

УДК 669.712(575.2)(04)

Мурзубраимов Б.М.

д.х.н., профессор, академик НАН КР, зав.лаб.ИХиФ НАН при Президенте КР

Мурзубраимов Б.М.

х.и.д., профессор, Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги,
КР Президентине караштуу УИА,

Химия жана фитотехнология институту, лаборатория башчысы

Murzubraimov B.M.

doctor of chemical sciences, professor, academician of the National Academy
of the Kyrgyz Republic, head of laboratory, Institute of Chemistry and Phytotechnology
of the National Academy of sciences under the President of the Kyrgyz Republic

Маймеков З.К.

д.т.н., профессор, академик ИА КР, зав.отделением КТУ «Манас»

Маймеков З.К.

техника илимдеринин доктору, профессор, КР ИА академиги,
КТУ «Манас» кафедрасынын башчысы

Maimekov Z.K.

doctor of technical sciences, professor, Academician of the engineering academy
of the Kyrgyz Republic, head of the department of the Kyrgyz Turkish University «Manas»

Самбаева Д.А.

д.т.н., профессор, академик ИА КР, зав.каф. КГТУ им.И.Раззакова МНВОИ КР

Самбаева Д.А.

т.и.д., профессор, Кыргыз Республикасынын ИА академиги, И. Раззаков атындагы
КМТУнин бөлүм башчысы Кыргыз республикасынын илим,
жогорку билим берүү жана инновациялар министрлиги

Sambaeva D.A.

doctor of technical sciences, Professor, Academician of the engineering academy
of the Kyrgyz Republic, head of department of the KSTU
named after I. Razzakov ministry of science, higher education and innovations
of the Kyrgyz republic

Тусупкалиев Е.А.

к.т.н., зав.лаб.ИХН им.А.Бектурова РК, г.Алматы

Тусупкалиев Е.А.

т.и.к., А. Бектуров атындагы Химия илимдери институтунун лаборатория башчысы,
Казакстан Республикасы, Алматы шаары

Tusupkaliev E.A.

candidate of technical sciences, head of laboratory, A. Bekturov Institute of chemical sciences,
Almaty, Republic of Kazakhstan

Тунгучбекова Ж.Т.

к.х.н., с.н.с. ИХФ НАН при Президенте КР, г.Бишкек

Тунгучбекова Ж.Т.

Х.и.к., улук илимий кызматкер КР Президентине караштуу УИА
Химия жана фитотехнология институту

Tunguchbekova Zh.T.

candidate of chemical sciences, senior researcher, Institute of Chemistry and Phytotechnology of
the National Academy of sciences under the President of the Kyrgyz Republic

ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВОГО СЫРЬЯ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКЦИЙ

НЕФЕЛИН ЖАТАКТАРЫН ИШТЕТҮҮНҮН НЕГИЗИНДЕ ХИМИЯЛЫК ӨНДҮРҮМДӨРДҮ АЛУУ МҮМКҮНЧҮЛҮКТӨРҮ

POSSIBILITIES OF PROCESSING NEPHELINE RAW MATERIALS TO OBTAIN CHEMICAL PRODUCTS

Аннотация. Спекание нефелинового сырья с известняком считается высокоэффективным производством, благодаря комплексному подходу, постоянному расширению ассортимента и повышению качества выпускаемой продукции: глинозема, соды, поташа, белой сажи и цемента. С учетом этих обстоятельств составлена химическая матрица нефелинового сырья месторождения Сандык и осуществлено термодинамическое моделирование его деструкции с участием известняка при широких пределах изменения температуры. Рассчитаны физико-химические и термодинамические параметры многокомпонентной системы: нефелин-известняк. Установлено концентрационное распределение основных компонентов, активных частиц и конденсированных фаз при максимуме энтропии системы. Выявлены температурные пределы образования и превращения продукт образующих веществ на основе нефелина.

Ключевые слова: нефелиновое сырье, известняк, термодинамическое моделирование, энтропия.

