

На правах рукописи



**ЯТИМОВ ПАРВИЗ МАДАМИНОВИЧ**

**ХЛОРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ  
БОРОСИЛИКАТНЫХ РУД ТАДЖИКИСТАНА**

**02.00.01 - неорганическая химия  
(химические науки)**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук

Душанбе — 2015

Работа выполнена в лаборатории комплексной переработки минерального сырья и отходов Института химии им.В.И.Никитина АН Республики Таджикистан.

**Научный руководитель:** **Маматов Эргаш Джумаевич,**  
кандидат технических наук, зав.лабораторией комплексной переработки минерального сырья и отходов Института химии им.В.И.Никитина АН Республики Таджикистан

**Научный консультант:** **Мирсаидов Ульмас Мирсаидович,**  
академик АН Республики Таджикистан

**Официальные оппоненты:** **Розиков Зафар Абдукахорович,** доктор технических наук, Проректор по науке Горно-металлургического института Таджикистана

**Мирзоев Бодур,**  
кандидат химических наук, директор Государственного учреждения «НИИ промышленности» Министерства промышленности и новых технологий РТ

**Ведущая организация:** Таджикский педагогический университет им. С.Айни, кафедра общей и неорганической химии, г. Душанбе

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_ 2015 года в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 047.003.02 при Институте химии им.В.И.Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063, г.Душанбе, ул. Айни, 299/2.  
E-mail: [gulchera@list.ru](mailto:gulchera@list.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии им.В.И.Никитина АН Республики Таджикистан и на сайте Института химии им.В.И.Никитина АН Республики Таджикистан [www.chemistry.tj](http://www.chemistry.tj)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

**Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор химических наук,  
профессор**



**Абулхаев В.Д.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы:** Развитие народного хозяйства Республики Таджикистан и его высокие темпы тесно связаны с ростом потребностей материально-сырьевых ресурсов, в частности, сырья для производства алюминия и бора. Бор широко используется в машиностроительной, авиационной и других отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве.

Производство чистого бора, а также борных солей из боратных руд предполагает разработку принципиально новых технологических способов, так как эффективная переработка боратных руд с большим содержанием кремнезёма щелочным и кислотным способами не эффективна.

На предприятиях Производственного объединения «Таджикхимпром» образуются большие количества хлора. Применение хлора для получения соединений бора, алюминия и железа из данбуритовой руды позволит получить не только значительный экономический эффект, но и решит экологические проблемы региона.

Комплексное использование боратных руд позволит значительно расширить сырьевую базу республики, ликвидировать в среднеазиатском регионе имеющийся дефицит таких ценных продуктов, как коагулянты для очистки воды, бура и др. Разработка эффективных хлорных способов переработки боратных руд значительно расширит сырьевую базу для производства борных соединений.

**Цель работы** заключается в разработке технологии получения борных соединений из боросиликатных руд месторождений Таджикистана.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

- изучены физические и химические свойства боросиликатных руд;
- с помощью РФА, ДТА и химического анализа исследованы исходные вещества, полупродукты и конечные продукты;
- определены наиболее рациональные параметры низкотемпературного хлорного разложения;
- исследовано хлорное разложение данбурита и данбуритового концентрата;
- изучена кинетика процессов хлорного разложения;
- разработаны принципиальные технологические схемы переработки борного сырья и его концентрата методом хлорирования;
- дана сравнительная оценка кислотного и хлорного разложения борного сырья.

**Научная новизна.** Разработаны новые способы технологии переработки боросиликатных руд и их концентратов хлорным методом разложения. Исследована кинетика хлорирования данбуритовой руды и её концентрата. Используя полученные кинетические данные, установлен механизм протекания процесса хлорирования и разработана принципиальная технологическая схема переработки боратных руд.

***Практическая значимость работы:***

- разработан хлорный способ переработки боросиликатных руд с получением хлоридов бора, железа и алюминия;
- разработана принципиальная технологическая схема переработки боросиликатного сырья хлорным способом.

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

- результаты исследования хлорного разложения боросиликатных руд Ак-Архарского месторождения Таджикистана;
- результаты хлорного разложения боросиликатных руд и данбуритового концентрата;
- кинетика извлечения  $B_2O_3$  из состава боросиликатных руд;
- результаты исследования физико-химических свойств сырья и продуктов его разложения химическим, рентгенофазовым, дифференциально-термическим методами;
- разработка принципиальной технологической схемы переработки боросиликатных руд хлорным методом.

***Публикации.*** Результаты диссертационной работы отражены в 12 научных публикациях, из которых 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, а также в материалах 7 международных и республиканских конференций.

***Апробация работы.*** Основные результаты работы обсуждались на: республиканской научно-практической конференции «Горные, геологические, экологические аспекты развития горнорудной промышленности в XXI веке», посвященной 100-летию академика АН РТ С.М.Юсуповой (Душанбе, 2010); республиканской конференции: «Новые теоретические и прикладные исследования химии в высших учебных заведениях Республики Таджикистан» (Душанбе, 2010); семинарах «2011 год - Международный год химии» и «Радиационная безопасность Таджикистана» (Душанбе, 2011); V Международной научно-практической конференции «Перспективы применения инновационных технологий и усовершенствования технического образования в высших учебных заведениях стран СНГ» (Душанбе, 2011); республиканской научно-практической конференции, посвященной 16 сессии Верховного Совета и 2012 году - году развития энергетики (Курган-Тюбе, 2012); Международной научно-практической конференции «От кризиса к модернизации: мировой опыт и российская практика фундаментальных и прикладных научных разработок в экономике, проектном менеджменте, образовании, юриспруденции, языкознании, культурологии, экологии, зоологии, химии, биологии, филологии, философии, медицине, психологии, политологии, социологии, градостроительстве, информатике, технике, математике, физике, истории, растениеводстве» (Санкт-Петербург, 2014); республиканской конференции «Ядерно-физические методы анализа состава биологических, геологических, химических и медицинских объектов» (Душанбе, 2014).

**Вклад автора** заключается в нахождении способов и решении поставленных задач, применении экспериментальных и расчётных методов для достижения намеченной цели, обработке, анализе и обобщении полученных экспериментальных и расчётных результатов работы, также их публикации. Формулировке и составлении основных положений и выводов диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх основных глав, заключения, выводов и списка цитированной литературы из 113 наименований, изложена на 103 страницах компьютерного набора, включает 24 рисунка и 9 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи хлорирования данбуритовой руды, также отражена научная новизна, практическая значимость, публикации, апробация работы, личный вклад автора и объём диссертации.

**В первой главе** рассмотрены имеющиеся в литературе данные о борных месторождениях, характеристика минералов и свойства элементов IIIA группы, методы переработки минеральных и борсодержащих руд, кислотное разложение данбуритов месторождения Ак-Архар Таджикистана и методы получения хлоридов элементов IIIA группы. На основе литературного обзора сделаны соответствующие заключения и обоснование по выбору темы диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена экспериментальной части. В ней рассмотрены методики эксперимента и химического анализа, характеристики данбурита и данбуритового концентрата месторождения Ак-Архар, исследованные различными методами химических анализов. Определены химический и минералогический состав исходного данбурита и его концентрата, изложены результаты РФ и ДТ анализов и показаны вероятности протекания реакции хлорирования данбуритовой руды и концентрата по изменению величины энергии Гиббса ( $\Delta G$ ).

**В третьей главе** изложены результаты хлорного разложения исходного данбурита и его концентрата месторождения Ак-Архар. Изучена кинетика хлорирования обожженного исходного данбурита месторождения Ак-Архар и концентрата данбурита. Разработана принципиальная технологическая схема комплексной переработки данбуритовых руд месторождения Ак-Архар хлорным способом.

## **1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

### **1.1. Характеристика данбуритовых руд месторождения Ак-Архар**

На территории бывшего Советского Союза находятся несколько крупных месторождений бора. В Российской Федерации наибольший интерес представляет месторождение Дальнегорска – боросиликатное, в Республике Таджикистан крупнейшим боросиликатным месторождением является Ак-Архарское месторождение.

Данбуритовая руда месторождения Ак-Архар отличается от других борсодержащих руд (коллеманита, улексита, ашарита, иньюита, датолитов и др.) структурой, химическим и минералогическим составами.

В настоящей главе рассматриваются характеристики исходных веществ, методики эксперимента и химический анализ.

Химический и минералогический составы данбуритовой руды и данбуритового концентрата определялись рентгенофазовым, пламенно-фотометрическим и объемным методами анализов. Химический состав данбуритовой руды и данбуритового концентрата приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Химический состав данбуритовой руды и данбуритового концентрата

	Компоненты												
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ппп.
	Содержание, мас%												
Исходная руда	10,4	59,8	1,27	2,2	1,39	19,6	0,75	0,15	0,29	0,1	0,03	0,11	3,91
Концентрат данбурита	17,41	46,8	2,45	2,67	1,68	23,6	0,75	0,15	0,29	0,1	0,03	0,11	3,56

### 1.2. Методика химического анализа

В настоящее время используется множество методик химического анализа различных руд, в этом подразделе использовалась методика, усовершенствованная нами применительно к данбуритовой руде и её концентрату.

