



**СУЛЕЙМАНОВ**  
Абдусаттор Абдулахаевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА  
АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ ВЫЖИГА**

02.00.04. - Физическая химия

01.04.14 - Теплофизике, теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

А. Су →

Душанбе - 2007

110  
113-47  
47

Работа выполнена в лаборатории «Комплексная переработка сырья и отходов» Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан и на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» Таджикского Технического университета им. академика М.С. Осими

- Научный консультант: доктор химических наук, профессор,  
член-корр. АН Республики Таджикистан  
**Сафиев Хайдар**
- Официальные оппоненты: доктор химических наук,  
**Шилов Алексей Львович**  
доктор химических наук  
**Абдусаломова Максуда**  
доктор технических наук, профессор  
**Хакдодов Махмалшариф Махмудович**
- Ведущая организация: **Таджикский государственный  
национальный университет,  
кафедра физической и коллоидной химии**

Защита диссертации состоится «25» апреля 2007 в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 047.003.01 при Институте химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063, г. Душанбе – 63, ул. Айни, 299/2.  
E – mail: gulchera@list.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан.

Автореферат разослан «20» марта 2007 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат химических наук *Касимова Г.Ф.* Касимова Г.Ф.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** определяется основной линией современной техники, направленной на совершенствование существующих и разработку новых технологий, интенсификацию технологических процессов, достижение экономической эффективности, при одновременном снижении наносимого окружающей среде ущерба твердыми и газообразными отходами технологического производства.

Правительством Республики Таджикистан принято постановление «О государственной экологической программе Республики Таджикистан на период 1998-2008 гг.» от 04.08.1997 № 344, которое должно обеспечивать устойчивое развитие страны в экологическом и экономическом отношениях.

При этом важнейшими становятся вопросы создания безотходных производств на базе новых технологий, утилизации отходов производства, рационального ресурсообеспечения при росте дефицита природных ресурсов, эффективного его использования, в первую очередь путем вовлечения в производство вторичных ресурсов, образующихся в самом производстве.

На территории Таджикского алюминиевого завода (ТадАз) скопилось огромное количество твердых отходов производства алюминия, которые хранятся под открытым небом, занимают большие площади и загрязняют окружающую среду. В то же время эти отходы содержат ценные сырьевые вещества, как глинозем и криолит. Содержание в них примесей, в частности углерода, не позволяет повторно использовать их в качестве возвратного сырья для производства алюминия. Промышленную переработку этих твердых отходов можно осуществлять выщелачиванием, флотацией, обжигом и т.д.

Наиболее простым способом обезуглероживания твердых отходов производства алюминия является обжиг, основанный на процессе выжигания углерода. Основными недостатками способа являются сложность регулирования температуры процесса и возможность взаимодействия составных частей отходов, в том числе сульфатов или карбонатов с криолитом, что приводит к потере ценного и дефицитного сырья.

Переработка твердых отходов производства алюминия выжигом углерода сопровождается отводом большого количества тепловой энергии с отходящими газами, приводящими к неоправданным потерям и снижению эффективности использования топлива и углерода сырья. Утилизация бросовой энергии, путем внедрения новых технических средств, обеспечивающих максимально возможный возврат теряемой энергии в технологический процесс, представляет не только экологический, но и большой экономический интерес.

Поэтому исследования, направленные на изучение физико-химических основ процесса выжигания отходов, и на их основе разработку

промышленной технологии обезуглероживания твердых отходов в печи с вращающимся цилиндрическим барабаном при одновременной утилизации тепла отходящих газов являются актуальными и своевременными.

**Цель работы** заключается в исследовании физико-химических основ процесса обезуглероживания и разработке промышленной технологической схемы по переработке твердых отходов производства алюминия методом выжигания.

Поставленная цель исследований достигается решением следующих **задач**:

- изучение кинетики и механизма процессов, протекающих при получении криолит-глиноземного концентрата (КГК) из углерод-, фторглиноземсодержащих твердых отходов производства алюминия;
- физико-химический анализ исходных материалов и образующихся в ходе их переработки продуктов;
- разработка технологической схемы переработки углерод-, фторглиноземсодержащих твердых отходов производства алюминия с утилизацией тепла отходящих газов;
- изучение механизма передачи тепла от отходящих газов к теплоносителю утилизационной установки;
- разработка конструкции печи выжигания и установление тепловых, аэродинамических характеристик и технологических режимов переработки отходов производства алюминия;
- проведение опытно-промышленных испытаний и внедрение разработанных устройств и установок.

**Научная новизна.** На основе экспериментально-теоретических исследований физико-химических свойств отходов и процесса их обезуглероживания:

- разработаны технологические схемы и режимы получения криолит-глиноземного концентрата (КГК) методом выжигания;
- научно обоснована возможность обезуглероживания отходов производства алюминия в печи с вращающимся цилиндрическим барабаном;
- установлены кинетические параметры и оптимальные режимы протекания процесса выжигания шлама, склада твердых отходов и «сметки» производства алюминия;
- разработаны конструкции вращающейся печи выжигания нового типа и утилизаторов тепла газовых выбросов;
- установлены аэродинамические и тепловые характеристики распределения воздуха под подвижный слой твердых частиц и изменения температуры подвижного слоя сырья по длине вращающегося цилиндрического барабана;
- предложен аналитический метод расчета воздухораспределителей равномерной раздачи постоянного поперечного сечения и постоянного статического давления для определения площади отверстий выпуска воздуха;

- разработана математическая модель определения кинетики изменения температуры процесса обезуглероживания и изменения концентрации углерода в зависимости от тепловых параметров рабочего объема печи.

Научная новизна вышеуказанных разработок подтверждена 10 авторскими свидетельствами и 1 патентом на изобретение.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке и совершенствовании технологии термического способа переработки отходов производства алюминия; конструктивном решении элементов печи с вращающимся цилиндрическим барабаном для проведения процесса обезуглероживания твердых отходов с утилизацией тепла газовых выбросов; разработке методик расчета: воздухораспределителей равномерной раздачи воздуха; изменения температуры воздуха в воздухораспределительной трубе печи; кинетики изменения средней температуры твердых частиц в подвижном слое вращающегося цилиндрического барабана; кинетики изменения концентрации углерода по длине вращающегося цилиндрического барабана; разработке конструкций рекуперативных и регенеративных утилизаторов тепла отходящих технологических газов; внедрении технологии термического способа обезуглероживания отходов производства алюминия в печи выжигания с вращающимся цилиндрическим барабаном.

#### **Результаты исследований внедрены:**

- на Таджикском алюминиевом заводе (ТадАз) при проектировании, разработке и внедрении в 2002 г. на вновь построенном участке выжигания криолит - глиноземных отходов. Качество получаемого продукта показало на возможность его использования в качестве возвратного сырья в процессе электролитического получения алюминия;
- на Худжандском хлебозаводе и объектах ПО «Таджиктеплокоммунэнерго» при разработке и внедрении конструкций утилизаторов тепла с вращающейся поверхностью нагрева.

Некоторые результаты исследований, представленные в диссертации, нашли также отражение в научно-технических отчетах НИР, выполненных в 1985-1991 гг. в Таджикском политехническом институте с Министерством коммунального хозяйства Таджикской ССР, в 2002-2004 гг. с АООТ «Душанбегаз», а также в 2001-2006 с Таджикским алюминиевым заводом.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- химический и минералогический состав углерод-, фторглиноземсодержащих твердых отходов производства алюминия и продуктов их переработки;
- результаты исследований физико-химических свойств отходов алюминиевого производства и продуктов их переработки;
- результаты исследований процесса выжигания углерода из состава отсева склада твердых отходов (СТО) и отмытого шлама;
- конструкция промышленной печи выжигания с вращающимся цилиндрическим барабаном;

- результаты исследований кинетики процесса выжигания углерод-фторсодержащих твердых отходов в рабочем объеме вращающейся печи выжигания;

- результаты исследований изменения температуры воздуха в воздухораспределительной трубе печи выжигания;

- результаты исследований изменения температуры твердых частиц в подвижном слое по длине печи выжигания;

- технологический режим получения криолит-глиноземного концентрата (КГК) методом выжигания;

- результаты опытно-производственных испытаний процесса выжигания углерод-фторглиноземсодержащих твердых отходов производства алюминия во вращающейся печи и утилизаторов тепла отходящих газов.

Достоверность результатов исследований подтверждена:

- необходимым объемом экспериментальных данных, полученных в лабораторных и производственных условиях в печи выжигания;

- полученными данными при аналитических расчетных моделях и экспериментальных исследованиях;

- идентичностью результатов теоретических и опытно-промышленных экспериментальных исследований печи выжигания.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканских научно-практических конференциях (Душанбе, 1985, 1987, 1989, 1997, 1998, 2000, 2002 гг.), Международных научно-практических конференциях – "Производство - технология - экология" ПРОТЭК-2000, ПРОТЭК-2001 (Москва 2000, 2001гг.); третьей Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, МЭИ, 2002 г.); III Всесоюзной студенческой конференции "Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии" (Казань, 1987 г.); Всесоюзном совещании "Аналитические методы расчета процессов тепло- и массообмена" (Душанбе, 1986 г.), Международном симпозиуме по экологии, энерго- и ресурсосбережению (Самарканд, 1993 г.); Международной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения одного из основателей Таджикского политехнического института Сулейманова А.С. (Душанбе, 1998 г.); Международной конференции: «Современная химическая наука и ее прикладные аспекты» (Душанбе, 2006 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 47 печатных работ, в том числе 1 патент, 10 авторских свидетельств на изобретение. Материалы диссертации отражены в 15 научно-технических отчетах, выполненных под руководством и при участии автора.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 220 наименований и 20 страниц приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 298 страниц компьютерного набора, из

них: основной текст диссертации, изложен на 278 страницах, включая 74 рисунка, 13 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении изложены предпосылки и основные проблемы исследования, обоснована актуальность работы.

**В первой главе** диссертации приведен анализ литературных данных по способам переработки углерод-, фторглиноземсодержащих отходов производства алюминия.

Анализ существующих способов переработки отходов показал, что методы выщелачивания и флотации, хотя и имеют достаточно высокие показатели извлечения ценных компонентов, связаны с высоким выходом шламов, хвостов флотации, и характеризуются громоздкостью технологической схемы, большой трудоемкостью операций и часто экономически являются малоэффективными. Из всех рассмотренных способов, термический метод (метод выжигания) является простым, и может, осуществляется во вращающихся печах или в печах с псевдоожиженным слоем. В промышленных технологических установках с псевдоожиженным слоем не обеспечивается полнота выжигания углерода и усложнено регулирование температуры процесса.

Разработана технологическая схема в Великобритании фирмой «Даттон Вест Рикавери Лимитед». Криолит-углеродистую смесь измельчают до крупности ~ 2 мм и с помощью конвейера загружают в печь кипящего слоя, имеющую решетку из керамических материалов. Для образования кипящего слоя и поддержания горения в область под решеткой непрерывно подают газ. Оптимальная температура процесса ~ 700°C. Температура в кипящем слое регулируется циркуляцией охлаждающего агента (воздух, вода и др.) по трубам. Конструкция печи усложняется внесением в кипящий слой циркуляционной системы.

Наиболее простым и экономичным методом извлечения из угольной пены фтористых солей является обжиг угольной пены, который сводится к выжиганию угольных частиц в специально сооруженной траншее. Такая траншея состоит из двух стенок, сложенных из огнеупорного кирпича без раствора с зазором между кирпичами до 10-20 мм для прохода воздуха к горящей в ней угольной пене. Этот способ является трудоемким и сопровождается загрязнением воздушной среды.

## Глава 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

При производстве алюминия образуется большое количество твердых отходов: отработанная угольная и теплоизоляционная футеровка электролизеров, анодные огарки, угольная пена, сметки, сплесы, шлаки.

Состав твердых отходов производства алюминия отличается в зависимости от участка, в которых они образуются. Так, содержание углерода препятствующее возврату отходов в производство алюминия колеблется в пределах от 16 до 55% масс.

Произведенный топографический и послойный химический анализ шламового поля и свалки твердых отходов ТадАЗа показали наличие в них полезных компонентов:  $Na_2SO_4$ ,  $NaF$ , графита,  $Na_3AlF_6$ ,  $AlF_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Al$  металлического,  $K_2SO_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ , и т.д.

В табл. 1 приводится химический состав отходов производства алюминия на Таджикском алюминиевом заводе.

Таблица 1.

Химический состав твердых отходов ТадАЗа

Компонент	Химический состав, % масс.								
	$F^*$	$Al^{**}$	$Na^*$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$SO_4^{2-}$	$CaF_2$	$MgF_2$	$C$
Пыль и шлак газоочистных аппаратов ЦЭА	12-16	9-12	9-11	0,3-0,6	1,0-1,6	2-5	0,7-1	0,6-0,9	16-30
Пена электролитная	28-32	12-13,5	15-17	0,1-0,4	0,3-0,5	-	0,8-1,0	1,0-1,6	20-25
Катодная футеровка КФ: угольные блоки	11-14	8-11	8,5-10,5	1,7-2,0	2,0-2,5	0,3-0,5	1,5-1,8	1,0-1,2	48-55
КФ: подовая набивка и серобелый слой	12-15	9-11	9-11	2,5-3,0	2,0-3,0	-	1,7-1,9	0,0-0,1	50-55
КФ: первый слой шамотного кирпича	18-20	20-22	14-16	28-32	1,5-1,6	-2,8-	3,2	0,0-0,1	3,0-4,0
Мелкая фракция свалки	24-27	13-15	17-18,5	0,3-0,5	0,7-0,8	0,3-0,4	-	-	20-25

Физико-химические исследования компонентов шлама и продуктов его переработки показали, что в составе шлама содержатся сульфаты и фториды металлов, глинозем, а в продуктах переработки имеется кальцинированная сода.

Как видно из рентгенограммы отмытого шлама (рис. 1а), основными его фазами являются: криолит, глинозем и углерод. В меньших количествах

в нем содержатся фазы гётита и кварца. Рентгенограмма концентрата, полученного из отмытого шлама (рис. 1б), подобна рентгенограмме огарка (рис. 1в), получаемого при сжигании углерода, но характеризуется усилением интенсивности основных линий глинозёма, что, очевидно, связано с частичным разложением криолита в результате его взаимодействия с остатком влаги в шламе и модификационными изменениями глинозёма ( $\alpha-Al_2O_3 \rightarrow \gamma-Al_2O_3$ ).

Исследование процесса выжигания углерода из нерастворимой части шлама выполнено в лабораторных условиях на модели, вращающейся трубчатой печи. Диапазон проведенных исследований: содержание углерода в исходном шламе 39%, масса пробы 30 гр., продолжительность процесса выжигания 10-20 мин., температура 650-900°C, расход воздуха 20-40 л/мин.