Аннотация. Нефелинди акиташтын негизинде: комплекстик иштетүү, алынган заттын ассортиментин кеңейтүү жана чыгарылган өндүрүмдүн эсеби (глинозем, сода, поташ, кремнийдин кош кычкылы, цемент) процесстин эффективдүү экендигин аныктайт. Ушул жагдайларды эске алып, Сандык нефелин кен жатагынын химиялык матрицасы түзүлүп, температуранын кеңири маанисинде нефелиндин акиташ чөйрөсүндө ажыроосу термодинамикалык моделдештирилди. Көп компоненттүү татаал нефелин-акиташ системасынын физика-химиялык жана термодинамикалык параметрлери эсептелди. Системанын максималдуу энтропиясында негизги компоненттердин, активдүү бөлүкчөлөрдүн жана конденсирленген фазалардын концентрациялык таралышы белгиленди. Нефелиндин курамында азыктарды камтыган заттардын пайда болушу жана алардын өз ара айланыштарынын температуралык чектери аныкталды.

Ачкыч сөздөр: нефелиндик зат, акиташ, термодинамикалык моделдештирүү, энтропия.

Annotation. Sintering of nepheline raw materials with limestone is considered a highly efficient production due to an integrated approach, constant expansion of the range and improvement of the quality of the manufactured products: alumina, soda, potash, white soot and cement. Taking these circumstances into account, a chemical matrix of nepheline raw materials from the Sandyk deposit was compiled and thermodynamic modeling of its destruction with limestone was carried out over wide temperature change ranges. Physicochemical and thermodynamic parameters of the multicomponent system: nepheline-limestone were calculated. The concentration distribution of the main components, active particles and condensed phases at the maximum entropy of the system was established. Temperature limits for the formation and transformation of efficient containing substances of nepheline were revealed.

Keywords: nepheline raw materials, limestone, thermodynamic modeling, entropy.

Введение. Известно, что основным источником получения глинозема в мировой практике являются бокситы, на основе которых получается алюминий [1]: Китай – 86,5 млн.т.Аl; Австралия – 81,7 млн.т.Аl; Россия

– 36,0 млн.т.Аl; Бразилия – 30,7 млн.т.Аl; Гвинея – 19,7 млн.т.Аl; Индия – 15 млн.т.Аl. В Кыргызской Республике тоже были проведены геологические исследования и выявлены около 30 месторождений бокситов

(Катранбаши, Караглинское, Кара-Кия Сай, Бедек) и бокситоподобных рудопоявлений (Охнинское, Андаракское, Шаршаринское, Кокчетауское, Шадимирское, Акшагильское, Сохское и др.). Однако, все эти месторождения считаются не промышленными из-за низкого качества сырья и незначительности их запасов [2, 3].

В плане производства глинозема в республике представляет интерес каолиновое Согутинское месторождение, находящееся в Иссык-Кульской области, которое представлено белым (SiO_2 – 49,88%, Al_2O_3 – 35,65%) и розовым (SiO_2 – 57,21%, Al_2O_3 – 30,56%) песчаником [3, 4]. Они легко обогащаются путем отмучивания, поэтому системно изучается свойство местных каолинов с целью установления сорбционных их характеристик, и предусмотрено использование сульфатных солей на их основе в качестве коагулянтов при очистке сточных вод [5-8].

В связи с изложенным выше следует подчеркнуть, что по сравнению с бокситом, нефелиновые руды и их концентраты характеризуются относительно небольшим содержанием оксида алюминия (до 30%) при высоком содержании кремнезема (более 40%). Например, нефелиновые сиениты Баткенского района имеют следующие составы [2]: Зарделек, %: Al_2O_3 /20,32-24,60/; SiO_2 /48,95-55,53/; Fe_2O_3 /0,49-3,43/; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ /0,8-1,0/; Ходжаачкан, %: Al_2O_3 /23,29/; SiO_2 /56,2/; FeO /1,8/; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ /14,94/; Кульп, %: Al_2O_3 /22,64/; SiO_2 /53,76/; FeO /4,41/; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ /13,91/. Нефелиновые сиениты Жумгалского района, Сандык (%): Al_2O_3 /18,63/; SiO_2 /52,91/; FeO /2,16/; Fe_2O_3 /1,25/; Na_2O /4,1/; K_2O /15,0/; TiO_2 /0,56/; CaO /2,90/; MgO /0,97/; MnO /0,07/; SO_3 /0,1/; P_2O_5 /0,1/; ППП /1,33/ [9,10]. Однако, при комплексной переработке нефелинового сырья, рационально используются все его составляющие и наряду с глиноземом получают сода, поташ, белая сажа и высококачественный цемент [4, 11].

