

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**И.И. Шепелев, О.В. Пиляева, Е.Н. Еськова, Е.В. Кирюшин,
И.С. Стыглиц**

**Красноярский государственный аграрный университет,
Ачинский филиал Красноярского государственного аграрного университета**

Предложены инженерно-технические мероприятия по снижению вредного воздействия на окружающую природную среду от вращающихся печей спекания АО "РУСАЛ Ачинск". Разработано дополнительное техническое решение по доочистке отходящих газов печи спекания в скруббер-электрофильтрах и направлении очищенных газов на передел карбонизации глиноземного цеха, обеспечивающее снижение вредных выбросов в атмосферу до уровня предельно допустимой концентрации. Проведенные опытно-промышленные испытания предлагаемой технологии подтвердили, что кроме эффективной очистки отходящих газов печей спекания от неорганической пыли и диоксида углерода обеспечивается высокая степень разложения алюминатного раствора, необходимая для технологии получения глинозема.

Ключевые слова: экологический инжиниринг, печи спекания, электрофильтры, скруббер, карбонизация алюминатного раствора, мокрая очистка газов

Increase in Efficiency of Processes of Purification of Gases of Aluminous Production

I.I. Shepelev, O.V. Pilyaeva, E.N. Eskova, E.V. Kiryushin, I.S. Styglits

**Krasnoyarsk State Agrarian University, 660049 Krasnoyarsk, Russia,
Achinsk Branch of Krasnoyarsk State Agrarian University, 662150 Achinsk, Russia**

Technical actions for decrease in harmful effects on the surrounding environment from the rotating furnaces of agglomeration of JSC RUSAL Achinsk are offered. Additional technical solution on tertiary treatment of flue gases of the furnace of agglomeration in a scrubber electric precipitators and the direction of purified gases on repartition of carbonization of the aluminous shop is developed. The providing decrease in harmful emissions in the atmosphere to the level of maximum-permissible concentration. The carried-out trial tests of the offered technology confirmed that except effective purification of flue gases of furnaces of agglomeration of inorganic dust and carbon dioxide the high extent of decomposition of aluminatny solution necessary for technology of receiving alumina is provided.

Keywords: ecological engineering, agglomeration furnaces, electric precipitators, scrubber, carbonization of aluminatny solution, wet purification of gases

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-11-10-14

Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ негативно воздействуют на все компоненты окружающей среды, прежде всего на атмосферный воздух и почвы. Промышленные выбросы, загрязняющие атмосферу, отличаются очень большим разнообразием содержащихся в них вредных веществ по агрегатному состоянию, количеству и степени их вредности. Отсюда и чрезвычайно

большое разнообразие методов очистки газов. Применяемые за рубежом способы очистки отходящих газов не всегда применимы для алюминиевой и глиноземной промышленности России [1–3].

Специфика российской алюминиевой промышленности заключается в том, что все электролизные производства расположены в центре Сибири. Сырьем для производства алюминия

являются глиноземные предприятия, которые являются одним из основных загрязнителей природной среды [4]. Единственным производителем глинозема в Красноярском крае является АО "РУСАЛ Ачинск", на котором освоена в промышленном масштабе технология комплексной переработки нефелиновых руд по способу спекания. Технология получения глинозема из нефелинов продемонстри-

рвала свои преимущества и способность конкурировать с высококачественными бокситами [5]. Вместе с тем, используемые в глиноземном производстве системы очистки газов не всегда эффективны ввиду высоких температур технологического процесса спекания сырьевой шихты, а также присутствия в выбросах печных агрегатов значительного количества тонкодисперсной пыли [6]. Внедрение технических мероприятий экологического инжиниринга с модернизацией системы очистки газов печей спекания может решить проблему очистки воздуха от пыли и ее последующей утилизации [7, 8].

Цель исследований — повышение эффективности процесса очистки отходящих газов от печей спекания от пыли и диоксида углерода.

Задача исследований — разработка и испытание инженерно-технологических решений, обеспечивающих повышение степени очистки атмосферного воздуха и снижение выбросов загрязняющих веществ от печей спекания глиноземного производства.

