# 9

# ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

**Михаил Львович Рахманов**
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
профессор, доктор технических наук

**Ольга Сергеевна Ежова**
Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший инженер

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминий — химический элемент III группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, легкий и пластичный металл матово-серебристого цвета. Вследствие высокой химической активности алюминий в природе встречается только в связанном виде.

Плотность (при нормальных условиях) — 2,69 г/см$^3$, электропроводность — $37 \cdot 10^6$ См/м.

Уникальные свойства алюминия:

- на воздухе моментально образует оксидную защитную пленку, которая способствует высокой коррозионной стойкости металла;
- низкая плотность при высокой прочности;
- неизменность свойств при низких температурах.

Алюминий обладает амфотерными свойствами, т. е. реагируя с кислотами, образует соответствующие соли, а при взаимодействии со щелочами — алюминаты. Эта особенность существенно расширяет возможности извлечения алюминия из руд различного состава. Алюминий растворяется в серной и соляной кислотах, а также в щелочах, но концентрированная азотная и органическая кислоты на алюминий не действуют. Механические свойства алюминия в значительной степени зависят от количества примесей в алюминии, его предварительной механической обработки и температуры. С увеличением содержания примесей прочностные свойства алюминия растут, а пластичные снижаются, которые проявляются и при изменении чистоты алюминия от 99,5 до 99,0%.

Благодаря таким свойствам, как малая плотность, высокая теплопроводность, низкое электрическое сопротивление, высокая пластичность, коррозионная стойкость, алюминий получил исключительно широкое распространение в различных отраслях современной техники и играет важнейшую роль среди всех цветных металлов. Чистый технический алюминий используется в электротехнике в качестве проводникового материала и для производства фольги. Основная часть алюминия применяется в виде литейных и деформируемых сплавов, и сравнительно небольшое количество алюминия — в виде порошков. К основным областям применения алюминия и его сплавов относятся аэрокосмическая промышленность, строительство, высокоскоростной железнодорожный и водный транспорт, автомобилестроение, электротехника, машины и турбинная техника, упаковка пищевых продуктов и напитков, криотехника, пиротехника и ракетное топливо, пищевая промышленность.

Практически единственным методом получения металлического алюминия является электролиз криолитоглиноземного расплава. Основное сырье для этого процесса — глинозем ($Al_2O_3$) — получают различными гидрохимическими методами путем переработки минералов, содержащих соединения алюминия.

Современное получение алюминия осуществляется путем электролитического разложения глинозема ($Al_2O_3$), растворенного в электролите (расплавленный криолит ($Na_3AlF_6$)). Технологический процесс осуществляется при 950–965°С в электролизных ваннах (электролизерах). В целом процесс разложения глинозема в электролизерах можно представить в виде формул:

$$Al_2O_3 + 1{,}5\,C \leftrightarrow 2\,Al + 1{,}5\,CO_2,$$
$$Al_2O_3 + 3\,C \leftrightarrow 2\,Al + 3\,CO.$$

Суммарную реакцию можно записать в виде:

$$Al_2O_3 + x\,C = 2\,Al + (3 - x)\,CO_2 + (2x - 3)\,CO$$

или представить ее как сумму трех реакций:

$$Al_2O_3 \leftrightarrow 2\,Al + 1{,}5\,O_2,\ C + O_2 \leftrightarrow CO_2,\ C + 0{,}5\,O_2 \leftrightarrow CO.$$

Основным исходным сырьем криолит-глиноземного расплава являются глинозем ($Al_2O_3$), фтористый алюминий ($AlF_3$) и криолит ($Na_3AlF_6$). Кроме того, в электролите всегда присутствует фтористый кальций ($CaF_2$), снижающий температуру кристаллизации электролита, что позволяет проводить электролиз при более низкой температуре.

Технологический процесс в алюминиевом электролизере — сложный комплекс взаимосвязанных химических, физико-химических и физических процессов.

При электролизе на катоде выделяется алюминий. Алюминий, обладающий большей плотностью, чем исходный расплав, собирается на дне электролизера, откуда его периодически извлекают. Рентабельность производства алюминия определяется доступностью и ценой электроэнергии, наличием сырьевых компонентов и их качеством.

В табл. 9.1 представлены действующие в Российской Федерации предприятия алюминиевой промышленности, год ввода в эксплуатацию, производительность и применяемые технологии электролиза. Их географическое расположение представлено на рис. 9.1.

*Таблица 9.1.* Перечень предприятий алюминиевой промышленности Российской Федерации

| № на карте | Место расположения | Завод | Год ввода в эксплуатацию |
|---|---|---|---|
| 1 | г. Волгоград | ВгАЗ (*производство законсервировано*)<br>Филиал ОАО «СУАЛ» «ВгАЗ-СУАЛ» | 1959 |
| 2 | Ленинградская область,<br>г. Пикалево | Пикалевский глиноземный завод<br>(«Базэл Цемент Пикалево») | 1959 |
| 3 | Республика Карелия,<br>п. Надвоицы | НАЗ.<br>Филиал ОАО «СУАЛ» «НАЗ-СУАЛ» | 1954 |
| 4 | Мурманская область,<br>г. Кандалакша | КАЗ<br>Филиал ОАО «СУАЛ» «КАЗ-СУАЛ» | 1951 |
| 5 | Свердловская область,<br>г. Каменск-Уральский | УАЗ<br>Филиал ОАО «СУАЛ» «УАЗ-СУАЛ» | 1939 |
| | Свердловская область,<br>г. Краснотурьинск | БАЗ<br>Филиал ОАО «СУАЛ» «БАЗ-СУАЛ» | 1943 |
| 6 | Кемеровская область,<br>г. Новокузнецк | НкАЗ<br>ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» | 1943 |
| 7 | Республика Хакасия,<br>г. Саяногорск | САЗ<br>АО «РУСАЛ Саяногорск» | 1985, 2006 |
| 8 | Красноярский край,<br>г. Красноярск | КрАЗ<br>ОАО «РУСАЛ Красноярск» | 1964 |
| | Красноярский край,<br>г. Ачинск | АГК<br>ОАО «РУСАЛ Ачинск» | 1970 |
| | Красноярский край,<br>Богучанский район | БоАЗ<br>ЗАО «Богучанский алюминиевый завод» | 2015 |
| 9 | Иркутская область,<br>г. Братск | БрАЗ<br>ОАО «РУСАЛ Братск» | 1966 |
| | Иркутская область,<br>г. Шелехов | ИркАЗ<br>Филиал ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехове | 1960 |

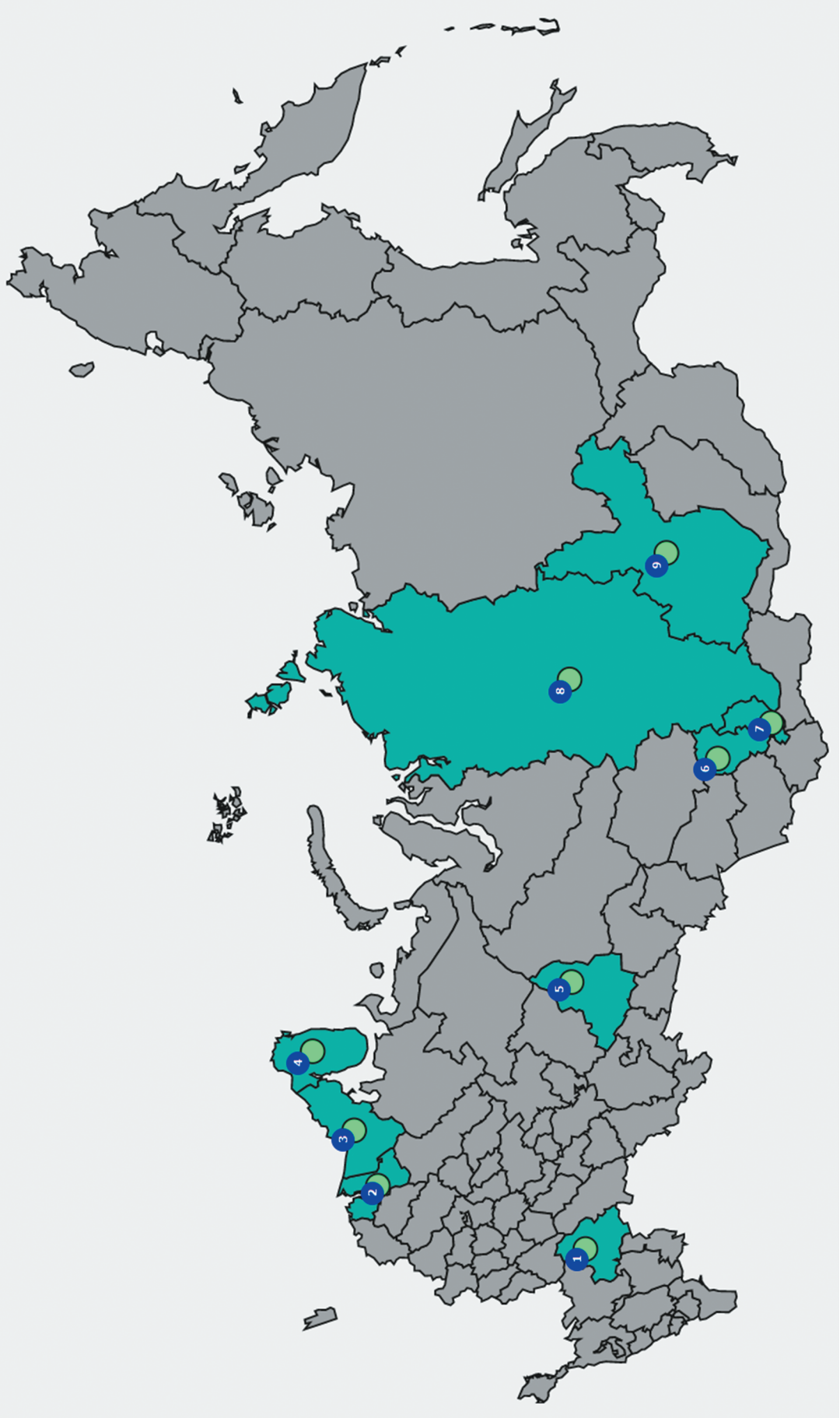



*Рис. 9.1.* Карта-схема расположения предприятий алюминиевой промышленности Российской Федерации

# ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## Зарождение алюминиевой промышленности в мире

Человечество сталкивалось с алюминием задолго до того, как этот металл был получен. В «Естественной истории» римского ученого Плиния Старшего говорится о легенде I в., в которой мастер дарит императору Тиберию чашу из неизвестного металла — похожую на серебряную, но при этом очень легкую.

Достаточно широко в древности применялись квасцы — соль на основе алюминия. Полководец Архелай обнаружил, что дерево практически не горит, если его выдержать в растворе квасцов, — этим пользовались для защиты деревянных укреплений от поджогов. В античные времена квасцы применялись в медицине, при выделке кож, в качестве протравы при крашении тканей. В Европе, начиная с XVI в., квасцы использовались повсеместно: в кожевенной промышленности в качестве дубильного средства, в целлюлозно-бумажной — для проклеивания бумаги, в медицине — в дерматологии, косметологии, стоматологии и офтальмологии.

Именно квасцам (по-латински — *alumen*) алюминий обязан своим названием. Такое название металлу дал английский химик Гемфри Дэви, который в 1808 г. установил, что получить алюминий можно методом электролиза из глинозема (оксид алюминия), но подтвердить теорию практикой он не смог.

Успехом увенчались опыты ученого-физика из Дании Ханса Христиана Эрстеда, который через сильно нагретую смесь глинозема и угля пропустил газ хлор. В результате был получен хлорид алюминия. Затем, подогрев эту соль с амальгамой калия, Ханс Эрстед выделил металл, который по своим физическим свойствам был похож на олово. Ученый опубликовал статью о своем опыте в журнале, после чего прекратил свои эксперименты с этим металлом.

Этот способ выделения чистого алюминия путем нагревания хлористого алюминия вперемешку с калием в 1827 г. использовал немецкий химик Фридрих Велер, и ему понадобилось приблизительно 20 лет на то, чтобы получить алюминий в слитке.

Широкое распространение металл получил в 1854 г., когда французский физик и химик Анри Сент-Клер Девиль изобрел промышленный способ получения алюминия. Этот химический процесс был основан на вытеснении алюминия металлическим натрием из двойного хлорида натрия и алюминия. Таким образом был заменен дорогостоящий калий. Этим способом было получено более 200 т металлического алюминия в течение последующих 36 лет. А уже в 1856 г. этот французский ученый получил алюминий методом электролиза из расплавленного двойного хлорида натрия-алюминия.

Французский император Наполеон III восхитился способом получения металла из глинозема и имел планы по вооружению всей своей армии оружием из этого очень легкого металла. С этой целью было построено несколько алюминиевых заводов во Франции. Это был первый шаг в формировании будущей алюминиевой промышленности мира.

Однако процесс получения алюминия все еще оставался дорогостоящим. Более дешевый метод получения металла появился во второй половине XIX в. Независимо друг от друга новый способ выделения алюминия искали двое ученых — американский инженер и химик Холл Чарльз и французский инженер-химик Поль Луи-Туссен Эру. В 1887 г. Холл получил патент на новый электролитический способ получения алюминия. Этот способ заключался в электролизе расплавленного в криолите оксида алюминия и требовал большого количества электроэнергии, потому также был довольно дорогим.

Чуть позже австрийский инженер Байер создал новую технологию получения глинозема, и тогда этот способ стал более дешевым. С тех времен и поныне способы Байера и Поля Эру применяются на современных алюминиевых заводах.

Чистый алюминий является непрочным металлом, потому не подходит для многих сфер применения. Эта проблема была решена немецким инженером-металлургом Альфредом Вильмом.

В 1903 г. Альфред Вильм зафиксировал, что сплав алюминия с 4-процентной медью при температуре закалки 500° С после охлаждения при комнатной температуре около 100–120 часов, становится более твердым и прочным, но при этом не теряет своей пластичности. В 1911 г. в городе Дюрен была выпущена первая партия такого сплава алюминия и меди. Полученный металл был назван в честь города — дюралюминий. В 1919 г. был изготовлен первый самолет из дюралюминия.

Таким образом зародилась мировая алюминиевая промышленность, а сам металл получил широкое применение. В начале XX в. мировое производство алюминия составляло около 8000 т. А в XXI в. объем мирового производства металла достиг 24 млн т.

## Зарождение алюминиевой промышленности в России

В дореволюционной России не было собственной алюминиевой промышленности. Однако в конце прошлого и в начале настоящего столетия русские ученые (Н. Н. Бекетов, П. П. Федотьев, Н. А. Пушин, Д. А. Пеняков, Е. И. Жуковский и другие) выполнили ряд исследований, сыгравших большую роль в развитии мировой алюминиевой промышленности. Под руководством П. П. Федотьева были проведены глубокие исследования теоретических основ электролитического способа получения алюминия, в частности были исследованы двойные системы фторид алюминия-фторид натрия, криолит-глинозем, явления растворимости алюминия в электролите, анодный эффект, а также ряд других процессов, связанных с электролизом криолито-глиноземных расплавов. Результаты этих исследований получили мировую известность.

