УДК 669.712

В.М.СИЗЯКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПОСОБА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВ

Рассмотрены основные направления усовершенствования технологии комплексной переработки нефелинов на глинозем и попутные продукты. Дана оценка перспективного «сухого» способа производства глинозема и портландцемента; рассмотрено решение проблемы разделения Al (III) и Si (IV) и получения крупнозернистого глинозема высших марок; показана перспектива расширения ассортимента выпускаемой продукции; приведен сравнительный анализ стоимостных характеристик переработки апатитового и нефелинового концентратов, свидетельствующий о существенно более высоком потенциале нефелинового сырья.

The basic directions of improvement of complex processing nepheline on alumina and passing products are considered. The estimation of a perspective «dry» way of manufacture of alumina and portland cement, problems of division of aluminium and silicon and reception of coarse-grained alumina of the top qualities is given, the prospect of expansion of assortment of let out production is shown, the comparative analysis of cost characteristics the concentrates of apatite and nepheline, testifying about higher potential raw material of nepheline is resulted.

У отечественной алюминиевой промышленности необычный путь развития, и во многом это определяется известной ситуацией в сырьевом секторе.

В мировой алюминиевой промышленности основным сырьем для производства глинозема служат высококачественные бокситы, перерабатываемые по способу Байера.

Развитие глиноземного производства в России и странах СНГ на территории бывшего СССР было ориентировано в основном на использование собственной сырьевой базы. Вследствие ограниченных запасов байеровских бокситов в сферу промышленного производства широко вовлекалось небокситовое высококремнистое сырье – нефелины. Усилиями отечественных ученых и инженеров были достигнуты выдающиеся результаты по созданию эффективных схем комплексной переработки, которые получили мировое признание. Доля глинозема из небокситового сырья в балансе алюминиевой промышленности бывшего СССР составляла 20 %, в настоящее время в России она возросла до 40 %.

В результате глубокой интеграции науки и производства способы комплексной переработки нефелинов получили дальнейшее развитие и существенно усовершенствованы [7, 8, 10].

Сущность способа комплексной переработки нефелинов заключается в спекании сырой руды или концентрата с известняком во вращающихся печах при 1200-1300 °С (рис.1).

Химические превращения при спекании протекают в основном в твердофазном состоянии и описываются реакцией

$$(Na,K)_2O\cdot Al_2O_3\cdot 2SiO_2 + 4CaCO_3 =$$

$$= (Na,K)_2O\cdot Al_2O_3 + 2(2CaO\cdot SiO_2) + 4CO_2.$$

Полученный спек выщелачивают оборотными щелочно-алюминатными растворами. При этом растворимые компоненты спека – алюминаты щелочных металлов переходят в раствор, а в твердой фазе остается малорастворимый двухкальциевый силикат (нефелиновый шлам), перерабатываемый на портландцемент. Алюминатные растворы,