Экспериментальная часть

В печах спекания известняково-нефелиново-содовая шихта готовится и подвергается термообработке до получения спека, в котором основного компонента — глинозема — содержится в пределах 15–16 %. Сырьем для цеха спекания является шихта. Шихта — мелкоизмельченная смесь нефелиновой руды, известняка и содощелочных растворов, взятых в определенном соотношении.

Нефелиновая руда содержит значительное количество диоксида кремния (до 42 %), который может образовывать с оксидом алюминия нерастворимые соединения и приводит к его потерям, поэтому диоксид кремния необходимо вывести из процесса посредством связывания его в двухкальцевый силикат.

Все физико-химические превращения протекают при температуре от 1200 до 1280 °С и на-



Рис. 1. Вращающиеся печи спекания
Fig. 1. Rotary sintering furnaces

личии жидкой фазы, которая активизирует диффузию компонентов шихты. При последующем снижении температуры материала до 1100–900 °С заканчивается кристаллизация образовавшихся соединений и формирование физической структуры спека, в котором находятся вышеуказанные соединения. Факторами, определяющими эффективность процесса, скорость реакций и поведение материала в печи, являются химический состав шихты, температура и продолжительность спекания.

В настоящее время на переломе спекания имеются источники выделения твердых загрязняющих веществ, по которым не достигнут установленный норматив предельно допустимых выбросов (ПДВ). Источниками выделения загрязняющих веществ в печном переделе цеха спекания АО "РУСАЛ Ачинск" являются вращающиеся печи спекания № 1 и № 2 (рис. 1).

Отходящие из печей спекания № 1 и № 2 газы поступают

в систему газоочистного оборудования, состоящую из пылевой камеры, батареи циклонов (две группы циклонов ЦН-24 диаметром 1,7 м по 8 шт.), горизонтальных электрофильтров (типа ПГД 4×50 и ЭГАВ) и дымососов. Средняя эксплуатационная эффективность работы систем очистки газов от пыли колеблется от 98,5 до 99,5 %. Требуемая эффективность для достижения ПДВ по пыли неорганической составляет 99,86 %. Регламентный показатель запыленности на выходе из источника выброса превышает.

Планом мероприятий по снижению негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ в атмосферу АО "РУСАЛ Ачинск" предусмотрена реконструкция установки очистки газов печей спекания № 1 и № 2 (электрофильтры № 1–4).

Учитывая, что печные газы содержат в значительном количестве углекислый газ, одним из вариантов снижения величины выбросов пыли от печи спекания



Рис. 2. Перевод газов от печи спекания № 1 на карбонизацию
Fig. 2. Transfer of gases from sintering furnace No. 1 to carbonization

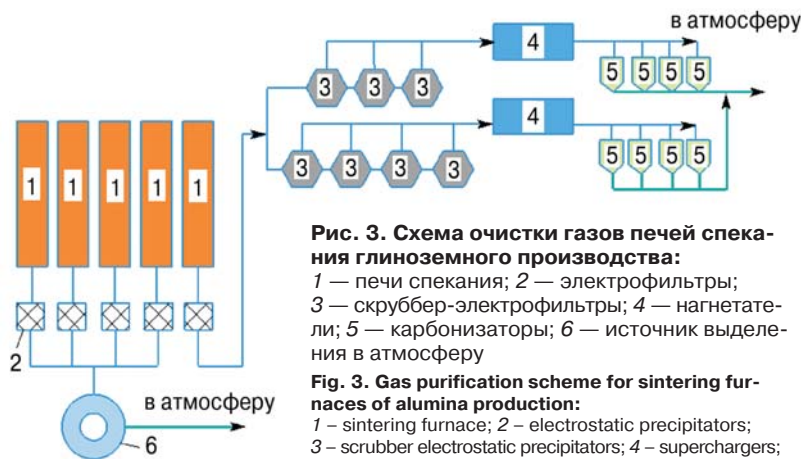


Рис. 3. Схема очистки газов печей спекания глиноземного производства:

1 — печи спекания; 2 — электрофильтры; 3 — скруббер-электрофильтры; 4 — нагнетатели; 5 — карбонизаторы; 6 — источник выделения в атмосферу