В 1882–1892 гг. химик К. П. Байер разработал в России щелочной способ получения глинозема, который до настоящего времени является основным в мировой алюминиевой промышленности. В 1895 г. Д. А. Пеняков предложил способ получения глинозема из бокситов спеканием с сульфатом натрия в присутствии угля, а А. Н. Кузнецов и Е. И. Жуковский в 1915 г. — способ получения глинозема из низкосортных руд путем восстановительной плавки их на шлаки алюминатов щелочноземельных металлов. Н. А. Пушин с сотрудниками в 1914 г. впервые в нашей стране получил алюминий «русского происхождения», т. е. из отечественного сырья и материалов.

Условия для создания в нашей стране алюминиевой промышленности, являющейся крупным потребителем электроэнергии, появились только после Великой Октябрьской социалистической революции. Решающую роль в этом сыграл разработанный в 1920 г. по инициативе и под руководством В. И. Ленина план ГОЭЛРО, положивший начало созданию прочной энергетической базы в нашей стране. Построенная в соответствии с этим планом в 1926 г. первая крупная гидроэлектростанция на р. Волхов явилась энергетической базой первого в СССР Волховского алюминиевого завода. В декабре 1927 г. XV съезд ВКП(б) принял решение о создании в нашей стране алюминиевой промышленности, а в августе 1929 г. Совет труда и обороны принял решение о строительстве в СССР Волховского и Днепровского алюминиевых заводов. В 1929 г. на Ленинградском опытном заводе «Красный Выборжец» под руководством П. П. Федотьева были проведены длительные производственные испытания по получению алюминия электролитическим путем из отечественных материалов.

В 1930 г. в Ленинграде был пущен опытный завод, который сыграл большую роль в развитии советской алюминиевой промышленности. На этом заводе испытывалось оборудование, осваивался технологический режим, готовились рабочие и инженерно-технические кадры для первых советских алюминиевых заводов. Одновременно были проведены исследования по производству электродных изделий, необходимых для получения алюминия. Результаты этих исследований легли в основу проектирования первых электродных заводов — Московского и Днепровского. Разработанный в Институте прикладной минералогии способ получения криолита был положен в основу проектирования производства криолита на Полевском криолитовом заводе. В 1931 г. были созданы Научно-исследовательский институт алюминиевой промышленности (НИИСалюминий) и проектный институт «Гипроалюминий». Позднее НИИСалюминий и «Гипроалюминий» были объединены в единый Всесоюзный

алюминиево-магниевый институт (ВАМИ). В период с 1926 по 1936 г. в Государственном институте прикладной химии (ГИПХ) под руководством А. А. Яковкина был разработан способ получения глинозема из тихвинских бокситов спеканием их с содой и известняком. В результате впервые была разрешена проблема переработки высококремнистых бокситов. В 1938 г. вошел в эксплуатацию Тихвинский глиноземный завод, а в 1939 г. на базе высококачественных североуральских бокситов — Уральский алюминиевый завод.

Зарождение и развитие отечественной алюминиевой промышленности в нашей стране неразрывно связано с Волховским алюминиевым заводом, который был построен на территории Ленинградской области и начал работать 14 мая 1932 г.

Как известно, дореволюционная Россия не располагала промышленными технологиями получения алюминия и не производила его. Первоочередные нужды страны в этом стратегическом металле (в объеме 5–6 тыс. т) даже в период первой мировой войны покрывались за счет импорта. Не были разведаны запасы сырья, отсутствовала необходимая энергетическая база.

Несмотря на то что теория электролитического способа получения алюминия была сформулирована в начале XX в. русским ученым П. П. Федотьевым, промышленную технологию пришлось создавать «с нуля». В 1929 г. на ленинградском заводе «Красный выборжец» под руководством П. П. Федотьева были впервые в стране проведены опыты по получению алюминия из отечественного сырья. В 1930 г. вошел в строй Ленинградский опытный алюминиевый завод.

Как свидетельствуют историки, 14 мая 1932 г. в 15 час 45 мин на Волховском заводе был получен первый советский алюминий. Эта дата стала «днем рождения» всей алюминиевой отрасли. Уже через два года наша страна полностью прекратила импорт этого стратегического металла, а к началу Великой Отечественной войны Советский Союз по выпуску алюминия вышел на одно из первых мест в мире. Промышленность отрасли бурно развивалась, создавались новые предприятия, но Волховский алюминиевый по-прежнему вносил существенный вклад в объемы производства.

## ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Алюминий — один из самых молодых металлов, открытых человеком. В чистом виде в природе он не встречается, поэтому получить его удалось лишь в XIX в., благодаря развитию химии и появлению электричества. За полтора века алюминий прошел невероятно интересный путь от драгоценного металла до материала, использующегося абсолютно в каждой сфере деятельности людей.

*Таблица 9.2.* Характеристика технологических циклов развития алюминиевой промышленности

| Период, годы | Цикл | Основные виды деятельности технологического цикла | Технологические лидеры |
|---|---|---|---|
| 1808–1885 | Первый (открытие алюминия) | Украшения, предметы искусства, посуда | Великобритания, Германия, Франция, Дания |
| 1886–1925 | Второй (получение алюминия электролизом) | Судостроение, скульптуры, железнодорожный транспорт | Франция, Швейцария, США, СССР |
| 1925 – настоящее время | Третий (широкое применение алюминия) | Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство | США, ЕС, Китай, Россия |

Развитие алюминиевой промышленности происходило благодаря постоянно растущему спросу на алюминий, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы становления угольной отрасли можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности.

*Таблица 9.3*. Основные этапы циклов развития алюминиевой промышленности

| Цикл | Научно-технический этап | Технико-экономический этап | Экономически-социальный этап | Социально-регуляторный этап |
|---|---|---|---|---|
| Первый (открытие алюминия) | Получение алюминия химическими методами из глинозема | Совершенствование химических методов выделения алюминия | Рост потребления алюминия | Высокая трудоемкость производства алюминия, высокая цена |
| Второй (получение алюминия электролизом) | Получение алюминия методом электролиза | Применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии | Рост потребления алюминия в различных отраслях промышленности | Усовершенствование электротехники, а также разработка новых способов извлечения глинозема |
| Третий (широкое применение алюминия) | Широкое применение алюминия | Толчок для развития новых отраслей промышленности | Ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий | Производство алюминия с использованием инертных анодов |

## Первый цикл — открытие алюминия и получение алюминия химическими методами

Английский химик Гемфри Дэви в 1808 г. установил, что получить алюминий можно методом электролиза из глинозема (оксид алюминия), но подтвердить теорию практикой он не смог.

Это сделал датчанин Ханс Кристиан Эрстед в 1825 г. Ему удалось получить не чистый металл, а некий сплав алюминия с элементами, участвовавшими в опытах. Ученый сообщил об открытии и прекратил эксперименты.

Его работу продолжил немецкий химик Фридрих Велер, который 22 октября 1827 г. получил около 30 граммов алюминия в виде порошка. Ему понадобилось еще 18 лет непрерывных опытов, чтобы в 1845 г. получить небольшие шарики застывшего расплавленного алюминия (корольки).

Открытый учеными химический метод получения алюминия довел до промышленного применения выдающийся французский химик и технолог Анри-Этьенн Сент-Клер Девиль. Он усовершенствовал метод Велера и в 1856 г. совместно со своими партнерами организовал первое промышленное производство алюминия на заводе братьев Шарля и Александра Тиссье в Руане (Франция).

Получаемый металл был похож на серебро, был легким и при этом дорогим, поэтому в то время алюминий считался элитным материалом, предназначенным для изготовления украшений и предметов роскоши. Первыми продуктами из алюминия считаются медали с барельефами Наполеона III, который всячески поддерживал развитие производства алюминия, и Фридриха Велера, а также погремушка наследного принца Луи-Наполеона, выполненная из алюминия и золота.

Однако уже тогда Сент-Клер Девиль понимал, что будущее алюминия связано отнюдь не с ювелирным делом.

## Второй цикл — получение алюминия электролизом (метод Холла — Эру)

Ситуация изменилась с открытием более дешевого электролитического способа производства алюминия в 1886 г. Его одновременно и независимо друг от друга разработали французский инженер Поль Эру и американский студент Чарльз Холл. Предложенный ими метод подразумевал электролиз расплавленной в криолите окиси алюминия и давал прекрасные результаты, но требовал большого количества электроэнергии.

Поэтому свое первое производство Эру организовал на металлургическом заводе в Нейгаузене (Швейцария), рядом со знаменитым Рейнским водопадом, сила падающей воды которого приводила в действие динамо-машины предприятия.

18 ноября 1888 г., между Швейцарским металлургическим обществом и немецким промышленником Ратенау было подписано соглашение об учреждении в Нейгаузене Акционерного общества алюминиевой промышленности с общим капиталом в 10 миллионов швейцарских франков. Позднее его переименовали в Общество алюминиевых заводов. На его торговой марке было изображено солнце, восходящее из-за алюминиевого слитка, что должно было, по замыслу Ратенау, символизировать зарождение алюминиевой промышленности. За пять лет производительность завода возросла более чем в 10 раз. Если в 1890 г. в Нейгаузене было выплавлено всего 40 т алюминия, то в 1895 г. — 450 т.

Чарльз Холл, воспользовавшись поддержкой друзей, организовал Питтсбургскую восстановительную компанию, которая запустила свой первый завод в Кенсингтоне неподалеку от Питтсбурга 18 сентября 1888 г. В первые месяцы он выпускал лишь около 20–25 кг алюминия в сутки, а в 1890-м — уже по 240 кг ежедневно.

Свои новые заводы компания расположила в штате Нью-Йорк, вблизи новой Ниагарской гидроэлектростанции. Алюминиевые заводы и в наше время строятся в непосредственной близости от мощных, дешевых и экологичных источников энергии, таких как ГЭС. В 1907 г. Питтсбургская восстановительная компания была реорганизована в Американскую алюминиевую компанию или сокращенно Alcoa.

В 1889 г. технологичный и дешевый метод производства глинозема — оксида алюминия, основного сырья для производства металла — изобрел австрийский химик Карл Иосиф Байер, работая в Санкт-Петербурге (Россия) на Тентелевском заводе. В одном из экспериментов ученый добавил в щелочной раствор боксит и нагрел в закрытом сосуде — боксит растворился, но не полностью. В нерастворившемся остатке Байер не обнаружил алюминия — оказалось, что при обработке щелочным раствором весь алюминий, содержащийся в боксите, переходит в раствор. Методы Байера и Холла — Эру лежат в основе современных технологий получения алюминия.

Таким образом, за несколько десятилетий была создана алюминиевая промышленность, завершилась история о «серебре из глины» и алюминий стал новым промышленным металлом.

## Третий цикл — широкое применение алюминия

На рубеже XIX и XX вв. алюминий стал применяться в самых разных сферах и дал толчок для развития целых отраслей.

В 1891 г. по заказу Альфреда Нобеля в Швейцарии создается первый пассажирский катер Le Migron с алюминиевым корпусом. А через три года шотландская судостроительная верфь Yarrow & Co представила изготовленную из алюминия 58-метровую торпедную лодку. Этот катер назывался «Сокол», был сделан для военно-морского флота Российской империи и развивал рекордную для того времени скорость в 32 узла.

В 1894 г. американская железнодорожная компания New York, New Haven, and Hartford Railroad, принадлежавшая тогда банкиру Джону Пирпонту Моргану (J. P. Morgan), начала выпускать специальные легкие пассажирские вагоны, сидения которых были выполнены из алюминия. А всего через 5 лет на выставке в Берлине Карл Бенц представил первый спортивный автомобиль с алюминиевым корпусом.

Но настоящую революцию алюминий совершил в авиации, за что навсегда заслужил свое второе имя — «крылатый металл». В этот период изобретатели и авиаторы во всем мире работали над созданием управляемых летательных аппаратов — самолетов.

17 декабря 1903 г. американские авиаконструкторы братья Уилбур и Орвилл Райт впервые в истории человечества совершили полет на управляемом летательном аппарате «Флайер-1». Для того чтобы заставить его полететь, они попытались использовать автомобильный

двигатель, однако он оказался слишком тяжелым. Поэтому специально для «Флайера-1» разработали полностью новый двигатель, детали которого были изготовлены из алюминия. Легкий 13-сильный мотор поднял первый в мире самолет с Орвиллом Райтом за штурвалом в воздух на 12 секунд, за которые он пролетел 36,5 метров. Братья совершили еще два полета по 52 и 60 метров на высоте около 3 метров от уровня земли.

Мир входил в период войн, в которых авиация стала играть стратегическую, а иногда решающую роль. Поэтому дюралюминий первое время являлся военной технологией, и метод его получения держался в секрете.

Тем временем алюминий осваивал новые и новые сферы применения. Из него начали массово производить посуду, которая быстро и почти полностью вытеснила медную и чугунную утварь. Алюминиевые сковородки и кастрюли легкие, быстро нагреваются и остывают, а также не ржавеют.

В 1907 г. в Швейцарии Роберт Виктор Неер изобретает способ получения алюминиевой фольги методом непрерывной прокатки алюминия. В 1910 г. он уже запускает первый в мире фольгопрокатный завод. А еще через год компания Tobler использует фольгу для упаковки шоколада. В нее, в том числе, заворачивают и знаменитый треугольный Toblerone.

Очередной переломный момент для алюминиевой промышленности наступает в 1920 г., когда группа ученых под руководством норвежца Карла Вильгельма Содерберга изобретает новую технологию производства алюминия, которая существенно удешевляла метод Холла — Эру. До этого в качестве анодов при электролизе использовались предварительно обожженные угольные блоки — они быстро расходовались, поэтому постоянно требовалась установка новых. Содерберг решил эту проблему с помощью постоянно возобновляемого электрода. Он формируется в специальной восстановительной камере из коксосмоляной пасты и по мере необходимости добавляется в верхнее отверстие электролизной ванны.

Технология Содерберга быстро распространяется по всему миру и приводит к увеличению объемов выпуска алюминия. Именно ее берет на вооружение СССР, не имевший тогда собственной алюминиевой промышленности. В дальнейшем развитие технологий вновь сделало применение электролизеров с обожженными анодами предпочтительнее из-за отсутствия на них выбросов смолистых веществ и меньшего расхода электроэнергии. Кроме того, одним из основных достоинств электролизеров с обожженными анодами является возможность увеличения силы тока, то есть производительности.

Еще в 1914 г. российский химик Николай Пушин писал: «Россия, потребляющая ежегодно 80 000 пудов алюминия, сама не производит ни одного грамма этого металла, и весь алюминий покупает за границей».

В это время алюминий активно использовался в авиации, судостроении и автомобилестроении, а также начинал свой путь в строительстве. В США в 1931 г. был построен знаменитый небоскреб Empire State Building, вплоть до 1970 г. являвшийся самым высоким зданием в мире. Это было первое здание, при строительстве которого широко использовался алюминий, как в основных конструкциях, так и в интерьере.