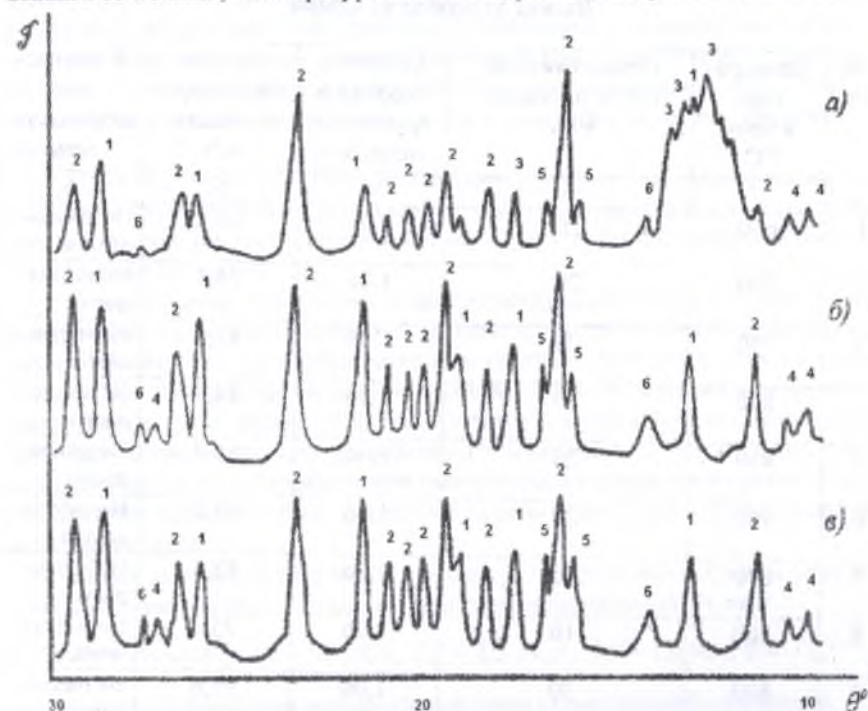


Рис. 1. Рентгенограммы: а) отмытого шлама; б) флотационного концентрата; в) огарка отжига шлама.

1 -  $Al_2O_3$ ; 2 -  $Na_3AlF_6$ ; 3 - C; 4 -  $SiO_2$ ; 5 -  $FeOOH$ ; 6 -  $CaF_2$ .

Проба твердого отхода помещалась в середину кварцевой (или фарфоровой) трубчатой печи, которая вставлялась в трубчатую электропечь, предварительно нагретую до температуры 400-450°C. При температурах

650-900°C углерод сжигался в потоке воздуха, продуваемого через вращающийся трубчатый реактор, в течение времени необходимого для полного сгорания углерода.

В таблице 2 приведены результаты лабораторных исследований по сжиганию углерода из отмытого шлама.

Как видно из таблицы 2, температура 700-750°C недостаточна для полного обезуглероживания сырья, а при температуре 900°C степень обезуглероживания снижается. На наш взгляд, это связано с образованием пленки над поверхностью частиц (расплавление), которая препятствует свободному доступу кислорода к поверхности углерода.

Выжиг углерода из шлама

Таблица 2.

№ пп.	Температура в печи °C	Продолжительность процесса, мин.	Скорость воздуха в трубчатой печи, м/с	Степень обезуглероживания, α, %	Унос частиц образца из печи
1	2	3	4	5	6
1.	650	20	1,06	40,5	Не наблюдается
2.	700	20	1,06	78,3	Не наблюдается
3.	750	20	1,06	83,8	Не наблюдается
4.	800	20	1,06	94,3	Не наблюдается
5.	850	20	1,06	86,7	Не наблюдается
6.	900	20	1,06	68,7	Не наблюдается
7.	800	15	1,06	88,4	Не наблюдается
8.	800	10	1,06	75,4	Не наблюдается
9.	800	30	1,06	95,6	Не наблюдается
10.	800	20	0,65	52,3	Не наблюдается
11.	800	20	0,85	78,6	Не наблюдается
12.	800	20	1,55	99,2	Частичный унос
13.	800	20	2,12	47,8	Заметный унос

Результат выжигания углерода (обезуглероживание) в трубчатой печи зависит от аппаратного оформления опыта. Когда проба в трубке реактора располагается компактной массой и температура в зоне горения составляет около 800°C, температура массы повышается за счет выделения тепла сжигания углерода и частицы в пробе слипаются. Это объясняется тем, что окисление углерода (не слишком быстрой реакции) при температуре до 700°C, выделяемая теплота путем теплоотдачи успевает отводиться воздухом, продуваемым через трубчатую печь. Поэтому, температура в зоне реакции равна или немного выше температуры окружающей среды. При нагревании скорость реакции быстро увеличивается, а вместе с ней увеличивается и скорость выделения тепла, одновременно растет и скорость теплоотдачи вследствие повышения температурного напора, однако, гораздо медленнее: первая, согласно уравнению Аррениуса, с температурой в показателе, а вторая по закону теплопроводности Ньютона, линейно. Поэтому, начиная с некоторой температуры, тепловое равновесие нарушается: теплоотдача не поспевает за выделением тепла и температура частиц в пробе возрастает.

Лучшие результаты обезуглероживания получены, когда проба на поверхности трубчатой печи расположена тонким слоем и в результате этого имеет большой контакт с воздухом и температура печи с пробой поднимается постепенно до 800°C.

В то же время, повышение скорости воздуха (см. табл. 2, графы 4 и 5) в трубчатой печи способствует повышению степени обезуглероживания сырья. Дальнейшее повышение скорости воздуха приводит к уносу частиц сырья из объема трубчатой печи и нарушает технологический режим из-за уноса несгоревших частиц углерода. Следует отметить, что движение воздуха над слоем образца не способствует повышению степени обезуглероживанию сырья, в особенности при увеличении толщины слоя пробы. Здесь сказывается недостаточный доступ кислорода к частицам расположенным под слоем пробы.

Таким образом, в результате выжигания углерода в оптимальном режиме можно получить криолит-глиноземную смесь содержащую (% масс.):

55 - 65  $Na_3AlF_6$ ; 25 - 35  $Al_2O_3$ ; 1,5 - 2,5  $Fe_2O_3$ ; 1,0 - 1,5  $SiO_2$ ; 0,6 - 1,5 С.

На рис. 2 приведена разработанная нами схема переработки шлама.

В предложенной схеме отмывка шлама производится водой, а затем полученная пульпа подвергается фильтрации. После фильтрации жидкая фаза, состоящая в основном из сульфатов и карбонатов упаривается до получения сухого остатка. Полученный остаток может быть использован в производстве глинозема, жидкого стекла и др.

Рентгенограмма отсева СТО (рис. 3а) в целом подобна рентгенограмме отмытого шлама, хотя интенсивность линий глинозема в этом случае заметно выше, что свидетельствует о его большом содержании в отсеве СТО

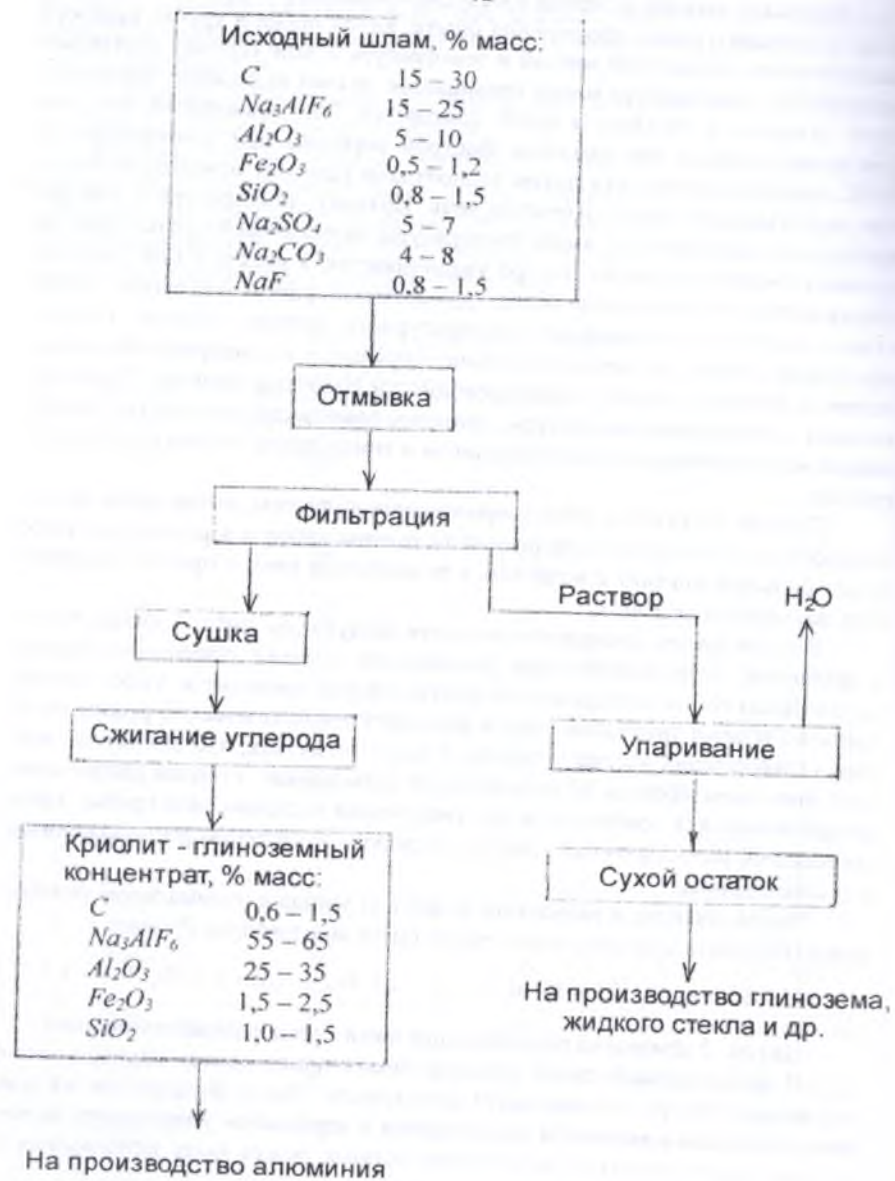


Рис. 2. Схема переработки шлама

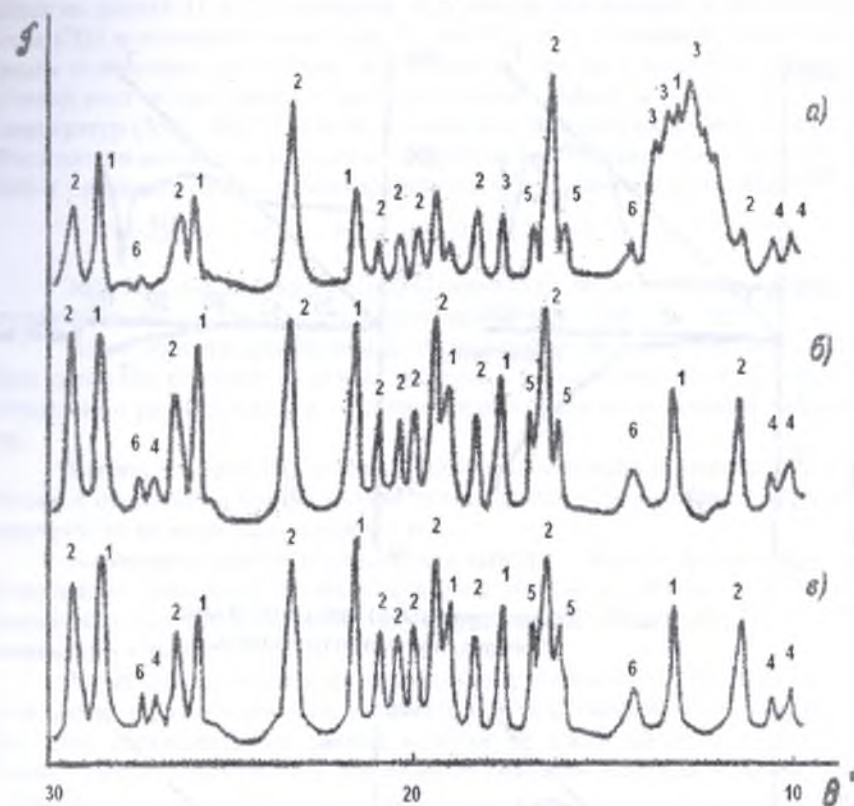


Рис.3. Рентгенограммы: а) отсева СТО; б) флотационного концентрата; в) отгарка отжига отсева СТО  
1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 - Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>; 3 - C; 4 - SiO<sub>2</sub>; 5 - FeOOH; 6 - CaF<sub>2</sub>.

в сравнении с отмытым шламом. Рентгенограмма КГК, полученного при выжиге углерода (рис. 3в) из отсева, в принципе подобна рентгенограмме флотационного концентрата (рис. 3б), что свидетельствует об идентичности их фазового состава.

Дериватогаммы отмытого шлама и отсева СТО идентичны, и на них можно выделить 4 интервала температур, характеризующих происходящие в них изменения (рис.4а, рис.5а). На линиях ТГ в начальном интервале температур не наблюдается существенных изменений массы. Далее, в интервале температур от 120°С до 200°С, наблюдается убыль массы (0,5 - 0,7%) и незначительный эндотермический эффект на линии ДТА, которые обуслов

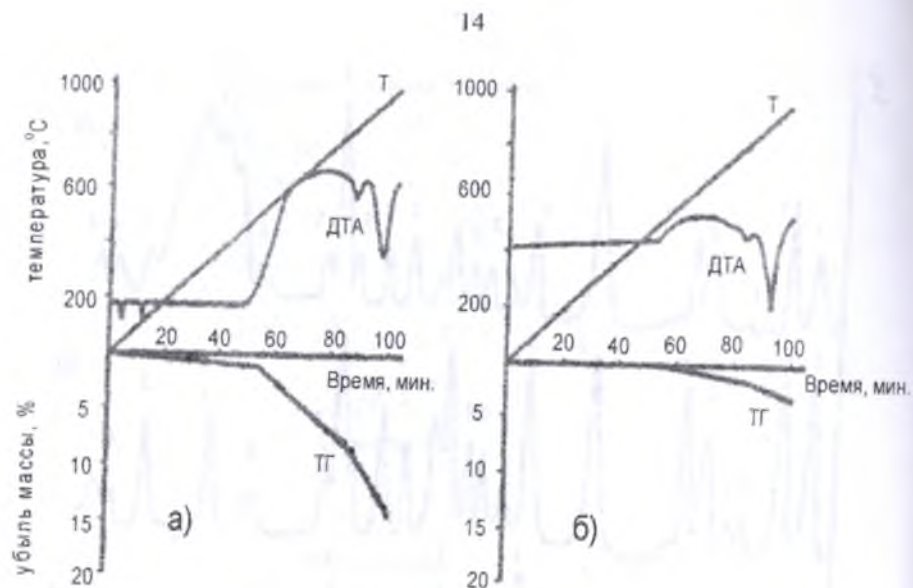


Рис. 4. Дериватограммы: а) отмытого шлама; б) огарка, полученного из него.

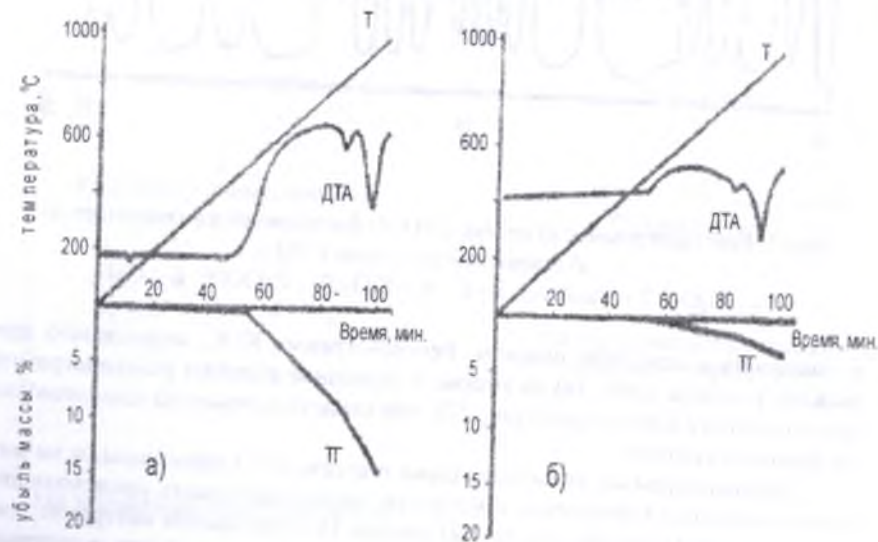
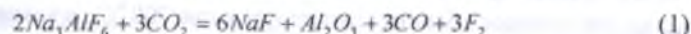


Рис. 5. Дериватограммы: а) отсева СТО, б) огарка, полученного из него.