В настоящей работе были использованы следующие методы химического анализа: пламенная фотометрия, перманганатометрия, комплексонометрия, аргентометрия.

В исходном сырье комплексонометрическим и весовым методами определяли содержание оксидов *Si*, *Al*, *Fe*, *Mg*, *Ca*, *B*, *P*, *Na*, *Ti*, *K* и *CO<sub>2</sub>*. На установке ПФМ-2 методом пламенной фотометрии определяли содержание щелочных металлов *K* и *Na*. Содержание хлора определяли аргентометрическим методом (метод Фольгарда). Определение проводили путём связывания *Cl<sup>-</sup>*-иона азотнокислым серебром и оттитровывания избытка реагента роданидом аммиака в присутствии солей трёхвалентного железа.

### 1.3. Дифференциально-термический анализ

Для данбуритовых руд метод ДТА использован для регистрации фазовых превращений и разложения некоторых компонентов, входящих в состав данбуритовой руды.

ДТА был проведён на дериватографе Q-1000 системы Паулик-Эрдей. Одним из важных факторов для проведения ДТА является скорость нагрева. Нами была использована скорость подъёма температуры, которая составляла 7°С/мин.

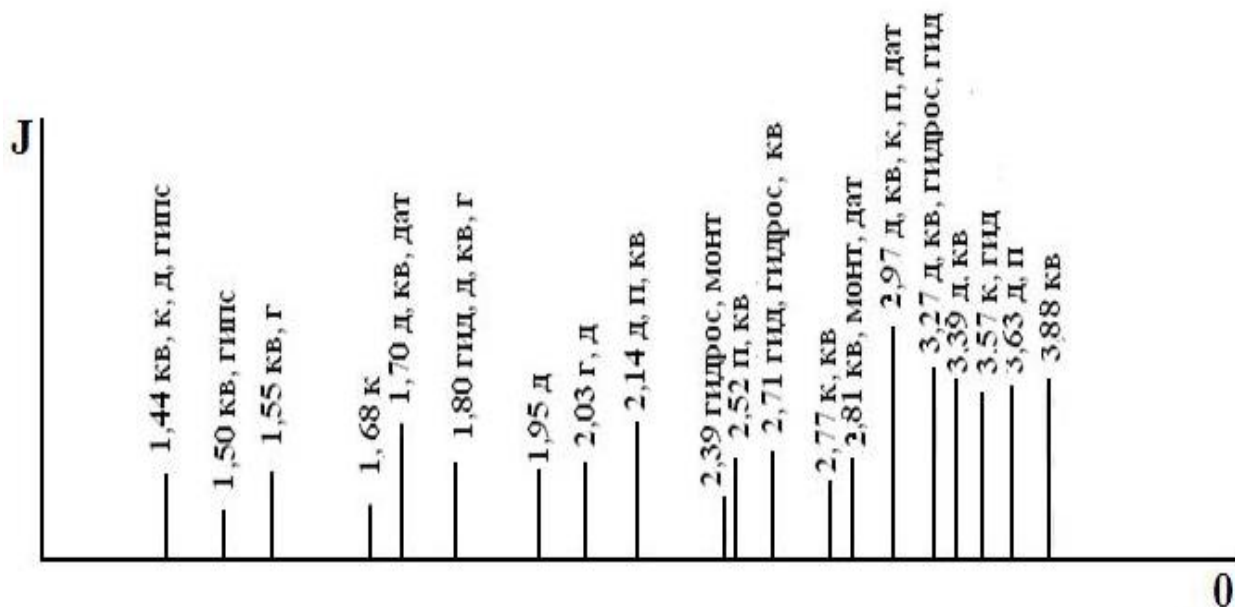
Установлено, что на термограмме исходной данбуритовой руды имеется эндотермический эффект при 780°С, который связан, по-видимому, с удалением связанной воды, летучих компонентов и частично с разложением кальцита, и при эндоэффект при 950°С, связанный с разложением данбуритовой руды и образованием силикатов кальция и бора.

На термограмме концентрата данбурита при более медленной скорости нагрева (5°С/мин) были выявлены небольшие эндотермические эффекты при 860, 950 и 1020°С, природу которых трудно определить. По-видимому, при 735°С происходит удаление связанной воды и затем плавление и фазовое превращение компонентов данбуритового концентрата.

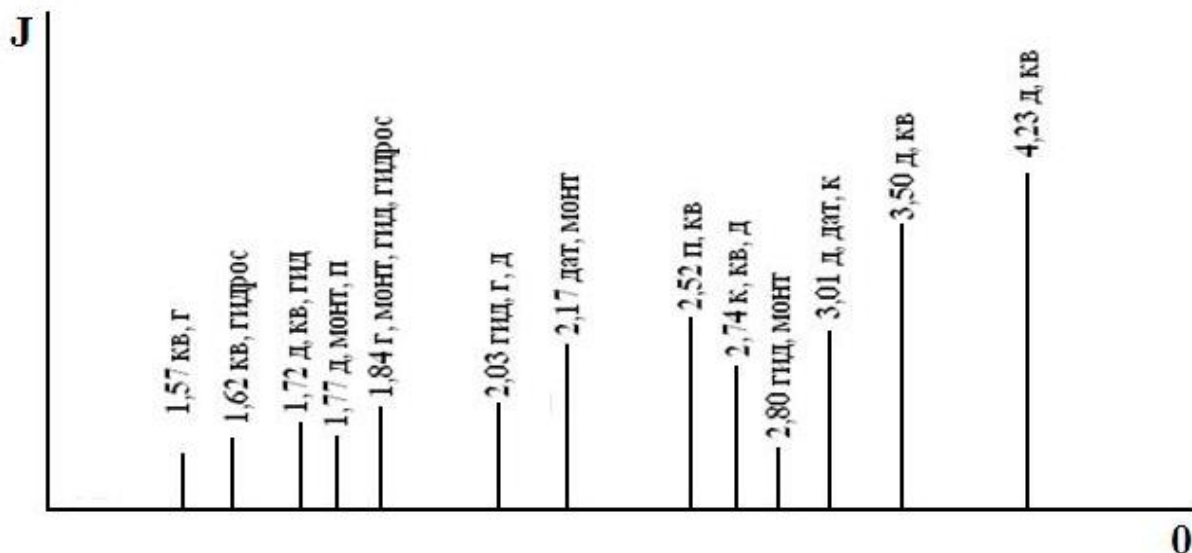
#### 1.4. Рентгенофазовый анализ (РФА) боросиликатного сырья

При исследовании исходной данбуритовой руды методом РФА было установлено, что основными рудообразующими минералами данбурита Ак-Архарского месторождения являются: кварц, данбурит, монтмориллонит, датолит, пироксены, гранат, гидроборацит, гидрослюда (или геденбергит), кальцит и др.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты РФА исходной данбуритовой руды и предварительно обожжённого данбурита.

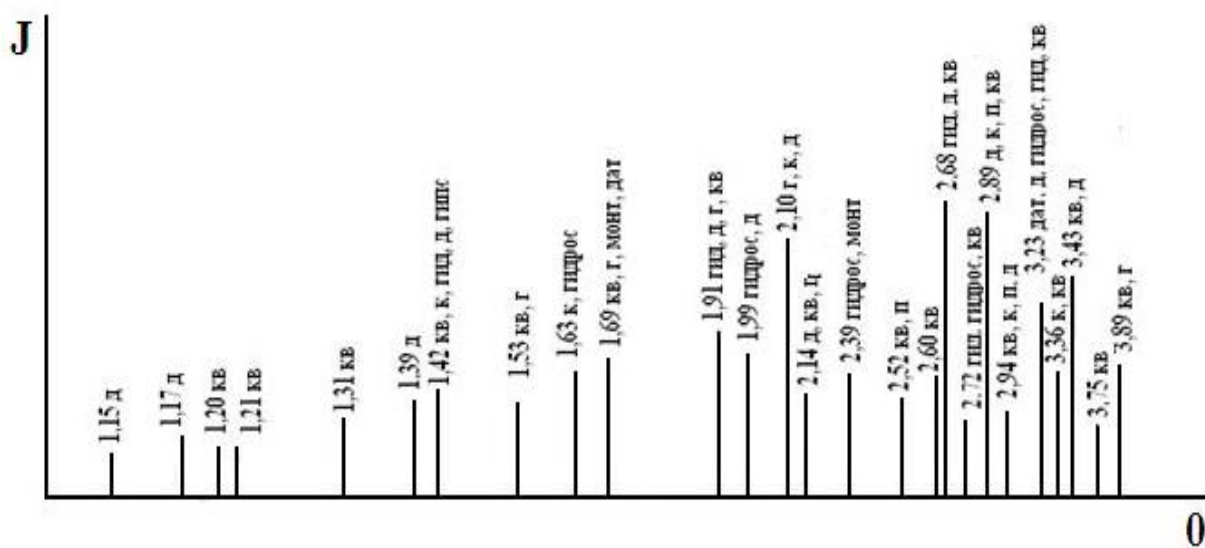


**Рисунок 1.** Штрих-диаграмма исходного данбурита Ак-Архарского месторождения: монт – монтмориллонит, гид – гидроборацит, дат - датолит, д – данбурит, кв – кварц, к – кальцит, г – гранат, п – пироксены, г – гидрослюда.