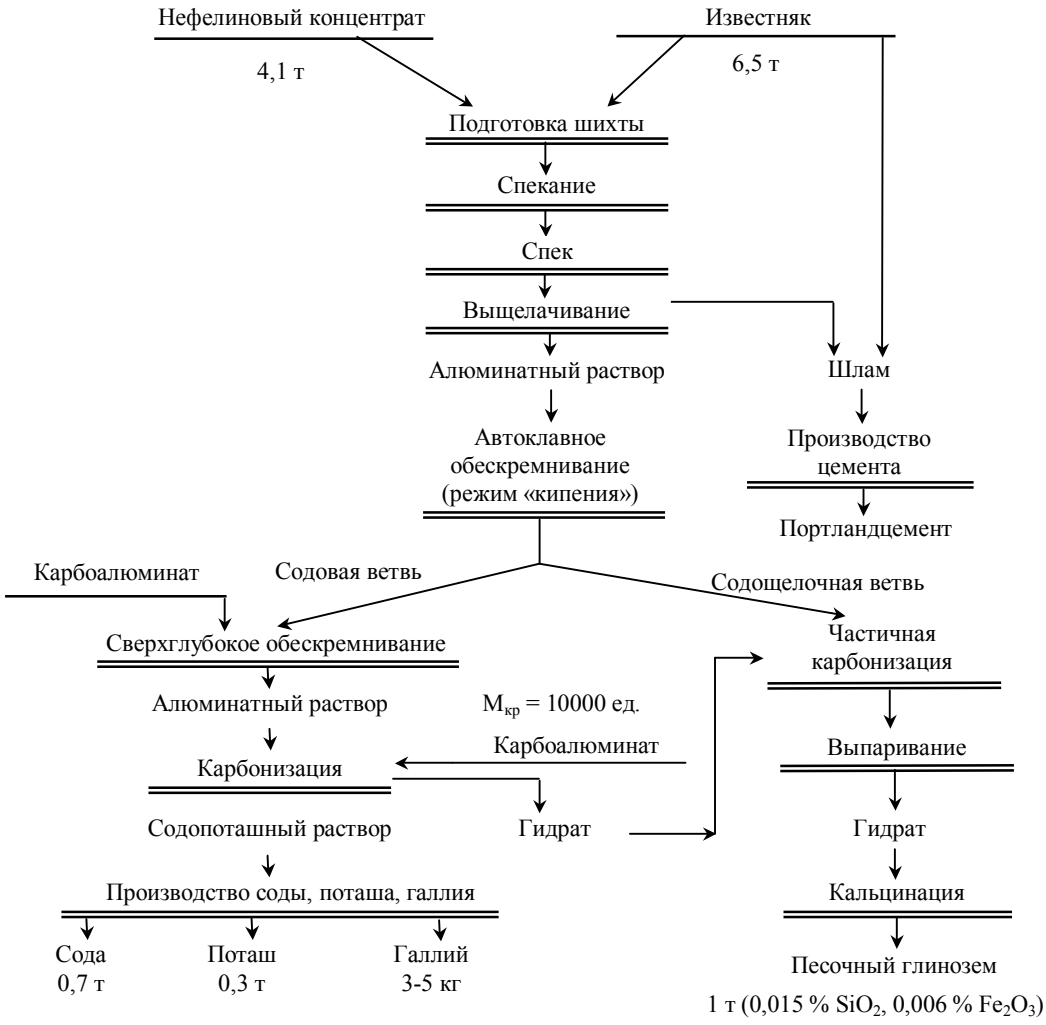


Рис.1. Усовершенствованный способ комплексной переработки нефелинов

существенно загрязненные SiO_2 (вследствие частичного разложения двухкальциевого силиката), обескремниваются и перерабатываются методом карбонизации и декомпозиции на гидроксид алюминия и карбонатные щелока. Гидроксид алюминия кальцинируется и получается глинозем, карбонатные растворы подвергаются политермическому выпариванию с выделением соды, поташа и галлия. Все компоненты исходного сырья используются полностью без отходов. В этом заключается уникальность созданной крупномасштабной промышленной технологии переработки нефелинов. Способ комплексной переработки нефелинов реализован в России на трех предприятиях – Волховском алюминиевом заводе (в стадии реконструкции), Ачинском глиноземном комбинате и филиале «Пикалевский глиноземный завод – СУАЛ» («ПГЗ – СУАЛ»).

В настоящее время в условиях экономики переходного периода наиболее устойчиво и эффективно из трех перечисленных заводов работает «ПГЗ – СУАЛ». Надеемся, что «противостояние» владельцев сырья – компании «ФосАгро» и переработчиков этого сырья – холдинга «СУАЛ», когда стороны в течение полугода не могли договориться о цене на кольский нефелиновый концентрат и довели ситуацию до остановки нефелинового производства, забудется и навсегда уйдет в историю (без повторений).

При переработке 4,1 т нефелинового концентрата с известняком получается 1 т глинозема, 0,8 т соды, 0,3 т поташа, 10 т цемента. Эксплуатационные расходы на про-

изводство продукции из нефелинового сырья значительно ниже затрат на раздельное производство этих продуктов из традиционного сырья по общепринятым технологиям.

Исходя из задач сегодняшнего дня и обозримой перспективы, рассмотрим состояние и направления дальнейшего развития комплексной переработки нефелинов в условиях рыночной экономики.