Fig. 3. Gas purification scheme for sintering furnaces of alumina production:

1 - sintering furnace; 2 - electrostatic precipitators; 3 - scrubber electrostatic precipitators; 4 - superchargers; 5 - carbonizers; 6 - source of atmospheric emissions

ния № 1 является использование отходящих газов в технологическом процессе получения гидроксида алюминия. Для реализации такого технического мероприятия было предложено направить отходящие газы печи спекания № 1 на предварительную дополнительную очистку в мокрые скруббер-электрофильтры КМ-21 и затем через нагнетательную станцию очищенные от пыли газы перевести на карбонизацию алюминатных растворов (рис. 2).

Предлагаемая схема очистки газов печи спекания № 1 с переводом в технологический процесс карбонизации алюминатного раствора приведена на рис. 3.

Скруббер-электрофильтры КМ-21 предназначены для очистки газов от твердых загрязняющих веществ до 0,02 г/м³ и предварительного охлаждения до

45–55 °С газов, содержащих углекислый газ, идущих в нагнетатель Н-1200-26-1 для последующей передачи их на передел карбонизации (рис. 4).

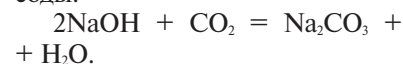
Принцип улавливания пыли в скруббере основывается на свойствах смачиваемости пыли, содержащейся в газе. Запыленный газ через входной патрубок поступает в скруббер снизу вверх, где и происходит контакт частиц пыли с водой. Для увеличения контакта вода поступает в скруббер через форсунки. Дробление воды на мелкие капли происходит на решетках с уложенными в один слой кольцами "Рашига". В скруббере улавливается крупнодисперсная пыль с частицами диаметром более 10 мкм. Улавливание пыли диаметром менее 10 мкм происходит в электрофильтре.

Нагнетатель выполнен в виде одноцилиндровой двухступенчатой машины одностороннего всасывания. Воздух, поступающий в нагнетатель, должен быть очищен от твердых минеральных частиц и примесей, которые могут вызвать механический износ или разбаланс ротора. Количество твердых частиц в поступающем в нагнетатели воздухе не должно быть более 0,02 г/м³.

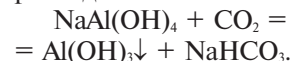
Согласно предлагаемому техническому решению очищенные печные газы печей спекания после очистки в скруббер-электрофильтрах КМ-21 нагнетателями направлялись на передел карбонизации глиноземного цеха АО "РУСАЛ Ачинск". При подаче очищенных газов печи спе-

кания на передел карбонизации глиноземного цеха происходит химическое взаимодействие углекислого газа, содержащегося в отходящих технологических газах печей спекания, с алюминатным раствором в карбонизаторах. Карбонизатор представляет собой цилиндрический сосуд с коническим дном. Алюминатный раствор после процесса его обескремнивания поступает в карбонизатор по трубопроводу, при этом перемешивание производится центральным секционным аэролифтом путем подачи в него сжатого воздуха. Топочные газы подводятся через барботеры, опущенные вертикально вниз в раствор. Для очистки и ремонта карбонизатор имеет боковой и нижний люки на конусе и два люка на крышке карбонизатора. Очищенный в скруббер-электрофильтрах газ из нагнетателя имеет следующие параметры: температура газа 45–50 °С, запыленность не более 0,02 г/м³. Максимальная производительность одного скруббер-электрофильтра 105200 м³/ч.

