № 4124186/31-25 ; заявл. 09.06.86 ; опубл. 03.01.89, Бюл. № 7. – 8 с. : ил.
85. А. с. 1539629 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Конышев В.П., Ивашенкова Н.Н., Назарова Г.В. (СССР). – № 4344607/31-25 ; заявл. 16.12.87 ; опубл. 27.12.89, Бюл. № 4. – 4 с. : ил.
86. А. с. 1608534 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ определения температуропроводности материалов / Драбкин И.М. (СССР). – № 4231755/31-25 ; заявл. 09.03.87 ; опубл. 13.11.90, Бюл. № 43. – 6 с. : ил.
87. Олейник, Б.Н. Точная калориметрия / Б.Н. Олейник. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 208 с.

88. Бровкин, Л.А. Определение коэффициента температуропроводности при квазистационарном режиме / Л.А. Бровкин // Заводская лаборатория. – 1961. – Т. 27, № 5. – С. 578 – 581.

89. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства плохих проводников тепла / Л.Л. Васильев, Ю.Е. Фрайман. – Минск : Наука и техника, 1967. – 172 с.

90. Краев, О.А. Простой метод измерения температуропроводности теплоизоляторов / О.А. Краев // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 81 – 82.

91. А. с. 1165958 СССР, МКИ⁴ G 01 N 25/18. Способ измерения коэффициента теплопроводности / Курепин В.В., Платунов Е.С., Нименский Н.В. и др. (СССР). – № 3661943/24-25 ; заявл. 21.11.83 ; опубл. 31.05.85, Бюл. № 25. – 10 с. : ил.

92. А. с. 1165957 СССР, МКИ⁴ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик плоских образцов материалов и устройство для его осуществления / Грищенко Т.Г., Геращенко О.А., Декуша Л.В. (СССР). – № 3659357/24-25 ; заявл. 27.09.83 ; опубл. 31.05.85, Бюл. № 25. – 15 с. : ил.

93. А. с. 1562820 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Ковалев А.В., Теличкун В.И., Пахомов В.Н. и др. (СССР). – № 4412021/31-25 ; заявл. 19.04.88 ; опубл. 12.02.90, Бюл. № 17. – 225 с. : ил.

94. А. с. 1561025 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ измерения теплопроводности / Буравой С.Е., Курепин В.В., Козин В.М. и др. (СССР). – № 4450862/31-25 ; заявл. 23.05.88 ; опубл. 22.03.90, Бюл. № 16. – 8 с. : ил.

95. А. с. 1578612 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности материалов / Драбкин Л.М. (СССР). – № 4492345/31-25 ; заявл. 19.09.86 ; опубл. 19.06.90, Бюл. № 26. – 6 с. : ил.

96. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 100 с.

97. Теплофизические измерения : учебное пособие / Е.С. Платунов [и др.] ; Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования С.-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – 737 с.

98. Измеритель теплопроводности ИТ-λ-400. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Актюбинск : завод «Эталон», 1979. – 40 с.

99. Шорин, С.Н. Теплопередача / С.Н. Шорин. – М. : Высшая школа, 1964. – 490 с.

100. Харламов, А.Г. Измерение теплопроводности твердых тел / А.Г. Харламов. – М. : Атомиздат, 1973. – 152 с.

101. А. с. 1038851 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Способ определения температуропроводности твердых тел / Гуревич М.Е., Носарь А.И. (СССР). – № 3420993/18-25 ; заявл. 12.04.82 ; опубл. 18.07.83, Бюл. № 32. – 4 с. : ил.

102. А. с. 1603271 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ измерения коэффициента температуропроводности материалов / Ивлиев А.Д., Куриченко А.А., Поздеев А.Н. и др. (СССР) – № 4382359/31-25 ; заявл. 25.02.88 ; опубл. 24.10.90, Бюл. № 40. – 8 с. : ил.

103. А. с. 1293606 СССР, МКИ⁴ G 01 N 25/18. Способ измерения коэффициента температуропроводности материалов и устройство для его осуществления / Константинов С.М., Скрипник Ю.А., Водотовка В.И. и др. (СССР). – № 3879635/31-25 ; заявл. 08.04.85 ; опубл. 26.01.87, Бюл. № 8. – 7 с. : ил.

104. Пат. 2224244 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 25/18. Способ температурных волн для определения теплофизических свойств материалов / Ищук И.Н. ; заявитель и патентообладатель Тамбовский военный авиационный инженерный институт. – № 2001130664/28 ; заявл. 12.11.2001 ; опубл. 20.02.2004, Бюл. № 5. – 10 с. : ил.