1. Повышение комплексности использования нефелинового сырья. При существующей безотходной технологии комплексной переработки нефелинов номенклатура и соотношение выпускаемой продукции не являются оптимальными. Возникает довольно сложная ситуация в связи с диспропорцией между выпуском глинозема и портландцемента. Как упоминалось выше, на 1 т глинозема производится 10 т портландцемента, в основном марки 400. При крупномасштабном производстве глинозема (а малые масштабы просто невыгодны) приходится постоянно сталкиваться с проблемой сбыта цемента. Для разрешения этих острых вопросов существуют два пути:

1) значительное расширение ассортимента выпускаемых марок цемента;

2) использование части нефелинового шлама вне цементного производства.

Работы по первому направлению связаны с организацией производства особо быстротвердеющих цементов для монолитного строительства, производства безусадочных, саморасширяющихся, напрягающих цементов и др. на основе алюминатных добавок (промышленных продуктов и белых шламов глиноземного производства). Все эти технологии вполне реальны, по ним проведены глубокие исследования с обоснованием физико-химических закономерностей основных процессов, а также выполнены крупные опытно-промышленные проверки.

Работы по второму направлению ведутся в области технологии строительных материалов высокотемпературного синтеза (стеклокристаллические материалы, керамика), технологии огнеупорных и теплоизоляционных материалов, технологии высокодисперсных наполнителей и др. Здесь наиболее подготовлен к внедрению способ производства высокодисперсных наполнителей, который один может взять на себя 20 % вырабатываемого нефелинового шлама.

Значительным резервом в повышении эффективности комплексной переработки нефелинов являются новые направления использования гидрогратановых шламов сверхглубокого обескремнивания и продуктов синтеза карбоалюминатных соединений (технологии получения литейных цементов, тампонажных, быстротвердеющих цементов, герметиков, особо чистых высокоглиноземистых цементов, композиционных материалов и др.). Технологии, основанные на алюминатах кальция и их производных, подготовлены к промышленному внедрению. В настоящее время ведутся работы по опробованию новых продуктов у потребителей [2, 11, 12].

В последнее время выполнен комплекс исследований по созданию и внедрению технологии получения галлия особой чистоты 99,99999 («семь девяток») как попутного продукта при переработке поташных маточников.

2. Снижение энергетических затрат и уменьшение пылегазовыбросов. В настоящее время шихтоподготовка глиноземных шихт осуществляется мокрым способом путем размола исходных компонентов в трубных мельницах на слабой промышленной воде при влажности пульпы 30 % с последующей корректировкой шихты по химическому составу. Пульпа подается наливом в длинные вращающиеся печи спекания диаметром 4×150 м. Мокрая шихтоподготовка ведет к повышенному расходу топлива (1,4 т на 1 т глинозема) и ограничивает мощность печных агрегатов. Затраты на топливо составляют существенную часть в себестоимости продукции.

С целью радикального снижения расхода топлива разработан полусухой способ спекания нефелиновых шихт. Он включает традиционную мокрую шихтоподготовку, фильтрацию пульпы со снижением влажности с 30 до 15 %. Шихта сушится и измельчается в мельнице-сушилке, проходит интенсивную термообработку в системе циклонов взвешенного слоя и в декарбонизаторе до 900 °С, что ис-

ключает образование настылей, процесс спекания завершается в короткой вращающейся печи диаметром 4 × 70 м. Это обеспечивает снижение удельного расхода топлива на 20 % и увеличение мощности печного агрегата в 3 раза. Способ прошел успешную проверку на отечественных пилотных установках и в опытно-промышленном масштабе в компании «Onoda cement» (Япония).

Совместно с инофирмами изучается полусухой способ обжига цементной шихты. Расчетная производительность одной технологической линии в составе четырехступенчатой системы циклонов с кальцинатором и печи диаметром 4,5 × 70 м составит 5000 т/сут вместо 1500 т/сут по существующему мокрому способу, расход топлива (газа) уменьшится с 1100 ккал/кг клинкера до 750 ккал/кг.