Вторая мировая война видоизменила основные рынки спроса на алюминий — на первый план выходит авиация, изготовление танковых и автомобильных моторов. Война подтолкнула страны антигитлеровской коалиции к увеличению объема алюминиевых мощностей, совершенствовалась конструкция самолетов, а вместе с ними и виды новых алюминиевых сплавов. «Дайте мне 30 тысяч тонн алюминия, и я выиграю войну», — писал в 1941 г. президенту США Франклину Рузвельту глава СССР Иосиф Сталин. С окончанием войны заводы переориентировались на гражданскую продукцию.

В середине XX в. человек шагнул в космос. Чтобы сделать это, вновь понадобился алюминий, для которого аэрокосмическая отрасль с тех пор стала одной из ключевых сфер применения. В 1957 г. СССР вывел на орбиту Земли первый в истории человечества искусственный спутник — его корпус состоял из алюминиево-магниевого сплава. Все последующие космические аппараты изготавливались из крылатого металла.

В 1958 г. в США появился алюминиевый продукт, ставший впоследствии одним из самых массовых товаров из алюминия, символом экологичности этого металла и даже культовым предметом в области искусства и дизайна. Это алюминиевая банка. Ее изобретение делят между собой алюминиевая компания Kaiser Aluminum и пивоваренная Coors. К слову, пивоваренная компания не только первой стала продавать пиво в алюминиевых банках, но и организовала систему сбора и переработки использованных банок. В 1967 г. разливать свои напитки в алюминиевые банки начинают Coca-Cola и Pepsi.

Спустя два года в Японии был запущен знаменитый Shinkansen — первый в мире высокоскоростной поезд, прообраз всех современных поездов такого типа, в которых алюминий является ключевым материалом. Он курсировал между Токио и Осакой и преодолевал расстояние в 515 км за 3 часа 10 минут, разгоняясь до 210 км/ч.

Тем временем первенство на мировом алюминиевом рынке переходит к СССР, где ударными темпами вводятся в строй новые мощные гидроэлектростанции и алюминиевые заводы на территории Сибири. В середине 1960-х гг. там запущенны два гиганта алюминиевой индустрии — Братский и Красноярский алюминиевые заводы мощностью по 1 млн т металла в год каждый. До сих пор эти предприятия являются крупнейшими в мире.

В 1970-х гг. возросшие объемы производства алюминия в мире и спрос приводят к тому, что этот металл становится биржевым товаром. Торги алюминиевыми контрактами в 1978 г. начинаются на Лондонской бирже металлов (LME) — старейшей в мире бирже, образованной в 1877 г.

Производство алюминия неуклонно растет по всему миру и к началу 1990-х гг. достигает отметки в 19 млн т. К этому моменту на глобальной экономической карте начинает возрастать роль Китая, на территорию которого постепенно начинает смещаться центр мирового производства. Выпуск собственного алюминия на тот момент в Китае не превышает и 900 тыс. т в год, но начинает быстро расти, обеспечивая внутренние нужды. В России алюминиевые мощности достигли уровня в 3,5 млн т ежегодно, но страна пережила распад СССР, развал экономики и вошла в фазу смены экономической модели, поэтому рост производства алюминия остановился.

Китай обогнал Россию в 2002 г., по итогам которого его производство превысило 4,3 млн т. В мире на тот момент было произведено 26 млн т алюминия. В дальнейшем алюминиевое производство в Китае росло опережающими темпами — всего через четыре года, в 2006, оно достигло почти 10 млн т, что составляло треть общемировых объемов. Страна обогнала все остальные регионы мира по выпуску крылатого металла.

Весь производимый алюминий Китай использует для собственных нужд. Оборот металла и других материалов настолько велик, что в Китае создаются собственные товарные биржи, которые в 1999 г. объединяются в Шанхайскую фьючерскую биржу (SHFE). Более 90% электроэнергии, которая используется для производства алюминия в Китае, вырабатывается на угольных электростанциях. Для сравнения, в России — обратная ситуация, и около 90% алюминиевого производства обеспечивается гидроэлектроэнергетикой.

Существенную роль в алюминиевой отрасли начинают играть и страны Ближнего Востока. Имея доступ к дешевой нефти и природному газу, получаемому попутно, алюминиевые производители обеспечены источником дешевой, но неэкологичной, электроэнергии. Они также активно наращивают свое производство и сегодня входят в число мировых лидеров по производству крылатого металла.

Испытания для мировой алюминиевой отрасли начались в 2008 г. вместе с глобальным финансово-экономическим кризисом. Тогда в результате обвала рынков алюминиевая отрасль впервые в истории столкнулась с кризисом перепроизводства и, как следствие, обрушением на 50% цен на металл. На складах по всему миру скопились миллионы тонн алюминия, интерес к которым проявили биржевые трейдеры: финансовые сделки с металлом стали выгодной инвестицией.

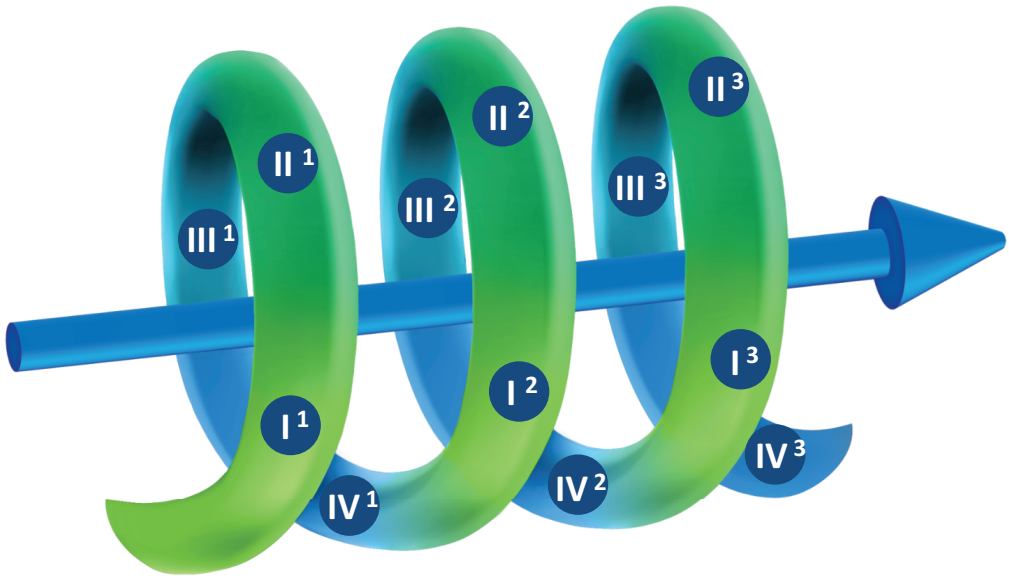
Кризис 2008–2009 гг. привел к масштабным закрытиям алюминиевых заводов практически всех западных алюминиевых компаний. Вместе с тем, производство металла в мире продолжило расти. Производители Китая и Ближнего Востока двигались в противоположном направлении и наращивали производство.

В 2013 г. мировая алюминиевая промышленность преодолела новый рубеж — производство металла превысило 50 млн т.

## Эволюция технологий производства алюминия

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения (рис. 9.2).




**I** **Научно-технический этап**

**II** **Технико-экономический этап**

**III** **Экономически-социальный этап**

**IV** **Социально-регуляторный этап**

**I 1** — получение алюминия химическими методами из глинозема
**II 1** — совершенствование химическим методов выделения алюминия
**III 1** — рост потребления алюминия
**IV 1** — высокая трудоемкость процесса, высокая цена

**I 2** — получение алюминия методом электролиза
**II 2** — применение дешевых и достаточно мощных источников энергии
**III 2** — рост потребления алюминия в различных отраслях промышленности
**IV 2** — усовершенствование электротехники, разработка новых способов извлечения глинозема

**I 3** — широкое применение алюминия
**II 3** — толчок развития новых отраслей промышленности
**III 3** — ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий
**IV 3** — производство алюминия с использованием инертных анодов

*Рис. 9.2.* Эволюция технологий производства алюминия

# ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## Производство глинозема

Способы производства глинозема из различных видов сырья (минералов), содержащего алюминий, основаны на получении алюминатных растворов и их свойстве самопроизвольно разлагаться при снижении температуры и концентрации на гидроксид алюминия и щелочь. Прокаливая гидроксид алюминия при температуре 1000–1200° С, получают глинозем.

Наиболее широкое применение в промышленности нашел разработанный Байером щелочной гидрохимический способ, с помощью которого, как правило, перерабатывают лишь высокосортные бокситы с малым содержанием кремнезема — бокситы с кремниевым модулем (соотношение $Al_2O_3$ и $SiO_2$ по массе) выше 6. После подготовки сырья (дробление и размол боксита) осуществляют его обработку щелочно-алюминатным раствором — процесс выщелачивания, в результате которого из боксита извлекается оксид алюминия, переходящий в раствор с концентрацией $Al_2O_3$ 250–300 г/л. При этом в осадок выпадают нерастворимые соединения, содержащиеся в боксите, — так называемый красный шлам. Последующие процессы производства связаны с отделением и очисткой алюминатного раствора от красного шлама и промывкой последнего для более полного извлечения алюминатного раствора.

*Таблица 9.4*. Основные этапы производства глинозема способом Байер-спекания

| Входной поток | Этап процесса (подпроцесс) | Выходной поток | Основное технологическое оборудование | Эмиссии |
|---|---|---|---|---|
| Боксит, известняк, вода, сода | Подготовка шихты к выщелачиванию и спеканию | Влажная шихта (пульпа) | Дробилки, шаровые мельницы | Пыль |
| Пульпа | Выщелачивание | Алюминатный раствор, шлам | Автоклавные батареи | Щелочь |
| Шлам | Сгущение и промывка шлама ветвей Байера и спекания (раздельно) | Шлам в отвал | Сгустители, фильтры | Щелочь, шлам |
| Пульпа | Спекание | Спек | Вращающиеся печи | Пыль, $SO_2$, $NO_x$, CO |
| Спек | Переработка спека | Алюминатный раствор, шлам (красный) | Дробилки, мельницы | Пыль, щелочь |
| Алюминатный раствор | Переработка алюминатных растворов (раздельно для каждой ветви) | Очищенный алюминатный раствор (оборотный), гидроксид алюминия | Декомпозеры, сгустители | Щелочь |
| Гидроксид алюминия | Кальцинация | Глинозем | Печи | Пыль, $SO_2$, $NO_x$, CO |

Бокситы с кремниевым модулем ниже 6 и другие виды высококремнистого сырья, пригодного для производства глинозема (нефелины, алуниты, каолины), перерабатывают или по способу спекания, или комбинированному способу — сочетание способа Байера со способом спекания.

Способ спекания основан на термической обработке смеси алюмосиликатной руды с известняком с целью перевода практически всего оксида алюминия из сырья в растворимую форму в спеке (алюминат натрия) и связывания диоксида кремния сырья в нерастворимую форму (двукальциевый силикат).

*Таблица 9.5*. Основные этапы производства глинозема способом спекания нефелинов

| Входной поток | Этап процесса (подпроцесс) | Выходной поток | Основное технологическое оборудование | Эмиссии |
|---|---|---|---|---|
| Нефелин, известняк, вода | Приготовление шихты | Влажная шихта (пульпа) | Дробилки, мельницы | Пыль |
| Пульпа | Спекание | Спек | Вращающиеся печи | Пыль, $SO_2$, $NO_x$, CO |
| Спек | Переработка спека | Алюминатный раствор, шлам | Дробилки, мельницы | Пыль, щелочь, шлам |
| Алюминатный раствор | Переработка алюминатных растворов | Гидроксид алюминия, содовые растворы | Карбонизаторы, декомпозеры, сгустители, автоклавы, фильтры | Щелочь, $SO_2$, $NO_x$, CO |
| Гидроксид алюминия | Кальцинация | Глинозем | Печи | Пыль, $SO_2$, $NO_x$, CO |

Способ Байера — самый экономичный, но его применение ограничивается качеством и количеством боксита; способ спекания является наиболее затратным, но более универсальным и пригоден для любого вида сырья.

На действующих российских предприятиях, выпускающих глинозем, применяются все из перечисленных технологий. На Ачинском глиноземном комбинате и Пикалевском глиноземной заводе («Базэл Цемент Пикалево») перерабатывается нефелиновое сырье. Технология производства глинозема, основанная на спекании нефелина с известняком, предусматривает комплексную переработку сырья на глинозем, соду и цемент.

Шлам, получаемый при выщелачивании спека (нефелиновый шлам), используют для получения цементного клинкера.

Богословский и Уральский алюминиевые заводы перерабатывают отечественные байеровские и спекательные бокситы. Производство глинозема осуществляется по комбинированному способу — параллельная схема Байер-спекания. По способу Байера получают около 80–90% глинозема, остальное — по технологии спекания. Ветвь спекания состоит из отделений приготовления шихты (дополнительного к ветви Байера), спекания, размола, выщелачивания спека и отделения алюминатного раствора от осадка шлама. Получаемый в этой ветви алюминатный раствор объединяется с алюминатным раствором из ветви Байера, а усредненный раствор поступает на последующую переработку, включая стадию прокалки гидроксида алюминия в печах кальцинации.

## Производство анодной массы и анодов

В зависимости от типа используемого электролизера в качестве анодных материалов используется анодная масса или предварительно обожженные аноды.

Анодные материалы являются одним из ключевых элементов в технологии электролитического производства алюминия. Угольные аноды или анодную массу для получения первичного алюминия, как правило, производят на том же алюминиевом заводе, что и сам металл. Хотя в некоторых случаях их могут производить на отдельных анодных фабриках.

Сырьем для производства анодной массы и анодов служат каменноугольный пек (связующий материал) и нефтяной кокс с низким содержанием зольных примесей (наполнитель).

Производство анодной массы. В табл. 9.6 представлено описание основных этапов технологического процесса получения анодной массы.

Исходный сырой кокс поступает на склад предприятия и по транспортной системе подается на первичное дробление. Далее через систему питания кокс подается в прокалочный агрегат, после которого по системе транспорта прокаленный кокс поступает в бункер запаса. Некоторые предприятия, не имея в своем составе прокалочных печей, осуществляют закупку уже прокаленного кокса. На сушку кокс поступает из бункера прокаленного кокса, затем на дробление и рассев, после чего полученные сортовые фракции прокаленного кокса подогреваются и направляются в смеситель, где происходит смешение кокса с пеком.

Пек поступает на предприятие в жидком и (или) твердом виде и после подготовки с помощью дозатора и пекового насоса подается в смеситель. После смесителя через орошаемый водой конвейер и систему транспорта охлажденные брикеты анодной массы поступают на склад готовой продукции.