лены испарением адсорбционной влаги. Подобные изменения не наблюдаются на линиях ТГ и ДТА огарков, полученных при выжиге углерода из отсева СТО и отмытого шлама (рис.4б, рис.5б), что обусловлено отсутствием влаги в образцах, вследствие ее удаления в процессе сжигания углерода. Резкий рост потери массы и экзотермический эффект в третьем интервале температур (550 – 880°C) связаны с началом процесса окисления углерода. Рост потери массы и эндотермический эффект в интервале температур 850 – 860°C, вероятно связан с взаимодействием CO<sub>2</sub> с криолитом по реакции:



Эндотермический эффект, наблюдаемый на линиях ДТА при температуре свыше 900°C, связан с плавлением криолита.

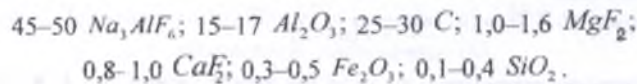
Таким образом, результаты ДТА, моделируя процессы, происходящие при сжигании углерода из шлама и отсева СТО, способствуют выбору оптимального режима выжигания, не допуская плавления исходного материала.

Выжигу углерода из отсева СТО предшествовали процессы: измельчение и отсеивание. Размол сырья производился в шаровой мельнице или вручную до размера частиц менее 1 мм.

Экспериментальные исследования выжигания углерода производились в следующих диапазонах изменения параметров: масса пробы 10 – 20 гр., продолжительность выжигания 10 – 30 минут, остаточный углерод 2,2 – 3,3 %, температура выжигания 800 °C.

Результаты проведенных исследований показали, что полнота сжигания растет с увеличением длительности опыта и уменьшением массы пробы. Это доказывает, что расход воздуха 40 л/мин на 30 г пробы (1,3 л/мин·г.сырья) недостаточен для полного сжигания углерода в течение 10-15 минут.

Нестабильность результатов из-за спекания пробы за счет плавления криолита является главным фактором, препятствующим повышению температуры более 800°C. Кроме того, на результаты опытов большое влияние оказывает величина помола, т.е. слишком тонкий помол (много пыли) вызывает активное сплавление и неполноту сжигания. В то же время слишком крупные частицы углерода (более 2,5 мм) не сгорают полностью за время опыта. Поэтому в дальнейших экспериментах был использован отсев СТО с размерами частиц менее 2,5 мм, содержащий, % масс.:



В исследованиях процесса обезуглероживания важную роль играет изучение кинетики и механизма протекания процесса сгорания углерода со-



держась в отсеке. На рис.6. представлена зависимость степени обезуглероживания от продолжительности процесса.

Как видно из рис.6. в интервале температур 600 – 800 °С при продолжительности процесса равном 20 мин., степень обезуглероживания изменяется от 14 до 95%. Кинетические кривые процесса обезуглероживания от 600 до 650 °С имеют прямолинейный характер, а при более высоких температурах – параболический.

С точки зрения практической реализации процесса обезуглероживания представляет интерес область температур выше 700 °С, в которой почти полное окисление углерода протекает за короткий промежуток времени.

В случае необратимых, идущих до конца реакций, скорость реакций определяется скоростью превращения только вступающих во взаимодействие веществ, и уравнение скорости химической реакции для начального  $a$

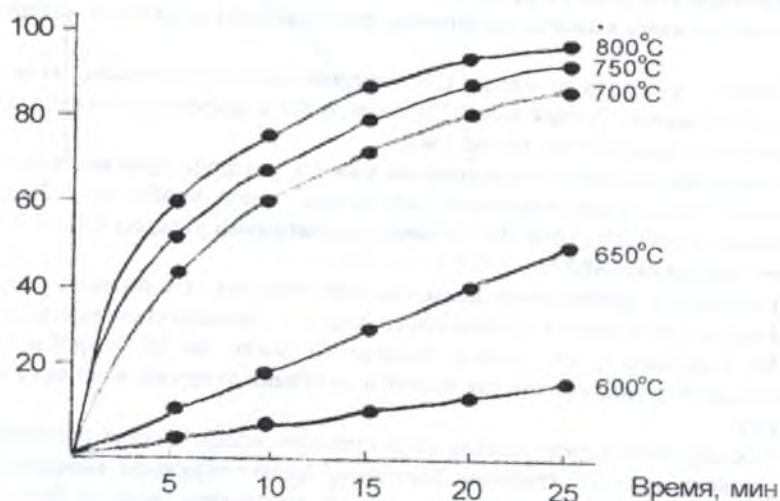


Рис. 6. Зависимость степени обезуглероживания от продолжительности процесса.

молей углерода в единице объема и остатка углерода  $(a - x)$  в момент времени  $\tau$  имеет вид:

$$\frac{dx}{d\tau} = k(a - x) \quad (2)$$

решение которого относительно коэффициента скорости  $k$  в относительных концентрациях имеет вид:

$$k = \frac{2,303}{\tau} \lg \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3)$$

откуда доля непрореагировавшего углерода к моменту времени

$$1 - \alpha = \exp(-k\tau) \quad (4)$$

а доля прореагировавшего

$$\alpha = [1 - \exp(-k\tau)] \quad (5)$$

На графике зависимости  $\lg \frac{1}{1 - \alpha}$  от времени, полученные прямые имеют отрицательный наклон, равный  $k/2,303$ .

Обработкой кривых в координатах  $\lg 1/(1 - \alpha)$  от времени (рис.7а) и  $\lg k$  от обратной абсолютной температуры (рис. 7б) были получены значения константы скорости и кажущейся энергии активации. Значение кажущейся энергии активации в интервале температур 600 – 700 °С – участок ВС (177,3 кДж/моль) свидетельствует о прохождении процесса в кинетической области. Снижение величины кажущейся энергии активации до 38,8 кДж/моль в интервале температур 700–800 °С (участок АВ) свидетельствует о том, что при температурах свыше 700 °С наряду с кинетическими проявляются и диффузионные факторы.

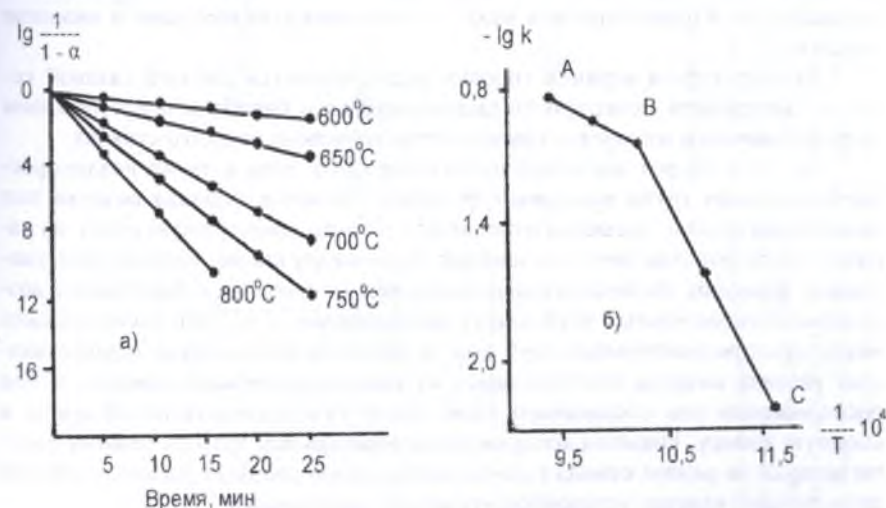


Рис. 7. Зависимость  $\lg 1/(1 - \alpha)$  от времени (а) и  $\lg k$  от обратной абсолютной температуры (б).

При рассмотрении процесса выжигания отходов алюминиевого производства в лабораторных условиях определены основные факторы влияющие на выжиг углерода: пределы изменения температур частиц и воздуха, обеспе-

чение свободного доступа воздуха к частицам, отвод газо-пылевоздушной среды и т.д.

В связи с этим предложена конструкция вращающейся печи, позволяющая в рабочем пространстве создать необходимые температурные условия, обеспечивающие полноту термического обезуглероживания и расширить диапазон изменения технологических режимов при переработке углеводород-фторметансодержащих отходов с различным содержанием углерода, и проведения процесса выжига углерода при перекрестной схеме движения подвижного слоя из твердых частиц и воздуха.

На основании установленных кинетических параметров и оптимальных режимов протекания процесса выжига сконструирована печь с вращающимся цилиндрическим барабаном. Конструкция печи выжига приведена на рис. 8, а разрезы показаны на рис. 9. Печь состоит из цилиндрического вращающегося барабана, по внутреннему периметру которого размещены воздухораспределительные трубы круглого сечения с постоянным по длине диаметром. По длине трубы закреплены полые насадки с определенным шагом. На насадках высверлены отверстия. Цилиндрический барабан расположен на опорных роликах и приводится в движение с помощью электродвигателя. Концы барабана входят в неподвижную верхнюю и нижнюю головки.

Температура в верхней головке поддерживается работой газовой горелки. Внутренняя поверхность цилиндрического барабана покрыта слоем из футеровочного материала (легкий бетон на основе жидкого стекла).

За один оборот цилиндрического барабана одна и та же воздухораспределительная труба выполняет функции: элемента подвода воздуха под подвижный слой и элемента отводящего газо-пылевоздушную среду из рабочего пространства печи, не занятой подвижным слоем. Выполнение указанных функций достигается перемещением (совместно с барабаном) воздухораспределительных труб вокруг оси вращения печи. При расположении воздухораспределительных труб под подвижным слоем сырья осуществляется раздача воздуха поступающего из распределительной камеры, а при расположении вне подвижного слоя, отвод газо-пылевоздушной среды в сборную камеру. Переход воздухораспределительных труб из режима подачи воздуха на режим отвода газо-пылевоздушной среды из рабочего объема печи осуществляется установкой «толстых» перегородок.

Из отверстий в полых насадках воздух поступает под подвижный слой, и способствует лучшему обтеканию и перемешиванию твердых частиц, их уносу за пределы подвижного слоя, поддержанию во взвешенном состоянии, нагреванию, горению и охлаждению в слое, а также уносу части образовавшегося продукта из рабочего пространства вращающегося цилиндрического барабана.

Схема перемещения частиц в полном цилиндрическом барабане представлена на рис. 10.

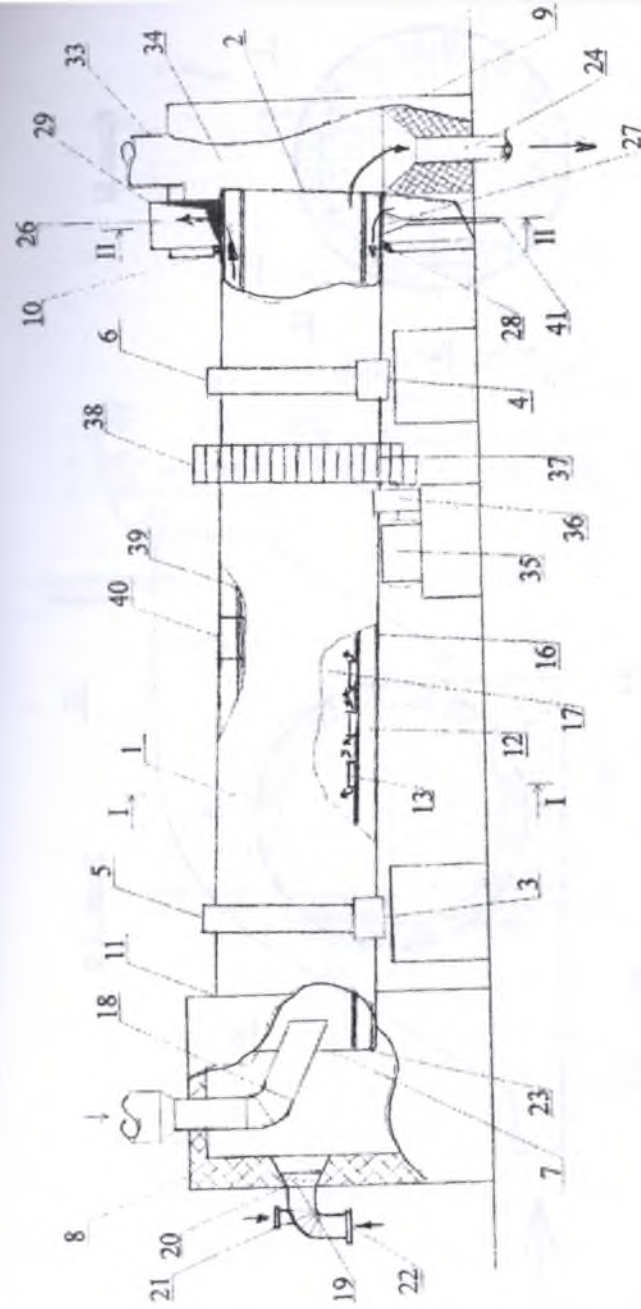


Рис. 8. Вращающаяся печь выжига.

1. Стальной вращающийся цилиндрический барабан. 2. Выпускной конек. 3, 4. Опорные ролики. 5, 6. Стальные бандажи. 7. Впускной конек. 8, 9. Верхняя и нижняя головки. 10, 11. Уплотнители. 12. Воздухораспределительная труба. 13. Перфорированный полый насадок. 16. Футеровочный слой. 17. Рабочее пространство. 18. Точка. 19. Газовая горелка. 20. Завихритель. 21. Патрубок подачи газа. 22. Патрубок подачи воздуха. 23. Заглушка. 24. Переходная камера. 26, 27. Сборная и распределительная камеры. 28. «Воздушная завеса». 29. Боковая стенка. 30. Патрубок отвода. 34. Камера нижней головки. 35. Электродвигатель. 36. Редуктор. 37. Подвешивающая шестерня. 38. Венцовая шестерня. 39. Патрубок подвода сжатого воздуха. 40. Компенсационный шов. 41. Патрубок подвода сжатого воздуха.