**Рисунок 2.** Штрих-диаграмма данбурита Ак-Архарского месторождения после предварительного обжига: монт – монтмориллонит, гид – гидроборазит, дат - датолит, д – данбурит, кв – кварц, к – кальцит, г – гранат, п – пироксены, гидрос – гидрослюда.

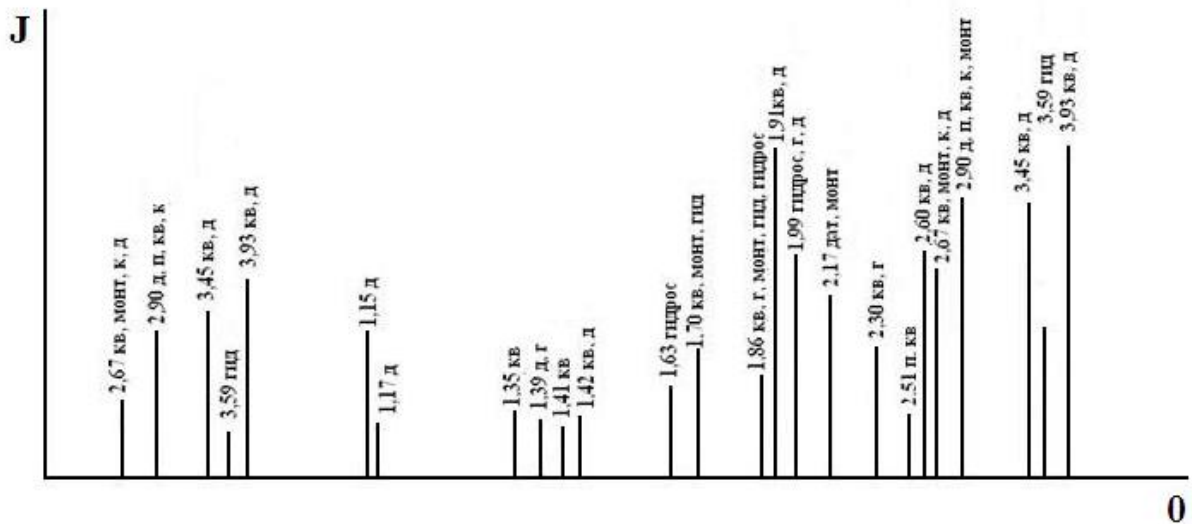
Методом РФА был также исследован данбуритовый концентрат до и после прокаливания при температуре 950-980°C, результаты исследования представлены на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3.** Штрих-диаграмма концентрата данбурита до обжига: монт - монтмориллонит, гид – гидроборазит, дат - датолит, д – данбурит, кв – кварц, к – кальцит, г – гранат, п – пироксены, гидрос – гидрослюда.

Из штрих-диаграмм концентрата данбурита до обжига (рис.3) и данбуритового концентрата после обжига (рис.4) видно, что пики, относящиеся к борсодержащим, алюминийсодержащим и железосодержащим минералам, идентичны. Выявлено, что алюминийсодержащие минералы монтмориллонит и гидрослюда после обжига при высоких температурах, равных 950-1000°C, превращаются частично в муллит.





**Рисунок 4.** Штрих-диаграмма концентрата данбурита после предварительного обжига: монт - монтмориллонит, гид – гидроборацит, дат - датолит, д – данбурит, кв – кварц, к – кальцит, г – гранат, п – пироксены, гидрос – гидрослюда.

Видимо, при высоких температурах прокаливания происходит термодеструкция минералов и кристаллическая структура минералов перестраивается из  $\alpha$ -модификаций в  $\beta$ - или  $\gamma$ -формы, которые обладают большей растворимостью. Эти явления особенно часто проявляются для кварца, при высоких температурах он способен к превращению в более активную аморфную форму, которая частично взаимодействует с оксидом кальция.

## 2. ХЛОРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ДАНБУРИТОВОЙ РУДЫ И ДАНБУРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

### 2.1. Хлорирование данбуритовой породы месторождения Ак-Архар

При переработке боросиликатных руд хлорным методом предусматривается получение треххлористого бора с последующим выделением из  $BCl_3$  ряда ценных продуктов и, в первую очередь, борной кислоты, буры и борных удобрений.

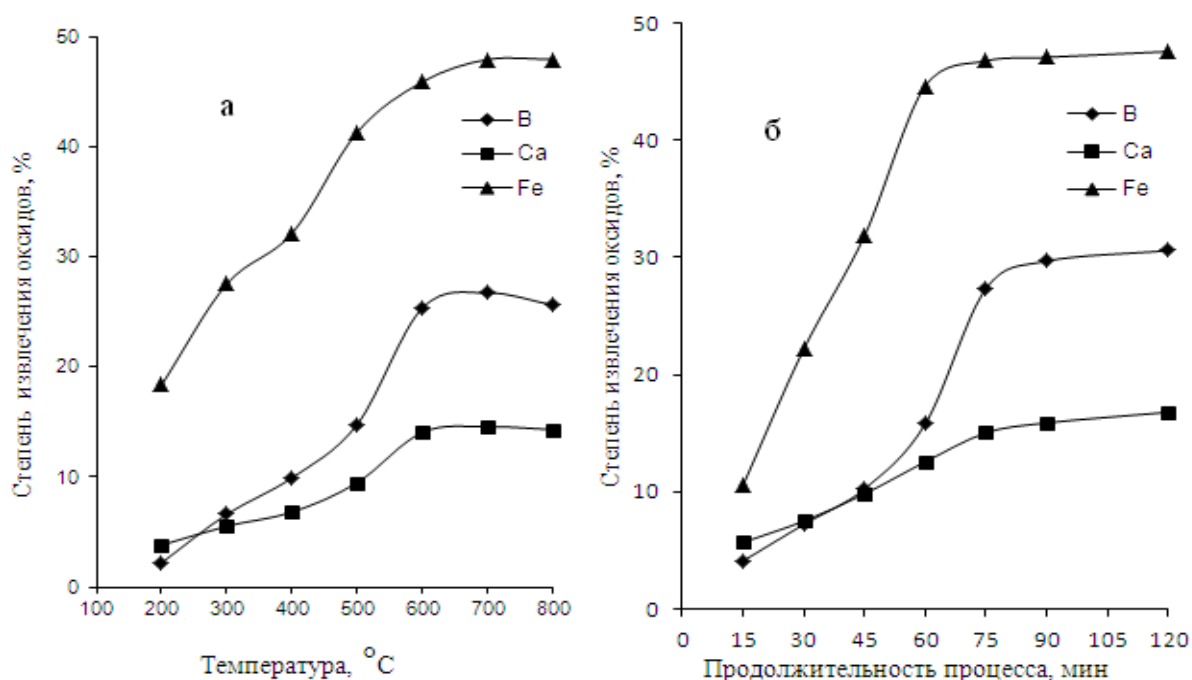
Основными рудообразующими минералами данбуритовой руды являются: кварц ( $SiO_2$ ), монтмориллонит, датолит ( $CaO \cdot B_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ ), аксинит, пироксены (или геденбергит) ( $CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), гидроборацит ( $CaO \cdot MgO \cdot B_2O_3 \cdot 6H_2O$ ), гранат ( $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3SiO_2$ ), данбурит ( $CaO \cdot B_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), гидрослюда и кальцит ( $CaCO_3$ ) (рис.1).

Нами изучено взаимодействие данбуритовой породы с газообразным хлором и установлено влияние различных параметров на извлечение оксида бора и других компонентов.

Газообразный хлор для разложения данбуритовой породы использовали в расчетных дозировках образования хлоридов алюминия,

железа, бора и кальция. Химический состав данбуритовой руды приведен в таблице 1.

Результаты опытов по хлорированию породы данбурита без восстановителя (угля) приведены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Зависимость степени извлечения оксидов ( $Fe_2O_3$ ,  $B_2O_3$  и  $CaO$ ) от температуры (а) и продолжительности процесса (б) в процессе хлорирования данбуритовой руды без восстановителя.

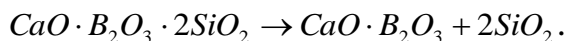
**Влияние температуры** на хлорирование данбурита изучали в интервале температуры 200-800°C при длительности процесса хлорирования 60 минут (рис.5а). Максимальное извлечение оксидов достигается при повышении температуры до 600-750°C и составляет, в %:  $Fe_2O_3$  – 47.9;  $B_2O_3$  – 26.7 и  $CaO$  – 14.28. При дальнейшем увеличении температуры степень извлечения оксидов, входящих в состав данбуритовой руды, существенно не меняется.