*Таблица 9.6.* Основные этапы технологического процесса получения анодной массы

| Входной поток | Этап процесса (подпроцесс) | Выходной поток | Основное технологическое оборудование | Эмиссии |
|---|---|---|---|---|
| Кокс нефтяной сырой | Прием, хранение, предварительное дробление | Кокс нефтяной сырой дробленый | Двухвалковая зубчатая дробилка | Пыль кокса |
| Кокс нефтяной сырой дробленый | Прокалка | Кокс нефтяной прокаленный | Вращающаяся прокалочная печь барабанного типа | Пыль кокса, CO, $SO_2$, $NO_x$ |
| Кокс нефтяной прокаленный | Дробление, размол, рассев на фракции | Сортовые фракции прокаленного кокса | Дробилка молотковая однороторная. Дробилка двухвалковая. Грохот универсальный. Шаровые барабанные мельницы | Пыль кокса |
| Сырой прокаленный кокс | Сушка | Сухой прокаленный кокс | Сушильный агрегат | Пыль кокса, CO, $SO_2$, $NO_x$ |
| Пек гранулированный каменноугольный | Прием, хранение, пекоподготовка | Пек жидкий | Пекоприемники | Пыль пека, возгоны пека |
| Пек жидкий каменноугольный | Прием, хранение, пекоподготовка | Пек жидкий | Пекоприемники Пекоплавители | Возгоны пека |
| Сортовые фракции прокаленного кокса, пек жидкий | Дозирование, смешение, формование | Брикеты анодной массы | Весовые дозаторы. Смесители. Формовочное устройство | Пыль кокса, возгоны пека |

Количество и качество связующего пека являются фактором, определяющим выделение в атмосферу загрязняющих веществ (ЗВ). Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки пыль от переделов производства анодной массы возвращается в производство.

Изложенные принципы производства анодной массы не меняются уже много десятилетий. Однако аппаратурное оформление, качество оборудования и принципы управления технологическим процессом постоянно совершенствуются.

Производство анодной массы является подчиненным к производству алюминия и осуществляется практически на всех алюминиевых заводах, применяющих технологию электролиза с самообжигающимися анодами (Содерберга).

Производство анодов. В табл. 9.7 приведены основные технологические этапы производства обожженных анодов.

Процесс производства анодов в части дробления, измельчения и смешивания сырьевых материалов идентичен производству анодной массы, за исключением использования отходов обожженных анодов (огарки), которые вместе с коксом проходят стадии дробления и рассева. Затем из смешанного материала формируются «зеленые» аноды и после охлаждения поступают на склад «зеленых» анодов. Со склада «зеленые» аноды по системе конвейеров направляются в печи обжига. Обжиг осуществляется в многокамерных кольцевых печах открытого типа с подвижной зоной «огня». Печь обжига состоит из блока вертикальных камер, соединенных между собой простенками для последовательного прохода дымовых газов из одной камеры в другую. Эти простенки делят камеры на кассеты, в которые загружаются анодные блоки.

*Таблица 9.7.* Основные этапы производства обожженных анодов

| Входной поток | Этап процесса (подпроцесс) | Выходной поток | Основное технологическое оборудование | Эмиссии |
|---|---|---|---|---|
| Кокс нефтяной сырой; огарки анодов | Прием, хранение, предварительное дробление | Кокс нефтяной сырой дробленый; огарки анодов дробленые | Двухвалковая зубчатая дробилка | Пыль кокса |
| Кокс нефтяной прокаленный, дробленые огарки | Дробление, размол, рассев на фракции | Сортовые фракции прокаленного кокса | Дробилка молотковая однороторная. Дробилка двухвалковая. Грохот универсальный. Шаровые барабанные мельницы | Пыль кокса |
| Пек гранулированный каменноугольный, пек жидкий | Прием, хранение, пекоподготовка | Пек жидкий | Пекоприемники, пекоплавители | Пыль пека, возгоны пека |
| Сортовые фракции прокаленного кокса и огарков, пек жидкий | Дозирование, смешение | Анодная масса | Весовые дозаторы. Смесители | Пыль кокса, возгоны пека |
| Анодная масса | Формование | «Зеленые» аноды | Вибропресс | Возгоны пека |
| «Зеленые» аноды | Обжиг | Обожженные аноды | Многокамерная кольцевая печь открытого типа | Пыль кокса, возгоны пека, HF, CO, $SO_2$, $NO_x$ |
| Обожженные аноды | Монтаж анодов | Смонтированные аноды | Печи ИЧТ, конвейеры, системы очистки огарков, дробилки | Пыль кокса, в том числе твердые фториды |

Продвижение огня производится путем переноса рампы с горелки, дутьевых и отсасывающих труб вдоль печи на одну камеру в соответствии с заданным темпом обжига. В качестве топлива используется мазут. Обожженные анодные блоки по конвейеру поступают на сборку в анодно-монтажное отделение (АМО), которое включает в себя отделение демонтажа и монтажа анодов. При монтаже обожженных анодов осуществляется заливка ниппельных гнезд чугуном, подготовка анододержателя и, как правило, покрытие поверхности анодного блока защитным слоем от интенсивного выгорания поверхностного слоя. При демонтаже огарков анодов в АМО осуществляется их зачистка от электролита, отделение от анододержателя и его зачистка, дробление огарка в дробилках для транспортировки его в заготовительное отделение. В технологическом процессе образуется некоторое количество брака «зеленых» анодов и анодной массы, которые после дробления возвращаются обратно в смеситель. При производстве анодов на специальных установках газоочистки с помощью глинозема из паров абсорбируются смолистые вещества, фториды из анодных огарков. Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки коксовая пыль от переделов производства анодов возвращается в производство.

## Производство первичного алюминия

Алюминий производится путем электролитического восстановления оксида алюминия (глинозема), растворенного в расплавленном электролите (криолите) при температуре приблизительно 960°С. В состав электролизера входит углеродный катод, изолированный огнеупорными кирпичами по внутренней поверхности прямоугольного стального кожуха, и углеродные аноды, прикрепленные к электропроводящей анодной балке и погружаемые в раствор. Электролизеры соединены последовательно и образуют серию электролизеров. Постоянный ток подается с анодов через электролит и слой металла на катод, а затем — по комплекту проводников, известных как «ошиновка», на следующий электролизер.

Жидкий алюминий оседает на катоде электролизера. Расплавленный металл периодически извлекается из электролизеров спецковшами и передается в литейное отделение для получения товарной продукции. При электролизе кислород из глинозема реагирует с углеродным анодом и образует диоксид углерода и монооксид углерода. Таким образом, в ходе этого процесса происходит непрерывный расход углеродных анодов.

Основным сырьем для получения алюминия служат: глинозем, фтористые соли (криолит, фтористый алюминий) и обожженные аноды или анодная масса.

Схемы производства алюминия представлена на рис. 9.3.

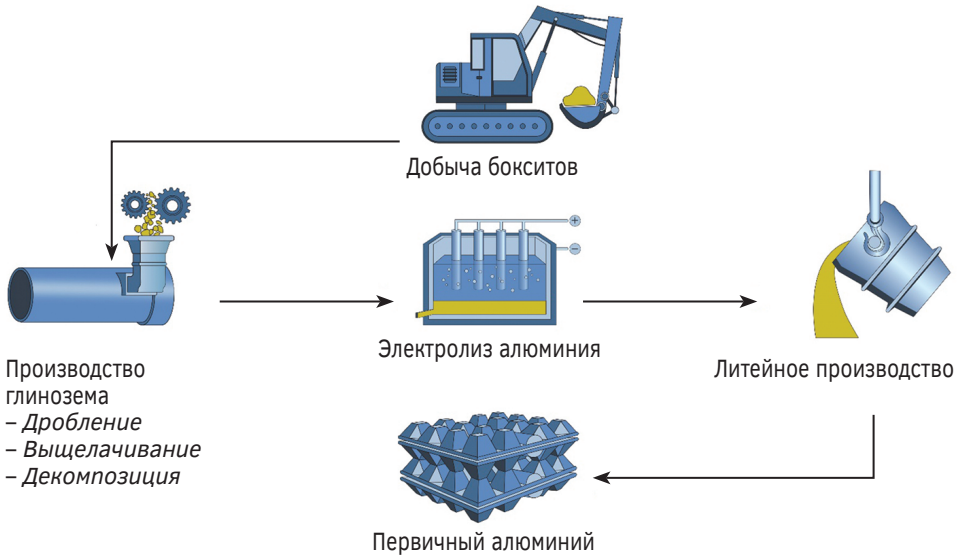



*Рис. 9.3.* Схема производства первичного алюминия

В табл. 9.8 приведена информация об электролизе.

*Таблица 9.8*. Описание электролиза

| Входной поток | Этап процесса | Выходной поток | Основное технологическое оборудование | Эмиссии |
|---|---|---|---|---|
| Свежий глинозем, фторсоли | Прием, хранение сырья на складах и в силосах | Свежий глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли | Склады, силоса, бункера | В атмосферный воздух: оксид алюминия; твердые фториды |
| Сырье: глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли. Электроэнергия | Электролитическое производство первичного алюминия | Первичный алюминий (алюминий-сырец) | Электролизеры: с самообжигающимися анодами и верхним токоподводом (Содерберга); с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом (Содерберга); с предварительно обожженными анодами | В атмосферный воздух: фтористый водород; твердые фториды; диоксид серы; оксид углерода; пыль неорганическая; смолистые вещества (для электролизеров Содерберга).<br>В поверхностные и подземные воды — отсутствуют.<br>В почву — непосредственно отсутствуют.<br>Отходы производства: отработанная угольная футеровка; отработанная кирпичная футеровка; угольная пена; огарки обожженных анодов.<br>Прочее: физические воздействия (тепловое, шум, вибрация, электромагнитное загрязнение) не являются лимитирующими для производства первичного алюминия |

## Виды электролизеров и технологий электролиза

Промышленное получение алюминия как в России, так и во всем мире осуществляется в электролизерах, различающихся по конструкции и единичной мощности. В настоящее время применяются следующие технологии электролиза:

– технология производства алюминия на электролизерах с предварительно обожженными анодами (технология электролиза ОА);
– технология производства алюминия на электролизерах с самообжигающимися анодами (или электролизеры с анодом Содерберга).

Электролизеры с самообжигающимися анодами различаются также по принципу подвода тока к аноду, с боковым и верхним токоподводом (технологии электролиза БТ и ВТ соответственно).

На электролизерах ВТ токоподводящие штыри устанавливают вертикально на высоту, обеспечивающую их запекание при опускании анодного массива. При достижении нижним концом штыря расстояния от подошвы анода, определяемого безопасным ведением процесса (минимальное расстояние от штыря до подошвы анода — не менее 20 см), штырь раскручивается и извлекается из тела анода.

Катодное устройство электролизера ВТ состоит из стального кожуха, футерованного внутри угольными подовыми блоками и боковыми плитами, огнеупорными и теплоизоляционными материалами. В нижнюю часть подовых блоков перед их установкой в электролизер устанавливаются стальные стержни (блюмсы), которые заливают чугуном. Блюмсы служат

для отвода тока от подины. Швы между подовыми блоками и периферийный шов набивают подовой массой.

Анодное устройство электролизера ВТ состоит из угольного анода, помещенного в стальной кожух, анодной шины и анодных штырей, служащих для подвески анода и подвода тока. В нижней части анодного кожуха по его периметру на специальном поясе подвешен газосборный колокол, собранный из чугунных литых секций. Колокол подвешивается на уголок (пояс) анодного кожуха и служит газосборником, собирающим из-под анода смесь газов. На рисунке представлена конструкция электролизера ВТ.

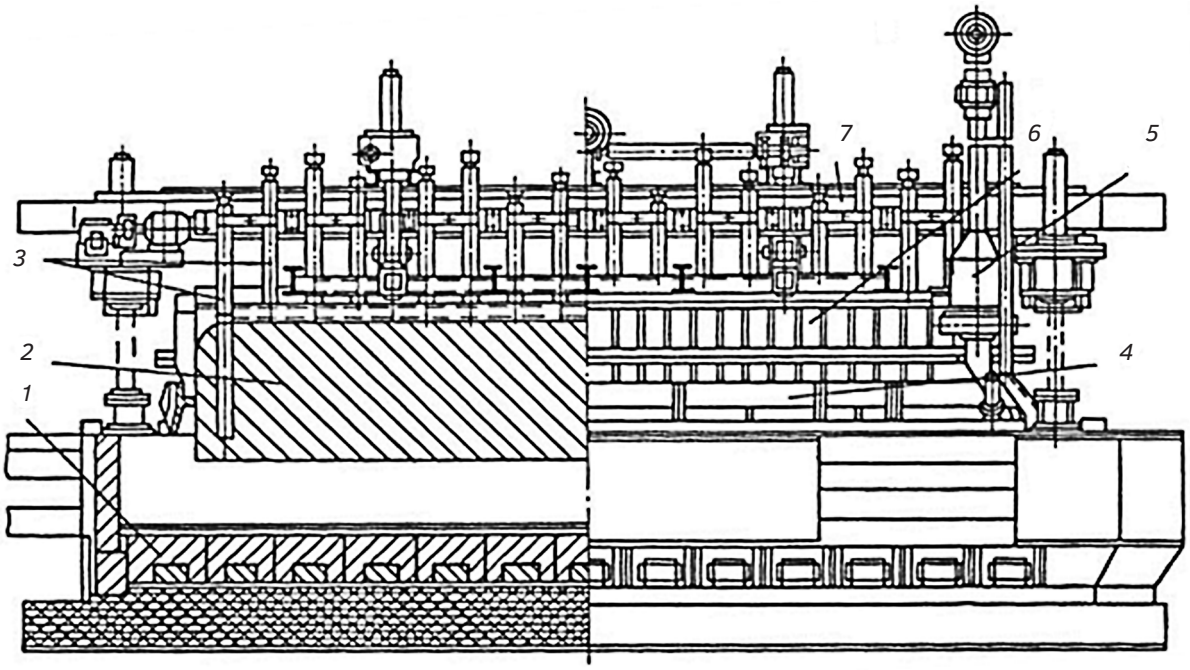



*Рис. 9.4*. Электролизер ВТ:

*1* — катодные угольные блоки; *2* — анодный массив; *3* — анодный токоведущий штырь; *4* — колокольный газосборник; *5* — горелочное устройство; *6* — анодный кожух; *7* — анодная шина

На электролизерах ВТ анодные газы эвакуируются с помощью системы колокольного газосборника и горелочного устройства. Колокольный газосборник, собранный из чугунных секций, крепится к пояску анодного кожуха и герметизируется в нижней части засыпкой глинозема. Анодные газы собираются под газосборником и под избыточным давлением поступают в горелочные устройства (для дожигания оксида углерода и смолистых веществ).

Разработкой новой конструкции электролизеров ВТ является проект «Создание экологически приемлемой и конкурентно способной технологии электролиза с анодом Содерберг» (проект «ЭкоСодерберг»). Проект «ЭкоСодерберг» включил практически весь комплекс работ, связанных с производством алюминия, а именно:

– технологию и оборудование по производству анодной массы;
– технологию изготовления и конструкцию катодного узла;
– технологию анода и электролиза с современной автоматизированной системой управления системой;
– комплекс мероприятий по дожигу и удалению газов от электролизера;
– автоматизированные системы по транспортировке и питанию электролизера сырьем;
– механизмы, устройства и инструменты, исключающие или снижающие долю ручного труда в обслуживании электролизера.