105. Власов, В.В. Теплофизические измерения : справочное пособие по методам расчета полей, характеристик теплопереноса и автоматизации измерений / В.В. Власов, Ю.С. Шаталов [и др.]. – Тамбов : Изд-во ВНИИРТмаш, 1975. – 256 с.

106. Пат. 2027172 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / Мищенко С.В., Глинкин Е.И., Чуриков А.А. и др. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 4932067/25 ; заявл. 06.05.1991 ; опубл. 20.01.1995, Бюл. № 2. – 8 с. : ил.

107. Чуриков, А.А. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств изделий и образцов из неоднородных твердых материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13 / А.А. Чуриков. – Тамбов, 2000. – 32 с.

108. Чуриков, А.А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / А.А. Чуриков. – М., 1980. – 16 с.

109. Фокин, В.М. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов / В.М. Фокин, В.Н. Чернышов. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2004. – 212 с.

110. Пат. 2216011 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик вещества / Тетерин Е.П., Потехин Д.С. и др. ; заявитель и патентообладатель Ковровская государственная технологическая академия. – № 2001100748/28 ; заявл. 09.01.01 ; опубл. 10.11.2003, Бюл. № 31. – 12 с. : ил.

111. Пат. 2221239 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ определения температуропроводности материалов / Озерной Н.А., Ус Н.А. ; заявитель и патентообладатель Воронежский военный авиационный инженерный институт. – № 2001102670/28 ; заявл. 31.01.01 ; опубл. 10.01.2004 , Бюл. № 1. – 7 с. : ил.

112. Пат. 2192000 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Клебанов М.Г., Обухов В.В., Фесенко Т.А.; заявитель и патентообладатель Тамбовский военный авиационный инженерный институт. – № 2000123040/28 ; заявл. 04.09.00 ; опубл. 27.10.2002, Бюл. № 30. – 6 с. : ил.
113. Пат. 2224245 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Власов А.Б. ; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т. – № 2002108341/28 ; заявл. 02.04.02 ; опубл. 20.02.2004, Бюл. № 5. – 8 с. : ил.
114. Чернышова, Т.И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2001. – 240 с.
115. Чернышов, В.Н. Разработка и исследование методов и информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / В.Н. Чернышов. – Л., 1980. – 16 с.
116. Бабаев, В.В. Теплофизические свойства пород / В.В. Бабаев и [др.]. – М. : Недра, 1987. – 156 с.
117. Чернышов, В.Н. Разработка теоретических основ и алгоритмического обеспечения неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов с метрологическим анализом полученных результатов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13 / В.Н. Чернышов. – Л., 1997. – 32 с.
118. Фокин, В.М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля / В.М. Фокин. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2003. – 140 с.
119. Пат. 2170423 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / Чернышов В.Н., Селиванова З.М. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2000112296/28 ; заявл. 16.05.00 ; опубл. 10.07.2001, Бюл. № 19. – 6 с. : ил.
120. А. с. 1573403 СССР, МКИ⁵ G 01 N 25/18. Способ измерения температуропроводности материалов / Шведов Л.К., Барановский В.М., Кестельман В.Н. (СССР). – № 447330431/31-25 ; заявл. 27.05.88 ; опубл. 2.03.90, Бюл. № 23. – 5 с. : ил.
121. Гаврильев, Р.И. Метод определения теплофизических свойств горного массива без нарушений естественной структуры / Р.И. Гаврильев, И.Д. Никифоров // ИФЖ. – 1983. – Т. 45, № 6. – С. 10 – 23.
122. Беляев, О.В. Особенности метода иррегулярного режима при исследовании теплопроводности твердых тел / О.В. Беляев, Г.Г. Спирин [и др.] // ИФЖ. – 1998. – Т. 71, № 5. – С. 805 – 810.
123. Поляков, В.В. Применение метода зонда к исследованию теплопроводности порошковых материалов / В.В. Поляков, М.А. Утемесов [и др.] // Теплофизические свойства веществ : труды VII Всесоюз. конф. АН СССР. – Новосибирск, 1989. – С. 282.

124. Пат. 2208778 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Чернышов В.Н., Сысоев Э.В., Чернышов А.В. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2001101230/28 ; заявл. 12.01.01 ; опубл. 20.07.2003, Бюл. № 20. – 10 с. : ил.