В процессе переработки нефелинового сырья в зависимости от его состава и свойств могут быть применены различные способы [9-11]: спекание с известняком, гидрохимические (щелочная, кислотная), электротермические. В основе спекание руды

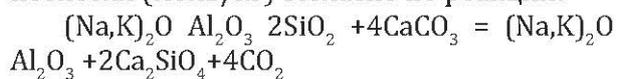
с известняком лежит перевод глинозема в алюминат кальция, а кремнезема в двух кальциевый силикат. При этом основным преимуществом кислотных способов перед щелочными является возможность вы-вода кремнезема в начале процесса. На практике используются еще кислотно-щелочные способы, состоящие из двух ветвей-кислотной и щелочной. В кислотной ветви обработкой руды раствором кислоты выводится кремнезем, из раствора соли алюминия выделяется сырой оксид алюминия, загрязненный соединениями железа. Последний перерабатывается на чистый глинозем щелочным способом Байера [11]. Основное преимущество кислотно-щелочных способов перед кислотными -устранение специальной операции очистки соли алюминия от соединений железа, основной недостаток - сложность технологической схемы [11]. Соответственно, разделение оксидов из нефелина обусловлено тщательным прогнозированием и подбором физико-химических, особенно термодинамических методов осуществления анализа процессов и доступных технологий [12].

Материалы и методы исследования.

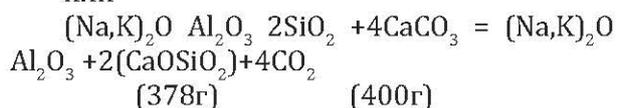
Процессы деструкции нефелина в соответствии с изложенными выше требует систематических научных исследований. При этом инструментальные исследования имеют высокую стоимость и являются далеко небезопасными. Расчетные методы термодинамического моделирования (ТДМ) процессов деструкции нефелина с использованием данных по их термодинамическим и теплофизическим свойствам приобретают практическую значимость, поскольку позволяют получить необходимые сведения о составе сложной нефелиновой системы с изменяющейся химической формулой в зависимости от места отбора пробы [4, 9, 10] $[\text{Na}_2\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$; $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$; $\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$; $\text{Na}_3\text{K}(\text{Si}_{0,56}\text{Al}_{0,44})_8\text{O}_{16}$], о формировании и поведении различных активных веществ и конденсированных фаз в широком интервале температуры. С учетом этих обстоятельств в расчетных экспериментах нами были рассмотрены нефелиновые сиениты с классической химической формулой: $(\text{Na,K})_2\text{O}$ -

$Al_2O_3-2SiO_2$. При этом методическую основу алгоритма расчетов составили возможность образования в равновесии газообразных, конденсированных веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов, чистых фаз и их растворов. Расчеты проведены при максимуме энтропии системы. В качестве неизвестных принимались логарифмы числа молей индивидуальных веществ и весовая доля химических элементов в смеси (M_c) и задача сводилась к определению фрагментов M_c методом итераций («Терра», Трусов Б.Г.) [13].

Заданы элементные составы нефелина ($Na_2K_2Al_2Si_2O_9$) и известняка ($CaCO_3$) на 1кг носителя (моль/кг) согласно по реакции:



или



Элементный состав системы включил, моль/кг: Na – 2,569, O – 26,969, K – 2,569, Al – 2,569, Si – 2,569, Ca – 5,136, C – 5,136. Температурные пределы деструкции твердой фазы изменялись в пределах от 298 до 3000 К с учетом температуры плавления исходных твердых веществ (Т, К) [14]: Al_2O_3 – 2072; SiO_2 – 1710; CaO – 2572, $CaCO_3$ – 1098, Na_2O – 1405, K_2O – 1013. Рассчитаны равновесные концентрации компонентов, активных частиц и конденсированных фаз, а также определены физико-химические (C^* , C_p , L_t , Pr , Mu , T , z) и термодинамические (S, I, U) параметры процесса при $P=0,1$ МПа. В работе представлены табличные (табл.1) и графические (рис.1-3) данные при начальных (300 К) и оптимальных (1450-1650 К температурах деструкции нефелинового сырья с известняком.