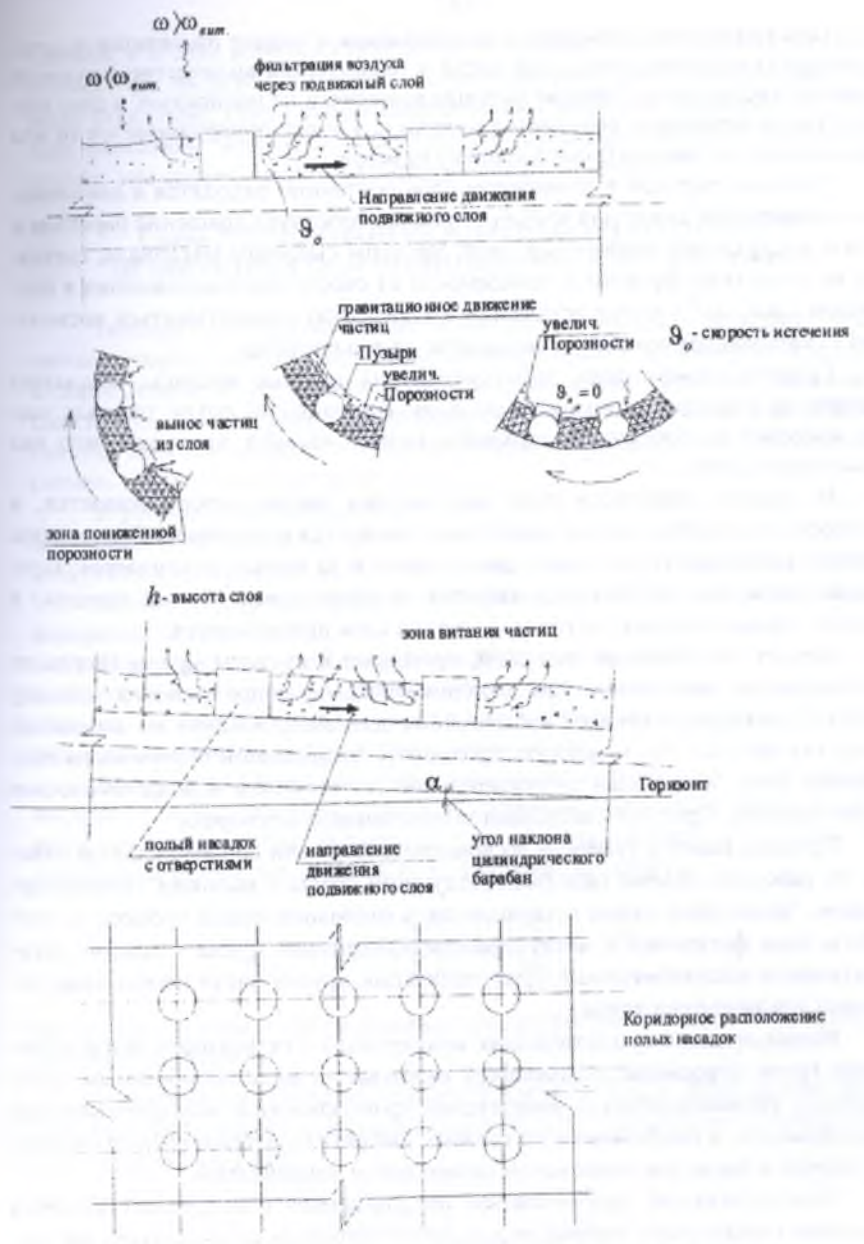


Рис. 10. Схема перемещения подвижного слоя во вращающемся цилиндрическом барабане.

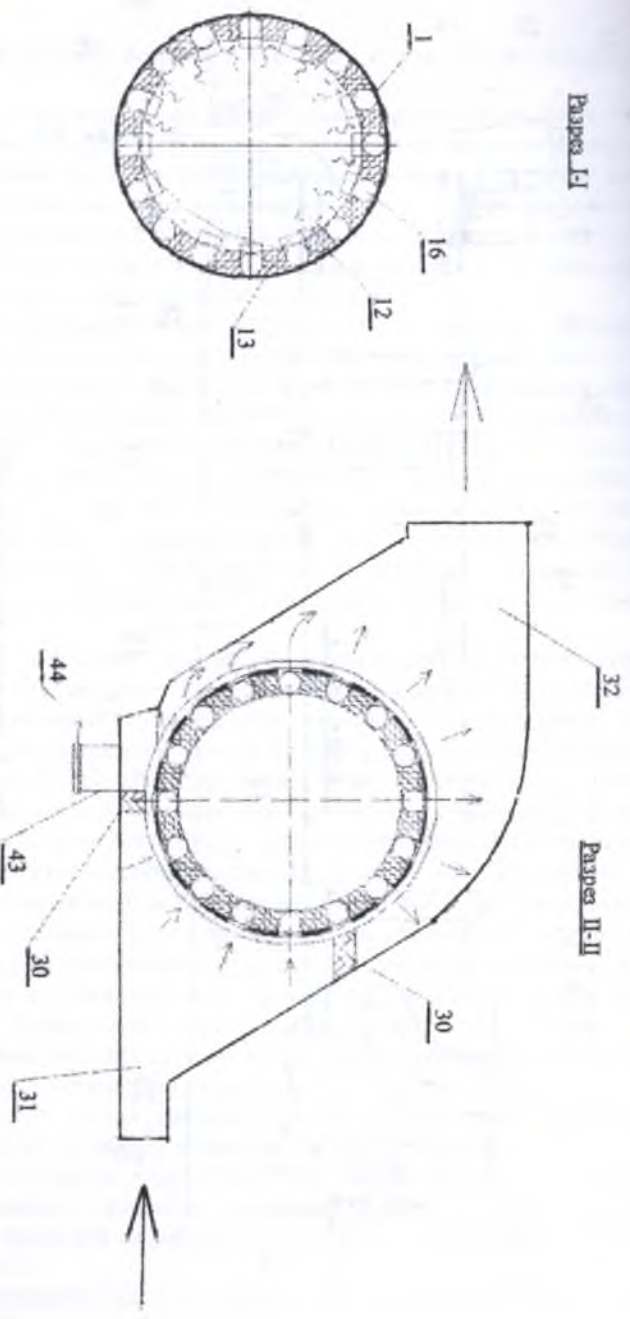


Рис. 9. Разрезы вращающейся печи выжигателя.

- 30. «Голстая» перегородка.
- 31. Патрубок подвода воздуха.
- 32. Патрубок отвода газо-, пылевоздушной среды.
- 43. Патрубок отвода осевших пылевых частиц.
- 44. Шибер.

При вращении цилиндрического барабана и подаче оживающего агента (воздуха) из подвижного слоя сырья в наибольшем количестве выносятся более мелкие частицы. Мелкие частицы выносятся не полностью, в слое всегда остается некоторое количество мелочи, а в уносе обнаруживается то или иное количество частиц более крупного размера.

Твердые частицы в подвижном слое постоянно находятся в движении. Интенсификации движения частиц в слое способствует вращение барабана и подача воздуха под подвижный слой. Частицы сыпучего материала, состоящие из различных фракций в зависимости от своего местонахождения в подвижном слое, либо могут оставаться в слое, либо подхватываться восходящим газообразным потоком и выносятся за его пределы.

Гравитационная сила, действующая на твердые частицы, оказывает влияние на порозность подвижного слоя. Нисходящий поток твердых частиц, набегает на лобовую поверхность полого насадка, выступающего над подвижным слоем.

В области набегания поток из твердых частиц затормаживается, и плотность подвижной массы возрастает, снижается порозность. Далее поток омывает поверхность насадка с двух сторон и за насадкой сливается. Продолжая движение, поток опять набегает на препятствие (полый насадок) и процесс перемешивания частиц и движение слоя продолжается.

Воздух, подводимый под слой, проникает в пустоты между твердыми частицами на расстояние, где аэродинамическое сопротивление проходу воздуха оказывается равным избыточному давлению воздуха на выходе их отверстия насадка. Часть воздуха проходит в направлении поверхности подвижного слоя, испытывая незначительное по величине аэродинамическое сопротивление. При этом наблюдается образование «пузырей».

Процесс выжигания углерода во вращающейся печи сопровождается отводом из рабочего объема газо-пылевоздушной среды с высоким теплосодержанием. Часть этого тепла возвращается в технологический процесс за счет работы слоя футеровки и воздухораспределительной трубы в режиме регенеративного теплообменника. Для утилизации другой части необходима установка утилизаторов тепла.

Использование существующих конструкций утилизаторов тепла отходящих газов, отводимых в атмосферу оказывается нецелесообразным, из-за их низких теплотехнических показателей, громоздкости и эксплуатационных характеристик, в особенности на газовых выбросах загрязненных пылевыми частицами, а также смачиваемости поверхности конденсатом.

Конструктивной особенностью предлагаемых конструкций является вращение поверхности нагрева в результате которого степень турбулентности газового потока повышается, интенсивность передачи тепла от газового потока к теплоносителю, движущемуся в трубках, растет. Центробежная сила, возникающая при вращении поверхности нагрева, прижимает твердые

частицы к стенке корпуса утилизатора и отделяет их от основного газового потока. При нагревании жидкости с температурой ниже температуры точки росы отходящих газов, может образоваться конденсат. Вращение не позволяет капелькам жидкости смачивать тепловоспринимающую поверхность трубок, тем самым, предохраняя последние от коррозии.

### Глава 3. ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО БАРАБАНА

Температура горячих газов, тепло выделяемое при горении твердых частиц углерода, расход сырья, дисперсность частиц, концентрация углерода в сырье, температура и количество воздуха подаваемого под подвижный слой сырья, концентрация образующихся продуктов горения, аэродинамика газовых потоков в рабочем объеме, разрежение в печи и т.д., определяют степень обезуглероживания отходов.

В ранних исследованиях процесса выжигания (продольное омывание поверхности слоя воздухом) был выявлен, недостаточный доступ кислорода воздуха под слой, в результате чего степень обезуглероживания снижается.

**Расчет воздухораспределителя равномерной раздачи постоянного поперечного сечения.**

Задача расчета заключается в определении площади отверстий в каждом пологом насадке и определении температуры воздуха в любой точке (у каждого насадка) по длине воздухораспределительной трубы. Расчетная схема воздухораспределителя представлен на рис. 11.

Решение дифференциального уравнения изменения полного давления по длине с использованием известных граничных условий в начале и в конце воздухораспределителя, позволило получить зависимость изменения величины статического давления по ходу движения воздуха:

$$P_{ст.х} = P_{ст.к} + \left(\frac{x}{L}\right)^2 \left( \lambda_{тр} \frac{L}{3d_{экв}} - 1 \right) P_{ДН} \quad (6)$$

по которой и определяется площадь отверстий любого полого насадка воздухораспределителя.

Изменение массового количества воздуха,  $G_1(\bar{\tau})$ , в направлении движения воздуха по воздухораспределительной трубе (со стороны нижней головки), представлен в виде:

$$G_1(\bar{\tau}) = G_0 \left( 1 - \frac{\bar{\tau}}{\tau_0} \right) = G_0 (1 - \bar{\tau}) \quad (7)$$

а при отводе газо-пылевоздушной среды из рабочего объема печи:

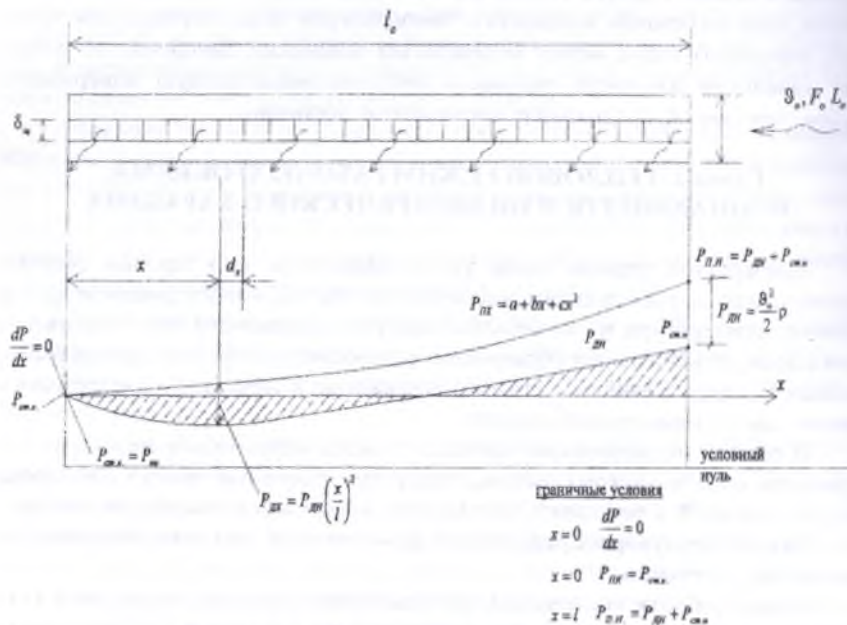


Рис. 11. Расчетная схема воздухоораспределителя равномерной раздачи постоянного поперечного сечения

$$G_2(\bar{\tau}) = G_0' \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right) = G_0' (1 - \bar{\tau}) \quad (8)$$

используя обычное степенное уравнение для газов и жидкостей определяющее теплообмен на внутренней поверхности труб:

$$Nu = \frac{\alpha d_{mp}}{\lambda} = 0,032 Re^{0,8} Pr^n \left( \frac{L}{d_{mp}} \right)^{-0,034} \quad (9)$$

и выражая, изменение теплофизических свойств газа от температуры и расхода воздуха в зависимости от относительной длины  $\bar{x}$ , определено изменение локального коэффициента теплоотдачи по длине воздухоораспределительной трубы:

для случая подвода воздуха в печь

$$\alpha_{возд.х} = 0,0247 \frac{\lambda_{0(t_{сн}, t_{сн})}}{d_{mp}} \left[ \frac{G_0}{d_{mp} \mu_{0(t_{сн}, t_{сн})}} \right]^{0,8} G_0^{-0,066} (1 + 0,17\bar{x})^{0,2} [1 - \bar{x}]^{0,8} \quad (10)$$

для случая отвода газо-пылевоздушной среды из печи

$$\alpha_{возд.х} = 0,0214 \frac{\lambda_{0(t_{сн}, t_{сн})}}{d_{mp}} \left[ \frac{G_0}{d_{mp} \mu_{0(t_{сн}, t_{сн})}} \right]^{0,8} G_0^{-0,066} (1 + \bar{x})^{0,2} (1 - \bar{x})^{0,8} \quad (11)$$

Изменение температуры воздуха в воздухоораспределительной трубе (см. рис. 12), получено из решения дифференциального уравнения теплового баланса в виде:

$$t_2 = t_{сн} - (t_{сн} - t_{св}) e^{-Ax} \quad (12)$$

Вычисления по полученной зависимости показали, что температура воздуха в воздухоораспределительной трубе по значению не превышает величины  $t_{в.п} \approx 390^\circ\text{C}$  определяемой из стационарных условий.

При вращении цилиндрического барабана смена режима работы воздухоораспределительной трубы (подвод холодного и отвод горячих газов), сопровождается резким изменением теплового потока на поверхностях футеровочного слоя, и может привести к критическим по величине перепадам температур материала футеровки. Это может стать причиной возникновения

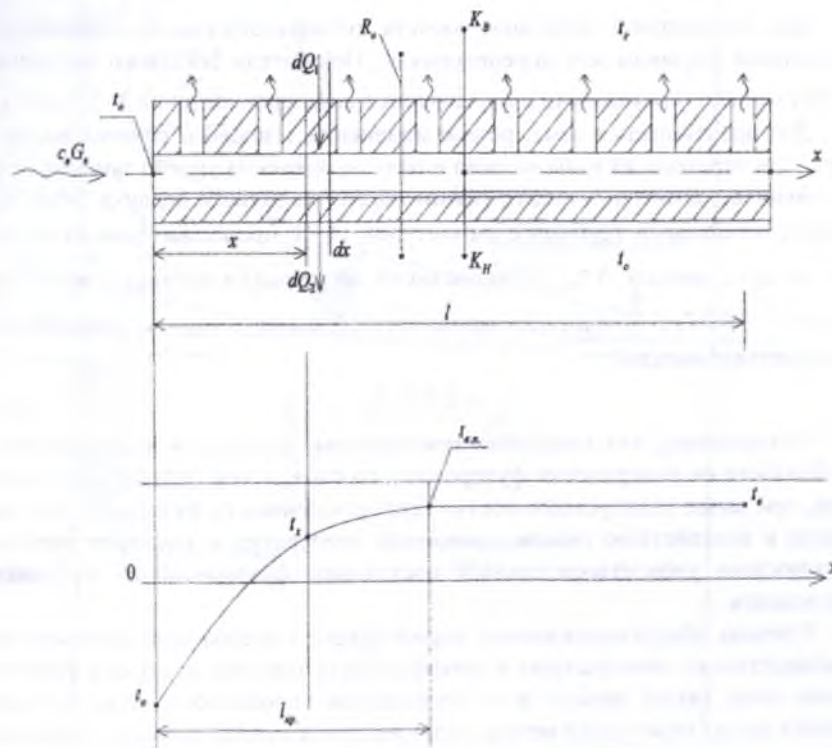


Рис. 12. Расчетная схема изменения температуры воздуха по длине воздухоораспределителя.