125. А. с. 1441285 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения локальных теплофизических характеристик твердых материалов / Глазов А.Л., Григорьев Г.К., Калмыкова Н.П. и др. (СССР). – № 4176010/31-25 ; заявл. 06.01.87 ; опубл. 05.11.88, Бюл. № 44. – 198 с. : ил.

126. Балабанов, П.В. Метод исследования изменения теплофизических характеристик зерновых хемосорбентов в процессе хемосорбции / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 367 – 372.

127. Балабанов, П.В. Тепловой метод измерения хемосорбционных характеристик регенеративных продуктов / П.В. Балабанов // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 68 – 71.

128. Балабанов, П.В. Исследование кинетики поглощения углекислого газа и влаги регенеративными веществами путем определения мощности внутренних источников теплоты / П.В. Балабанов, А.А. Кримштейн, С.В. Пономарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 503 – 512.

129. Балабанов, П.В. Применение теории метода двух альф для исследования теплофизических характеристик регенеративных продуктов и химических поглотителей / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // Измерительная техника. – 2010. – № 11. – С. 45 – 49.

130. Балабанов П.В. Исследование закономерности изменения теплофизических характеристик регенеративных продуктов в процессе регенерации / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // VIII Научная конференция ТГТУ : Пленарные доклады и краткие тезисы. – Тамбов, 2003. – Ч. 1. – С. 73–74.

131. Пономарев, С.В. Метод и устройство для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, Е.С. Пономарева // Измерительная техника. – 2003. – № 9. – С. 51 – 54.

132. Пат. 2243543 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов / Мищенко С.В., Пономарев С.В., Трофимов А.В., Балабанов П.В., Пономарева Е.С. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003110027/28 ; заявл. 08.04.2003 ; опубл. 27.12.2004, Бюл. № 36. – 36 с. : ил.

133. Балабанов, П.В. Повышение точности метода двух альф при измерении теплофизических характеристик / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев // Измерительная техника. – 2011. – № 2. – С. 57 – 60.

134. Повышение точности метода измерения теплофизических свойств за счет выбора рациональных параметров проведения эксперимента и обработки опытных данных / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, В.Ф. Сорочинский, А.С. Щекочихин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 718 – 728.

135. Пономарев, С.В. Оценка погрешностей измерения теплофизических свойств твердых материалов / С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, А.В. Трофимов // Измерительная техника. – 2004. – № 1. – С. 44 – 47 .

136. Трофимов А.В. Повышение точности измерения теплопроводности путем введения критерия управления ходом измерения / А.В. Трофимов, П.В. Балабанов // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции : программа, материалы школы-семинара молодых ученых. – Тамбов : ТГТУ, 2003. – С. 137.

137. Балабанов, П.В. Повышение точности измерения теплопроводности путем введения критерия управления ходом измерения / П.В. Балабанов // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции : программа, материалы школы-семинара молодых ученых. – Тамбов : ТГТУ, 2003. – С. 93.

138. Применение компьютерных технологий при автоматизации методов и средств измерения теплофизических характеристик веществ / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.С. Баронин, П.В. Балабанов, М.С. Толстых // Заводская лаборатория. – 2010. – Т. 76, № 10. – С. 39 – 41.

139. Кримштейн, А.А. К расчету индивидуальных дыхательных сорбционных аппаратов с круговой схемой движения воздуха / А.А. Кримштейн, С.В. Плотникова, В.И. Коновалов, Б.В. Путин // ЖПХ. – 1993. – Т. 66, № 8. – С. 1734 – 1736.

140. Балабанов, П.В. Идентификация параметров математических моделей регенерации воздуха средствами защиты изолирующего типа/ П.В. Балабанов, А.А. Кримштейн, С.В. Пономарев // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 68 – 73.

141. Путин, С.Б. Экспериментальные исследования процесса регенерации воздуха в регенеративном патроне изолирующего дыхательного аппарата / С.Б. Путин [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 90 – 98.

ПРИЛОЖЕНИЯ

III. Моделирование процессов теплопереноса в изолирующем осевом аппарате с маятниковой схемой дыхания

Моделирование процессов теплопереноса проводится при предположении, что изменение температуры происходит только в направлении движения воздуха (для осевого патрона – вдоль оси реактора), т.е. рассматривается только одномерная задача. Допущение об одномерности температурного поля будет справедливым для практически значимого случая поглощения диоксида углерода сорбентом, когда в слое действуют источники теплоты и наблюдается интенсивное развитие температур. Тот временной период, когда сорбент отработал и происходит его остывание, нас не интересует. При разработке математической модели учитывались следующие физические и химические процессы, происходящие в реакторе:

- перенос тепла потоком воздуха;
- перенос тепла путём теплопроводности;
- выделение тепла в результате химической реакции;
- теплообмен с окружающей средой.