Результаты и их обсуждение. В основе спекание руды с известняком лежит перевод

глинозема в алюминат кальция ($mCaO \ nAl_2O_3$), а кремнезема – в двух кальциевый силикат (Ca_2SiO_4) [11]. Соответственно, результаты деструкции системы нефелин-известняк в зависимости от температуры (рис.1-4) показали предельные точки образования максимальных количеств конденсированных фаз типа (моль/кг): $CaCO_3(c)$ – 3,8519 (Т=300-1150 К), CaO(c) – 3.197 (Т=1200-1900 К), $CaSiO_3(c)$ – 2,5689 (Т=300-700 К; 2600-3000 К), $Ca_3Si_2O_7(c)$ – 1,2844 (Т=300-2600 К), $KAlO_2(c)$ – 2,5575 (Т=1150-1650 К), $K_2CO_3(c)$ – 1,2844 (Т=300-1500 К), $Na_2SiO_3(c)$ – 1,2844 (Т= 300 К; 1650-2250 К), $Na_2CO_3(c)$ – 1,2844 (Т=3550-900 К), $NaAlO_2(c)$ – 2,5689 (Т=950-2450 К), $Al_2O_3(c)$ – 1,2844 (Т=300-850 К), C(c) – $0,24 \times 10^{-4}$ (Т=300-700 К), на основе которых могут быть получены химические продукты: глинозем (Al_2O_3), сода (Na_2CO_3), поташ (K_2CO_3), белая сажа (SiO_2) и цемент.

Следует отметить, что конденсированный диоксид кремния при прямой деструкции нефелина не образуется, но он появляется при карбонизации метасиликата натрия $Na_2SiO_3(c)$ с диоксидом углерода обусловленного за счет спекания нефелинового концентрата с $CaCO_3$.

Конденсированный углерод образуется в незначительных количествах ($C(c) = 0.24 \times 10^{-4}$ моль/кг) в пределах 300-700К и расходуется в основном на образование оксидов углерода (CO , CO_2). Из полученных результатов видно, что в процессе деструкции системы нефелин-известняк образуются CaO(c), $Al_2O_3(c)$, а также суммация $CaSiO_3(c)$ и $Ca_3Si_2O_7(c)$. Известь CaO(c) направляется на процессы обескремнивание метасиликата натрия. При выщелачивании спека образуются алюминатные растворы с выраженным концентрационным (C^* , моль/кг) распределением $NaAlO_2(c)$ и $KAlO_2(c)$ (рис.1).

Таблица 1. Физико-химические и концентрационные параметры системы: нефелин-известняк при различных температурах (Т, К) ее спекания

T=300 K	Lt=0	Mu=0	S=0,87505	I=-12383,1
U=-12383,1	M=8,98964	Cp=0,826517	z=1	Pr=0
концентрационное распределение, C [*] , моль/кг				
C(c) = 0,19e-4	Al₂O₃(c) = 1,28	CaCO₃(c) = 3,85	CaSiO₃(c) = 1,2	
Ca₃Si₂O₇(c) = 0,1e-4	Na₂SiO₃(c) = 1,2	K₂CO₃(c) = 1,28	-	
T=1450 K	Lt=0,0939554	z=0,830436	S=3,22255	I=-10493,2
U=-10530,1	M=10,2734	Cp=1,25369	Mu=0,0000513	Pr=0,721931
концентрационное распределение, C [*] , моль/кг				
O = 0,84e-7	O ₂ = 0,45e-3	CO = 0,79e-3	CO₂ = 3,85	
CaO(c) = 1,28	Ca₃Si₂O₇(c) = 1,28	Na = 0,98e-4	Na ₂ = 0,72e-10	
NaO = 0,45e-7	Na₂O = 0,43e-9	Na ₂ O ₂ = 0,1e-11	NaAlO₂(c) = 2,56	
K = 0,15e-3	KO = 0,93e-6	K₂O = 0,52e-8	K ₂ O ₂ = 0,74e-10	
K₂CO₃(c) = 1,2	K ₂ CO ₃ = 0,19e-3	KAlO₂(c) = 0,9e-4	NaK = 0,16e-9	
Na ⁺ = 0,38e-11	K ⁺ = 0,35e-8	-	-	
T=1650 K	M=12,8427	z=0,773243	S=3,56047	I=-9955,96
Mu=0,0000558	Lt=0,103847	Cp=1,22843	Pr=0,722236	U=-10013,9
концентрационное распределение, C [*] , моль/кг				
O = 0,45e-5	O ₂ = 0,005	CO = 0,005	CO₂ = 5,12	
CaO(c) = 3,19	CaO = 0,12e-11	Ca₃Si₂O₇(c) = 0,64	Na = 0,005	
Na ₂ = 0,77e-7	NaO = 0,78e-5	Na₂O = 0,31e-6	Na ₂ O ₂ = 0,11e-8	
Na₂SiO₃(c) = 1,27	NaAlO₂(c) = 0,01	K = 0,006	KO = 0,97e-4	
K₂O = 0,17e-5	K ₂ O ₂ = 0,25e-7	K₂CO₃ = 0,002	KAlO₂(c) = 2,55	
NaK = 0,15e-6	-	O ⁻ = 0,62e-10	O ₂ ⁻ = 0,17e-9	
Na ⁺ = 0,79e-9	K ⁺ = 0,26e-6	K ₂ ⁺ = 0,10e-9	K ₂ O ⁺ = 0,15e-9	