Большой комплекс работ выполнен по совершенствованию выщелачивания нефелиновых спеков. На переделе внедрены классификаторы выщелоченной пульпы – вертикальные аппараты проф. В.Я.Абрамова. Классификация нефелинового шлама обеспечила внедрение передовой технологии сгущения и промывки шламов с добавками синтетических флокулянтов (Алклар 500, 600), что позволило коренным образом преобразовать технологию, исключив из схемы старые фильтры – сгустители и тяжелый ручной труд по их обслуживанию [6].

Проведена реконструкция передела автоклавного обескремнивания по способу заслуженного изобретателя РФ В.М.Тыртышного [15] с использованием режима «кипения», что позволило на 28 % снизить расход пара на переделе. Под руководством В.М.Тыртышного усовершенствована технология концентрирующей выпарки содопоташных растворов с использованием двухходовых аппаратов и аппаратов с падающей пленкой, что позволило на 19 % снизить расход пара на переделе [2].

Новые технологии спекания, обжига, выщелачивания, обескремнивания и выпарки наряду со снижением энергетических затрат позволяют решать экологические проблемы по значительному уменьшению пылегазовыбросов и тепловыделений.

3. Повышение качества глинозема и гидрата. До недавнего времени глиноземные заводы, перерабатывающие нефелиновое сырье, выпускали глинозем с позиций современных требований невысокого качества, загрязненный кремнеземом (0,08-0,2 % SiO_2). В условиях рынка такой глинозем просто не нашел бы сбыта. Поэтому проблема получения глинозема высших марок является ключевой в способах комплексной переработки нефелинового сырья.

Действительно, в исходном нефелине содержится 28-29 % Al_2O_3 и 43-44 % SiO_2, а в товарный продукт необходимо перевести чистый оксид алюминия с примесью SiO_2 на уровне 0,02 %.

Физико-химические аспекты традиционной технологии обескремнивания алюминатных растворов отражены в работах [1, 3, 5, 6, 9].

Толчком к развитию принципиально новых теоретических представлений о процессах полного разделения алюминия (III) и кремния (IV) в щелочно-алюминатных системах послужили наши исследования частных разрезов многокомпонентной системы Al_2O_3-Na_2O-CaO-SO_2-CO_2-SO_3-H_2O и механизма кристаллизации твердых растворов ряда C_3AH_6-C_3AS_3 (условные обозначения: C – CaO; A – Al_2O_3; H – H_2O; S – SiO_2) [9, 11, 13, 14].

Новая теория базируется на развитии учения о строении алюминатных растворов и комплексе исследований физико-химических свойств сверхактивных ионообменников – гидрокарбоалюминатов кальция (ГКАК) – $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}mCO_2{\cdot}11H_2O$, проявляющих в определенных условиях уникальную способность к полному осаждению SiO_2 из алюминатных растворов. Сущность новой теории заключается в следующем. Для полного разделения гидроксоформ алюминия (III) и кремния (IV) в алюминатных растворах на основе процесса осаждения SiO_2 в составе твердых растворов – гидрогранатов кальция необходимо обеспечить соизмеримость скоростей построения основы (C_3AH_6) твердого раствора и непосредственно образования самого твердого раствора путем изоморфного обмена $4(OH^-) = [SiO_4^{4-}]$. Это главное усло-

вие сверхглубокого обескремнивания достигается достаточно медленной перестройкой гексагональной неустойчивой решетки карбоалюмината в устойчивую кубическую C_3AH_6 через раствор с образованием промежуточного активного гидроксокомплекса $C_xA_yH_z$ со структурой, подобной C_3AH_6.

Выполненные теоретические разработки легли в основу эффективной технологии сверхглубокого обескремнивания, осуществляемой по патенту Российской Федерации № 1556525 и внедренной в филиале «ПГЗ – СУАЛ».

В результате получаются качественно новые алюминатные растворы с кремниевым модулем 8000-10000 и выше, т.е. достигается полное разделение ионов алюминия и кремния, при этом расход извести по сравнению со старой технологией сокращен в 3 раза. Полученные алюминатные растворы перерабатываются на гидроксид алюминия и глинозем, примесь SiO_2 не превышает 0,015 %. Одновременно за счет активной высокоразвитой поверхности ГКАК содержание железа снижено в 1,7 раза и отвечает концентрации 0,006 % Fe_2O_3.