К новым техническим и технологическим решениям конструкции электролизера «ЭкоСодерберг» относятся:

– устройство электролизеров С8БМ(Э) и С8Б(Э) с новым безгорелочным газосборным колоколом и новой системой газоудаления;
– новый технологический инструмент, средства механизации, новые технологические практики для обслуживания данных электролизеров;
– технология производства и использования анодной массы с низким содержанием связующего.

На рис. 9.5 представлена система газоудаления электролизера «ЭкоСодерберг».

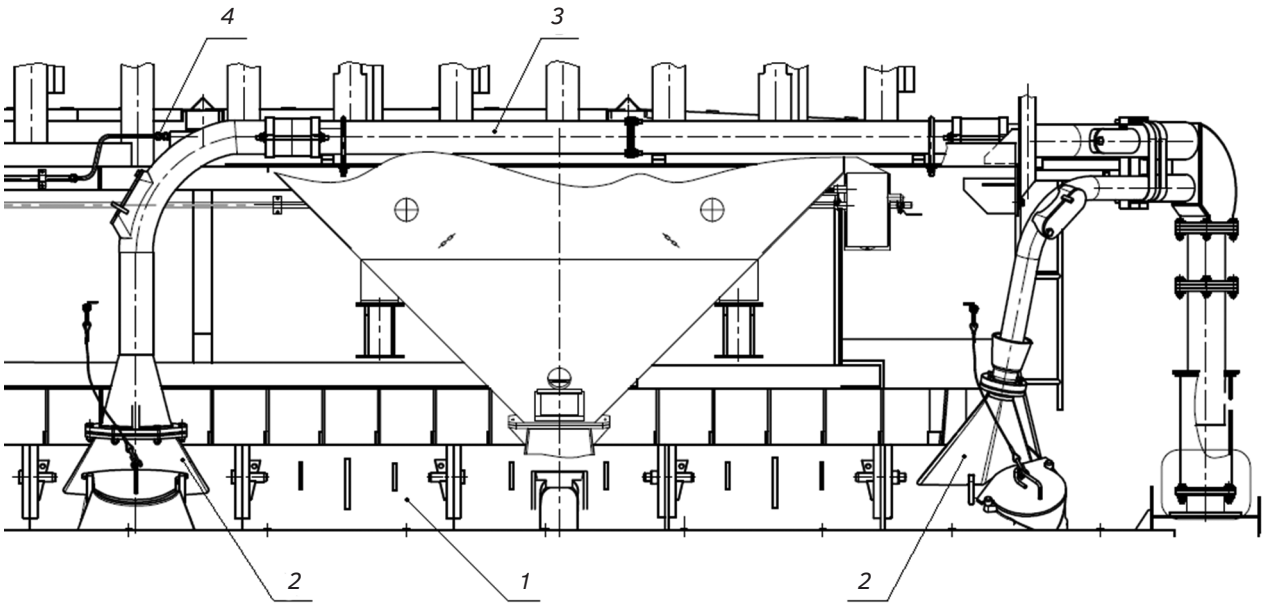



*Рис. 9.5*. Система газоудаления электролизера «ЭкоСодерберг»:
*1* — газосборный колокол электролизера; *2* — сборные купола системы газоудаления; *3* — трубопроводы системы удаления газов; *4* — продувка системы удаления газов

На электролизерах БТ конструкция катодного устройства такая же, как у стандартного (рядового) электролизера ВТ.

Анодное устройство электролизера БТ состоит из стальной анодной рамы, которая с помощью стальных канатов и системы полиспасов подвешивается на металлоконструкции. По мере сгорания анода и его опускания для поддержания установленного межэлектродного расстояния одновременно с ним опускается анодная рама. Токоведущими являются два нижних ряда штырей. Они подключаются к анодной ошиновке с помощью медных или (чаще) алюминиевых спусков. Стальные токоведущие анодные штыри забиваются под определенным углом в боковые поверхности анодного массива в верхних зонах, где еще не прошли процессы спекания анода, и по мере сгорания анода перемещаются вместе с анодом в нижние, более горячие зоны, где спекаются со скоксовавшимся массивом и при достижении определенных температур воспринимают токовую нагрузку. Когда становится вероятным выход нижнего конца штыря из тела анода и контакт с электролитом, штырь извлекается из тела анода и забивается в верхний горизонт. Электролизеры БТ снабжены укрытием для сбора вредных веществ, выделяющихся при электролизе. Укрытие монтируется на каркасе и имеет вверху газосборный колпак и шторы (навивные, створчатые и др.), закрывающие боковые стороны электролизера.

По-разному осуществляется и эвакуация анодных газов, образующихся при электролизе на электролизерах разных типов. На электролизерах БТ все устройство, ограниченное коркой электролита и боковыми поверхностями анода, перекрыто шторными укрытиями.

Анодные газы, содержащие горючий оксид углерода, выделяются через специально устраиваемые отверстия в корке электролита «огоньки». При этом горючие компоненты анодного газа сгорают, а продукты горения удаляются с отсасываемой от электролизера газовоздушной смесью.

На рис. 9.6 представлена конструкция электролизера БТ.

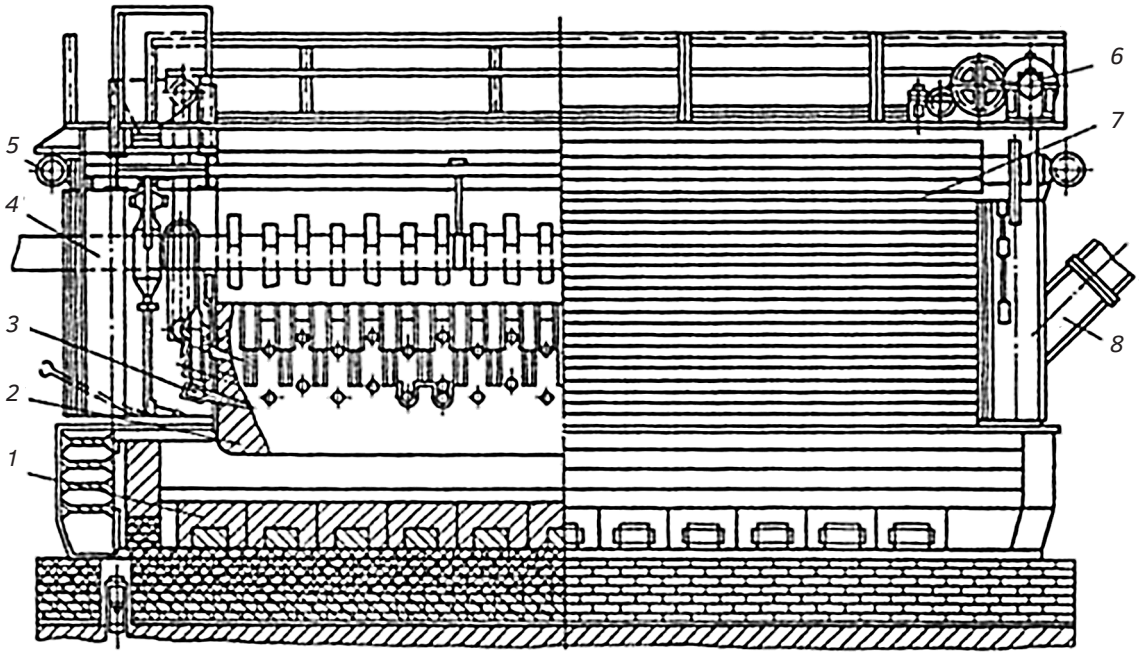



*Рис. 9.6*. Электролизер БТ:

*1* — катодные угольные блоки; *2* — анодный массив; *3* — анодный токоведущий штырь; *4* — анодная шина; *5* — механизм подъема штор; *6* — механизм перемещения анода; *7* — шторное укрытие; *8* — патрубок отсоса газов

Электролизеры ОА отличаются от рассмотренных выше электролизеров ВТ и БТ конструкцией анодного устройства. Обычно электролизеры ОА имеют многоблочный анодный массив. Число анодных блоков зависит от их размеров.

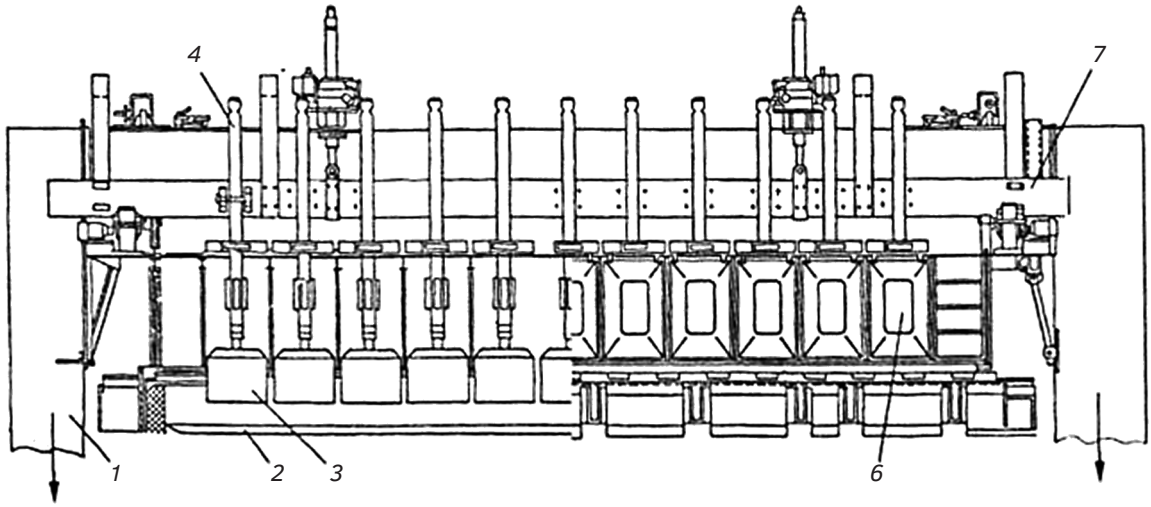



*Рис. 9.7*. Электролизер ОА:

*1* — анодная шина; *2* — катодное устройство; *3* — ОА; *4* — анодные штанги; *5* — анодная рама; *6* — створки укрытия

Анодами служат формированные и прессованные угольные блоки, обожженные в печах при конечной температуре 1100–1200°С. После обжига анодов в них монтируются анододержатели, в комплекте с которыми они поставляются в корпус электролиза. Аноды присоединяются к анодным шинам с помощью анододержателей, алюминиевая штанга которых прижимается специальным зажимом к шине, а стальная (ниппели) закрепляется в ниппельных гнездах блока с помощью чугунной заливки. Для перемещения анодного массива на электролизере имеется подъемный механизм. Укрытие электролизера ОА предназначено для сбора и удаления образующихся вредных веществ. Газы направляются на улавливание ценных компонентов и регенерацию фторсолей. На рис. 9.7 представлена конструкция электролизера ОА.

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Для сравнения технологий производства алюминия по технологическим циклам необходимо определить показатели, пригодные для сравнения согласно соответствующим условиям:

– актуальность на протяжении всех технологических циклов развития алюминиевой промышленности;
– наличие сопоставимых статистических данных за рассматриваемый период.

В качестве наиболее распространенных критериев, характеризующих промышленность, можно выделить: ресурсоемкость, энергоемкость, экологичность, трудоемкость. Критерий ресурсоемкости и экологичности не пригоден для сравнения технологий производства алюминия на всех технологических циклах, так как в течение развития алюминиевой промышленности происходило изменение используемых ресурсов и данные не отражены статистическими данными. Сравнение технологий различных технологических циклов развития алюминиевой промышленности производилось по двум критериям: чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия.

На рис. 9.8 представлены объемы производства алюминия, циклы развития алюминиевой промышленности и выбранные критерии для сравнения (чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия).

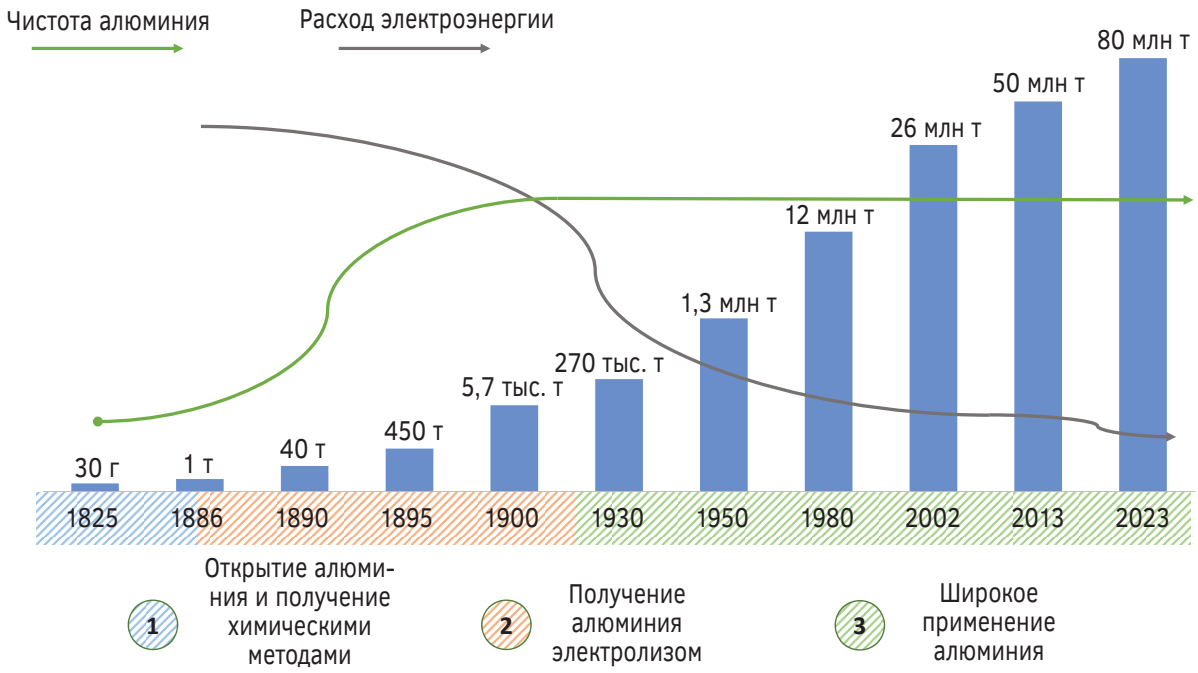



*Рис. 9.8*. График исторического развития алюминиевой промышленности

## Сравнение применяемых технологий производства алюминия

Производство глинозема. Расход сырья на 1 т глинозема и, как следствие, количество выбросов, сбросов и образующихся отходов зависят от применяемой технологии производства и являются основными показателями при производстве глинозема.

Удельные уровни потребления сырьевых материалов (топлива, воды и электроэнергии) минимальны для процесса Байера и максимальны для технологии переработки нефелинов на глинозем. В табл. 9.9 представлены достигнутые удельные расходные показатели по сырью, потребляемому в производстве.