напряжений приводящих к образованию трещин или разрушению футеровочного слоя.

**Расчет теплоустойчивости футеровочного слоя внутренней поверхности вращающегося цилиндрического барабана.**

В средней части футеровочного слоя достаточно большой толщины, где практически не сказывается влияние условий на внутренней поверхности воздухораспределителя, коэффициент теплоусвоения зависит только от свойств материала футеровочного слоя. В пределах этой части (зона «регулярных» колебаний) величина коэффициента теплоусвоения  $Y$  принимается равной коэффициенту теплоусвоения материала  $S$ ,  $Bm/(m^2K)$ .

Представив изменение температур правильными гармоническими колебаниями с периодом  $T$ , для определения коэффициента теплоусвоения футеровочного материала получено выражение:

$$S = 26,048 \sqrt{\lambda c \rho}$$

Для инженерной методики расчета теплоустойчивости предложены упрощенные формулы для определения  $\nu$ . Показатель сквозного затухания конструкции футеровки печи определяется в виде произведения  $\nu = \nu_B \nu_1 \nu_K$ .

Для вращающейся печи, резкое изменение теплового режима поверхности, при переходе из зоны нагрева в зону охлаждения учтено заменой прямоугольника, характеризующего режим подачи холодного воздуха воздухо-распределительными трубами с амплитудой  $A_n$  и продолжительностью подачи воздуха, равной  $\Delta \tau_{на}$ , равновеликой по площади косинусоидой с периодом  $T = 4\Delta \tau_{на}$ . Амплитуда эквивалентной косинусоиды  $A_c$  установлена из равенства площадей:

$$A_c = 1,571 A_n \quad (13)$$

Установлено, что колебания температуры затухают в непосредственной близости от поверхности футеровочного слоя, и чем больше число оборотов, тем выше теплоустойчивость. Теплоустойчивость футеровочного материала к воздействию резких изменений температур и тепловых потоков подтверждена удовлетворительным состоянием футеровочного материала печи выжига.

Степень обезуглероживания термического способа определяемая его зависимостью от температуры и коэффициента избытка воздуха в рабочем объеме печи, также зависит и от перетекания холодного воздуха из окружающей среды через щели между подвижными и неподвижными узлами печи. Это приводит к нарушению температурного режима технологии выжига концевых участков цилиндрического барабана и перерасходу газообразного топлива используемого на нагрев сырья.

**Исследование набегающих на поверхность вращающегося цилиндрического барабана системы воздушных струй.**

С целью предотвращения проникновения окружающего воздуха в печь, концевые участки цилиндрического барабана, по наружному диаметру снабжались кольцевым трубчатым коллектором с отверстиями. Система осесимметричных струй истекающих из отверстий коллектора набегают на нормально расположенную наружную поверхность цилиндрического барабана, создает область повышенного давления в щели и тем самым образует «воздушную завесу» изолирующую рабочий объем печи от воздействия внешней среды (см. рис. 13).

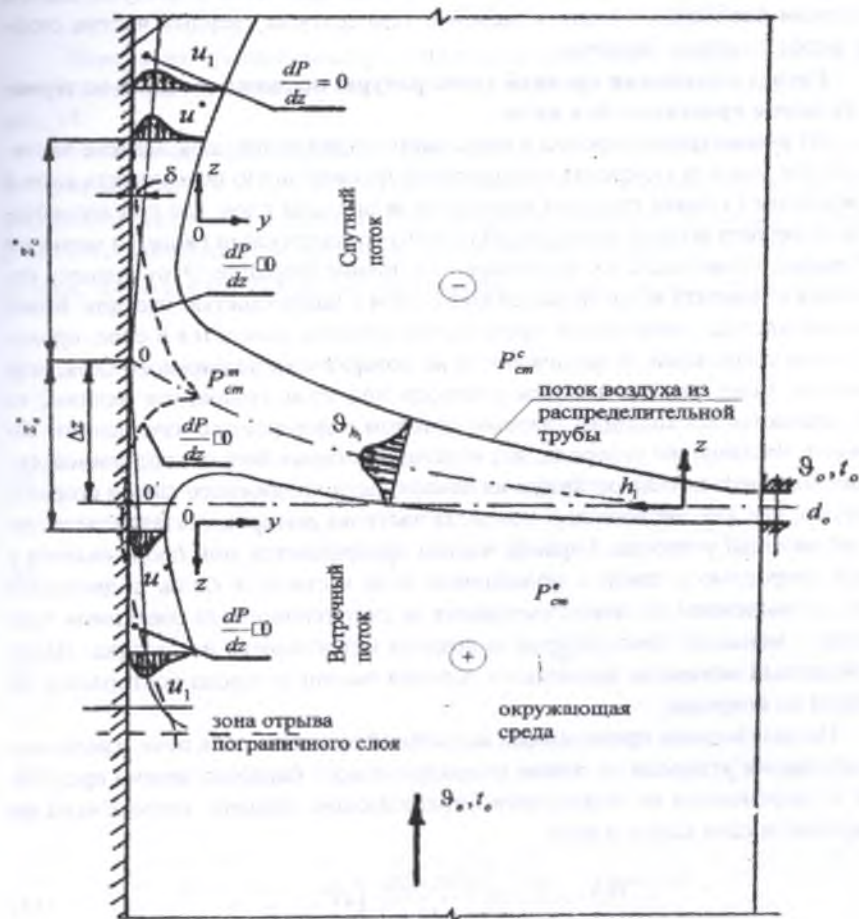


Рис. 13. Схема набегающей системы осесимметричных струй на поверхность цилиндрического барабана

Установлена область с отрицательным градиентом давления  $dp/dx < 0$  и область основного течения, где  $dp/dx = 0$ .

Установлена протяженность области с отрицательным градиентом давления  $z^*$  (область повышенного давления) определяемая зависимостью  $z^* = 0,42h$ , и определен шаг расположения отверстий на трубчатом коллекторе обеспечивающая надежную «воздушную завесу» в пространстве щели.

При изучении кинетики и механизма процесса обезуглероживания в рабочем объеме вращающегося цилиндрического барабана, когда исследуемый объект (твердые частицы отхода в слое) находится в поступательном движении необходимо знать изменение температуры твердых частиц отходов в слое по длине барабана.

#### Расчет изменения средней температуры подвижного слоя материала по длине вращающейся печи.

Из рассмотрения процесса сегрегации подвижного слоя, мелкие частицы, (в том числе и углерода) «всплывают» на свободную поверхность слоя и восходящим газовым потоком выносятся за пределы слоя, где под воздействием лучистого потока тепла, ослабленного трехатомными газами и мелкими частицами, происходит их частичное или полное сгорание. Этот процесс начинается с момента встречи подвижного слоя с поверхностью насадок. Более крупные частицы, некоторый промежуток времени находятся в слое, проходят этапы сегрегации, и поднимаются на поверхность подвижного слоя, возгораются. Если, размер частицы углерода при этом становится мелким, то она увлекается восходящим газовым потоком и догорает во взвешенном состоянии. Частицы же углерода, вес и размер которых больше подъемной силы восходящего потока остаются на поверхности подвижного слоя и сгорают не долго, так как нисходящий поток из частичек материала «затопляет» горящие частицы углерода. Горение частиц прекращается, или продолжается с малой скоростью в связи с попаданием этой частицы в глубь подвижного слоя, уменьшением ее теплосодержания за счет теплоотвода соседними частицами с меньшей температурой и воздуха истекающего из насадка. Далее приведенный механизм движения и горения частиц углерода повторяется до полного их сгорания.

По результатам проведенных испытаний вращающейся печи изменение концентрации углерода по длине цилиндрического барабана можно представить в зависимости от параметров определяющих процесс теплообмена на поверхности слоя сырья в виде

$$C^r(\bar{\tau}) = C_0^r \exp\left[-\frac{\alpha_s F_c \tau_0}{Vc\rho} \int d\bar{\tau}\right] \quad (14)$$

Уравнение теплового баланса составленного для слоя в общем случае имеет вид:

$$\frac{d\theta}{d\bar{\tau}} + \frac{\alpha_s F_c \tau_0}{Vc\rho} \theta = \frac{\alpha_s F_c \tau_0}{Vc\rho} \left[ t_r + \frac{Q_r(\bar{\tau}) - Q_n(\bar{\tau}) - Q_n(\bar{\tau})}{\alpha_s F_c} \right] \quad (15)$$

Решение дифференциального уравнения (15) относительно изменения температуры  $\theta$ , твердых частиц в слое имеет вид:

$$\theta_s = t_r - \frac{Q_{n,0} + L_0 c \rho \Delta t}{\alpha_s F_c} \left( \bar{\tau} - \frac{Vc\rho}{\alpha_s F_c} \right) + \left( \frac{Q_{r,0} \tau_0}{Vc\rho} \bar{\tau} + \theta_0 - t_r - \frac{Q_{n,0} + L_0 c \rho \Delta t}{\alpha_s F_c} \right) \exp\left[-\frac{\alpha_s F_c \tau_0}{Vc\rho} \bar{\tau}\right] \quad (16)$$

Изменения средней температуры твердых частиц подвижного слоя по длине печи выжига рассчитанные по полученным формулам показаны на рис. 14.

Как видно, из рис.14 температура частиц в слое при отсутствии подачи воздуха (случай  $Q_B = L_0 c \rho \Delta t = 0$ ) под подвижный слой сырья, достигает определенной величины и остается практически постоянной до конца цилиндрического барабана. При продольном обдувании слоя (случай  $Q_r > 0, Q_n = 0$ ) воздух, приводит к повышению температуры твердых частиц, превышающее

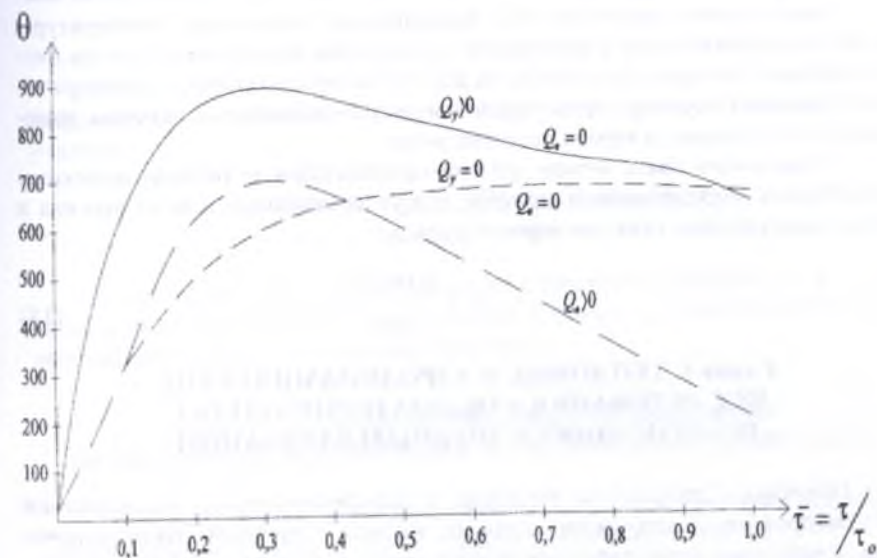


Рис. 14. Изменение температуры подвижного слоя вращающегося цилиндрического барабана.

допустимое, и в слое происходит слипание и комкообразование частиц и технологический процесс обезуглероживания нарушается. Подача воздуха под слой (случай  $Q_n > 0$ ) не позволяет превышения значения температуры больше технологически допустимой.

Значение технологически допустимой температуры твердых частиц в слое определяется свойством и составом твердого отхода. В зоне горения углерода частицы материала должны находиться в твердом состоянии и обладать текучестью, не плавиться и не укрупняться. Поддержание этой температуры в слое возможно регулированием количества подаваемого под слой сырья воздуха на участках с большой скоростью горения углерода.

Количество тепла, поглощаемое холодным воздухом при заданной степени ее нагрева в слое можно представить в виде:

$$L_0 c_p \Delta t = \alpha_s F_c \frac{t_r - \frac{Q_{n,0}}{\alpha_s F_c} \left( \bar{\tau} - \frac{V\varphi}{\alpha_s F_c} \right) + \left( \frac{Q_{n,0} \tau_0}{V\varphi} \bar{\tau} + \theta_0 - t_r - \frac{Q_{n,0}}{\alpha_s F_c} \right) \exp \left[ -\frac{\alpha_s F_c \tau_0}{V\varphi} \bar{\tau} \right] - \theta_r}{\left\{ \bar{\tau} - \frac{V\varphi}{\alpha_s F_c} \right\} + \left[ -\frac{\alpha_s F_c \tau_0}{V\varphi} \bar{\tau} \right]} \quad (17)$$

откуда определяется необходимый объем воздуха  $L$ , для ассимиляции избыточного количества тепла.

Совпадением теоретических исследований изменения температуры частиц подвижного слоя и измерений температуры подвижного слоя на входе в рабочее пространство печи и на выходе из вращающегося цилиндрического барабана подтверждено принятым экспоненциальным законом изменения концентрации углерода по длине печи.

Установлена связь между физико-химическими и теплофизическими параметрами, определяющим процесс обезуглероживания в печи выжига в период полураспада реакции первого порядка:

$$k = \frac{0,06 \varepsilon \alpha}{c_p h} \quad (18)$$

#### Глава 4. ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛА С ВРАЩАЮЩИМСЯ ТРУБНЫМ БАРАБАНОМ

Приведены результаты тепловых и аэродинамических исследований утилизаторов тепла отходящих газовых потоков. Основным теплотехническим показателем определяющим конструктивные размеры и эффективность использования утилизатора тепла является коэффициент теплопередачи между отходящей газо-пылевоздушной средой и теплоносителем, движущимся в трубках тепловоспринимающей поверхности.

Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности канала установлен аналитически исследованием гидродинамики течения жидкости на начальном участке формирования потока. Профиль скорости в канале круглого сечения задан полиномом второй степени. Изменение скорости ядра потока жидкости учтено внесением зависимости скорости от протяженности участка гидродинамической стабилизации.

Приближенным решением дифференциального уравнения движения получена зависимость изменения толщины динамического пограничного слоя на участке гидродинамической стабилизации потока жидкости и получено выражение для протяженности этого участка.