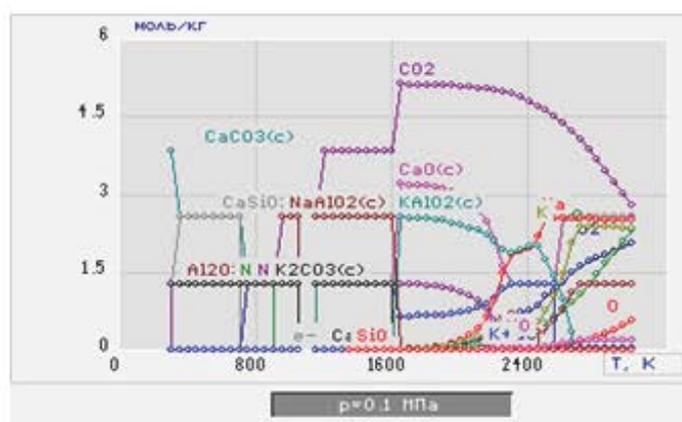


Рис.1. Деструкция системы нефелин-известняк в зависимости от температуры (Т, К)

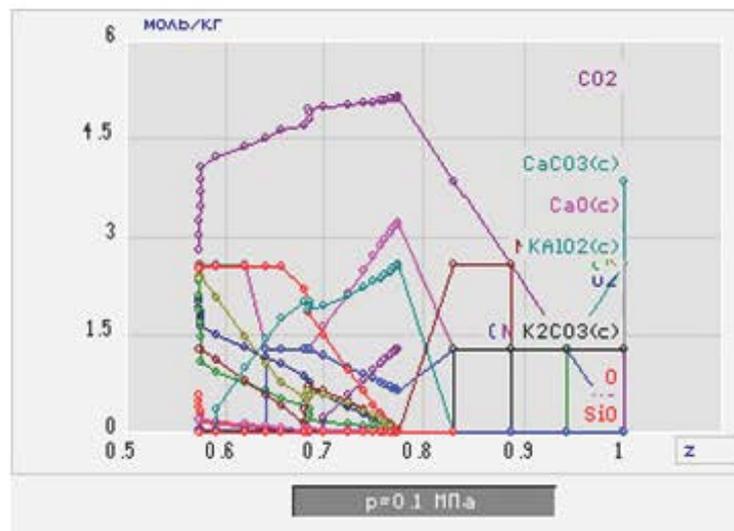


Рис.2. Изменение массовой доли (z) конденсированных фаз в системе нефелин-известняк