*Таблица 9.9*. Расход сырья, материалов и энергоресурсов

| Наименование | Единица измерения | Расход на 1 т глинозема | |
|---|---|---|---|
| | | Байер-спекание (параллельный вариант) | Переработка нефелинов |
| Боксит | т | 2,54–2,74 | — |
| Нефелин | т | — | 4,0–5,0 |
| Тепловая энергия | Гкал | 2,90–4,0 | 1,25–1,35 |
| Электроэнергия | тыс. кВт·ч | 0,35–0,40 | 1,0–1,1 |

Производство глинозема из нефелинов требует наиболее высоких расходов сырья и энергоресурсов. Его применение в Российской Федерации вызвано отсутствием запасов качественных отечественных бокситов и целесообразно только при наличии дешевой электроэнергии и топлива, низких транспортных расходов на перевозку сырья и готового продукта и при условии комплексного использования сырья.

Основными загрязняющими веществами в производстве глинозема являются твердые вещества (технологическая пыль) при сжигании топлива, а также производственные отходы — красный (переработка бокситов) и нефелиновый (переработка нефелинов) шламы. Количество шлама напрямую зависит от качества исходного сырья.

*Таблица 9.10*. Выбросы пыли в атмосферу и образование отходов при производстве глинозема

| Наименование | Единица измерения | Байер-спекание | Спекание нефелинов |
|---|---|---|---|
| Пыль спека (пыль неорганическая с содержанием $SiO_2$ ниже 20%) | мг/нм$^3$ | 200 | |
| Пыль неорганическая с содержанием $SiO_2$ ниже 20% | мг/нм$^3$ | | 200 |
| Красный шлам | т/т глинозема | 1,52–1,70 | |
| Нефелиновый (белитовый) шлам | т/т глинозема | | 7,5–8,7 |

На рис. 9.9 представлен график показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве глинозема.

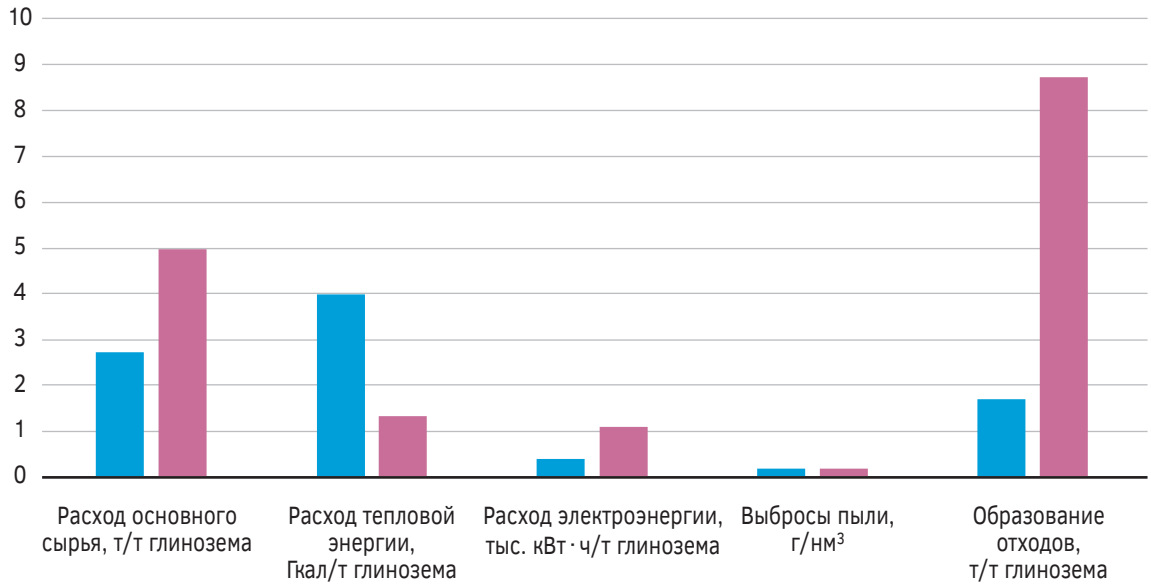



*Рис. 9.9*. График показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве глинозема

Производство первичного алюминия. Расход сырья, электроэнергии, выбросы пыли и образование отходов являются основными показателями по ресурсо- и энергосбережению при производстве первичного алюминия.

Расход сырья зависит от многих факторов: типа электролизера, состояния технологии, качества сырья, транспортных потерь и т. д.

В табл. 9.11 приведены данные по расходу сырья, материалов и энергоресурсов для разных технологий электролиза.

*Таблица 9.11*. Расход сырья, материалов и энергоресурсов

| Наименование оборудования | Технологические характеристики | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Расход электроэнергии, кВт·ч/т Al | Расход глинозема, кг/т Al | Расход анодов нетто или анодной массы, кг/т Al | Расход фтор. алюминия, кг/т Al |
| Электролизеры с самообжигающимися анодами и верхним токоподводом | 15216–16111 | 1920–1939 | 522–528 | 21–40 |
| Электролизеры с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом | 15171–15620 | 1932–1944 | 510–515 | 12,0–21,0 |
| Электролизеры с предварительно обожженными анодами | 13158–15126 | 1917–1938 | 420–460 | 12,0–21,0 |

Расход глинозема практически не зависит от типа электролизеров и определяется в основном транспортными потерями, потерями на перевозку от склада до электролизеров и содержанием мелких фракций, значительная часть которых теряется в виде пыли.

Расход фторидов (криолит и трифторид алюминия) зависит от многих факторов: типа электролизера; состояния технологии; состава и температуры перегрева электролита; наличия, вида, КПД и КПИ газосборного и газоочистного оборудования; состояния технологической дисциплины; содержания оксида натрия в глиноземе; количества снимаемой угольной пены и эффективности ее флотации и др.

Расход анодов зависит от типа электролизеров. Фактически в электролизере на производство 1 т алюминия расходуется 420–460 кг обожженных анодов. При этом остается огарок, следовательно, полная потребность в обожженных анодах зависит от качества анода и величины огарка. Расход анодной массы также зависит от многих факторов: потерь при транспортировке, потерь летучих компонентов при коксовании пека и с поверхности жидкой анодной массы, осыпания и окисления боковых поверхностей анода, выхода по току и плотности тока.

Расход электроэнергии зависит главным образом от типа электролизера и выхода по току. При прочих равных условиях наибольший расход электроэнергии — у электролизеров ВТ, а наименьший — у ванн с ОА.

Источником выделения вредных веществ при производстве алюминия является используемые сырье и материалы. При этом зачастую очень важную роль играет не столько химический состав применяемых сырья и материалов, сколько их физические характеристики, такие, например, как гранулометрический состав.

Образование и выделение из электролизеров фтористых соединений, основным из которых является фторид водорода, происходят непрерывно, хотя они и не связаны непосредственно с электрохимическим процессом, а обусловлены процессами испарения и разложения расплава электролита и загружаемых фтористых солей. Летучестью электролита и загружаемых фтористых солей обусловлено выделение из электролизеров лишь некоторой части твердых фторидов, обнаруживаемых в пыли. Вторым источником пылевидных фторидов служит механический унос загружаемых солей восходящими потоками анодных газов либо отсасываемой от электролизера газовоздушной смесью.

Источником выделения и выбросов в атмосферу смолистых веществ при производстве алюминия в электролизерах с самообжигающимися анодами (БТ и ВТ) является каменноугольный пек, используемый в качестве связующего при получении анодной массы. Смолистые вещества выделяются из электролизеров в результате термохимических процессов, происходящих при коксовании анодной массы. Второй источник выделения смолистых веществ связан с операцией перестановки токоподводящих штырей в аноде на электролизерах ВТ. При использовании рядовой анодной массы после раскручивания и извлечения штыря в образовавшееся отверстие в спеченной части анода затекает жидкая анодная масса из верхних зон. При попадании жидкой анодной массы в зону высоких температур происходит бурное коксование пека с образованием большого количества возгонов смолы, которое выбрасывается в атмосферу корпуса. Кроме того, сырая угольная масса налипает на горячий штырь в момент извлечения его из анода, когда раскаленная его часть касается слоя жидкой анодной массы, при этом в атмосферу корпуса также выделяются смолистые погоны.

Смолистые вещества, образующиеся при коксовании анодной массы на электролизерах ВТ и поступающие в газосборник, дожигаются в горелках. Полнота сгорания зависит от конструкции горелок, регулировки процесса горения и контроля за процессом. Часть несгоревшей смолы, особенно ее тяжелые фракции, конденсируется и вместе с пылью оседает в каналах газоходов, остальная поступает на газоочистку. В зависимости от типа электролизера, условий и уровня его эксплуатации объем и состав пылегазовоздушной смеси может изменяться.

*Таблица 9.12*. Выбросы пыли в атмосферу и образование отходов при производстве первичного алюминия

| Наименование | Единица измерения | Технология электролиза ОА | Технология электролиза самообжигающимися анодами | Технология электролиза ВТ |
|---|---|---|---|---|
| Пыль общая | кг/т Al | 3,4–4,9 | 3,20–5,50 | 3,2–16,9 |
| Угольная пена | кг/т Al | до 0,8 | до 13 | 15–43 |

На рис. 9.10 представлен график показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия.

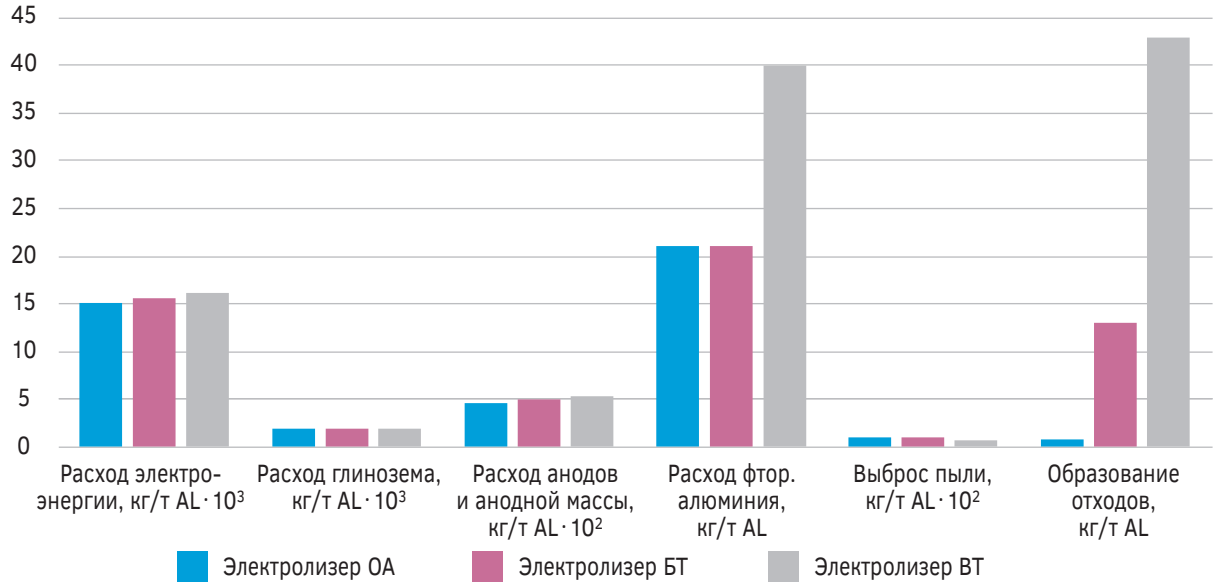



*Рис. 9.10*. График показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия

## РОЛЬ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Стремительный рост производства крылатого металла был обусловлен, с одной стороны, развитием технологий его производства, а с другой — расширением сфер применения алюминия. Индустриализация, урбанизация, технический прогресс — алюминий стал неотъемлемой составляющей этих процессов. Сегодня высокое потребление алюминия в оценке «килограмм на душу населения» признается экономистами одним из наглядных показателей сильной и развитой экономики. Неудивительно, что в лидерах по этому показателю находятся государства с высоким ВВП, являющиеся флагманами технического развития, такие как США, Япония, страны Европы.

### Предложение

Алюминиевый рынок делится на производителей первичного алюминия и сплавов на его основе — сегмент upstream, производителей алюминиевой продукции — сегмент downstream и производителей алюминия из вторичного сырья (переработка алюминия).

Сегмент upstream — это не только производство первичного алюминия и сотен различных сплавов, но и вся сырьевая цепочка, которая предшествует этому процессу. Для производства алюминия требуется добыть боксит, переработать его в глинозем и доставить на алюминиевый завод. Крупнейшие мировые производители алюминия, как правило, представляют собой вертикально-интегрированные холдинги, включающие в себя бокситовые рудники и глиноземные заводы. Преимуществом вертикальной интеграции для крупных компаний является то, что они становятся независимыми от колебаний цен и многих других внешних факторов, обеспечивая себя сырьем в необходимом объеме для непрерывного процесса производства алюминия. Небольшие производители, как правило, закупают сырье у внешних поставщиков.

Наибольшие запасы бокситов в мире сосредоточены в тропическом и субтропическом поясах Земли, поэтому основные объемы добычи обеспечивают страны Юго-Восточной Азии, Латинской Америки и Африки, а также Австралия. Как правило, в этих регионах расположено и производство глинозема, что позволяет экспортировать более сложный продукт с добавленной стоимостью.

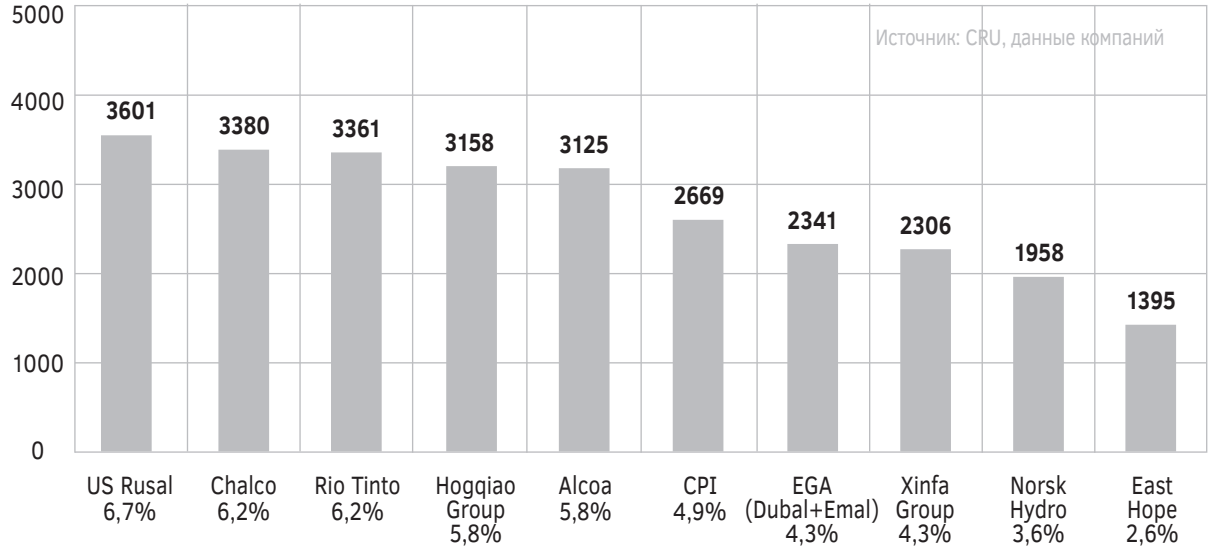



*Рис. 9.11.* Крупнейшие производители алюминия в мире

На сегодняшний день крупнейшим производителем первичного алюминия в мире является российская компания РУСАЛ, созданная в 2000 г. В ее состав входят предприятия по производству алюминия, глинозема и бокситов на территории России и Украины, а также иностранные активы, вошедшие в результате серии слияний и поглощений в 2000-х гг.