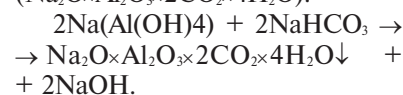
Карбонизация алюминатных растворов ведется барботированием через раствор смеси газов, содержащих CO₂. Сущность процесса состоит в нейтрализации едкой щелочи с образованием соды:



При взаимодействии алюминатного раствора с углекислым газом содержание каустической щелочи уменьшается, что ведет к снижению стойкости алюминатного раствора и выпадению гидроксида алюминия в осадок:



При глубокой карбонизации, проводимой на второй стадии (в присутствии карбонатной и бикарбонатной щелочей), происходит разложение оставшегося алюмината натрия с образованием гидроалюмокарбоната натрия (Na₂O×Al₂O₃×2CO₂×4H₂O):



Образование бикарбоната происходит по реакции:

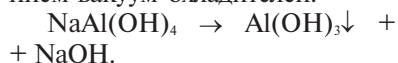


Рис. 4. Скруббер-электрофильтр

Fig. 4. Scrubber electrostatic precipitator



Выделение гидроксида алюминия в содощелочной ветви происходит в результате гидролиза алюмината натрия в присутствии "затравочного" гидроксида при интенсивном перемешивании и снижении растворимости гидроксида алюминия в растворе при естественном снижении температуры пульпы на 8–10 °С к концу процесса, либо на 12–15 °С при принудительном охлаждении с использованием вакуум-охлаждающих:



Алюминатный раствор после второй стадии обескремнивания из приемного бака насосами откачивается в головной карбонизатор многокорпусной батареи карбонизаторов первой стадии. В головной карбонизатор подается также "затравочный" гидроксид алюминия, полученный после первой стадии карбонизации, и алюмокарбонат натрия, полученный на второй стадии карбонизации. Перемещение пульпы от первого до последнего карбонизатора идет самотеком по перетокам и транспортными аэролифтами.

В процессе промышленных испытаний дымовые газы, содержащие оксид углерода, подавали в опущенные, через крышку карбонизатора, барботеры на глубину 5 м от уровня раствора в каждом аппарате. Перемешивание пульпы в карбонизаторах происходило в основном с помощью газа, подаваемого на нейтрализацию каустической щелочи в растворе и воздушных перемешивающих аэролифтов. В последний карбонизатор или емкость газ не подавали. Он служил в качестве затвора-выгрузителя для стабилизации уровня в газуемых карбонизаторах. Из последнего карбонизатора пульпа поступала в сборные мешалки, а затем на сгущение в одноярусные сгустители.

Газы, прошедшие карбонизацию, выбрасывались в атмосферу, в них ограничивалось содержание загрязняющих веществ. Предельно-допустимая концент-

Аэрогидродинамические показатели скруббер-электрофильтра
Aerohydrodynamic indicators of a scrubber-electrostatic precipitator

Показатель	Расчетные (проектные) данные	Данные инструментальных замеров на одном скруббер-электрофильтре
Производительность скруббер-электрофильтра, м ³ /ч	105200	88976
Скорость газа в активной зоне электрофильтра, м/с	1,2	0,88
Максимальная температура газа в электрофильтре, °С:		
на входе	140–150	138
на выходе	40–45	46
Допустимое разряжение газа в электрофильтре, мм вод. ст./кПа	500/4,9	498/4,9
Гидравлическое сопротивление скруббер-электрофильтра, кПа	2,7	2,27
Общий расход воды скруббер-электрофильтра, м ³ /ч	675	506
Расход воды, м ³ /ч:		
для периодической промывки осадительных электродов	50	50
для орошения скрубберной части	625	456
Содержание пыли в газе, г/м ³ :		
на входе в скруббер-электрофильтр	до 0,7	0,683
на выходе из скруббер-электрофильтра	0,020	0,019

рация загрязняющих веществ в воздухе — аэрозоли щелочи (в пересчете на NaOH) не превышала установленного предприятия нормативу — $5 \cdot 10^{-4}$ г/м³.

По результатам проведенного анализа фактических показателей работы газоочистной установки печи спекания № 1 запыленность на выходе из электрофильтров печи на уровне 0,72–0,88 г/м³, что позволило направить эти газы на мокрую доочистку в скруббер-электрофильтры и подать их на карбонизацию. Средний объемный расход очищенных газов печи спекания № 1 составляет 688680 м³/ч. Расчетные данные разработанного скруббер-электрофильтра (см. таблицу) были подтверждены результатами экспериментальных замеров, полученных в процессе промышленных испытаний, которые показали, что для проведения технологического процесса выделения гидроксида алюминия из алюминатных растворов можно применять газ от печи спекания № 1, содержащий не менее 16,5 % диоксида углерода. В таблице приведены аэрогидродинамические показатели одного скруббер-электрофильтра. Замеренный объемный расход очищенного печного газа после 7-ми скруббер-электрофильтров составлял 685924 м³/ч. Незначи-

тельное отклонение 0,4 % находится в пределах методики измерения параметров газов. Рассчитанный объемный расход печного газа должен обеспечивать требуемую полноту осаждения гидроксида алюминия на карбонизации. Содержание пыли в газе на выходе из скруббер-электрофильтров находилось на уровне проектного и составляло 0,019 г/м³.