Таким образом, в филиале «ПГЗ – СУАЛ» получают самый чистый по химическому составу гидрат и металлургический глинозем, причем продукты отличаются повышенной белизной. Получение химически чистого глинозема создало одновременно предпосылки для улучшения его физических свойств.

Сверхглубокое обескремнивание и снижение температуры карбонизации дают хороший эффект по укрупнению и повышению прочности кристаллов гидроксида алюминия и глинозема, возрастанию активности их поверхностей. В результате исследований установлено влияние микродобавок соединений щелочно-земельных металлов на процесс укрупнения гидроксида алюминия. Под их воздействием выход мелких частичек коллоидных размеров заметно уменьшается. Поэтому массовая кристаллизация гидрата протекает в основном без участия псевдокристаллических алюмокарбонатных структур ($Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2CO_2{\cdot}2H_2O$) на основе роста сферолитов гиббсита и их агрегирования с минимальным выходом пылящих фракций.

По своим физическим свойствам полученный глинозем приближается по качеству к известному глинозему песочного типа фирмы «Алкоа», но превосходит его по химической чистоте.

С учетом новых разработок, которые подготовлены к промышленному внедрению (речь идет по существу о диверсификации производства), эффективность комплексной переработки нефелинов может возрасти в 1,5 раза.

4. Увеличение масштабов производства. Как известно, занимая третье место в мире по объемам производства первичного алюминия (после Китая и США) и имея практически неограниченные запасы небокситового сырья, Россия вынуждена импортировать половину металлургического глинозема. Ситуация еще более парадоксальна в силу того, что Россия, обладает уникальными технологиями комплексной переработки небокситового сырья. По нашим оценкам [16], за счет вовлечения в промышленную переработку кольского нефелинового концентрата Россия может увеличить производство глинозема на 1,5-1,7 млн т/год, т.е. практически на 50 % от текущего уровня.

В настоящее время основной производитель апатитового концентрата в России – ОАО «Апатит» холдинга «ФосАгро» в состоянии в длительной перспективе устойчиво обеспечивать производство и промышленно значимых объемов нефелинового концентрата. Сейчас в филиале «ПГЗ – СУАЛ» перерабатывается всего лишь 1 млн т/год нефелинового концентрата, доступный дополнительный объем, по данным ФосАгро [4], может составить 3,15 млн т. Основные характеристики предприятия по переработке указанного дополнительного объема нефелинового концентрата следующие:

Объем переработки нефелинового концентрата, млн т/год	3,15
Объем производства товарной продукции:	9,5
глинозема, млн т/год	0,79
цемента, млн т/год	7,9
соды, тыс.т/год	536
поташа, тыс.т/год	210
галлия, т/год	22

Коэффициент полезного использования нефелинового концентрата, %	100
Валовая выручка предприятия, млрд руб.	24
Объем налоговых отчислений в бюджеты всех уровней, млрд руб.	2,5
Стоимость импортзамещающей продукции, млрд руб.	7,9
Грузооборот предприятия, млн т/год	15
Численность, чел.	5000
Обеспеченность алюминийсодержащим сырьем, лет	>100
Удельные капитальные вложения в пересчете на 1 т Al_2O_3, руб./т	56000
Внутренняя норма прибыли (IRR), %	19,6
Дисконтированный срок окупаемости (с окончания строительства), год	7,9

Отличительной особенностью указанного проекта будет создание конкурентоспособной отечественной технологии, ориентированной на собственное минеральное сырье с длительной перспективой использования. Как нам известно, компания «ФосАгро» считает реализацию рассматриваемого проекта своей приоритетной задачей. Задача компании «ФосАгро» – организационное обеспечение проекта на всех стадиях его разработки, а также поиск и привлечение финансовых ресурсов, необходимых для увеличения объемов промышленной переработки кольского нефелинового концентрата.

На рис.2 приведен сравнительный анализ стоимостных характеристик переработки апатитового и нефелинового концентратов, свидетельствующий о существенно более высоком потенциале нефелинового сырья [4].