**Продолжительность процесса.** Интервал времени менялся от 20 до 120 мин (рис.5б). Постоянными параметрами были: размер частиц - 0.1 мм, температура - 650-750°C. Максимальное извлечение оксидов из состава данбурита наблюдается при продолжительности хлорирования 120 мин и составляет (в %):  $Fe_2O_3$  – 47.96;  $B_2O_3$  – 30.6 и  $CaO$  – 16.75, соответственно, температура при этом должна составлять не менее 750-800°C. Следует, отметить, что алюмосодержащие минералы при этом не разлагаются.

## 2.2. Хлорирование предварительно обожженного данбурита в присутствии восстановителя

Установлено, что при термической обработке минералы существенно активизируются.

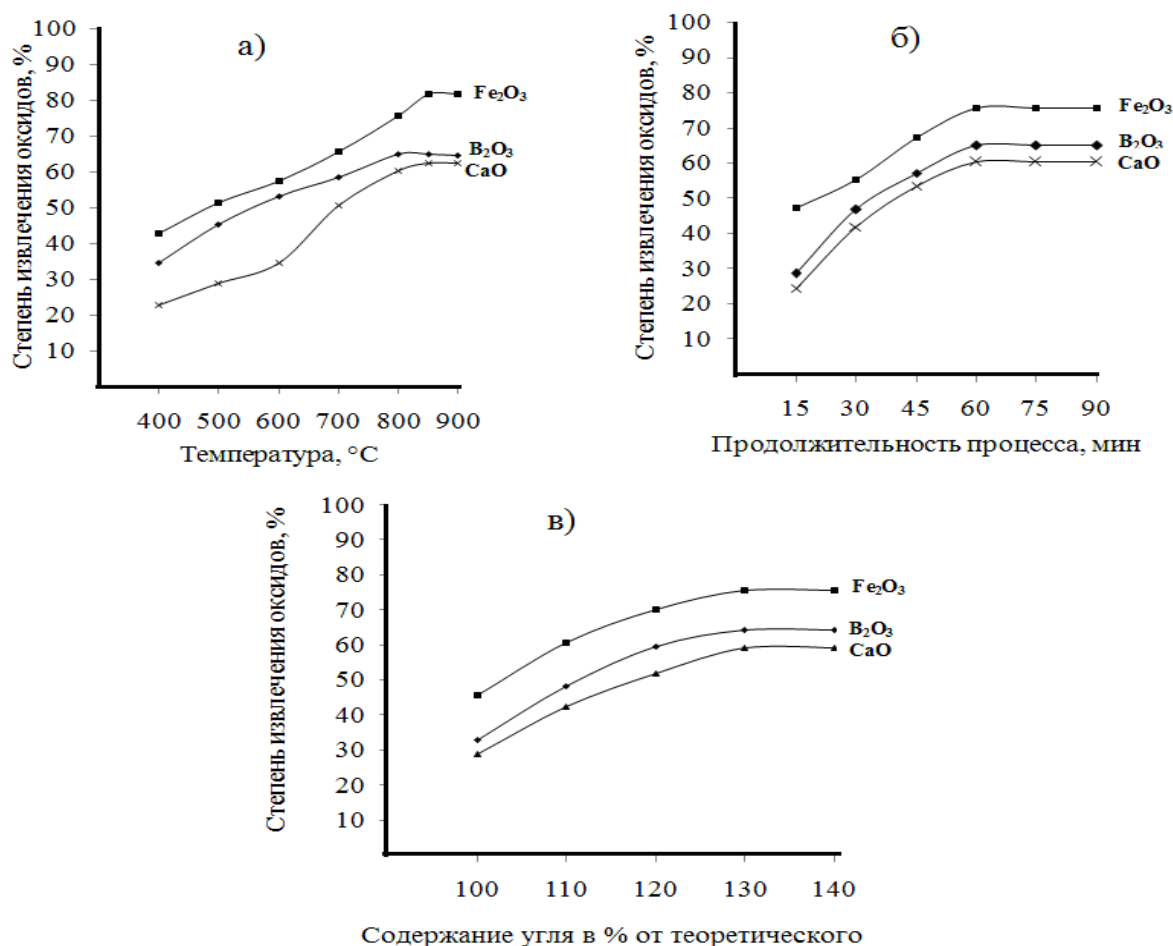
Нами показано, что предварительный обжиг увеличивает реакционную способность данбуритовой породы и после термической обработки происходит частичное разложение данбурита:



В результате исследований также выявлена зависимость степени извлечения оксида бора от содержания восстановителя (угля), продолжительности процесса, температуры и размера частиц данбуритовой породы. Как показали результаты анализа, после обжига степень извлечения оксида бора из данбурита достигает максимального значения, составляя в среднем 80%.

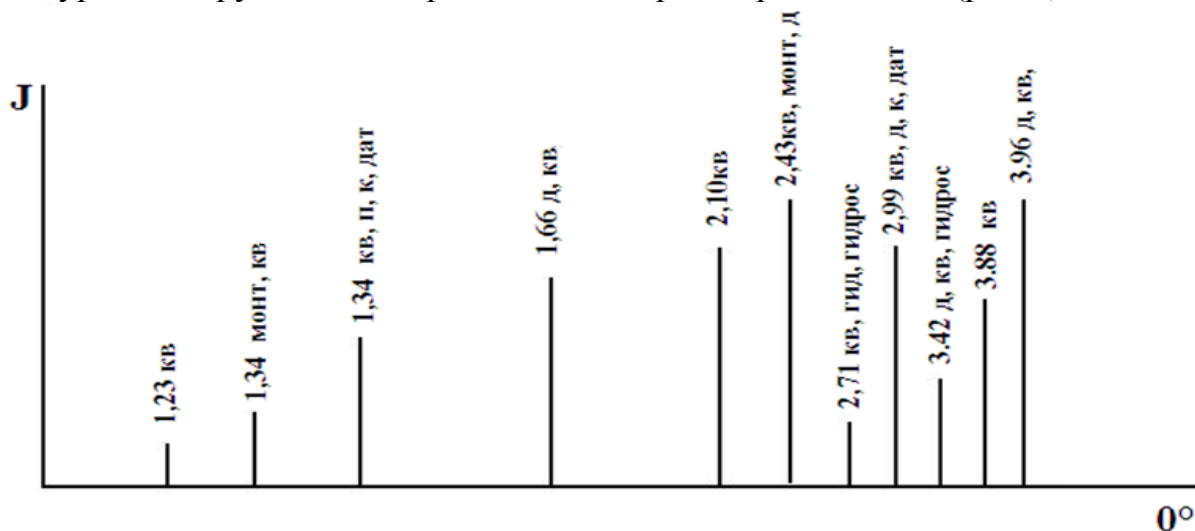
Влияние предварительного обжига на хлорирование данбурита изучали в интервалах 400-800°C при длительности процесса хлорирования 60 мин в присутствии восстановителя.

На рисунке 6 приводятся результаты исследования зависимости степени извлечения оксидов железа, бора и кальция от продолжительности процесса, температуры и содержания восстановителя при хлорировании предварительно обожженного данбурита.



**Рисунок 6.** Зависимость степени извлечения оксидов  $Fe_2O_3$ ,  $B_2O_3$  и  $CaO$  от температуры (а), продолжительности процесса (б) и содержания восстановителя (в) при хлорировании обожженного данбурита.

Как видно из рисунка 6, оптимальными параметрами для процесса хлорирования обожженного данбурита являются: температура процесса - 800°C, содержание восстановителя (угля) в шихте 130% от теоретического расчёта при продолжительности процесса 60 мин. Результаты химических анализов были подтверждены исследованием штрих-диаграммы остатка данбуритовой руды после проведения хлорного разложения (рис.7).



**Рисунок 7.** Штрих-диаграмма остатка данбуритовой руды после хлорирования: кв – кварц, д - данбурит, дат – датолит, к - кальцит, п - пироксен, гид - гидроборацит, гидрос – гидрослюда, м –монтмориллонит.

Видно, что содержание минералов после хлорирования уменьшается, и пики, относящиеся к некоторым минералам, сокращаются.

### 2.3. Кинетика разложения предварительно обожженного данбурита месторождения Ак-Архар

Кинетика хлорного разложения исходной данбуритовой руды Ак-Архарского месторождения исследовалась после прокаливании породы.