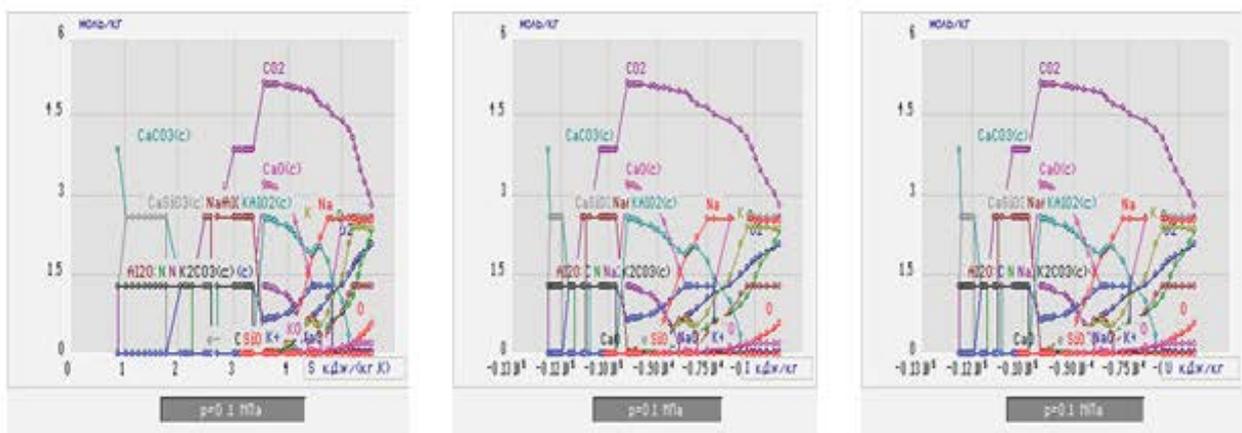


Рис.3. Изменение энтропии (S), энтальпии(I), внутренней энергии(U) в системе нефелин-известняк

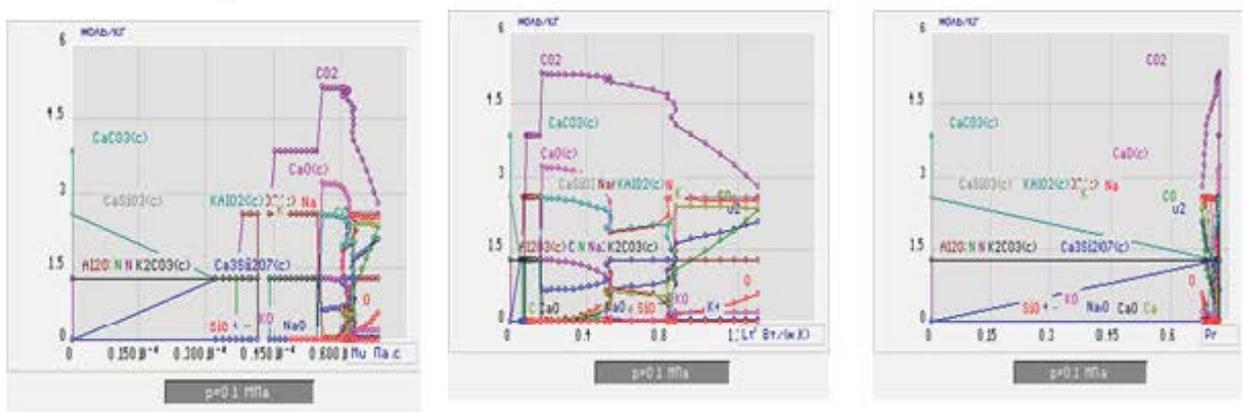


Рис.4. Изменение динамической вязкости (Mu), теплопроводности (Lt), числа Прандтля (Pr) в системе нефелин-известняк

Изменение массовой доли конденсированных фаз (рис.2), энтропии, энтальпии, внутренней энергии (рис.3), динамической вязкости, теплопроводности, числа Прандтля (рис.4) в системе нефелин-известняк свидетельствует о термическом выщелачивании с изменением теплоемкости (Ср) исходной нефелиновой руды с направленным синтезом, т.е. образованием концентрата (I) и смешанных щелочно-кремнеземистых растворов (II) (табл.1). Дальнейшая переработка полученной смеси (I и II) приводит к получению: (I) цемента, белой сажи, глинозема; (II) соды, поташа и кремнезема. В связи с этим, в работе [4] ранее представлена принципиальная технологическая схема комплексной переработки нефелинового сырья Сандыкского месторождения (рис.5) со средним химическим составом штучных проб нефелино-сиенитных пород (%): Al_2O_3 /22,2/; SiO_2 /58,18/; Fe_2O_3 /3,55/; Na_2O

/3,96/; K_2O /6,05/; CaO /1,94/; MgO /1,41/; $ППП+H_2O$ /2,32/[4], а в более поздних работах в основной пробе нефелинового сиенита отмечено содержание: FeO , TiO_2 , MnO , SO_3 и P_2O_5 [9]; Rb , Ga , V_2O_5 [14]; а в настоящей работе следы: Cu , Mn , Zn , Pb , As , Ni , Cd , Mo , Sb , Co , Bi в пределах 0,001%. Соответственно полученные результаты термодинамического моделирования полезны при оптимизации научно-теоретических основ ранее разработанных технологических схем переработки нефелина [4] путем выщелачивания руды оборотным раствором шихты [15]; подготовкой нефелиново-известняково-содовой шихты [16]; с добавлением отходов шамотного огнеупорного кирпича, т.е. глиноземсодержащей добавки, а именно шлака, являющийся отходом процесса алюминотермического производства [18-20], а также путем изменения состава шихты с добавлением золы местного бурого угля (рис.5).