Обсуждение и анализ полученных результатов

Технологические показатели эффективности процесса карбонизации алюминатного раствора с использованием очищенных газов от печей спекания подтвердили результаты анализа раствора до и после карбонизации. При этом исходный раствор, подаваемый на содовую ветвь передела карбонизации, имел массовую концентрацию оксида алюминия 77 г/дм³ при установленном нормативе технологической инструкции 70–78 г/дм³. Массовая концентрация каустической щелочности в пересчете на оксид натрия раствора, подаваемого на карбонизацию, находилась в нормируемых пределах 65–75 г/дм³. При взаимодействии алюминатного раствора с углекислым газом содержание каустической щелочи в нем уменьшилось, это показал проведенный химиче-

ский анализ растворов. Массовая концентрация каустической щелочности в пересчете на оксид натрия в растворе после 1-й стадии карбонизации снизилась и составляла 3–5 г/дм³.

Таким образом, проведенные промышленные испытания практически подтвердили результаты расчетов рассеивания загрязняющих веществ от источника выделения от печей спекания и показали, что при направлении газов, отходящих от печи спекания № 1, на передел карбонизации обеспечиваются необходимые требования техно-

логического режима и выбросы неорганической пыли в атмосферу через дымовую трубу не превышают установленный норматив.

Выводы

1. Рассчитанные аэродинамические показатели скруббер-электрофильтров подтверждают техническую возможность эффективной мокрой очистки печных газов для последующего их направления в технологический процесс для разложения алюминатного раствора.

2. Проведенные опытно-промышленные испытания показа-

ли, что дополнительная мокрая очистка печного газа в скруббер-электрофильтрах обеспечивает необходимую для технологии разложения алюминатного раствора степень очистки газов печи спекания № 1 от неорганической пыли.

3. Технологическими расчетами определена оптимальная концентрация диоксида углерода в очищенных газах печи спекания, которая составила не менее 16,5 % и обеспечивала эффективное разложение алюминатного раствора в карбонизаторах.

Литература

1. Сизяков В.М. Современное состояние и проблемы развития алюминиевой промышленности России. Записки Горного института. СПб., СПГГИ.2006. Т. 163. С. 163–170.
2. Wang Xing Li. Alumina production theory and technology. Changsha, Central South University, 2010. 411 p.
3. Fraser P, Steele P., Cooksey M. Carbon Dioxide Emissions from an Australian Aluminium Smelter Using Time-Integrated Stack Sampling and GC-MS, GC-FID Analysis. Light Metals. 2013. P. 871–876.
4. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России. Цветные металлы. 2006. № 1. С. 32–38.
5. Самойлов А.Г., Копылов А.В., Ломаев В.Г. Бокситы Сибири и возможность их использования для производства глинозема. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. № 3. С. 8–12.
6. Гузаев В.А., Троицкий А.А. Технические решения по повышению эффективности и надежности электрофильтров ФИНГО. Сб. докл. IV Международ. межотраслевой конф. "Пылегазоочистка-2011". М., 27–28 сентября 2011 г. ООО "ИНТЭКО". 2011. С. 16–18.
7. Golovnykh N., Bychinskii V., Filimonova L., Chudnenko K. Increasing the efficiency of gas-scrubbing systems in aluminum production. Universities Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy. 2017. № 3. P. 45–55.
8. Шепелев И.И., Бочков Н.Н., Стыглиц И.С. Альтернативные способы утилизации пыли газоочистных сооружений глиноземного производства. Сб. докл. IX Междунар. Конгресса "Цветные металлы и минералы-2017". Красноярск, 2017. С. 147–155.
9. Троицкий А.А., Гузаев В.А. Новейшие разработки экологической машиностроительной группы различных типов газоочистного оборудования. Экологический вестник России. 2010. № 2. С. 38–40.