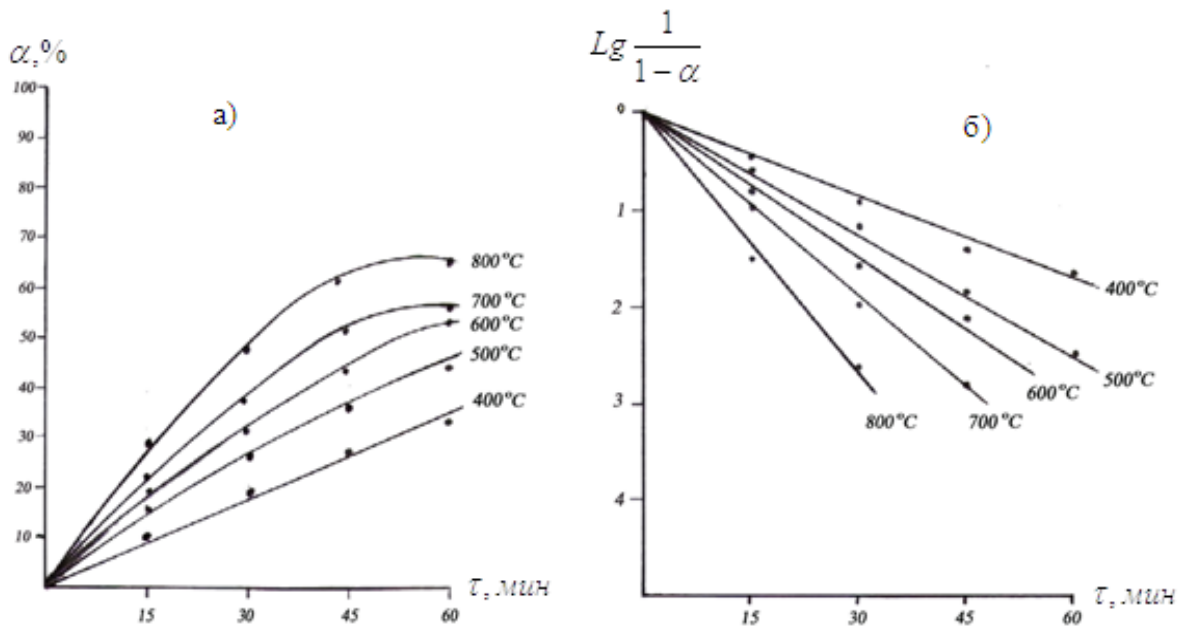
Зависимость степени разложения оксида бора от времени и  $\lg \frac{1}{1-\alpha}$  от времени при хлорном разложении предварительно обожженного данбурита изучена в интервале температур 400-800°C при длительности процесса от 15 до 60 минут. Результаты исследования представлены на рисунке 8. Из рисунка 8а видно, что извлечение оксида бора из состава предварительно обожженной данбуритовой руды возрастает от 34,5 до 64,9%. После построения кинетических кривых данного процесса видно, что они имеют параболический характер. Данные кинетические кривые можно описать уравнением первого порядка:

$$d\alpha / d\tau = K (1-\alpha),$$

где:  $\alpha$ - степень извлечения, %;

$\tau$  – время, мин;

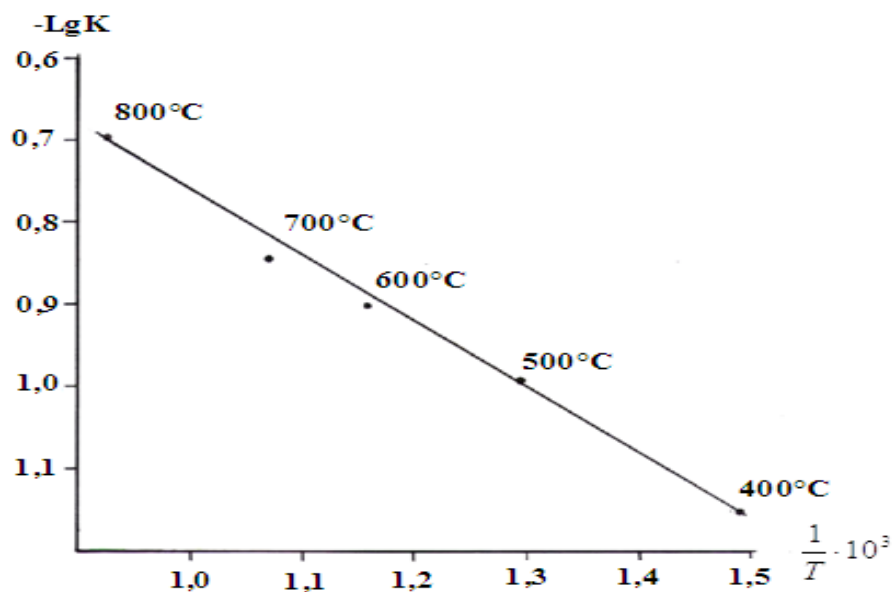
K - константа скорости разложения, мин.



**Рисунок 8.** Зависимость степени разложения ( $\alpha$ ) оксида бора от: а) времени и б)  $\lg \frac{1}{1-\alpha}$  от времени процесса хлорного разложения обожженного данбурита.

На рисунке 8б представлена зависимость  $\lg 1/(1-\alpha)$  от времени. При различных температурах рассчитанные экспериментальные точки представляют собой прямую линию с отрицательным наклоном.

Также была исследована зависимость логарифма константы скорости протекания хлорного разложения обожженной данбуритовой руды от величины абсолютной обратной температуры. Был построен график зависимости  $\lg K$  от  $(1/T \cdot 10^3)$ , представляющий собой прямую линию (рис.9).



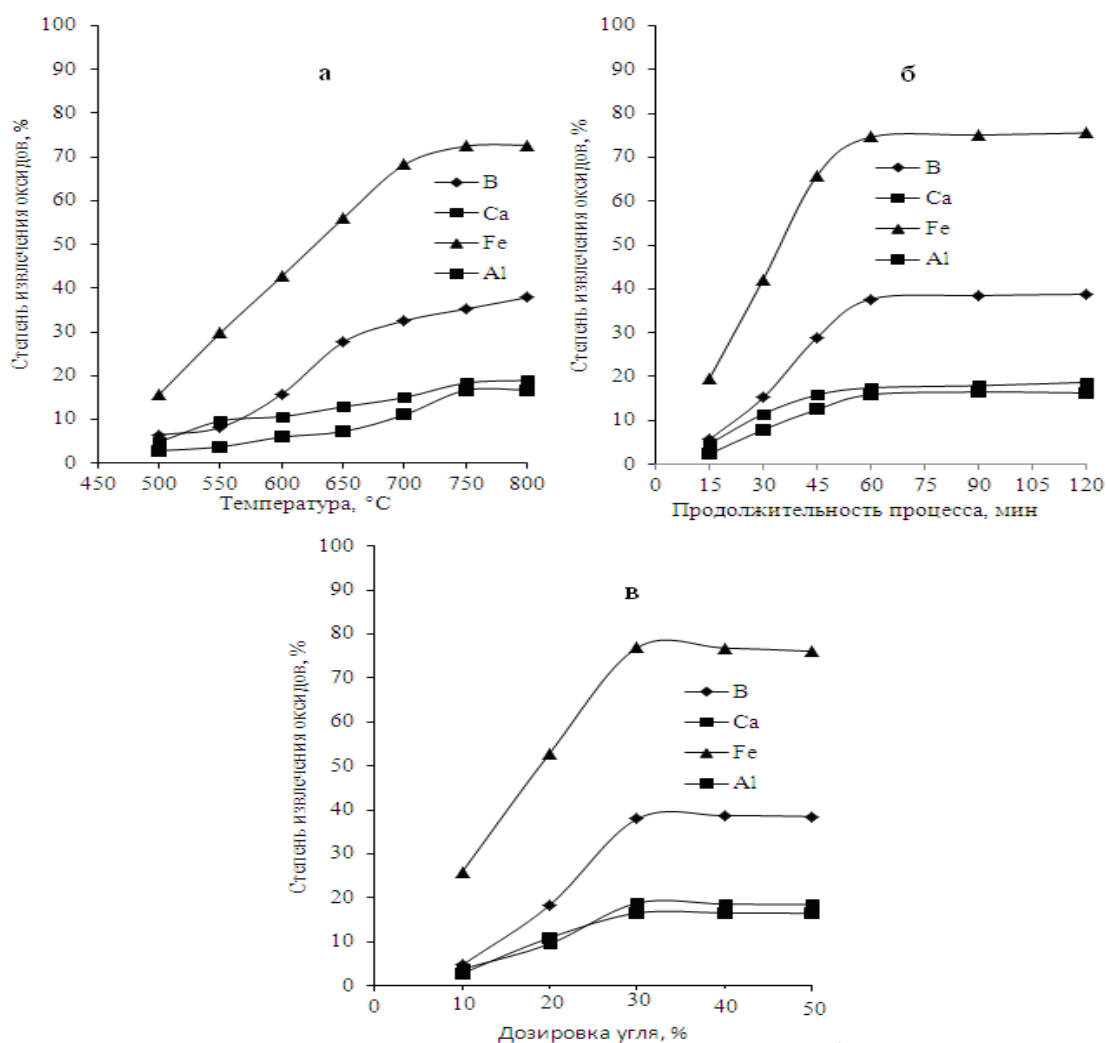
**Рисунок 9.** Зависимость  $\lg K$  от абсолютной обратной температуры при хлорном разложении обожженного данбурита месторождения Ак-Архар.