Температурное поле в реакторе описывается уравнением [128]:

$$c_{\text{ш}}\rho_{\text{ш}} \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_{\text{г}}\rho_{\text{г}}w \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \frac{\partial \phi}{\partial \tau} - \frac{2\alpha}{R}(T - T_{\text{ср}}), \quad (\text{П.1})$$

где T , $T_{\text{ср}}$ – температура в реакторе и температура среды; $c_{\text{ш}}$, $c_{\text{г}}$ – теплоёмкости соответственно сорбента и ГВС; $\rho_{\text{ш}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность насыпного слоя сорбента и ГВС; $\lambda_{\text{ш}}$ – эффективная теплопроводность насыпного слоя сорбента; q – количество теплоты, выделяемой при поглощении единицы объема диоксида углерода; $\frac{\partial \phi}{\partial \tau}$ – скорость поглощения диоксида углерода; R – радиус патрона; α – коэффициент теплообмена с окружающей средой.

Начальное условие имеет вид

$$T(x, 0) = T_{\text{ср}}. \quad (\text{П.2})$$

Граничные условия на стадии выдоха зададим в виде

$$T(0, \tau) = T_{\text{выдох}}, \quad (\text{П.3})$$

$$c_{ш}\rho_{ш} \frac{\partial T(H, \tau)}{\partial \tau} + c_{г}\rho_{г} w \frac{\partial T(H, \tau)}{\partial x} = q \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - \frac{2\alpha}{R} (T - T_{ср}), \quad (\text{П.4})$$

где $T_{\text{выдох}}$ – температура на стадии выдоха, H – длина слоя сорбента.

На стадии вдоха граничные условия примут вид

$$T(H, \tau) = T_{\text{д.м.}}, \quad (\text{П.5})$$

$$c_{ш}\rho_{ш} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial \tau} + c_{г}\rho_{г} w \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - \frac{2\alpha}{R} (T - T_{ср}), \quad (\text{П.6})$$

где $T_{\text{д.м.}}$ – температура в дыхательном мешке.

Температуры $T_{\text{выдох}}$ и $T_{\text{д.м.}}$ определяются по формулам, аналогичным приведенным в работе [139]. Для их вывода введем понятие вредного пространства, которое включает в себя подмасочник, гофртрубку и предшихтовое пространство. Объем вредного пространства обозначим через V_0 . Среднюю температуру на стадии выдоха определяем по формуле

$$\bar{T}_{\text{выдох}} = \frac{T_{\text{чел}}(V_0 + V_{\text{чел}}) + T_1 V_0}{2V_0 + V_{\text{чел}}}, \quad (\text{П.7})$$

где $T_{\text{чел}}$, T_1 – температура воздуха выдыхаемого человеком и средняя температура выходящего из патрона воздуха за цикл вдоха; $V_{\text{чел}}$ – объем воздуха, выдыхаемый (вдыхаемый) человеком;

$$T_1 = \int_{\tau_i}^{\tau_i + \tau_b} T(0, \tau) V(\tau) d\tau / V_{\text{чел}}, \quad (\text{П.8})$$

τ_b – период вдоха (выдоха), $V(\tau) = \frac{\pi V_{\text{чел}}}{2\tau_b} \sin \frac{\pi \tau}{\tau_b}$ [139–140].

Воздух, находящийся в подмасочнике остывает за счет теплообмена с окружающей средой. Обозначив $\alpha_{\text{подм}}$, $S_{\text{подм}}$ – коэффициент теплообмена с окружающей средой для подмасочника и площадь подмасочника соответственно, запишем уравнение для определения температуры $T_{\text{выдох}}$ в виде

$$T_{\text{выдох}} = \bar{T}_{\text{выдох}} - \alpha_{\text{подм}} (\bar{T}_{\text{выдох}} - T_{ср}) \frac{S_{\text{подм}} \tau_b}{c_{г}\rho_{г} (V_{\text{чел}} + 2V_0)}. \quad (\text{П.9})$$

Аналогичным образом записываются уравнения для вычисления температуры в дыхательном мешке

$$\bar{T}_{\text{д.м.}} = \int_{\tau_i}^{\tau_i + \tau_b} T(H, \tau) V(\tau) d\tau / V_{\text{чел}}, \quad (\text{П.10})$$

$$T_{\text{д.м.}} = \bar{T}_{\text{д.м.}} - \alpha_{\text{д.м.}} (\bar{T}_{\text{д.м.}} - T_{\text{ср}}) \frac{S_{\text{д.м}} \tau_b}{c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} V_{\text{чел}}}, \quad (\text{П.11})$$

где $\alpha_{\text{д.м.}}$, $S_{\text{д.м.}}$ – коэффициент теплообмена с окружающей средой для дыхательного мешка и площадь поверхности дыхательного мешка.