Используя, связь между толщиной динамического и теплового пограничных слоев и уравнения теплового потока на внутренней поверхности канала получены критериальные зависимости на участке гидродинамической стабилизации для определения локального коэффициента теплоотдачи

$$Nu_x = \frac{\alpha_s x}{\lambda} = 0,4658 \left\{ \frac{1}{Pe} \frac{x'}{d} \right\}^{-\frac{1}{2}} \left[ \frac{(1 + \sqrt{\bar{x}'(2 - \bar{x}')})^2}{\left( 1 + \sqrt{8,9 \bar{x}'(1 - 3/20 \bar{x}')}(2 - \bar{x}') \right)} \right]^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{6}} \quad (19)$$

среднего значения коэффициента теплоотдачи на участке гидродинамической стабилизации протяженностью  $x_H$

$$\bar{Nu} = \frac{\alpha_{cp} x}{\lambda} = 0,694 \left\{ \frac{1}{Pe} \frac{x_H}{d} \right\}^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + 10,95 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x_H}{d} \right) Pr^{\frac{1}{3}} \right] Pr^{\frac{1}{6}} \quad (20)$$

изменения относительной избыточной температуры теплоносителя на этом участке:

$$\frac{t - t_w}{t_r - t_w} = \left( 1 - \frac{(1 + \bar{x}') Pr^{\frac{1}{3}} r}{\sqrt{\bar{x}'}} \frac{1}{R} + \frac{(1 + \bar{x}')^2 Pr^{\frac{2}{3}} r^2}{4 \bar{x}' R^2} \right) \quad (21)$$

Полученные зависимости позволяют определить температуру в любой точке потока теплоносителя движущегося в канале, а также расчетную теплоотдающую поверхность утилизатора тепла.

#### Глава 5. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ВЫЖИГА И УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛА

Производственное испытание печи выжига с вращающимся цилиндрическим барабаном проводилось на Таджикском алюминиевом заводе.

Печь была включена в новую технологическую линию по выжигу твердых отходов производства алюминия, разработанную Таджикскими учеными и специалистами завода. Основные криолит-глиноземсодержащие от-



ходы производства алюминия - электролитная пена, шлак газоочистки, мелкая фракция склада твердых отходов (СТО) и «сметки» корпусов электролиза подвергались выжигу в новой конструкции вращающейся печи.

Вращающаяся печь выжига, представляющая собой цилиндрический барабан длиной 16 м и наружным диаметром 2,2 м, была установлена на фундаменте и располагалась на отметке выше уровня земли. На более низкой отметке располагался холодильник для охлаждения получаемого продукта. Связь между печью и холодильником осуществлена с помощью перехода.

Распределительная и сборная камера для подвода воздуха и отвода газо-пылевоздушной среды разделена между собой перегородкой. Форма камер выполнена таким образом, чтобы обеспечить равномерность распределения воздуха по воздухораспределительным трубам и сбора газо-пылевоздушной среды из рабочего пространства печи. Стенки неподвижной верхней головки снабжены слоем теплоизоляции из шамотного кирпича.

Технологическая схема производства КГК с использованием вращающегося цилиндрического барабана представлена на рис. 15. Сырье подается в

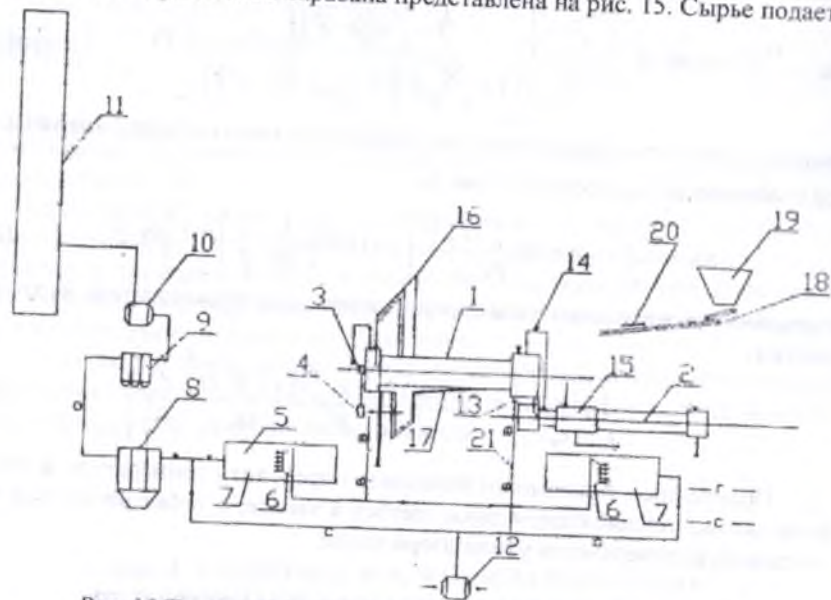


Рис. 15. Технологическая схема производства КГК методом выжига с использованием вращающегося цилиндрического барабана

1. Вращающийся цилиндрический барабан. 2. Холодильник (охладитель продукта). 3. Газовая горелка с завихрителем. 4. Вентилятор подачи воздуха на горение газа. 5. Охлаждающее устройство. 6. Дымосос. 7. Смесительная камера. 8. Электрофильтры. 9. Скрубберы. 10. Дымовая труба. 11. Дутьевой вентилятор. 12. Дутьевой вентилятор. 13. Инерционный пылеотделитель. 14. Взрывной клапан. 15. Кожух водяного охлаждения. 16. Вибропитатель. 17. Ленточный транспортер. 18. Дозатор. 19. Бункер сырья. 20. Электромагнитная ловушка.

бункер вместимостью 70 т и через весовой дозатор с помощью ленточного транспортера длиной около 60 м (над которым расположена электромагнитная ловушка), и через элеватор с вибратором засыпается в бункер вращающейся печи. В печи, при подаче холодного наружного воздуха, поступающего с помощью вентилятора и воздухопроводов, под подвижный слой происходит сгорание углерода, содержащегося в сырье. Обезуглероженный продукт по переходной течке поступает во вращающийся холодильный барабан с наружным водяным охлаждением. Охлажденный до температуры 100°C криолит-глиноземный концентрат (КГК) по течке поступает в бункер готовой продукции.

Температурный режим рабочего пространства печи поддерживается теплом, выделяющимся при сжигании природного газа в газовой горелке с подводом воздуха к ней от дутьевого вентилятора, а также теплом, выделяющимся при сгорании частиц углерода, содержащимся в сырье.

Продукты сгорания природного газа и углерода, отводимые из рабочего пространства печи, содержащие мелкие пылевидные частицы продукта проходят через инерционный пылеуловитель, а затем через газоходы направляются в смесительное устройство и на газоочистку в электрофильтр и скруббер. Степень очистки по HF составляет 98,0-99,8%, а по SO<sub>2</sub> - 90,0-92,8%. Разрежение в рабочем пространстве печи поддерживается дымососом. Очищенный от продукта газ отводится в атмосферу через дымовую трубу.

Надежная работа электрофильтров обеспечивается снижением температуры газообразного продукта сгорания в смесительной камере воздухом, истекающим из сопел, расположенных в смесительных устройствах.

Во вращающейся печи выжига использовалась газовая горелка типа ГМГ с завихрителем газового потока. Факел газовой горелки выходил из амбразуры, расположенной в верхней неподвижной головке печи, причем ось амбразуры совпадала с осью вращающегося барабана печи. Основным элементом системы автоматического отключения газа от газовой сети являлся фотодатчик. Фотодатчик фиксировал отсутствие факела (например, при отрыве пламени) и передавал сигнал на исполнительный механизм отсечения газа.

В качестве первой ступени отделения твердых частиц продукта от газа - пылевоздушного потока использован инерционный пылеуловитель жалюзийного типа.

Производственные испытания проводились в следующих диапазонах изменения основных параметров: производительность печи по сырью 500 ÷ 1000 кг/ч; скорости вращения цилиндрического барабана 1,8 ÷ 4 об/мин; температура газовой среды в верхней головке 600 - 780°C; расход природного газа 25 ÷ 135 м<sup>3</sup>/ч; количество воздуха, подаваемое на горелку 1000 ÷ 4000 м<sup>3</sup>/ч; количество воздуха подаваемое под подвижный слой

5000 ÷ 25000 м<sup>3</sup>/ч; разряжение в верхней головке 0,3 ÷ 2 мм вод.ст.; температура на наружной поверхности вращающегося барабана 95 ÷ 160 °С.

Сбор продукта, после процесса обезуглероживания твердых отходов производился в инерционном пылеуловителе, бункере готовой продукции и на электрофильтрах. По результатам опытно-промышленных испытаний в зависимости от фракционного состава накопление получаемого КГК составило: в инерционном пылеуловителе – 40-50 % масс., в бункере готовой продукции – 25-30 % масс., и на электрофильтрах 15-20% масс. Кроме этого, некоторое количество продукта скапливается под конструкцией распределительной и сборной камер, из-за отсутствия герметичности между вращающимся барабаном и неподвижной нижней головкой.

Накапливающийся в различных точках технологической линии продукт, отличается не только по своему фракционному, но и по минералогическому составу. Так, на электрофильтрах накапливается самая мелкая фракция (размером частиц менее 0,074 мм – 82,28 % масс.), связанная с уносом мелкой фракции потоком отходящих газов движущихся от печи к электрофильтрам. Более крупные фракции (размером частиц менее 0,15 мм – 63,5% масс.) отделяются от газового потока в пылеуловителе за счет инерционных сил. Наиболее крупная фракция с размером частиц более 0,3 мм (82,2 % масс.), накапливается в бункере готовой продукции. Таким образом, конструкция печи с одной стороны, технологическая схема, с другой, способствует сепарации сырья и продукта по фракционному и минералогическому составу.

Результаты опытно-производственных испытаний технологии производства КГК из «сметок» в печи выжиг с вращающимся цилиндрическим барабаном, химический и минералогический состав «сметок» и КГК приведен в табл. 3 и 4.

Таблица 3.

Химический состав «сметок» и КГК, полученного при температуре газовой среды  $t = 720^{\circ}\text{C}$ , расход воздуха  $L_B = 10500 \text{ м}^3/\text{ч}$

№ пп.	Наименование	Химический состав, % масс.							
		C	Al	Na	F	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	П.П.П.
1.	«Сметки» (исходное)	16-20,0	18,3-28,5	10,8-16,7	11,5-17,1	0,5-0,9	0,4-0,8	0,6-0,9	15,3-18,6
2.	КГК из пылеуловителя	1,2-2,2	30,3-48,5	15,1-20,7	10,2-18,8	0,6-0,8	0,4-0,7	0,8-1,2	0,5-0,6
3.	КГК из бункера Холодильника	1,5-2,3	22,3-34,8	19,4-30,5	20,4-32,3	0,4-0,6	0,3-1,1	0,6-1,3	1,7-2,8
4.	КГК с электрофильтров	4,0-6,1	27,4-42,6	8,2-18,4	8,7-19,2	0,6-0,9	0,4-0,8	0,6-1,9	1,6-2,4

Таблица 4.

Минералогический состав «сметок» и КГК, полученного при температуре газовой среды  $t = 720^{\circ}\text{C}$ , расход воздуха  $L_B = 10500 \text{ м}^3/\text{ч}$

№ п/п	Наименование	Минералогический состав, % масс.						
		Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	П.П.П.
1.	«Сметки»	20,0-30,0	25,0-40,0	16,0-20,0	0,5-0,9	0,4-0,8	0,6-0,9	15,3-18,8
2.	КГК из пылеуловителя	20,0-35,0	45,0-70,0	1,2-2,2	0,6-0,8	0,4-0,7	0,8-1,2	1,6-2,1
3.	КГК из бункера холодильника	35,0-60,0	30,0-50,0	1,5-2,3	0,4-0,6	0,3-1,1	0,8-1,3	1,7-2,8
4.	КГК с электрофильтров	15,0-35,0	40,0-60,0	4,0-6,1	0,8-0,9	0,4-0,8	0,8-1,0	1,8-2,4

Продукт, накапливающийся в пылеуловителях и электрофильтрах более богат по глинозему, а КГК их бункера готовой продукции более богат по криолиту. Такое распределение по компонентам, очевидно, связано с тем, что КГК, накапливающийся в бункере после холодильника имеет крупные частицы «оборота», который богат, именно, по криолиту.

Температура газовой среды одинаково влияет на характер зависимости степени обезуглероживания КГК из пылеуловителя, бункера готовой продукции и электрофильтров, т.е. до температуры 700 °С степень обезуглероживания имеет резкий рост, затем от 700 °С до 750 °С рост замедляется, и далее от 750 °С до 800 °С – имеет тенденцию к снижению. Это обусловлено тем, что с повышением температуры скорость сгорания углерода возрастает, а затем при температуре 700-750 °С начинает замедляться вследствие комкообразования (слипания) сырья, что приводит к снижению площади соприкосновения углерода с кислородом воздуха. При температурах свыше 750 °С комкообразование охватывает всю массу сырья и процесс выжиг резко замедляется.

В таблицах 5 и 6 приведены химический и минералогический состав исходного сырья и продуктов выжиг.

Различие в абсолютных величинах степени обезуглероживания для КГК из пылеуловителя, бункера готовой продукции и электрофильтров объясняется тем, что в холодильник попадают крупные недогоревшие частицы углерода, а в электрофильтры разряжением уносится мелкодисперсная угольная пыль. Аналогичный характер имеет также зависимость влияния количества воздуха, подаваемого в печь, на степень обезуглероживания, т.е. повышение коэффициента избытка воздуха влияет на скорость сгорания углерода до определенного предела, дальнейшее ее повышение приводит к замедлению скорости процесса вследствие ассимиляции тепла и снижения скорости процесса обезуглероживания. При этом получается КГК, который содержит менее 2 % углерода и может быть использован в качестве добавоч-

Таблица 5.

Химический состав исходного сырья и продуктов выжигания, % масс.

№ п/п	Наименование сырья продукции	C	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	П.П.П.
<b>A</b>	<b>Электролитная пена</b>	35,3	40,6	21,7	0,79	0,83	1,22	36,7
1	КГК из пылеуловителя	4,3	56,5	27,1	0,76	1,58	1,45	6,4
2	КГК из бункера готовой продукции	7,5	66,6	21,8	1,88	1,65	0,96	9,6
3	КГК из электрофильтров	8,7	63,8	21,2	0,83	1,75	0,47	9,2
<b>Б</b>	<b>Электролитная пена</b>	32,1	51,7	14,6	0,8	0,49	1,22	36,3
1	КГК из пылеуловителя	5,4	58,8	30,1	0,70	0,98	1,48	6,7
<b>В</b>	<b>Электролитная пена (50%)+сметка (50%)</b>	23,4	39,6	29,3	0,86	1,08	1,33	25,3
1	КГК из пылеуловителя	1,9	36,6	55,5	0,79	0,97	1,04	2,92
2	КГК из бункера готовой продукции	3,4	39,2	24,1	0,69	1,04	0,98	4,24

ного сырья в производстве алюминия электролизом.

Исследования на электролизных ваннах показали, что использование полученного в процессе выжигания продукта не оказывает отрицательного воздействия на процесс производства алюминия.

Было установлено, что степень обезуглероживания тем выше, чем меньше размер частиц углерода, содержащихся в сырье. Так, (при прочих равных условиях) у фракции менее 0,074 мм степень обезуглероживания может достигнуть 98-99 %, в то время как для фракции более 0,83 мм этот показатель не превышает 90-92 %. Учитывая, что фракции менее 0,074 мм составляют более 64 % масс. «сметок», предварительная стадия измельчения не осуществлялась.

Как видно, из рентгенограммы «сметки» (рис. 16) основными его фазами являются: глинозем ( $\alpha, \gamma - Al_2O_3$ ), криолит ( $Na_3AlF_6$ ), графит (C). В меньших количествах в нем содержатся фазы гётита ( $FeOOH$ ) и кварца ( $SiO_2$ ).

Таблица 6.

Минералогический состав исходного сырья и продуктов выжигания, % масс.