Рассчитанные точки хорошо укладываются на прямую линию Аррениуса, по наклону прямой была рассчитана величина кажущейся энергии активации (E) хлорного разложения обожженного данбурита, равная 15,22 кДж/моль. Рассчитанная величина энергии активации E совпадает со значениями, найденными графическим методом.

#### 2.4. Хлорирование данбуритового концентрата

Нами также изучено хлорирование данбуритового концентрата месторождения Ак-Архар Таджикистана, где содержание  $B_2O_3$  составляет более 17 мас% (табл.1).

Для выявления оптимальных параметров проведения хлорирования данбуритового концентрата была исследована зависимость степени извлечения оксидов от температуры, продолжительности процесса и концентрации восстановителя. Результаты исследования приведены на рисунке 10.



**Рисунок 10.** Зависимость степени извлечения оксидов  $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и  $CaO$  от температуры (а), продолжительности процесса (б) и концентрации восстановителя (в) при хлорировании данбуритового концентрата.

**Влияние температуры** на степень хлорирования оксидов, входящих в состав данбуритового концентрата, исследовали в пределах температур 500-800°C при длительности процесса 1 ч (рис.10а). Содержание восстановителя в шихте составило 30%, крупность частиц породы и угля 0,1 мм.

**Продолжительность процесса.** Результаты влияния продолжительности процесса на хлорирование оксидов ( $Fe_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  и  $CaO$ ), входящих в состав данбуритового концентрата, приведены на рисунке 10б. Интервал времени менялся от 15 до 120 мин. Постоянными параметрами были: размер частиц - 0.1 мм, температура - 800°C и содержание восстановителя - 30%. Как показывают результаты опытов, максимальное извлечение оксидов наблюдается при продолжительности хлорирования 60 мин, которое составляет (в %):  $Fe_2O_3$  - 70.54,  $B_2O_3$  - 36.8,  $CaO$  - 18.52 и  $Al_2O_3$  - 15.8.

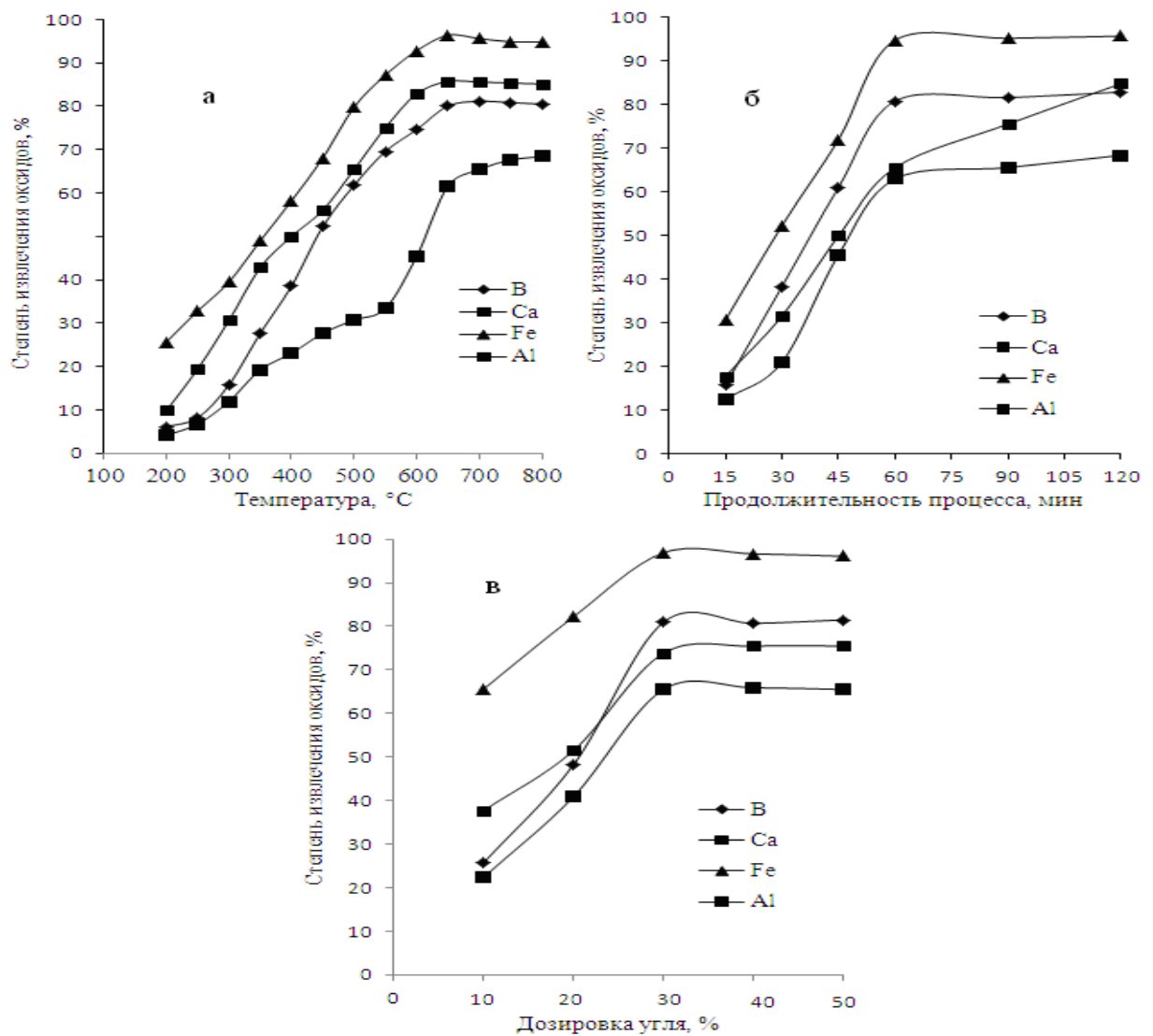
**Влияние дозировки угля в шихте** на хлорирование данбуритового концентрата изучали во временном интервале 1 час при температуре 800°C. Содержание угля дозировалось от 10 до 50% от веса шихты. При повышении количества активированного угля от 10 до 30% степень хлорирования оксидов алюминия, кальция, бора и железа резко повышается, достигая (в %):  $Al_2O_3$  - 16.78,  $CaO$  - 18.22,  $B_2O_3$  - 38.5 и  $Fe_2O_3$  - 72.4 (рис.10в).

Для достижения максимальной степени извлечения оксидов проводили разложение предварительно обожженного данбуритового концентрата хлорированием с добавлением активированного угля. Результаты исследования представлены на рисунке 11.

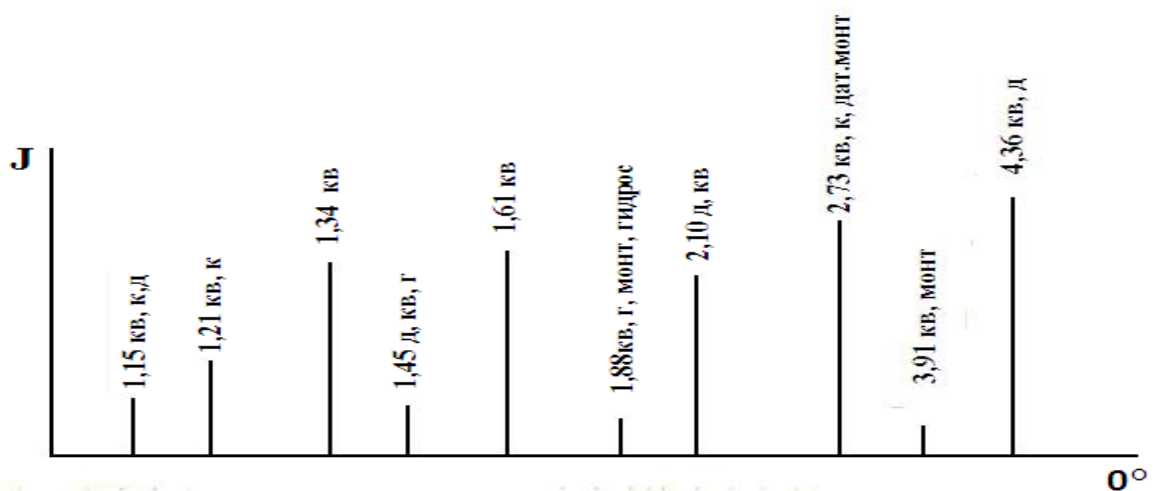
При обработке обожженного данбуритового концентрата хлорированием степень извлечения полезных компонентов резко возрастает. Как видно из рисунка 11, при температуре 650°C, длительности процесса 60 мин и дозировке угля 125% степень извлечения  $B_2O_3$  составляет более 80%.

Опираясь на результаты проведенных опытов, для хлорного разложения данбуритового концентрата с предварительным обжигом рекомендованы следующие оптимальные условия: температура обжига - 950-980°C при длительности термической обработки 60 мин; расход хлора 300 мл/мин; продолжительность хлорного разложения - 60 мин при 650°C; дозирование угля - 100-125% от стехиометрического расчета.