Для определения температуры на входе будем использовать выражение, аналогичное (П.7)

$$\bar{T}_{\text{вдох}} = \frac{T_{\text{чел}} V_0 + T_1 (V_0 + V_{\text{чел}})}{2V_0 + V_{\text{чел}}}, \quad (\text{П.12})$$

$$T_{\text{вдох}} = \bar{T}_{\text{вдох}} - \alpha_{\text{подм}} (\bar{T}_{\text{вдох}} - T_{\text{ср}}) \frac{S_{\text{подм}} \tau_b}{c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} (2V_0 + V_{\text{чел}})}. \quad (\text{П.13})$$

Для компьютерного моделирования процессов теплопереноса была разработана программа, осуществляющая численное решение задачи (П.1) – (П.13) методом прогонки.

Адекватность модели была проверена сопоставлением расчетных данных с экспериментальными. В большинстве случаев при испытании аппаратов измеряется только температура на входе. Однако по этому отклику трудно судить о правильности модели в целом. Это объясняется тем, что величину температуры на входе можно менять в широком интервале за счет выбора коэффициента $\alpha_{\text{подм}}$. Поэтому были проведены эксперименты, в которых измерялась температура в точках внутри аппарата. Эксперименты проводились с макетом патрона с параметрами: высота слоя – 0,125 м; диаметр слоя – 0,116 м, регенеративный продукт ОКЧ-3. Режим дыхания: вентиляция – 45 л/мин; частота дыхания 21 1/мин. Температуры измерялись термомпарами в трех точках патрона на расстоянии 20, 60 и 100 мм от начала слоя (со стороны подмасочника).

Таблица температур на входе, полученных в результате расчёта и эксперимента, приведена ниже.

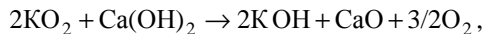
Из таблицы видно, что на начальном этапе работы патрона расчётные и экспериментальные данные не совпадают. Это можно объяснить тем, что в модели (П.1) – (П.13) не учитывается изменение ТФХ регенеративного продукта, а также потери тепла на нагрев элементов аппарата – гофртрубки, подмасочника, корпуса.

II.1. Температуры на входе

Время, мин	Температура на входе	
	расчет	эксперимент
5	42,8	33,1
10	42,6	36,0
15	42,0	38,3
20	41,1	38,6
25	40,3	39,1
30	39,7	39,3
35	39,3	39,3
40	39,0	39,3
45	38,7	39,3
50	38,5	39,3
55	38,4	39,3
60	38,2	38,6
65	38,1	38,0

Для того чтобы учесть изменение ТФХ сорбента необходимо знать как меняется текущее поглощение диоксида углерода во времени при работе патрона. Для этого использовалась методика, изложенная в работе [141]. В ходе процесса регенерации дополнительно берется проба регенеративного продукта на содержание в нем поглощенного диоксида углерода и химически связанного кислорода. Анализ пробы осуществляется лабораторными химическими методами. В результате эксперимента получают кривые изменения скорости поглощения диоксида углерода и величины текущего поглощения во времени в заданном сечении регенеративного аппарата. Для взятия проб эксперимент периодически останавливают, а затем продолжают.

Знание величины текущего поглощения диоксида углерода во времени, а также зависимости ТФХ от величины текущего поглощения позволяет в заданные моменты времени при расчетах по модели (П.1) – (П.13) вводить поправки в объемную теплоемкость и теплопроводность сорбента. Отметим, что поправки вводились при расчетах до температур 300 °С, так как разработанные методы исследования зависимостей ТФХ сорбентов от степени их отработки применимы до указанных температур. Из неопубликованных отчетов ФГУП «ТамбовНИИ» известно, что при температурах свыше 350 °С протекает реакция



сопровождающаяся поглощением теплоты.