Старейшим производителем металла в мире, также входящим в ТОП-10, является американская Alcoa. Она была основана 1 октября 1888 г. одним из изобретателей применяемой сегодня во всем мире технологии электролиза алюминия Чарльзом Мартином Холлом и называлась тогда Pittsburgh Reduction Company. В 1907 г. название изменили на «Алюминиевая компания Америки» (Aluminum Company of America), оно сохранялось до 1999 г., когда его официально сократили до Alcoa.

Еще один участник рейтинга — австралийско-британский концерн Rio Tinto, одна из крупнейших в мире диверсифицированных горнометаллургических компаний. В 2007 г. она приобрела за рекордные 38 млрд долларов канадскую алюминиевую компанию Alcan (Aluminum Company of Canada Limited), что позволило ей стать одним из глобальных лидеров по производству алюминия. Кстати, Rio Tinto обошла Alcoa, которая также участвовала в борьбе за Alcan.

Западную Европу в топ-листе производителей представляет норвежская Hydro. Компания тоже имеет более чем столетнюю историю: она была основана в 1905 г. изначально для реализации проектов в гидроэнергетике и с тех пор выросла в крупный международный энергометаллургический холдинг.

За последние несколько лет в список крупнейших upstream-производителей вошло большое количество китайских компаний — Chalco, Hongqiao, Xinfa, East Hope, и их доля постоянно растет. Сегодня китайский алюминиевый рынок является крупнейшим в мире по объемам производства, на него приходится около половины мирового объема. При этом свыше 90% алюминиевого производства в Китае обеспечивается энергией работающих на угле электростанций, создавая серьезную нагрузку на окружающую среду.

Еще одним крупным игроком рынка становятся компании из Ближнего Востока, такие как EGA (объединенные Dubal и Emal), Alba, Qatar Aluminium, Sohar Aluminium и другие. Все они

обладают важным преимуществом: возможностью использовать для производства дешевую электроэнергию, получаемую при сжигании попутного газа нефтяных месторождений.

Быстро наращивают объемы производства компании из Индии — Hindalco, Vedanta и другие. По прогнозам, Индия может стать крупным экспортером алюминия на международный рынок, поскольку рост мощностей уже сегодня превышает объем внутреннего потребления.

Количество downstream-производителей в мире исчисляется тысячами. Их продукция — это огромный спектр товаров, начиная от алюминиевых полуфабрикатов и заканчивая готовыми алюминиевыми изделиями.

Среди крупнейших downstream-производителей — американские Novelis и Aleris, британская Rexam, европейские Constellium и SAPA и многие другие компании, производящие алюминиевые банки, фасадные материалы, части фюзеляжа и корпусов автомобилей, материалы упаковки, трубы, панели, профили и прочие виды огромного списка алюминиевой продукции.

В последнее время среди upstream-компаний наметилась тенденция к развитию собственных downstream-направлений, что позволяет им получать дополнительную прибыль. Например, Alcoa заявила, что взяла курс на трансформацию бизнес-модели и больше не будет являться чисто сырьевой компанией. Норвежская Hydro, оставаясь одним из лидеров по производству первичного металла, также является одним из ведущих европейских производителей downstream-продукции. Крупнейший производитель алюминия в мире РУСАЛ тоже имеет downstream-сегмент — производство всех видов алюминиевой фольги для нужд пищевой, строительной и электротехнической отраслей промышленности.

## Спрос

Производство алюминия в мире из года в год увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом на этот металл.

В среднем мировая потребность в алюминии увеличивается на 5–7% ежегодно. Так, мировое потребление первичного алюминия в 2014 г. по сравнению с 2013 г. увеличилось на 7% — до 54,8 млн т. А по итогам 2015 г. мировой спрос должен вырасти еще на 6% — до 58 млн т.

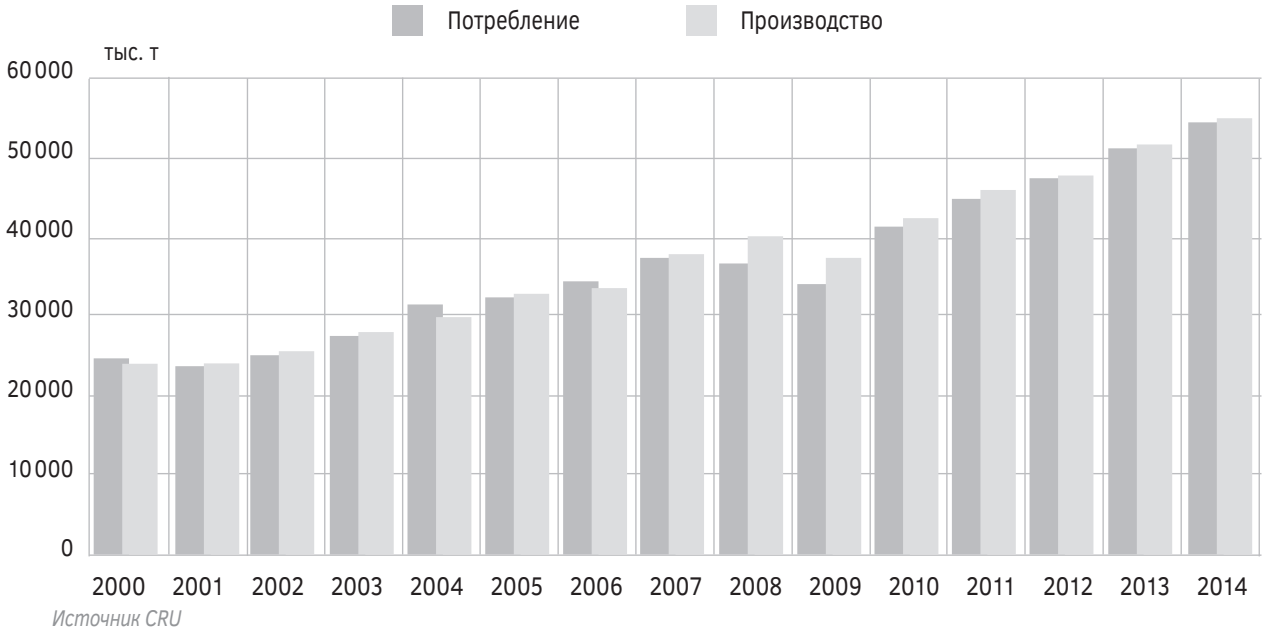



*Рис. 9.12*. Производство и потребление алюминия в мире

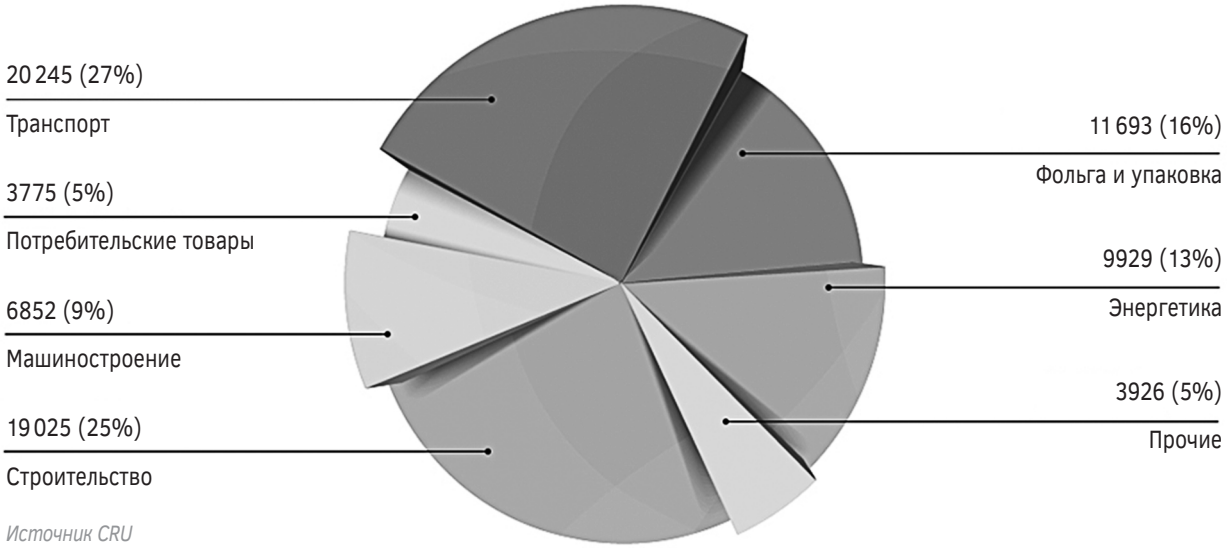



*Рис. 9.13.* Потребление по отраслям (тыс. т)

Вместе с тем рост потребления алюминия происходит на фоне глобальной урбанизации и индустриализации. И если в странах с развитой экономикой уже достигнут высокий уровень экономического развития, то развивающиеся страны как раз весьма активно наверстывают упущенное.

Глобальный алюминиевый рынок сегодня можно условно разделить на две части: Китай и все остальные страны. За последнее десятилетие Китай продемонстрировал феноменальные темпы экономического роста, и в том числе стал крупнейшим в мире производителем и потребителем алюминия.

На КНР сегодня приходится половина всего мирового объема производства и потребления алюминия, ни одна другая страна не может приблизиться к Китаю по этому показателю. При этом все свои потребности в первичном металле Китай закрывает исключительно собственным же производством, поэтому чаще всего он рассматривается отдельно от мирового. В то же время Китай активно наращивает экспорт алюминиевых полуфабрикатов, конкурируя на глобальном рынке с западными компаниями.

На втором и третьем местах по объемам потребления алюминия — рынки Европы и США, где спрос исторически очень велик по причине высокого уровня промышленного развития экономик этих стран. Еще один крупный рынок — Япония, не только страна с развитой экономикой, но и родина огромного количества технических новинок в сфере электроники и приборостроения. При этом Страна восходящего солнца импортирует весь необходимый ей первичный металл, совершенно не имея собственного алюминиевого производства. Причина в отсутствии на ее территории мощных и дешевых источников электроэнергии.

Также постоянный хороший прирост потребления показывают активно развивающиеся страны Юго-Восточной Азии.

Наибольшее количество алюминия идет на нужды транспортной и строительной отраслей экономики — в 2014 г. на них пришлось 27 и 25% соответственно. Из алюминиевых сплавов делают детали фюзеляжа самолетов, части корпусов автомобилей и поездов, детали топливных систем, систем кондиционирования, части моторов, детали кресел и внутренней отделки, яхты и морские суда, космические шаттлы и твердое ракетное топливо. В наш век в моде легкость, скорость и надежность, а гарантировать все это может только алюминий.

В строительстве этот металл также завоевал весьма прочные позиции: без него не обходится ни один небоскреб, ни одно металлокаркасное здание, да и обычный жилой дом. Оконные и дверные панели, кровля, строительные каркасы, фасадные и несущие конструкции,

элементы внешнего декора, сайдинги, лестницы, системы кондиционирования и отопления — все это сегодня производится с использованием алюминия и сплавов на его основе.

Следующими по объему отраслями использования являются упаковка и энергетика — 16 и 13%. Алюминий незаменим при производстве линий электропередач и телефонных проводов, радиолокаторов, конденсаторов и так далее. В сфере упаковки главные позиции занимают пищевая фольга и алюминиевая банка для напитков. В мире ежегодно производится более 200 млрд банок для напитков, ну и ничего более удобного и качественного, чем упаковка из алюминиевой фольги, человечество пока еще не придумало.

## Торговля

Алюминий является биржевым товаром. Такие товары имеют стандартизированные потребительские свойства — потребителю не важно, какая именно компания произвела их. Они взаимозаменяемы, легко транспортируются и хранятся, могут дробиться на партии. Именно поэтому на сырьевых биржах торгуется upstream-продукция, а не полуфабрикаты или готовые изделия. Когда товарно-сырьевые биржи только создавались, они служили местом для заключения физических контрактов на поставку таких биржевых товаров, однако с увеличением объемов торгов и развитием финансовых инструментов роль бирж изменилась.

Сегодня на них торгуются фьючерсные контракты на сырье — финансовые инструменты, которые практически никогда не влекут за собой реальную физическую поставку (вместе с тем такая возможность не исключается). В результате торгов устанавливается цена, служащая ориентиром для производителей и потребителей по всему миру. Сама биржа при этом ничего не покупает и не продает, она лишь предоставляет площадку для проведения торгов профессиональным игрокам рынка — брокерам.

В мире существует несколько товарно-сырьевых бирж, торгующих металлами, которые расположены в регионах с крупнейшим спросом на них. В Китае — это Шанхайская фьючерсная биржа (SHFE), в Северной Америке — Чикагская товарная биржа (CME). Однако крупнейшей в мире биржей по торговле металлами в целом и алюминием в частности является Лондонская биржа металлов (LME), образованная еще в 1877 г.

LME начала продавать алюминий в 1978 г. Более века назад, когда биржа только создалась, торговцы встречались в небольшой кофейне недалеко от Королевской биржи и заключали сделки с голоса, собираясь в круг. Сегодня на LME ежегодно торгуются около 3,7 млрд т различных металлов на сумму примерно 14,5 трлн долларов. Это в три раза больше, чем ВВП Японии.

В июне 2012 г. новым владельцем LME стала Гонконгская фондовая биржа (HKEX), которая приобрела ее за 1,4 млрд фунтов стерлингов.

Алюминий является крупнейшим по объему торгов биржевым товаром среди всех металлов в мире. На него приходится почти треть заключаемых на LME контрактов. На бирже торгуются свыше 100 марок алюминия от ведущих производителей, она работает более чем с 700 различными специализированными складами для металлов в 14 странах мира. Это необходимо, чтобы покупатель всегда мог физически приобрести купленый металл, так как, несмотря на то что львиная доля контрактов — фьючерсные сделки, никто не запрещает покупать алюминий на бирже реальному промышленному покупателю для производственных нужд. Такая функция биржи получила название «рынок последней надежды». На практике это означает, что покупатель всегда может купить, а продавец всегда может продать металл по биржевому контракту по установленной биржевой цене и получить или поставить товар на один из биржевых складов.