Достоверность результатов химических анализов подтверждает штрих-диаграмма остатка после хлорирования данбуритового концентрата, приведенная на рисунке 12, из которой видно, что пики, относящиеся к железосодержащим минералам: гранату и пироксену, а также к данбуриту, исчезают, а пики, подтверждающие наличие кварца, наоборот увеличиваются. В раствор переходят бор и железосодержащие минералы - гранат, пироксены, гидроборатит и данбурит.



**Рисунок 11.** Зависимость степени извлечения оксидов  $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и  $CaO$  от температуры (а), продолжительности процесса (б) и концентрации восстановителя (в) при хлорировании предварительно обожженного данбуритового концентрата.



**Рисунок 12.** Штрих-диаграмма остатка данбуритового концентрата после хлорирования: кв – кварц, д – данбурит, дат – датолит, к – кальцит, гидрос – гидрослюда, монт- монтмориллонит.

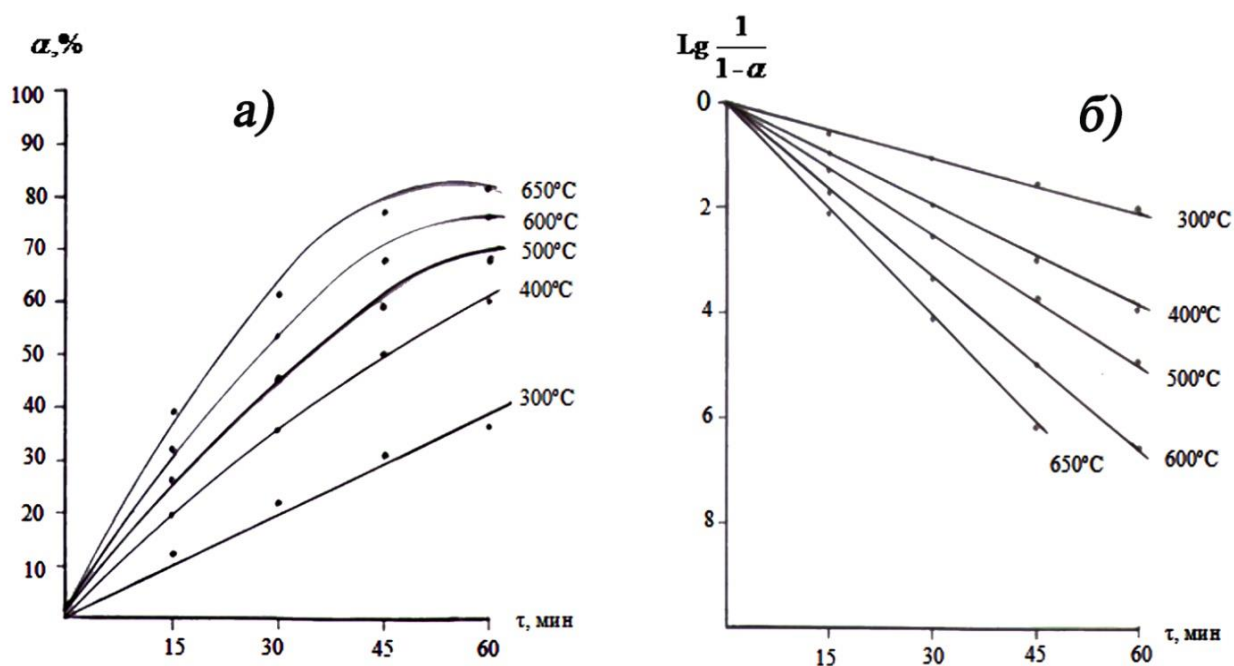


## 2.5. Кинетика хлорного разложения предварительно обожженного данбуритового концентрата

Кинетика извлечения оксида бора из состава предварительно обожженного данбуритового концентрата при разложении хлором исследовалась в интервале температур от 300 до 650°C в течение от 15 до 60 минут. Результаты кинетических исследований приведены на рисунке 13. Характер кинетических кривых разложения указывает на то, что разложение происходит очень быстро и при температуре 600°C в течение 1 часа извлечение составляет 77,66%. За это же время при температуре 650°C достигнуто максимальное извлечение бора в раствор, которое составляет 84,95%.

Используя кинетическое уравнение первого порядка, были рассчитаны константы скорости разложения предварительно обожженного данбуритового концентрата.

Из рисунка 13а видно, что с увеличением температуры извлечение оксида бора из состава предварительно обожженного данбуритового концентрата резко увеличивается от 37,3 до 85,0%. Кинетические кривые данного процесса носят параболический характер.



**Рисунок 13.** Зависимость степени разложения ( $\alpha$ ) оксида бора от времени (а) и  $\lg \frac{1}{1-\alpha}$  от времени (б) при разложении предварительно обожженного данбуритового концентрата хлором.

На рисунке 13б представлены зависимости  $\lg 1/(1-\alpha)$  от времени. Полученные в ходе эксперимента при различных температурах точки хорошо укладываются на прямой, которая имеет отрицательный наклон.

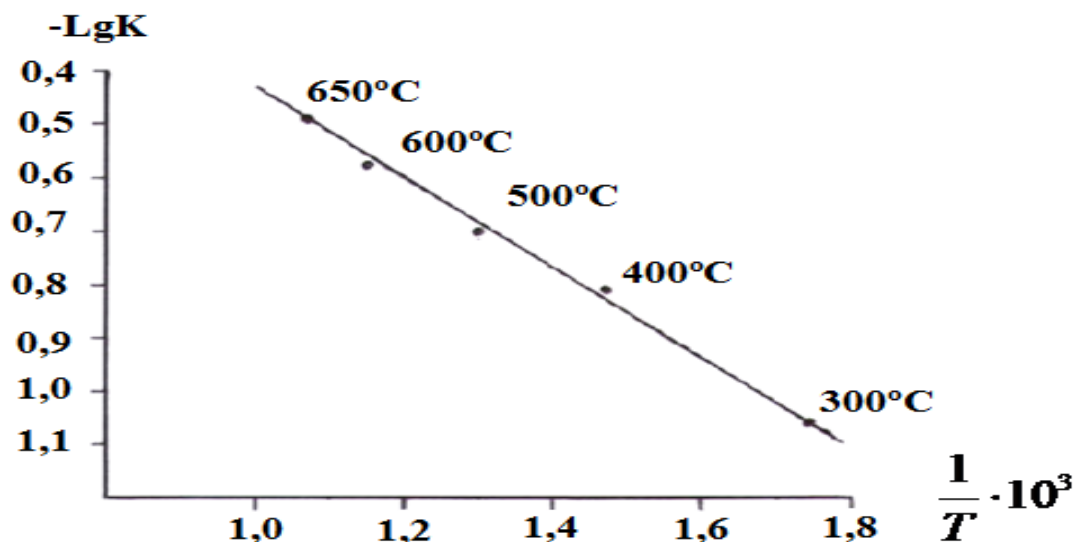
Предэкспоненциальный множитель  $K_0$  и кажущуюся энергию активации ( $E$ ) определяли с помощью уравнения Аррениуса графическим методом по формуле:

$$K = K_0 \cdot e^{-E/RT}, \quad \text{или:} \quad \lg K = -\lg K_0 - \frac{E}{2,303 RT},$$

где:  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/моль, град;

$T$  – абсолютная температура, К.

На рисунке 14 представлена зависимость логарифма константы скорости при разложении обожженного данбуритового концентрата хлором от обратной абсолютной температуры. Для определения энергии активации строили график зависимости  $\lg K_{cp}$  от  $(1/T \cdot 10^3)$ , который носит прямолинейный характер и точки хорошо укладываются на прямую линию Аррениуса, по наклону которой вычислена величина кажущейся энергии активации разложения обожженного данбуритового концентрата газообразным хлором, численное значение которой составляет 16,78 кДж/моль.