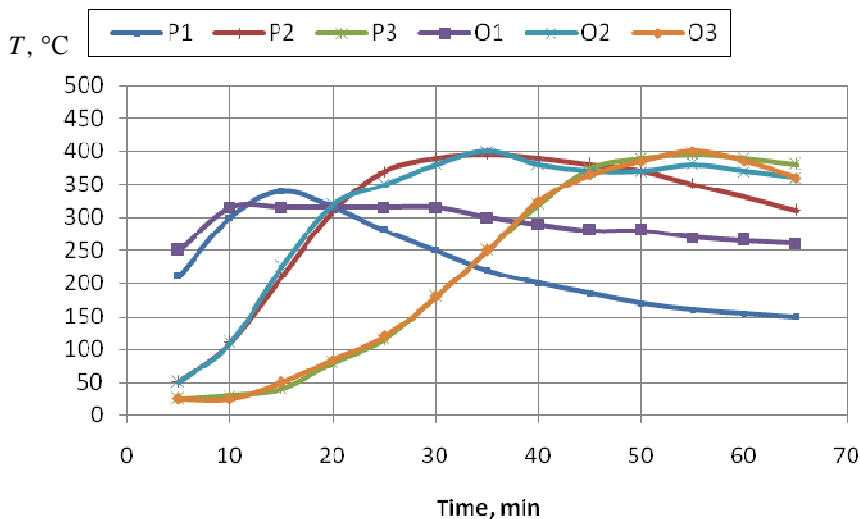


Рис. П1. Расчетные (P) и опытные (O) данные об изменении температур в сечениях 1 – 3 патрона

Результаты экспериментального и расчетного определения температур внутри патрона приведены на рис. П1. Сопоставление полученных данных показывает, что в период интенсивного развития температур (т.е. когда сорбент в данном сечении работает) экспериментальные и расчетные кривые достаточно хорошо совпадают.

П2. Методика выбора тепловой защиты регенеративных патронов

При воздействии на изделие, содержащее регенеративный продукт, высокой температуры, например при пожаре в герметично закрытом отсеке подводного аппарата, начинается разложение РП с выделением кислорода.

Учитывая тот факт, что РП, содержащийся в регенеративных патронах, является источником большого объема кислорода, штатных средств пожаротушения герметично закрытых объектов, в случае возникновения пожара и, как следствия, термического разложения РП и выделения кислорода, может не хватить.

В связи с этим актуальной задачей является разработка вариантов тепловой защиты, позволяющей предотвратить сильный перегрев РП и его термическое разложение. Общая методика выбора вариантов тепловой защиты регенеративных патронов изложена в данном приложении. Она заключается в следующем.

1. Согласно техническим требованиям, которым должна удовлетворять тепловая защита, задают толщину теплозащитного пакета и теплофизические характеристики материалов, из которых изготовлен пакет.

2. Численным методом решают задачу по определению поля температур в регенеративном патроне в течение заданного промежутка времени.

3. По существующим моделям (в данной работе они не показаны), позволяющим при известных температурных полях в регенеративном патроне вычислить количество выделившегося кислорода при термическом разложении РП, определяют избыточное давление кислорода в герметично закрытом патроне.

4. Если расчетное избыточное давление кислорода в патроне не превышает предельно допустимого (из расчета прочности корпуса патрона), то теплозащитный пакет принимается и далее проходит макетные испытания. В противном случае выбирается новый вариант тепловой защиты и расчеты повторяются.

Рассмотрим задачу о нахождении температурного поля в регенеративном патроне.

В качестве физической модели тела для данной задачи рассмотрим составное цилиндрическое тело (рис. П2). Оболочки 2 и 3 цилиндра 1 представим в виде полых бесконечных цилиндров с осями, совпадающими с осью z .

В качестве ТФХ 1-го слоя принимают измеренные разработанным методом ТФХ сорбентов. В качестве ТФХ 2-го слоя задают свойства корпуса (обечайки) регенеративного патрона. Третий слой представляет собой теплозащитный пакет. Если теплозащитный пакет составлен из нескольких слоев различных материалов, то в физической модели, представленной на рис. П4, добавляются дополнительные слои.