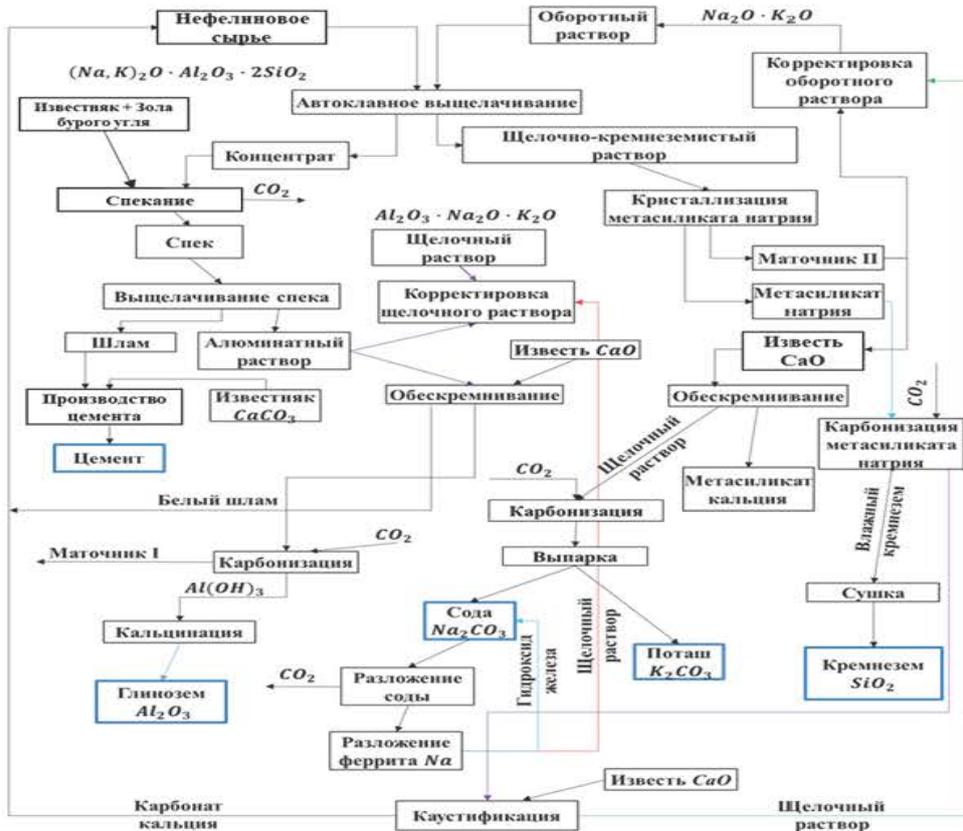


Рис.5. Принципиальная технологическая схема комплексной переработки нефелинового сырья Сандыкского месторождения

Указанные выше задачи направлены в снижении расхода известняка при приготовлении шихты и уменьшении содержания оксида кремния SiO_2 в алюминатном растворе, а также в использовании в качестве топлива более доступного, следовательно, более дешевого ископаемого бурого угля.

Выводы

1. Термодинамическое моделирование процесса термодеструкции нефелина в среде известняка выявило образование различных конденсированных фаз типа: $\text{CaCO}_3(\text{c})$, $\text{CaO}(\text{c})$, $\text{CaSiO}_3(\text{c})$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{c})$, $\text{KAlO}_2(\text{c})$, $\text{K}_2\text{CO}_3(\text{c})$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{c})$, $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{c})$, $\text{NaAlO}_2(\text{c})$, $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c})$, $\text{C}(\text{c})$.

2. Изменение концентрационных, физико-химических и термодинамических параметров системы нефелин-известняк свидетельствует о термическом выщелачивании исходной нефелиновой руды с образованием концентрата (I) и смешанных щелочно-кремнеземистых растворов (II), и на их основе химических продуктов: цемента, белой сажи, глинозема, соды и поташа.