№ п/п	Наименование сырья продукции	C	Na	Al	F	Si	Fe	SO <sub>4</sub>	П.П.П.
<b>A</b>	<b>Электролитная пена</b>	35,3	16,6	16,7	22,1	0,40	0,54	0,83	33,7
1	КГК из пылеуловителя	4,3	23,7	21,6	30,7	0,35	1,1	0,98	6,4
2	КГК из бункера готовой продукции	7,5	20,8	20,1	36,2	0,86	1,15	0,65	9,6
3	КГК из электрофильтров	8,7	19,6	19,4	34,7	0,43	1,25	0,32	9,2
<b>Б</b>	<b>Электролитная пена</b>	32,1	16,0	14,4	28,1	0,4	0,34	0,83	36,3
1	КГК из пылеуловителя	5,4	22,4	23,5	32,0	0,35	0,7	1,00	6,7
<b>В</b>	<b>Электролитная пена (50%)+сметка (50%)</b>	23,4	22,0	20,7	22,1	0,41	0,82	0,90	25,3
1	КГК из пылеуловителя	1,9	21,1	33,0	19,9	0,38	0,64	0,7	2,9
2	КГК из бункера холодильника	3,4	20,7	17,8	21,3	0,32	0,70	0,66	4,3

Рентгенограмма электролитной пены (рис. 16б) отличается от рентгенограммы «сметки» некоторым увеличением линий криолита.

Как видно из рентгенограммы (рис. 16в), после обработки при температуре 700-720°C, при подводе воздуха под подвижный слой сырья  $L = 9000 \div 10500 \text{ м}^3/\text{ч}$  отсутствуют фазы графита, и наблюдается некоторое увеличение интенсивности линий криолита и глинозема, что свидетельствует о практически полном сгорании углерода.

Химизм процессов, происходящих при термической переработке отходов, был получен из данных ДТА. Как следует, из дериватограммы «сметки», и продукта, полученного из них (рис. 17) следует выделить четыре интервала температур, характеризующие происходящие в них изменения. На линиях ТТ в начальном интервале температур не наблюдается существенных изменений массы. Далее, в интервале температур от 120°C до 400°C, наблюдается потеря массы (0,5 - 0,7%) и эндотермический эффект на линии ДТА. Эти изменения связаны с испарением адсорбционной влаги и удалением кри-

сталлизационной воды. Отсутствие подобных изменений на линиях ТГ и ДТА, обусловлено удалением влаги из образца в процессе сжигания углерода из его состава.

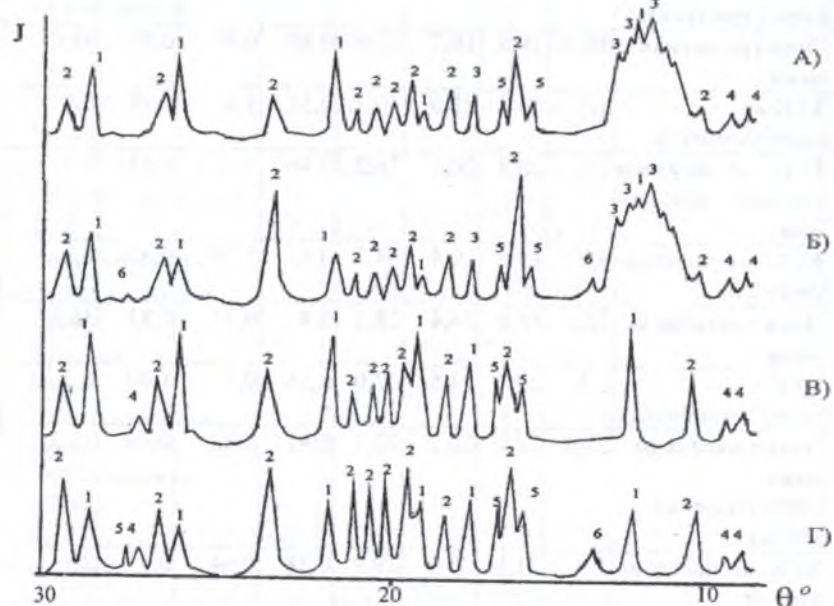


Рис. 16. Рентгенограммы: а) сметки; б) электролитной пены; в) КГК из сметки; г) КГК из электролитной пены.  
1)  $Al_2O_3$ ; 2)  $Na_2AlF_6$ ; 3) C; 4)  $SiO_2$ ; 5)  $FeOOH$ ; 6)  $CaF_2$

Резкий рост потери массы на линиях ТГ ( $5 \div 7\%$ ) и экзотермический эффект на линиях ДТА в третьем интервале температур, от 600 до 650 °C связан процессом окисления углерода. Рост потери масс, в следующем интервале температур (800–1000°C), на наш взгляд, связан с взаимодействием  $CO_2$  с криолитом. Этим, возможно, и обусловлено наличие эндотермического эффекта при температурах 850–860°C на линиях ДТА данных образцов. Эндотермический эффект (рис. 17б) наблюдаемый на линиях ДТА при температурах 970 – 980 °C, связан расплавлением криолит – глиноземного концентрата. Четвертый интервал эндотермического эффекта криолит – глиноземного концентрата полученного из электролитной пены отличается на 40-50 °C от полученных КГК «сметки». Это связано, по видимому, соотношением криолита в КГК.

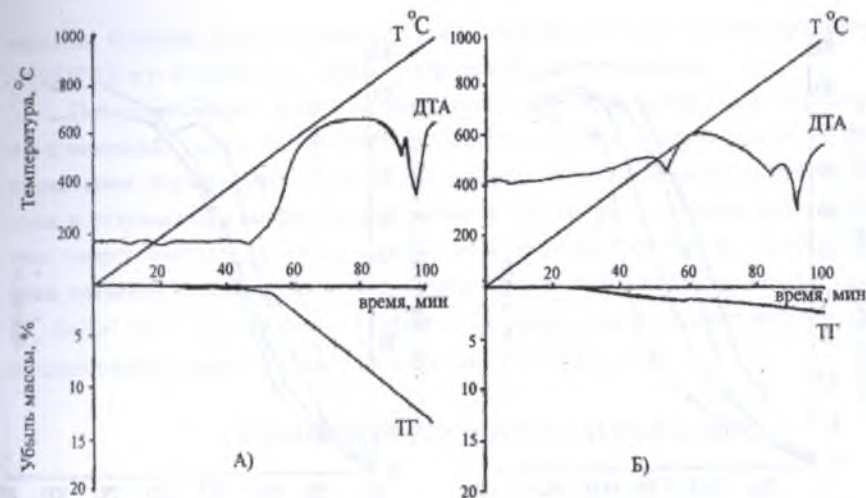


Рис. 17. Дериватограммы: а) сметки; б) КГК из сметки

Зависимость степени обезуглероживания отходов, подвергнутых процессу выжига во вращающейся печи от температуры газа – пылевоздушной среды и от общего количества поступающего воздуха приведена на рис. 18 и 19. Из графиков видно, что кроме указанных факторов на обезуглероживание влияет и фракционный состав исходного материала. Это объясняется тем, что предыстория процессов полученного продукта в различных точках отличается друг от друга.

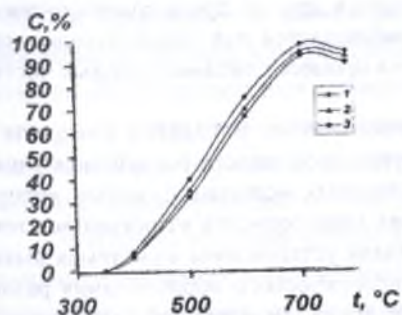


Рис. 18. Зависимость степени выгорания углерода от температуры для фракции: 1 - в пылеуловителе, 2 - в бункере холодильника, 3 - в электрофильтре.

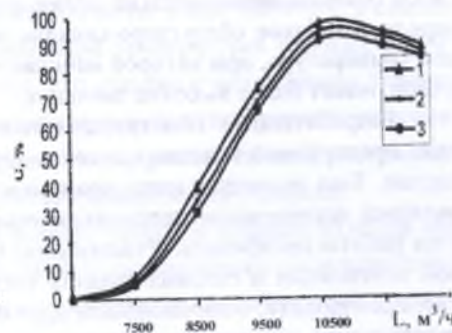


Рис. 19. Зависимость степени обезуглероживания от количества подаваемого воздуха для КГК: 1 - в пылеуловителе, 2 - на электрофильтре, 3 - в бункере холодильника.

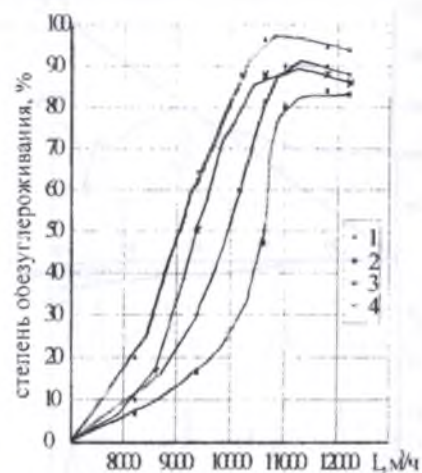


Рис. 20. Зависимость степени обезуглероживания от количества воздуха, подаваемого в печь: 1 - КГК из электролитной пены в пылеуловителе; 2 - КГК из электролитной пены в бункере холодильника; 3 - КГК из электролитной пены (50%) + сметки (50%) в пылеуловителе; 4 - КГК из электролитной пены (50%) + сметки (50%) в бункере холодильника.

На рис. 20 и 21 показаны зависимости степени обезуглероживания для смеси отходов незначительно отличающихся друг от друга содержанием углерода. Глубокое обезуглероживание наблюдается для смеси отходов, причем температура, при которой начинается процесс слипания твердых частиц в слое, имеет более высокое значение.

Разработанные конструкции теплообменных аппаратов внедрены на ряде предприятий тепловых сетей и других производств республики Таджикистан. Был проведен цикл производственных испытаний, целью которых являлись исследования теплотехнических характеристик утилизаторов тепла и их работоспособность. Утилизаторы были установлены в системах вытяжной вентиляции и газовых трактах технологического оборудования различных производств, отличающихся друг от друга температурой газовой среды, содержанием взвешенных частиц, объемами отводимой среды и т.д. В качестве объектов исследований были газовые тракты теплотехнического оборудования.

Разработанные теплоутилизаторы были внедрены и испытывались в г. Душанбе во внутриквартальных котельных Академгородка, у. Хайяма, Севостопольской, городской клинической больницы (ГКБ-2), в г. Гиссаре в ко-

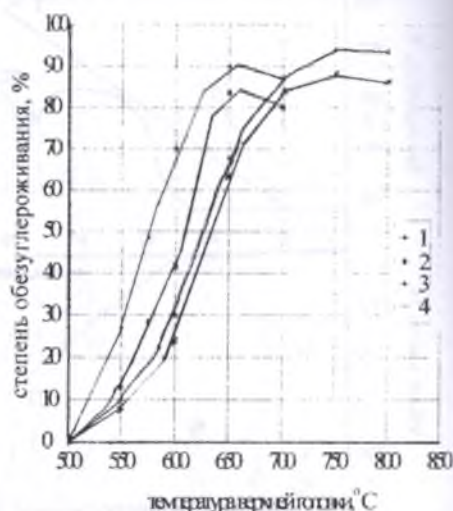


Рис. 21. Зависимость степени обезуглероживания от температуры верхней головки печи, для: 1 - КГК из электролитной пены в пылеуловителе; 2 - КГК из электролитной пены в бункере холодильника; 3 - КГК из электролитной пены (50%) + сметки (50%) в пылеуловителе; 4 - КГК из электролитной пены (50%) + сметки (50%) в бункере холодильника.

тельных Беляева, республиканской школе интернате для глухонемых детей (РШИГД), в г. Кулябе и на других энергетических установках.

Полученные результаты производственных испытаний были обработаны с помощью уравнений математической статистики и вероятностного распределения параметров. Результаты расчета по предложенным зависимостям и результаты измерений показывают, что это расхождение для различных энергетических объектов находится в пределах от 0,6 до 17,5%. При этом значение коэффициента теплопередачи аппаратов составило от 14,78 до  $81 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Экономический эффект от внедрения утилизаторов тепла с вращающейся поверхностью тепла составил 46890 у.е./год.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Физико-химическими методами установлены химический и минералогический состав углерод-, фторглиноземсодержащих твердых отходов производства алюминия. Выявлено, что основными полезными компонентами отходов являются глинозем и криолит, а основной примесью препятствующей возврату отходов в производство алюминия является углерод.

2. Установлены оптимальные параметры процесса обезуглероживания из нерастворимой части шлама и отсева склада твердых отходов в лабораторных условиях: температура 700-800 $^\circ\text{C}$ ; продолжительность 20-30 минут. Изучение кинетики процесса показало, что в интервале температур 600-700 $^\circ\text{C}$  процесс протекает в кинетической области, а при 700-800 $^\circ\text{C}$  в смешанной области, близкой к диффузионной. При температурах близких к 900 $^\circ\text{C}$  степень обезуглероживания снижается, что связано с повышением температуры частиц, вследствие возрастания тепловыделения сжигаемого углерода и образованием пленки над поверхностью частиц (расплавление), которая препятствует свободному доступу кислорода к поверхности углерода.

3. Изучена кинетика процесса выжигания углерода твердых отходов производства алюминия в конструкции печи с вращающимся цилиндрическим барабаном в условиях перекрестного движения подвижного слоя сырья и ожижающего агента (воздуха) при следующих параметрах: производительность печи по сырью 500-1000 кг/ч; скорость вращения цилиндрического барабана 1,8-4 об/мин; температура газовой среды в верхней головке 600-780 $^\circ\text{C}$ ; расход природного газа 25-135 м $^3$ /ч; количество воздуха, подаваемое на горелку 1000-4000 м $^3$ /ч; количество воздуха подаваемое под под-

вижный слой  $5000 \div 25000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; разрежение в верхней головке  $0,3 \div 2 \text{ мм вод.ст.}$ ; температура на наружной поверхности вращающегося барабана  $95 \div 160^\circ\text{C}$ .

4. Установлена связь между физико-химическими и теплофизическими параметрами, определяющими процесс окисления углерода в печи выжига в период полураспада при исследовании технологического режима обезуглероживания отходов производства алюминия.

5. Исследованием механизма уноса частиц из подвижного слоя установлено, что большая часть частиц углерода выжигается во взвешенном состоянии. Процесс выжига углерода - беспламенный. Эффективная температура горения частиц углерода во взвешенном состоянии находится в пределах до  $760\text{-}780^\circ\text{C}$ . При повышении температуры пылегазовой среды в рабочем объеме печи более  $800^\circ\text{C}$  происходит спекание твердых частиц и на внутренней поверхности вращающегося барабана появляются участки с частицами, налипающими на нее, которые затем нарастают и в конечном итоге покрывают всю внутреннюю поверхность, вплоть до зоны охлаждения продукта.

6. Получена аналитическая зависимость определения средней температуры подвижного слоя в любом сечении печи по длине. Полученные расчетные зависимости позволяют установить необходимое количество оживающего агента (воздуха) в различных частях цилиндрического барабана для поддержания оптимального режима выжига. Количество воздуха определяется в зависимости от заданных параметров: расхода природного газа, сырья, начальной концентрации углерода в перерабатываемом отходе и потери тепла наружной поверхностью корпуса печи и отводимой газо-пылевоздушной среды и т.д.

7. Разработаны методики расчета определяющих геометрические размеры воздухораспределительных труб постоянного статического давления и постоянного поперечного сечения. Полученные расчетные зависимости позволяют определить аэродинамические и тепловые характеристики воздухораспределительной трубы (воздухораспределителя) при работе на воздушной и газообразной среде.