Выполненные маркетинговые исследования свидетельствуют об устойчивости баланса производства и потребления нефелинперерабатывающего комплекса. С вводом нового крупнотоннажного перерабатывающего комплекса существенно сократится зависимость российских производителей алюминия от импорта глинозема.

Увеличение объемов производства товарного нефелинового концентрата, по расчетам ФосАгро [4], позволит обеспечить соответствующую отдачу от добываемого минерального сырья и улучшить показатели ОАО «Апатит», прежде всего снизить себестоимость производимых товарных концентратов.

Основные показатели ОАО «Апатит» в текущем (числитель) и перспективном (знаменатель) состоянии следующие:

Объем добычи руды, млн т	28/28
Объем производства товарных концентратов, млн т:	9,85/13
апатитового	8,8/8,8
нефелинового	1,05/4,2
Выход товарной продукции, т/т	0,35/0,46
Валовая выручка, млрд руб.	13,5/17
Себестоимость товарных концентратов, %:	
апатитового	100/88
нефелинового	100/88
Численность	13900/14500
Выработка концентратов на 1-го работающего, т/чел. в год	709/897

На рис.3 приведены результаты модельного расчета себестоимости производства апатитового и нефелинового концентрата в зависимости от объемов производства последнего [4].

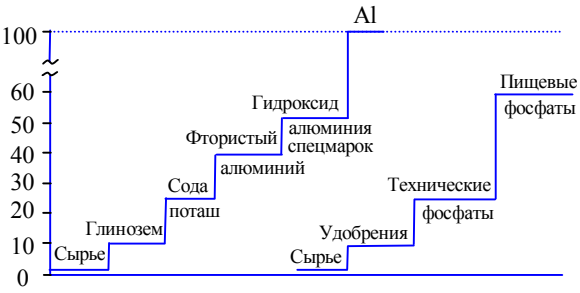


Рис.2. Мультипликаторы стоимости сырья и продуктов переработки нефелинового и апатитового концентратов

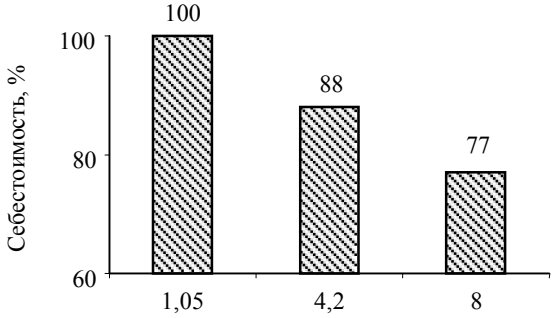


Рис.3. Сравнительные данные по себестоимости апатитового и нефелинового концентратов при различных объемах производства нефелина

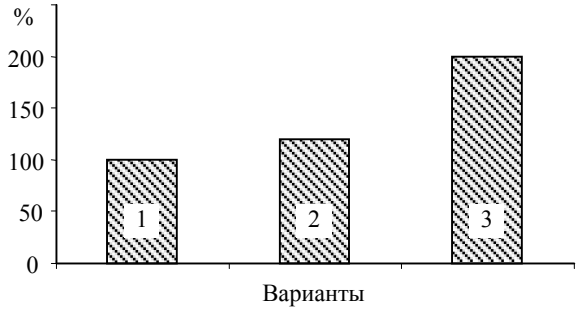


Рис.4. Сравнение приведенных затрат на производство товарных концентратов из комплексного и моносырья

Увеличение выхода товарных концентратов из комплексной апатито-нефелиновой руды позволит поддержать устойчивое развитие двух стратегически важных отраслей экономики:

- производство агрохимикатов, обеспечивающих восстановление плодородия почв, урожайность и качество сельхозкультур и соответственно продовольственную безопасность страны;
- производство алюминия, используемого в высокотехнологичных и оборонных секторах экономики.

По данным компании «ФосАгро», на рис.4 приведено сопоставление затрат на производство товарных концентратов при трех вариантах использования минерально-сырьевой базы: 1) извлечение полезных компонентов в виде товарных концентратов при переработке комплексного минерального сырья; 2) извлечение полезных компонентов с временным складированием хвостов; 3) производство концентратов на различных месторождениях. Таким образом, очевидна необходимость единовременного извлечения полезных компонентов из комплексного минерального сырья.