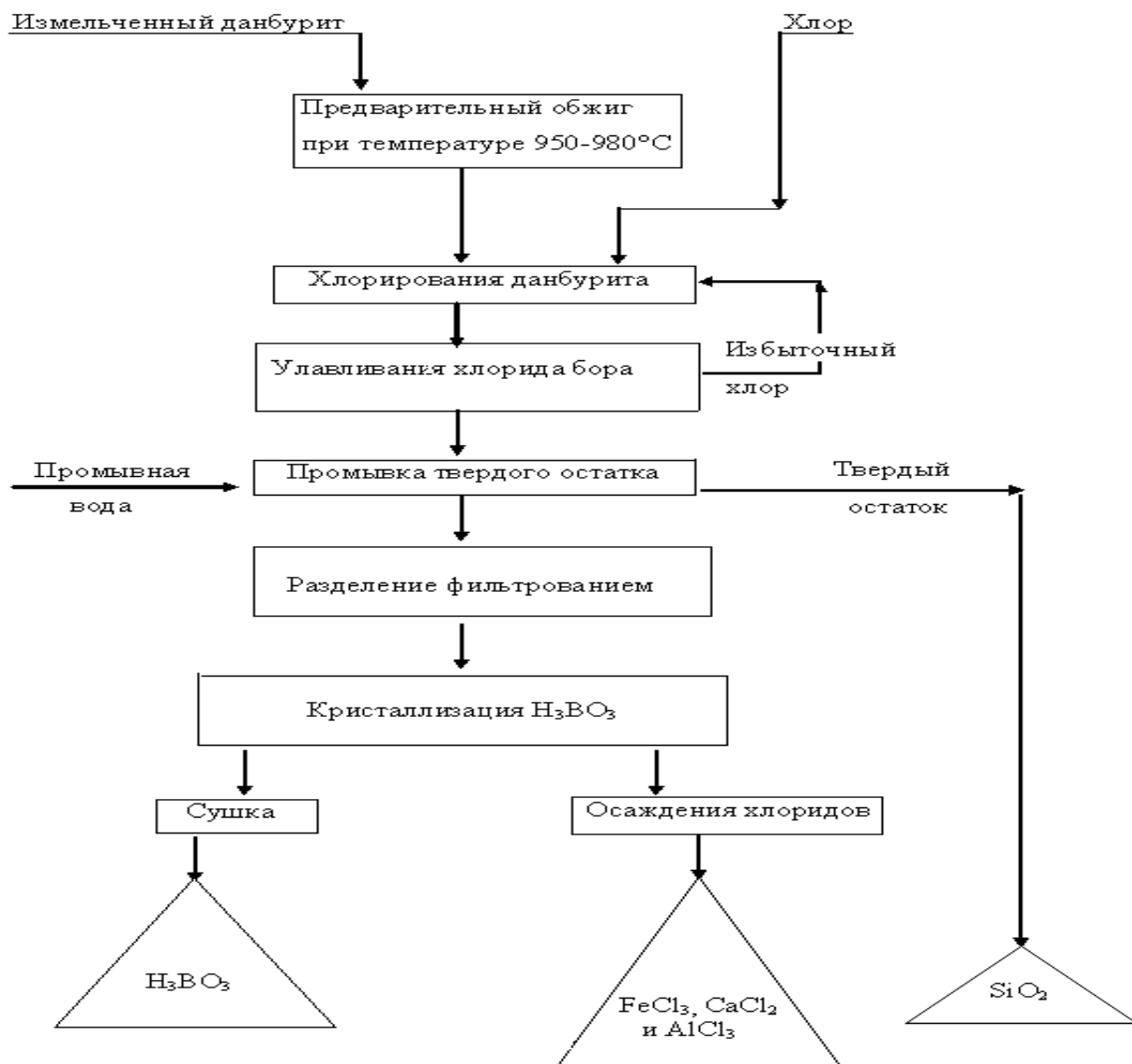
**Рисунок 14.** Зависимость  $\lg K$  от обратной абсолютной температуры при хлорном разложении предварительно обожженного данбуритового концентрата Ак-Архарского месторождения.

## 2.6. Разработка принципиальной технологической схемы хлорной переработки данбурита месторождения Ак-Архар

На основе проведенных исследований разработана принципиальная технологическая схема переработки данбуритовой руды (рис.15). Сущностью данного способа переработки является получение борной кислоты, хлоридов бора, алюминия и железа. Основными последовательными стадиями данного метода являются:

- предварительный обжиг данбуритовой руды при температуре 950-980°C до начала разложения газообразным хлором;
- измельчение данбуритовой породы до определенного размера частиц 0,1-0,3 мм;

- хлорирование газообразным хлором в присутствии восстановителя – угля;
- выделение из цикла ценного продукта - хлорида бора;
- промывание выделившегося твердого осадка водой;
- разделением осадка фильтрованием с перекристаллизацией борной кислоты;
- сушка борной кислоты с параллельным осаждением хлоридов алюминия, кальция и железа.



**Рисунок 15.** Принципиальная технологическая схема хлорной переработки данбури́тов.

### ВЫВОДЫ

1. При помощи химического, дифференциально-термического и рентгенофазового методов анализа установлены химико-минералогические составы исходного данбури́та, данбури́тового концентрата и продуктов переработки хлорного разложения.
2. Определены условия хлорного разложения данбури́товой руды. Установлены наиболее рациональные параметры процесса:

предварительный обжиг при температуре 950°C и продолжительность – 60 мин; температура хлорирования обожженного данбурита - 800°C, длительность процесса – 60 мин, содержание восстановителя в шихте 130%.

3. Определены условия хлорного разложения данбуритового концентрата. Найдены оптимальные параметры процесса хлорного разложения: температура обжига 950–980°C при длительности термической обработки 60 мин; расход хлора 300 мл/мин; продолжительность хлорного разложения – 60 мин при 650°C; дозирование угля – 100-125% от стехиометрического расчета.
4. Исследована кинетика процесса хлорирования предварительно обожженной данбуритовой руды хлором и вычислена энергия активации процесса, равная 15,22 кДж/моль, что свидетельствует о его протекании в диффузионной области.
5. Изучена кинетика разложения данбуритового концентрата хлором. Вычисленная кажущаяся энергия активации составляет 16,78 кДж/моль, что свидетельствует о протекании процесса в смешанной области.
6. Разработана принципиальная технологическая схема комплексной переработки данбуритовой руды месторождения Ак-Архар хлорным способом.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации*

1. Ашуров, Н.А. Хлорирование данбурита месторождения Ак-Архар / Н.А. Ашуров, Э.Д. Маматов, А.С. Курбонов, **П.М. Ятимов**, У.М. Мирсаидов // Докл. АН Республики Таджикистан, 2009, т.52, №2, с.95-98.
2. Мирсаидов, У.М. Хлорирование предварительно обожженного концентрата данбурита и расчёт кинетических параметров / У.М. Мирсаидов, **П.М. Ятимов**, Э.Д. Маматов, З.В. Кобулиев, Ш.Б. Назаров // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук, 2013, №2(151), с.79-84.
3. Мирсаидов, У.М. Хлорирование концентрата данбурита / У.М. Мирсаидов, **П.М. Ятимов**, Э.Д. Маматов, З.В. Кобулиев, А. Курбонбеков // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук, 2014, №1(154), с.84-87.
4. Ашуров, Н.А. Хлорирование исходного данбурита месторождения Ак-Архар / Н.А. Ашуров, **П.М. Ятимов**, Э.Д. Маматов // Вестник Таджикского национального университета (научный журнал). Серия естественных наук, 2014, №1/3(134), с.120-124.
5. **Ятимов, П.М.** Переработка борсодержащих руд газообразным хлором / **П.М. Ятимов**, Э.Д. Маматов, Н.А. Ашуров, А. Тагоев // Вестник Курган-

Тюбинского государственного университета имени Носира Хусрава (научный журнал), 2014, №1(27), с.29-32.

***Публикации в материалах конференций***

6. **Ятимов, П.М.** Разложение данбурита месторождения Ак-Архар Таджикистана хлорным способом / П.М. Ятимов, Э.Д. Маматов // Материалы республиканской научно-практической конференции, посвящ. 100-летию академика АН РТ С.М. Юсуповой «Горные, геологические, экологические аспекты и развитие горнорудной промышленности в XXI веке», Душанбе, 2010, с.129-132.
7. **Ятимов, П.М.** Хлорирование данбуритового концентрата месторождения Ак-Архар / П.М. Ятимов, Э.Д. Маматов, У.М. Мирсаидов // Материалы семинаров «2011 год - Международный год химии» и «Радиационная безопасность Таджикистана», Душанбе, 2011, с.71-73.
8. **Ятимов, П.М.** Перспективы переработки данбурита месторождения Ак-Архар Таджикистана хлорным методом / П.М. Ятимов, Э.Д. Маматов, У.М. Мирсаидов // Материалы республиканской научно-практической конференции, посвящ. 16-ой сессии Верховного Совета, 15-летию мира и национального согласия Республики Таджикистан и 2012 году - году развития энергетики Курган-Тюбе, 2012, с.345-347.
9. Маматов, Э.Д. Особенности хлорирования борсодержащего сырья Таджикистана / Э.Д. Маматов, **П.М. Ятимов**, Н.А. Ашуров, А. Тагоев // Сб. научных статей по итогам Международной научно-практической конференции «От кризиса к модернизации: мировой опыт и российская практика фундаментальных и прикладных научных разработок в экономике, проектном менеджменте, образовании, юриспруденции, языкознании, культурологии, экологии, зоологии, химии, биологии, филологии, философии, медицине, психологии, политологии, социологии, градостроительстве, информатике, технике, математике, физике, истории, растениеводстве», Санкт-Петербург, 2014, с.80-88.

*Разрешено к печати 07.05.2015 г.*

*Сдано в печать 08.05.2015 г.*

*Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, усл.п.л.1,5. Заказ № 00. Тираж 100 экз.*

*Отпечатано в типографии ТНУ,*

*ул. Лахути 2.*