8. Разработаны утилизаторы тепла с вращающейся поверхностью нагрева с высокими теплотехническими характеристиками, позволяющие транспортировать газо-пылевоздушную среду, теплоноситель без дополнительной установки нагнетателей. Утилизаторы тепла разработаны в различ-

ных модификациях с горизонтальным и вертикальным трубчатым барабаном и разными способами подвода и отвода теплоносителей, что позволяет использовать их в различных системах утилизации, в том числе и в системах отвода газовых выбросов с пылевидными частицами.

9. Внедрена новая конструкция печи выжига с вращающимся цилиндрическим барабаном на технологической линии обезуглероживания твердых отходов Таджикского алюминиевого завода. Установлен оптимальный технологический режим обезуглероживания твердых отходов в промышленных условиях. Экономический эффект внедрения вращающейся печи выжига на ТадАЗе в период с 12.04.2002 г. по 31.08.2006 г. составил 600 тыс. долларов США (Акт внедрения от 15.09.2006 г.).

#### Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Патент № 005302 (Евразийский). Печь Сулейманова / Эрматов А.Г., Мирсаидов У.М., Сафиев Х.С., Сулейманов А.А., Азизов Б.С., Тошматов Б.Э., Алиджанов Ф.Н., Кадыров Н.А., Рузиев Дж.Р., Абдуллаев А.С., 2004.
2. Мирсаидов У.М., Сафиев Х.С., Азизов Б.С., Сулейманов А.А., Рузиев Дж.Р., Раджабов Ф. Переработка отходов производства алюминия методом выжига // Докл. АН Республики Таджикистан. -2002. -т. 14. -№ 11-12. - С. 6-12.
3. Азизов Б.С., Сулейманов А.А., Рузиев Дж.Р., Абдуллаев А.С., Сафиев А.Х. / Опытные-промышленные испытания технологии производства КГК «сметю» методом выжига. Труды ТУТ, №10. -Душанбе, 2004. -С. 122-125.
4. Азизов Б.С., Сафиев Х.С., Сулейманов А.А., Рузиев Дж.Р. Переработка криолит-глинозем содержащих отходов производства алюминия методом выжига // Материалы конференции «Современная химическая наука и ее прикладные аспекты», Душанбе, 25-27 октября 2006 г. -Душанбе, 2006. - С.212-214.
5. Сулейманов А.А. Термические процессы обезуглероживания отходов производства алюминия во вращающейся печи выжига // Докл. АН Республики Таджикистан. -2005. -т.48. -№ 9-10. -С.53-58.
6. Сулейманов А.А., Сафиев А.Х., Рузиев Дж.Р., Мирсаидов У.М. Физико-химические свойства твердых отходов и продуктов их переработки алюминиевого производства // Докл. АН Республики Таджикистан. -2005. -т.48. -

№9-10, -С.59-63.

7. А.с. № 1267112 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Регенеративный теплообменник // Бюллетень изобретений. -1986. -№ 40.

8. А.с. 1402775 СССР. Сулейманов А.А., Абдуллаев Р.Г. Вентиляционное устройство // Бюллетень изобретений. -1988. -№ 22.

9. А.с. 1709775 СССР. Сулейманов А.А., Ганиев Б.А. Нагнетатель // Бюллетень изобретений. -1988. -№ 20.

10. А.с.1483195 СССР. Сулейманов А.А., Абдуллаев Р.Г., Набиев В.Н. Устройство для увлажнения воздуха // Бюллетень изобретений. -1989. -№ 20.

11. А.с. 1488678 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Устройство для обеспыливания вентиляционного воздуха // Бюллетень изобретений. -1989. -№ 23.

12. А.с. 1488564 СССР. Сулейманов А.А. Роторная машина // Бюллетень изобретений. -1989. -№ 23.

13. А.с. 1451522 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Рекуперативный теплообменник // Бюллетень изобретений. -1989. -№ 2.

14. А.с. 1557445 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Рекуперативный теплообменник // Бюллетень изобретений. -1990. -№ 14.

15. А.с. 1666911 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Теплообменник // Бюллетень изобретений. -1991. -№ 28.

16. А.с. 1746112 СССР. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А., Султанов М.М., Скурник Р.Н. Теплообменник // Бюллетень изобретений. -1992. -№ 25.

17. Сулейманов А.А., Сафиев Д.Р., Рузиев Д.Р., Азизов Б.С., Мирсаидов У.М. Переработка отходов производства алюминия методом выжигания // Докл. АН Республики Таджикистан. -2005. -т.48. -№ 9-10. -С.64-67.

18. Сулейманов А.А., Рузиев Д.Р., Сафиев А.Х., Азизов Б.С., Мирсаидов У.М. Переработка отсева склада твердых отходов методом выжигания // Докл. АН Республики Таджикистан. -2005. -т.48. -№ 9-10. -С.68-71.

19. Мирсаидов У.М., Сафиев Х.С., Сулейманов А.А., Рузиев Д.Р. Печь выжигания твердых отходов производства алюминия // Докл. АН Республики Таджикистан. -2005. -т.48. -№ 9-10. -С.72-76.

20. Гельман Н.А., Сулейманов А.А., О взаимодействии параллельных осесимметричных струй // Докл. АН Таджикской ССР. -1975. -С.73-76.

21. Гельман Н.А., Сулейманов А.А. Температурный режим непрерывно движущегося нагретого тела // Докл. АН Таджикской ССР. -1987. -том 30. -С. 165-168.

22. Стерлигов В.А., Сулейманов А.А., Губарев В.Я., Крамченков Е.М., Ермаков О.Н. Теплообмен при течении газового потока во вращающемся трубном пучке // В кн. Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. -М.: Издательство МЭИ, 2002. -336 с., -С. 203-204.

23. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Испытание утилизаторов тепла с вращающейся поверхностью нагрева // Водоснабжение и санитарная техника. -1996. -№8. -С. 30-31.

24. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А., Гельман Н.А. Теплоотдача вращающихся пучков труб // Водоснабжение и санитарная техника. -1996. -№11. -С.29-30.

25. Стерлигов В.А., Сулейманов А.А., Губарев В.Я., Крамченков Е.М., Ермаков О.Н. Теплообмен при течении в трубчатых каналах // В кн. Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. М.: Издательство МЭИ, 2002. -304 с., -С. 269-272.

26. Сулейманов А.А. Аэродинамические испытания перфорированного воздухораспределителя системы охлаждения ленты стекла // Инф. лист № 162, ТаджикНИИНТИ. -Душанбе, 1975. -6 с.

27. Сулейманов А.А., Хатамов М.Х. Аэродинамические, теплотехнические характеристики ребристого теплообменника с малым аэродинамическим сопротивлением // Инф. лист № 100-85, ТаджикНИИНТИ. -Душанбе, 1985. -4 с.

28. Сулейманов А.А. Ребристый теплообменник с малым аэродинамическим сопротивлением // Инф. листок № 85-18, ТаджикНИИНТИ. -Душанбе, 1985. -3 с.

29. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Рекуперативный утилизатор тепла с вращающейся поверхностью нагрева // Инф. лист №86-14, ТаджикНИИНТИ. -Душанбе, 1986. -3 с.

30. Сулейманов А.А. Температурное поле охлаждаемой пластины // Материалы Всесоюзного совещания (12-14 ноября). -Душанбе, 1986. -С. 38-39.

31. Сулейманов А.А. Роторная машина // Инф. лист № 126-94, НИИ-Центр РТ. -Душанбе, 1994. -3 с.

32. Ибрагимов М., Хабиёв Р. Сулейманов А.А. Утилизаторы тепла для

агрессивных сред / Материалы III Всесоюзной студенческой конференции "Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии". - Казань, 1987. - С.46.

33. Сулейманов А.А., Набиев В.Н., Султанов М.М. Топочное устройство к котлоагрегатам «Братск-1г» // Инф. лист №34-87, ТаджикНИИНТИ. - Душанбе, 1987. - 3 с.

34. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Утилизатор тепла с вращающейся поверхностью нагрева // Инф. лист №88-34, ТаджикНИИНТИ. - Душанбе, 1988. - 3 с.

35. Сулейманов А.А., Стерлигов Н.А. Вентиляционное устройство для очистки воздуха // Инф. лист № 88-36, НПИЦентр РТ. - Душанбе, 1988. - 3 с.

36. Гельман Н.А., Сулейманов А.А., Абдуллаев Р.Г. Повышение эффективности систем воздухораспределения / Научно-технический семинар: Современное оборудование вентиляционных систем. Дом научно-технической пропаганды. Секция "Промышленная вентиляция" 7-8 июня 1990 г. - М.: Знание, 1991. - С.18-23.

37. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Теплообменники для утилизации тепла газовых выбросов / Международный симпозиум. Экология, энерго- и ресурсосбережение. - Самарканд, 1993. - С. 35-37.

38. Сулейманов А.А., Абдуллаев Р.Г. Воздухораспределитель равномерной раздачи / Международного симпозиума. Экология, энерго- и ресурсосбережение. - Самарканд, 1993. - С.60-62.

39. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Повышение эффективности теплоутилизатора с вращающейся тепловоспринимающей поверхностью / Материалы научно-практической конф. преподавателей посвященный итогам научной деятельности университета. - Душанбе, 1994. - С.16-18.

40. Сулейманов А.А., Абдуллаев Р.Г. Вентиляционное устройство // Инф. лист №120-94, НПИЦентр РТ. - Душанбе, 1994. - 2 с.

41. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Рекуперативный теплообменник // Инф. лист № 118-94, НПИЦентр РТ. - Душанбе, 1994. - 3 с.

42. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Теплообменник // Инф. лист № 121-94, НПИЦентр РТ. - Душанбе, 1994. - 2 с.

43. Сулейманов А.А., Стерлигов В.А. Рекуперативный теплообменник // Инф. лист № 127-94, НПИЦентр РТ. - Душанбе, 1994. - 3 с.

44. Сулейманов А.А. Применение интегрального метода при решении задач строительной теплофизики / Материалы научно-практической конф.

преподавателей, посвященной итогам научной деятельности университета. - Душанбе, ТТУ, 1994. - 2 с.

45. Сулейманов А.А. Температурное поле охлаждаемой пластины / Материалы Всесоюзного совещания "Аналитические методы расчета процессов тепло- и массообмена", 12-14 ноября 1986. - Душанбе, 1986. - С.38-39.

46. Сулейманов А.А., Назаров С.М. Рациональное использование воды и энергии в существующих системах теплоснабжения // Современное состояние водных ресурсов Таджикистана - проблемы и перспективы рационального использования, 13-14 мая. - Душанбе, 2003. - С.121-123 .

47. Сулейманов А.А., Мухиддинов П.М., Назаров С.М. Исследование течения потока на начальном участке гидродинамической стабилизации кольцевого канала. Теплоэнергетика // Сб. научных трудов Липецкого госуниверситета. - Липецк, - 2005, - С.105-111.



## Условные обозначения

$D$  - диаметр трубного барабана, м;  $d$  - внутренний диаметр трубок, м;  $G$  - массовый расход, кг/ч;  $L$  - межтрубное расстояние (узкое сечение), м;  $l_{тр}$  - длина трубки, м;  $Nu$  - число Нуссельта;  $N$  - количество трубок, шт.;  $n$  - число оборотов, мин<sup>-1</sup>;  $Pr$  - число Прандтля;  $Pe$  - число Пекле;  $Q$  - тепловой поток, Вт;  $K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $R$  - радиус канала, м;  $r$  - координата, расстояние от стенки (центра) до рассматриваемой точки, м;  $Re$  - число Рейнольдса;  $t$  - температура, °C;  $\omega$  - скорость жидкости, м/с;  $X$  - координата текущей длины, м;  $\bar{x}$  - относительная длина,  $\alpha$  - коэффициент теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $\delta$  - толщина пограничного слоя, м;  $\lambda$  - теплопроводность, Вт/м·°C;  $V$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  - время прохождения слоем расстояния  $X$ ;  $\tau_0$  - общее время прохождения слоем всей длины печи  $l$ ;  $\nu_B$  - показатель затухания при переходе от газовой среды к внутренней поверхности воздухоораспределителя;  $\nu_1$  - показатель затухания в стальной стенке воздухоораспределительной трубы;  $\nu_K$  - показатель затухания в слое футеровки,  $G_m$ , кг/ч количества материала поступающего в единицу времени в печь;  $Q_n(\bar{\tau})$  - количество подводимого воздуха в рабочее пространство печи воздухоораспределительными трубами в м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{н.г.}$  - низшая теплотворная способность природного газа;  $G_p$  - количество сжигаемого природного газа, м<sup>3</sup>/ч;  $\eta$  - потери тепла, вызванное химическим недожогом природного газа;  $L_0$  - количество воздуха подаваемое в рабочее пространство печи через воздухоораспределительные трубы с полыми насадками;  $\omega_v$  - скорость перемещения подвижного слоя, м/ч;  $\theta_0$  - начальная температура подвижного слоя, °C;  $Q_n(\bar{\tau})$  - теплотери наружной поверхностью корпуса печи, Вт;  $\alpha_r$  - коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $\alpha_k$  - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $\alpha$  - коэффициент полного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $\epsilon$  - эффективная степень черноты;  $C_0^p$  - начальная концентрация углерода в смеси из твердых частиц отходов алюминия;  $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}$  - безразмерное время;  $\tau_0$  - полное время нахождения частиц в рабочем объеме вращающейся печи выжигает от момента формирования под-

вижного слоя до выхода частицы (продукта) из выходного конца цилиндрического барабана;  $k$  - константа скорости реакции, м<sup>-1</sup>;  $C$  - теплоемкость материала, кДж/кг·°C;  $\rho$  - насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  - средняя толщина подвижного слоя, м;  $A_{tr} = \frac{A_{tr}}{V}$ ;  $A_{tr}$  - амплитуда колебания температуры воздуха, °C;  $A_{tr}$  - амплитуда колебания температуры поверхности, °C;  $C_0^p$  - начальная концентрация углерода в смеси из твердых частиц отходов алюминия, %;  $k_B$  и  $k_H$  - соответственно, коэффициенты теплопередачи верхнего и нижнего футеровочного слоя, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $t_{OKP}$  - температура окружающего воздуха, °C;  $t_r$  - температура газо - пылевоздушной среды в рабочем пространстве печи, °C;  $\bar{x}' = \frac{x'}{x_H}$ , где  $x'$  - расстояние от входа жидкости в канал круглого сечения, м,  $Q_{н.г.}^p(\bar{\tau}) = 339C^p(\bar{\tau})$  - теплота сгорания углерода, Дж/кг;  $Q_r = Q_{н.г.}^p G_r \eta$  - тепловыделения в рабочем объеме печи при сжигании природного газа, Дж/ч;  $Q_r = Q_{н.г.}^p(\bar{\tau}) \cdot G_r = Q_{r,0} \exp\left[-\frac{\alpha_r F_c \tau_0}{V c \rho} \int_0^1 d\bar{\tau}\right]$  - тепловыделение по длине цилиндрического барабана при горении частиц углерода, Дж/ч,  $Q_{r,0} = 339C_0^p$ ;  $Q_n(\bar{\tau}) = L_0 c \rho (t_r - t_B) r_0 \bar{\tau}$  - количество тепла, расходуемое на нагрев воздуха до температуры газо - пылевоздушной среды рабочего пространства, Дж/ч;

Государственный университет  
имени Л. Н. Гумилева  
Литовский университет  
имени К. Донелайсиса  
Литовский университет  
имени К. Донелайсиса  
Литовский университет  
имени К. Донелайсиса

Институт химической физики  
имени А. М. Прохорова  
Российская академия наук  
Москва, Россия