3. Расчетные результаты полезны при оптимизации научно-теоретических основ технологических схем, составленных с учетом среднего химического состава опытных проб нефелино-сиенитных пород Сандыкского месторождения.

Литература

1. Боксит. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Боксит>
2. Реестр месторождений и проявлений полезных ископаемых <https://www.geology.kg/wp-content/uploads/2024/01/Reestr-PI.pdf>
3. Данциг С.Л., Заболотская Н.К. Отчет по теме №1-1961г «Изучение вещественного состава и технологическое опробование 4-х проб нефелиновых пород Сандыкского месторождения. Ленинград, 1961, Фонды госгеолагентства, 4823
4. Фридман Я.Д., Клесов Н., Лобанов В. Отчет по научно-исследовательской работе на тему: Физико-химическое изучение Сандыкских нефелино-сиенитовых пород и технологии их переработки (сводный отчет за 1957-1961 г.г.). г. Фрунзе, 1961, Фонды госгеолагентства, 4823
5. Маймеков З.К., Шаршенбек к. А., Самбаева Д.А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М. Физико-химические и термодинамические характеристики каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения при различных температурах ее деструкции. Известия НАН КР, 2023. №7. с.32-38
6. Wang H., Li C., Peng Z., & Zhang S. Characterization and thermal behavior of kaolin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 105(1), 157–160. doi:10.1007/s10973-011-1385-0
7. Shahverdi-Shahraki K., Ghosh T., Mahajan K., Ajji A., & Carreau P. J. Effect of dry grinding on chemically modified kaolin. *Applied Clay Science*, 2015, 105-106, 100–106. doi:10.1016/j.clay.2014.12.026
8. Yanik G. Mineralogical, crystallographic and technological characteristics of Yaylayolu kaolin (Kütahya, Turkey). *Clay Minerals*, 2011, 46(03), 397–410. doi:10.1180/claymin.2011.046.3.397
9. Мурзубраимов Б.М., Жаснакунов Ж.К., Сатыбалдиев А.С. Нефелиновые породы Кыргызстана и их переработка. КГУ им. И.Арабаева, Бишкек, 2024, 128с.
10. Садыралиева У.Ж. Кандидатская диссертация. Разработка комплексной технологии переработки нефелиновых сиенитов месторождения Сандык. 2019, Бишкек, 125 с.
11. Матвеев В.А., Майоров Д.В., Веляев Ю.О., Захаров В.И. Сернокислотные способы комплексной переработки нефелинсодержащего сырья. Апатиты: КНЦ, 2017, 155 с.
12. Meshalkin V.P. Current Theoretical and Applied Research on Energy- and Resource-Saving Highly Reliable Chemical Process Systems Engineering // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V.55. No4. p.563-587. [Мешалкин В.П. Актуальные теоретические и прикладные исследования по инжинирингу энергоресурсосберегающих высоконадежных химико-технологических систем // Теор. осн. хим. технол. 2021. Т. 55. № 4. с. 399-428.]

13. Трусов Б.Г., Бадрак С.А., Туров В.П., Барышевская И.И. Автоматизированная система термодинамических данных и расчетов равновесных состояний. Математические методы химической термодинамики. 1982. с. 213-219.

14. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Мн.: Современная школа, 2005. 608 с.

15. Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема. М.: Металлургия, 1978. с.184-193

16. Абрамов В.Я., Алексеев А.И., Бадалянц Х.А. Комплексная переработка нефелино-апатитового сырья. М.: Металлургия, 1990, с.36-46

17. Патент РФ №2225357, кл.С01F 7/04, заявл. 25.09.2002, опубл. 10.03.2004

18. Патент РФ №2259945, кл. С01F 7/38, опубл. 10.07.2005.

19. Рекомендации по проектированию золошлакоотвалов тепловых электрических станций: П 26-85. / ВНИИГ, Л., 1986. с.74-76.

20. Михайленко С.А., Масальский Г.Б., Капустин П.Г. и др. Обоснование возможности организации заданного температурного режима в печах спекания ОАО «РУСАЛ Ачинск» с использованием бурых углей Канско-Ачинского бассейна. ООО «Красноярский котельный завод», 2010.