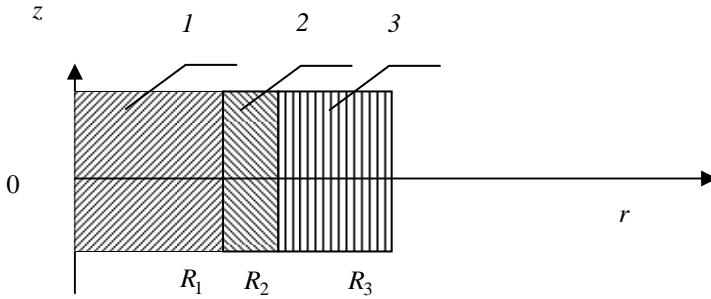


Рис. П2. Сечение составного цилиндрического тела в плоскости (r, z)

Будем считать, что начальные и граничные условия не зависят от координаты z , а зависят только от координаты r и времени τ . Тогда уравнения теплопроводности, описывающие распределение температуры в цилиндрических телах, запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a_i \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, \quad (\text{П.14})$$

$$R_{i-1} \leq r \leq R_i, \quad i = \overline{1, 3}, \quad R_0 = 0,$$

где a_i – коэффициенты температуропроводности i -х слоев, причем

$$a_i = \begin{cases} a_1, & 0 < r < R_1, \\ a_2, & R_1 < r < R_2, \\ a_3, & R_2 < r < R_3. \end{cases}$$

Начальным условием для уравнения (П.14) будет

$$T(r, 0) = T_H(r) = \text{const}. \quad (\text{П.15})$$

Граничные условия зададим в виде

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (\text{П.16})$$

$$\begin{cases} T(R_j - 0, \tau) = T(R_j + 0, \tau), \\ \lambda_j \frac{\partial T(R_j - 0, \tau)}{\partial r} = \lambda_{j+1} \frac{\partial T(R_j + 0, \tau)}{\partial r}, \quad j = \overline{1, 2}. \end{cases} \quad (\text{П.17})$$

$$T(R_3, \tau) = T_0 = \text{const}. \quad (\text{П.18})$$

Задача (П.14) – (П.18) достаточно просто решается методом прогонки. Численное решение сравнивалось с аналитическим, полученным в виде

$$\Theta(\bar{r}, \text{Fo}) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k Y_k(\bar{r}) e^{(-\varepsilon_k^2 \text{Fo})}, \quad (\text{П.19})$$

где $Y_k(\bar{r})$, ε_k – собственные функции и собственные значения задачи Штурма-Лиувилля:

$$\frac{d^2 Y_k(\bar{r})}{d\bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{dY_k(\bar{r})}{d\bar{r}} + [\varepsilon_k^2 / \alpha_i] Y_k(\bar{r}) = 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad 0 < \bar{r} < 1, \quad (\text{П.20})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_k\left(\frac{R_j}{R_3} - 0\right) = Y_k\left(\frac{R_j}{R_3} + 0\right), \\ \lambda_j \frac{dY_k\left(\frac{R_j}{R_3} - 0\right)}{d\bar{r}} = \lambda_{j+1} \frac{dY_k\left(\frac{R_j}{R_3} + 0\right)}{d\bar{r}}, \quad j = \overline{1, 2} \end{array} \right. \quad (\text{П.21})$$

$$Y_k(1) = 0, \quad (\text{П.22})$$

$$\frac{dY_k(0)}{d\bar{r}} = 0, \quad (\text{П.23})$$

$$\Theta(\bar{r}, \text{Fo}) = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_{\text{н}} - T_0}, \quad \bar{r} = \frac{r}{R_3}, \quad \text{Fo} = \frac{a_2 \tau}{R_3^2}, \quad \alpha_i = a_i / a_2,$$

$$A_k = \int_0^1 r \Theta(r, 0) Y_k(\bar{r}) d\bar{r} \bigg/ \int_0^1 r Y_k^2(\bar{r}) d\bar{r}.$$

Ограничившись, например, тремя членами ряда (П.19) можно вычислить собственные значения и собственные функции задачи (П.20) – (П.23) методом Рунге-Кутты, а коэффициенты A_k методом Ньютона-Котеса. На рис. П3 показаны результаты численного и аналитического вычисления температуры на оси цилиндрического тела.

Из рисунка видно, что численное и аналитическое решения совпадают.

Математическая модель использовалась при выборе варианта теплозащитного пакета. При этом рассматривались два типа материалов – теплоизоляционные волокнистые материалы и экранный теплоизоляционный пакет.