Такой подход полностью отвечает требованиям рационального и экономного недропользования. Комплексная переработка апатит-нефелиновых руд в расширенном масштабе на новой ступени инженерно-технологического развития продолжит прерванное по ряду причин направление советских времен (когда было намечено к строительству 5 крупных предприятий по переработке нефелинового концентрата) и на длительную перспективу обеспечит доступную сырьевую базу для производства стратегически важных продуктов, таких как глинозем, галлий, цемент, содопродукты, минеральные удобрения и др.

В заключение необходимо отметить, что промышленные предприятия по комплексной переработке апатито-нефелиновых руд обладают надежной устойчивостью в условиях рыночной экономики и имеют отличные перспективы для дальнейшего развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Краус И.П.* Растворимость гидроалюмосиликата натрия в щелочных растворах / И.П.Краус, В.А.Деревянкин, О.И.Кузнецов // Цветные металлы. 1968. № 7. С.43.

2. *Кузнецов А.А.* Опыт реконструкции Пикалевского объединения «Глинозем» / А.А.Кузнецов, В.М.Сизяков // Цветные металлы. 1999. № 9. С.74-79.

3. *Кузнецов С.И.* Физическая химия производства глинозема по способу Байера / С.И.Кузнецов, В.А.Деревянкин. М.: Металлургия, 1964. 353 с.

4. *Левин Б.В.* Комплексная переработка минерального сырья – стратегическое направление развития горно-перерабатывающего комплекса России // В трудах конференции «Современные проблемы природопользования». Апатиты: Наука, 2005. С.28-40.

5. *Манвелян М.Г.* Обескремнивание щелочных алюминатных растворов / М.Г.Манвелян, А.А.Ханамирова. Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1973. 300 с.

6. *Ни Л.П.* Комбинированные способы переработки низкокачественного алюминиевого сырья / Л.П.Ни, В.Л.Райзман. Алма-Ата: Наука, 1988. 254 с.

7. Производство глинозема / А.И.Лайнер, Н.И.Еремин, Ю.А.Лайнер, И.З.Певзнер. М.: Металлургия, 1978. 344 с.

8. *Певзнер И.З.* Обескремнивание алюминатных растворов / И.З.Певзнер, Н.А.Макаров. М.: Металлургия, 1974. 112 с.

9. *Пучков П.В.* Упругость пара алюминатных растворов при температуре 100-160 °С / П.В.Пучков, О.К.Чахальян // ЖПХ. 1976. Т.49. № 6. С.387-390.

10. *Сизяков В.М.* Состояние и проблемы развития алюминиевой промышленности России в условиях рыночной экономики // Цветные металлы. 2000. № 11-12. С.29-34.

11. *Сизяков В.М.* Повышение качества глинозема в попутной продукции при переработке нефелинов / В.М.Сизяков, В.И.Корнеев, В.В.Андреев. М.: Металлургия, 1986. 115 с.

12. *Сизяков В.М.* Термодинамика гидрокарбоалюмината кальция в щелочных растворах / В.М.Сизяков, А.Е.Исаков, И.А.Дибров // Цветные металлы. 2000. № 9. С.120-125.

13. *Сизяков В.М.* Теория и практика обескремнивания алюминатных растворов. М.: Цветметинформация, 1971. С.48-61.

14. *Сизяков В.М.* Синтез и физико-химические свойства гидрокарбоалюмината кальция / В.М.Сизяков, Г.М.Высоцкая, Д.И.Цеховольская // Цветные металлы. 1974. № 9. С.28-30.

15. *Тыртышный В.М.* Новый автоклавный процесс в режиме «кипения» / В.М.Тыртышный, Е.А.Исаков, А.Г. Жуков // Цветные металлы. 2000. № 1. С.23-25.

16. *Sisyakov V.M.* Current state and problems of alumina industry development in Russia. St.Petersburg. Travaux. ICSOBA. 2004. V.31. № 35. P.21-25.