References

1. Sizyakov V.M. Sovremennoe sostoyanie i problemy razvitiya alyuminievoi promyshlennosti Rossii. Zapiski Gornogo instituta. SPb., SPGGI.2006. T. 163. S. 163–170.
2. Wang Xing Li. Alumina production theory and technology. Changsha, Central South University, 2010. 411 p.
3. Fraser P, Steele P., Cooksey M. Carbon Dioxide Emissions from an Australian Aluminium Smelter Using Time-Integrated Stack Sampling and GC-MS, GC-FID Analysis. Light Metals. 2013. P. 871–876.
4. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategicheskie zadachi metallurgicheskogo kompleksa Rossii. Tsvetnye metally. 2006. № 1. S. 32–38.
5. Samoilov A.G., Kopylov A.V., Lomaev V.G. Boksitы Sibiri i vozmozhnost' ikh ispol'zovaniya dlya proizvodstva glinozema. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. 2006. № 3. S. 8–12.
6. Guzaev V.A., Troitskii A.A. Tekhnicheskie resheniya po povysheniyu effektivnosti i nadezhnosti elektrofiltrov FINGO. Sb. dokl. IV Mezhdunar. mezhotraslevoi konf. "Pylegazoochistka-2011". M., 27–28 sentyabrya 2011 g. ООО "INTEKO". 2011. S. 16–18.
7. Golovnykh N., Bychinskii V., Filimonova L., Chudnenko K. Increasing the efficiency of gas-scrubbing systems in aluminum production. Universities Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy. 2017. № 3. P. 45–55.
8. Shepelev I.I., Bochkov N.N., Styglits I.S. Alternativnye sposoby utilizatsii pyli gazoochistnykh sooruzhenii glinozemnogo proizvodstva. Sb. dokl. IX Mezhdunar. Kongressa "Tsvetnye metally i mineraly-2017". Krasnoyarsk, 2017. S. 147–155.
9. Troitskii A.A., Guzaev V.A. Noveishie razrabotki ekologicheskoi mashinostroitel'noi grupy razlichnykh tipov gazoochistnogo oborudovaniya. Ekologicheskii vestnik Rossii. 2010. № 2. S. 38–40.

И.И. Шепелев — д-р техн. наук, профессор, Красноярский государственный аграрный университет, 660049, г. Красноярск, пр. Мира 90, e-mail: Ekoing@mail.ru
 ● О.В. Пилыева — канд. техн. наук, зав. кафедрой, Ачинский филиал Красноярского государственного аграрного университета, 662150 Россия, г. Ачинск, ул. Коммунистическая 49, e-mail: olga_pilyaeva@mail.ru ● Е.Н. Еськова — канд. биол. наук, зав. кафедрой, Красноярский государственный аграрный университет, 660049, г. Красноярск, пр. Мира 90, e-mail: nikeskov@mail.ru ● Е.В. Кирушин — аспирант, e-mail: 2549007@mail.ru ● И.С. Стыглиц — аспирант, e-mail: Styglit@mail.ru

I.I. Shepelev — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk State Agrarian University, 660049 Russia, Krasnoyarsk, Mira Ave. 90, e-mail: Ekoing@mail.ru ● O.V. Pilyaeva — Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Achinsk Branch of Krasnoyarsk State Agrarian University, 662150 Russia, Achinsk, Kommunisticheskaya Str. 49, e-mail: olga_pilyaeva@mail.ru ● E.N. Eskova — Cand. Sci. (Biol.), Head of Department, Krasnoyarsk State Agrarian University, 660049 Russia, Krasnoyarsk, Mira Ave. 90, e-mail: nikeskov@mail.ru ● E.V. Kiryushin — Post-graduate Student, e-mail: 2549007@mail.ru ● I.S. Stiglits — Post-graduate Student, e-mail: Styglit@mail.ru