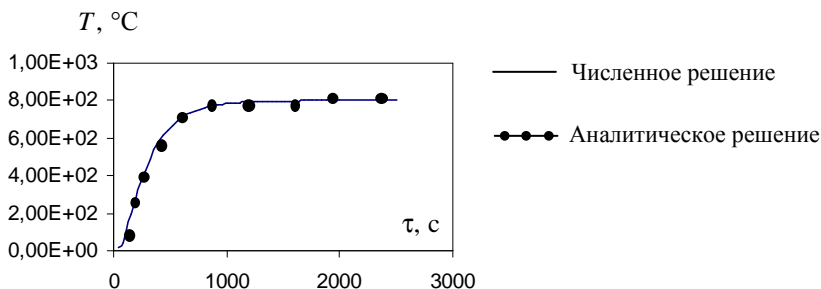


Рис. ПЗ. Изменение температуры на оси цилиндрического тела во времени при $R_3 = 0,1358$ м, $T_0 = 800$ °С, $T_n = 0$ °С

Теплоизоляционные волокнистые материалы (ТВМ). Ограничения, накладываемые температурными условиями эксплуатации, исключают применение широко используемых теплоизоляционных волокнистых материалов на основе полимерных, базальтовых, стеклянных и т.д. волокон.

Кроме того, требование по исключению токсичных продуктов разложения не позволяет использовать ТВМ, содержащие в своем составе упрочняющие органические связующие (фенольные, кремнийорганические и др.). Наиболее перспективным для решения поставленной задачи является использование эластичных материалов на основе ультратонких термостойких неорганических волокон.

Экранный теплоизоляционный пакет (ЭТП). Экранная теплоизоляция нашла широкое применение в различных отраслях техники. В качестве экранов, в зависимости от условий эксплуатации, используются металлизированные полимерные пленки (полиэтилентерефтолатная, полиимидная) и металлическая фольга.

Расчетным путем было установлено, что использование теплоизоляционных материалов ТВМ и ЭТП не дает положительных результатов.

Анализ возможных вариантов тепловой защиты позволил предположить, что при расположении на защищаемой поверхности дополнительного материала с большой теплоемкостью произойдет замедление темпа нагрева, что при определенных значениях теплоемкости может привести к получению требуемых результатов.

В качестве дополнительных материалов с большой теплоемкостью для расчетов были приняты сталь и корунд, толщина которых изменялась от 2,5 до 10 мм.

В расчете использовались следующие характеристики:

	Сталь	Корунд
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	0,43	0,8
Плотность кг/м ³	7800	3700

Полученные результаты показали, что уже при толщине этих материалов 5...6 мм температура защищаемой поверхности снижается на 200 °К по сравнению с исходным теплоизоляционным пакетом.

Однако дальнейшее увеличение толщины материалов из-за значительной теплопроводности последних приводит к резкому увеличению температуры на защищаемой поверхности и, как следствие, увеличивается скорость термического разложения РП. Полученные результаты показали, что при суммарной толщине пакета 15 мм (состоящего из трех слоев: 1-й слой – ТВМ, второй слой – ЭТП, третий слой – корунд) скорость разложения РП не превышает предельно допустимую.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТФХ СОРБЕНТОВ	5
1.1. Область применения регенеративных продуктов и поглотителей	5
1.2. Характеристики регенеративных продуктов и поглотителей диоксида углерода	6
1.3. Методы и средства измерения ТФХ твердых и сыпучих материалов	10
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ	20
2.1. Метод исследования теплофизических характеристик зеренных хемосорбентов	20
2.2. Метод исследования теплофизических характеристик хемосорбентов в форме блоков с каналами	31
Глава 3. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	41
3.1. Анализ погрешностей и разработка рекомендаций по повышению точности определения ТФХ зеренных сорбентов	41
3.2. Анализ погрешностей и разработка рекомендаций по повышению точности определения ТФХ сорбентов в форме блоков с каналами	51

Глава 4. ТЕХНИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТФХ СОРБЕНТОВ	57
4.1. Технические средства автоматизированной установки ...	57
4.2. Алгоритмическое обеспечение автоматизированной установки	60
4.3. Программное обеспечение автоматизированной установки	62
4.4. Метрологическая оценка средств измерения ТФХ сорбентов	65
Глава 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ	68
5.1. Исследование температурных зависимостей ТФХ сорбентов ..	68
5.2. Исследование закономерностей изменения ТФХ сорбентов в процессе регенерации воздуха	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	73
ПРИЛОЖЕНИЯ	84

Научное издание

БАЛАБАНОВ Павел Владимирович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРОДУКТОВ
И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

**Часть 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Монография

Редактор Е.С. Мордасова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 06.09.2012.

Формат 60 × 84 / 16. 5,58 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 475

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14