Главным органом управления торгами является биржевой комитет, он ежедневно объявляет официальную цену дня на алюминий, устанавливая ее по совокупному результату прошедших торгов. Торговля проходит в соответствии со стандартными биржевыми

контрактами. В каждом таком контракте определяется объем товара (для алюминия это минимум 25 т), условия поставки (это может быть любой склад Лондонской биржи), срок исполнения (немедленная поставка, трехмесячный, шестимесячный срок и т. д.) и требования к качеству (металл должен быть сертифицирован на бирже).

Биржевая цена, устанавливаемая в ходе торгов, — ключевой ценовой ориентир (price benchmark) для продавцов и покупателей алюминия по всему миру, но это не конечная стоимость металла.

Сегодня итоговая цена на алюминий для потребителя складывается, как правило, из трех составляющих: биржевой цены, региональной премии, которая зависит от доступности металла на конкретном рынке, а также продуктовой наценки в зависимости от типа продукции. Если ценовым ориентиром в мировой торговле служат котировки алюминия на LME, то в переговорах о размере премии за физическую поставку производители и потребители ориентируются на данные о премиях, публикуемых в авторитетных специализированных журналах, таких как Platts, Metal Bulletin, Nikkei.

Связующим звеном между производителями и потребителями металла зачастую выступают трейдеры. Они обеспечивают обработку средних и небольших заказов, берут на себя часть финансовых рисков сделки, располагают собственными сетями складов, удобно расположенных для потребителей, а также оказывают прочие сопутствующие услуги.

## Кризис 2008 года

Когда биржи только появлялись, считалось, что формируемая на них цена наиболее справедлива, так как отражает реальный баланс спроса и предложения. Однако мировой финансовый кризис 2008 г. выявил существенные недостатки биржевого ценообразования.

Последовавший за ним спад потребительской активности и промышленного производства стал серьезным испытанием для алюминиевой отрасли. Спрос на алюминий резко сократился, а цена за тонну алюминия упала с 3200 до 1200 долларов. Производители были вынуждены поставлять алюминий по контрактам LME, поскольку не могли так же быстро сократить объемы выплавляемого металла вслед за падением спроса. В результате за несколько лет объем хранящегося на складах LME металла вырос с 1 до 5 млн т.

Ситуацией воспользовались финансовые игроки: алюминий стал для них финансовым инструментом с гарантированной доходностью за счет доступного дешевого финансирования и ценового контанго — ситуации, при которой будущая цена на металл выше текущей. В итоге объем биржевой торговли алюминием на LME с 2007 по 2014 г. вырос в 34 раза (+3300%), тогда как в действительности реальный физический спрос за этот же период увеличился не более чем на 40%.

Финансовые сделки «заморозили» весь скопившийся на складах объем алюминия, поскольку каждая такая сделка должна быть обеспечена реальным металлом. Покупатели, желающие приобрести алюминий по биржевому контракту, были вынуждены ожидать поставки со склада в течение полутора лет и больше. Сформировались очереди на отгрузку алюминия со складов LME. В свою очередь это привело к росту премий за немедленную поставку металла — их размер в середине 2014 г. превышал 20% биржевой цены алюминия. Тогда как средний уровень премии за последние 25 лет колебался в размере 60–80 долл./т, то есть в пределах 5%.

Лондонская биржа попыталась вернуть рынок в сбалансированное состояние, проведя внутреннюю реформу, в ходе которой были установлены новые правила загрузки и отгрузки металла со складов, что существенно ограничило возможности финансовых игроков.

В то же время с учетом высоких объемов алюминия, хранящегося на складах, крупнейшие производители алюминия сократили часть своего производства за счет устаревших

и нерентабельных мощностей. В частности, были остановлены предприятия, работавшие с использованием угольной генерации и не отвечающие современному взгляду на нормативы выбросов углекислого газа, что сделало отрасль в целом более эффективной и экологичной.

Наиболее активными в этом процессе были западные компании, такие как РУСАЛ и Alcoa, тогда как производители Китая и Ближнего Востока, напротив, продолжили наращивание объемов выпуска. Ближневосточные компании исходят из того, что наличие дешевой электроэнергии за счет использования попутного газа позволяет им иметь крайне низкую себестоимость алюминия и выгодно продавать металл даже при низких ценах. Что же касается Китая, то на первый план здесь выходят вопросы обеспечения рабочих мест и поддержания высоких темпов экономического роста.

Несмотря на все сложности, прогнозируется, что потребление алюминия продолжит динамично расти. К 2030 г. объем потребления крылатого металла может перевалить за 80 млн т, таким образом позволяя алюминию не только отстоять, но и укрепить свои лидерские позиции как ключевого конструктивного материала нашего времени.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

Алюминиевая промышленность по масштабам производства и потребления занимает первое место среди подотраслей цветной металлургии. По этим же показателям она второй по важности металлургический сегмент и уступает лишь стали. Меняется уклад экономики, образ жизни, социализируется общество — алюминий соответствует данным тенденциям развития.

### Баланс спроса и предложения

Производство алюминия в мире из года в год увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом. Так в период с 2009 по 2016 г. мировой рынок алюминия вырос на 30%.

Несмотря на колебания мировой экономики 2017 г. оказал положительное влияние на алюминиевую отрасль. Мировой спрос на алюминий по итогам 2017 г. вырос на 6% по сравнению с предыдущим годом благодаря экономическому росту в крупнейших регионах мира, включая Китай, Европу и Северную Америку. В результате уверенного роста спроса дефицит на мировом рынке алюминия составил 0,6 млн т в 2017 г. и, по оценкам, увеличится до 1,7 млн т в 2018 г. Мировой рост потребления на алюминий поддержан, прежде всего, быстрым экономическим развитием и урбанизацией Китая, доля которого в общем объеме мирового потребления составляет более 50%.

Ожидается, что производство первичного алюминия в мире в 2018 г. вырастет на 1% по сравнению с ростом 5,7% в 2017 г.

Основной причиной изменения баланса между спросом и предложением специалисты называют сокращение производства алюминия в Китае, где правительство требует закрытия предприятий, выпускающих металл без лицензии и с избыточным воздействием на окружающую среду. Данная реформа оптимизации привела к сокращению на 10 млн т в 2017 г. нелегальных мощностей, как построенных, так и ранее проектируемых.

Мировой рынок алюминия с 2017 г. вступил в период дефицита, который продлится, по меньшей мере, до 2020 г. Этим обусловлено сокращение складских запасов на Лондонской бирже металлов с 2,2 млн т на конец 2016 г. до 1,3 млн т на октябрь 2017 г.

В ближайшие 5 лет в среднем прогнозируется увеличение мирового потребления на 4–5% ежегодно, что влечет за собой сохранение дефицита первичного алюминия.

## Уровень цены на алюминий

В 2017 г. цена алюминия на LME выросла на 22,7% по сравнению с прошлым годом. Данный рост произошел на фоне масштабного сокращения мощностей в Китае и постоянного сокращения запасов на LME. В Китае рост себестоимости привел к тому, что существенная часть китайского алюминиевого производства находилась в конце 2017 г. на грани рентабельности.

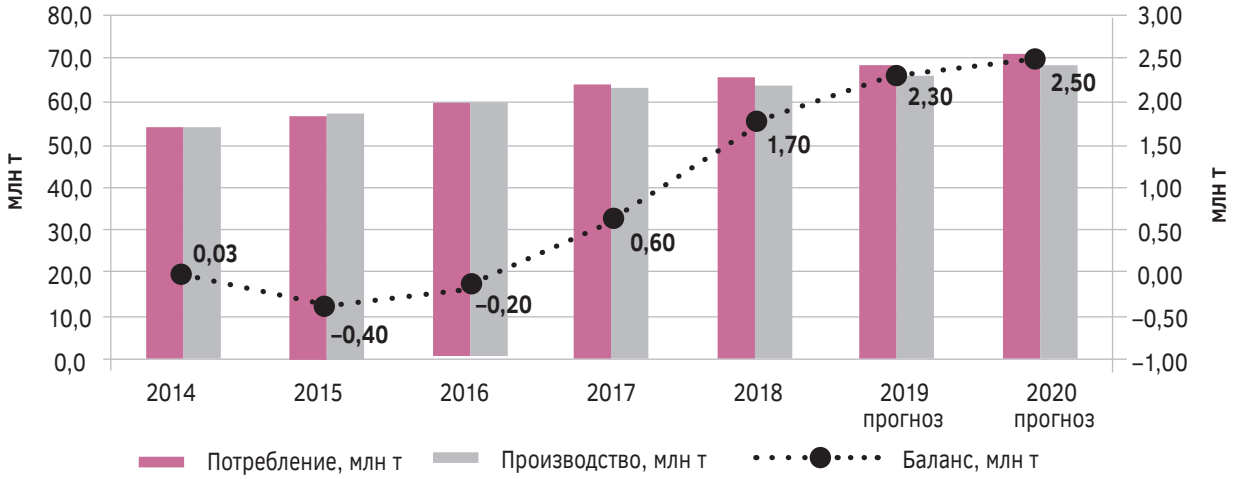



*Рис. 9.14*. Мировой баланс производства и потребления алюминия, 2014–2020 гг.

Начало 2018 г. оказалось богатым на события. В результате объявления США о введении пошлин на импорт алюминия и введении санкций против Российского производителя первичного алюминия АО «Русал» в апреле 2018 г. цена алюминия на LME достигла 2550 долларов США за тонну — почти своего шестилетнего максимума, закрепившись впоследствии на уровне 2211 долларов США за тонну.

По оценкам АКРА, в 2018–2019 гг. средние цены на алюминий составят 2050–2150 долл./т. Дополнительную поддержку ценам на металлы оказывает снижение широкого индекса доллара за восемь месяцев 2017 г.

## Производство алюминия в мире

Производство первичного алюминия в мире в 2017 г. увеличилось на 5,7% — до 63,5 млн т. Лидером по-прежнему остается Китай, где прирост составил 9,5% (до 36,4 млн т). Производство первичного алюминия на рынках вне Китая увеличилось на 1% — до 27,2 млн т. Распределение производства алюминия по регионам, по данным Международного института алюминия, отражено в табл. 9.13.

Китай остается главным и практически единственным драйвером мирового производства — 57% и потребления — 54,4% металла. По данным руководства страны, алюминиевый комплекс нуждается в серьезной реструктуризации. Установленные мощности по выпуску первичного металла достигли 40 млн т при потреблении около 33 млн т. Избыток мощностей в основном относится к экологически сложному электролизному переделу в составе неэффективных устаревших заводов.

Однако в связи с ужесточением экологических норм в регионе, высоких издержек на перезапуск и низкой рентабельности существенная часть алюминиевых производств, закрытых в течение зимнего периода, не будут перезапущены после его окончания. Кроме того, реализуемые мероприятия могут привести к сокращению производства алюминия в годовом выражении на 1 млн т.

*Таблица 9.13*. Структура производителей алюминия по регионам

| Регион | 2016 г. | | 2017 г. | | Прирост, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | млн т | % | млн т | % | |
| Северная Америка | 4,0 | 7 | 4,0 | 6 | –1,9 |
| Южная Америка | 1,4 | 2 | 1,4 | 2 | 1,2 |
| Западная Европа | 3,8 | 6 | 3,8 | 6 | –0,1 |
| Восточная и Центральная Европа | 4,0 | 7 | 4,0 | 6 | 0,5 |
| Африка | 1,7 | 3 | 1,7 | 3 | –0,8 |
| Азия (без Китая) | 8,6 | 14 | 9,1 | 14 | 5,3 |
| Китай | 32,6 | 55 | 35,9 | 57 | 10,0 |
| Австралия и Океания | 2,0 | 3 | 1,8 | 3 | –7,8 |
| Оценочный незарегистрированный | 1,8 | 3 | 1,8 | 3 | 0,0 |
| МИР В ЦЕЛОМ | 59,9 | 100 | 63,5 | 100 | 6,4 |

Дополнительным фактором сокращения мощностей в Китае являются претензии США по поводу чрезмерного роста поставок алюминиевых полуфабрикатов из Китая.

Экспорт алюминиевых полуфабрикатов из Китая находится под существенным давлением в связи с международными антидемпинговыми расследованиями. В результате чего США объявил введение пошлин на импорт алюминиевой продукции.

## Потребление алюминия в мире

Рост потребления алюминия происходит на фоне глобальной урбанизации и индустриализации. И если в странах с развитой экономикой уже достигнут высокий уровень экономического развития, то развивающиеся страны как раз весьма активно наверстывают упущенное.

Наибольшее количество алюминия идет на нужды транспортной и строительной отраслей экономики — в 2017 г. на них пришлось 27 и 26%, соответственно. В наш век в моде легкость, скорость и надежность, а гарантировать все это может только алюминий.

В строительстве этот металл завоевал весьма прочные позиции: без него не обходится ни один небоскреб, ни одно металлокаркасное здание, да и обычный жилой дом уже трудно представить без алюминиевых элементов.

Следующими по объему отраслями использования являются энергетика и машиностроение — 14 и 9%. Алюминий незаменим при производстве линий электропередач и телефонных проводов, радиолокаторов, конденсаторов и так далее. Из алюминиевых сплавов делают детали фюзеляжа самолета, части корпусов автомобилей и поездов, детали топливных систем, систем кондиционирования, части моторов, детали кресел и внутренней отдели, яхты и морские суда, космические шаттлы и твердое ракетное топливо.

В общей структуре потребления упаковка занимает 9%. Главные позиции занимают пищевая фольга и алюминиевая банка для напитков. В мире ежегодно производится более 200 млрд банок для напитков. Мировой спрос на алюминий по итогам 2017 г. вырос на 6%, по сравнению с предыдущим годом достиг 64,2 млн т благодаря экономическому росту в крупнейших регионах мира, включая Китай, Европу и Северную Америку.

Спрос на алюминий вне Китая составил 3,7%, увеличившись до 29,2 млн т. Спрос на алюминий в Китае увеличился на 7,8%, увеличившись до 34,9 млн т. Несмотря на высокие цены на алюминий, процесс перезапуска мощностей вне Китая идет медленно в связи с высокими издержками и отсутствием конкурентного энерготарифа.

*Таблица 9.14*. Структура потребления алюминия по отраслям

| Отрасль потребления | 2016 г. | | 2017 г. | | Прирост, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | млн т | % | млн т | % | |
| Транспорт | 15,3 | 25,7 | 17,1 | 27 | 11,3 |
| Строительство | 15,5 | 26 | 16,7 | 26 | 7,7 |
| Энергетика | 8,4 | 14 | 9,0 | 14 | 7,5 |
| Машиностроение | 5,7 | 9,5 | 6,0 | 9 | 5,8 |
| Фольга | 4,8 | 8 | 5,0 | 8 | 4,8 |
| Упаковка | 4,3 | 7,2 | 4,5 | 7 | 4,6 |
| ТНП | 3,0 | 5 | 3,1 | 5 | 3,2 |
| Другие | 2,7 | 4,6 | 2,8 | 4 | 2,9 |
| ИТОГО | 59,7 | 100 | 64,2 | 100 | 7,54 |

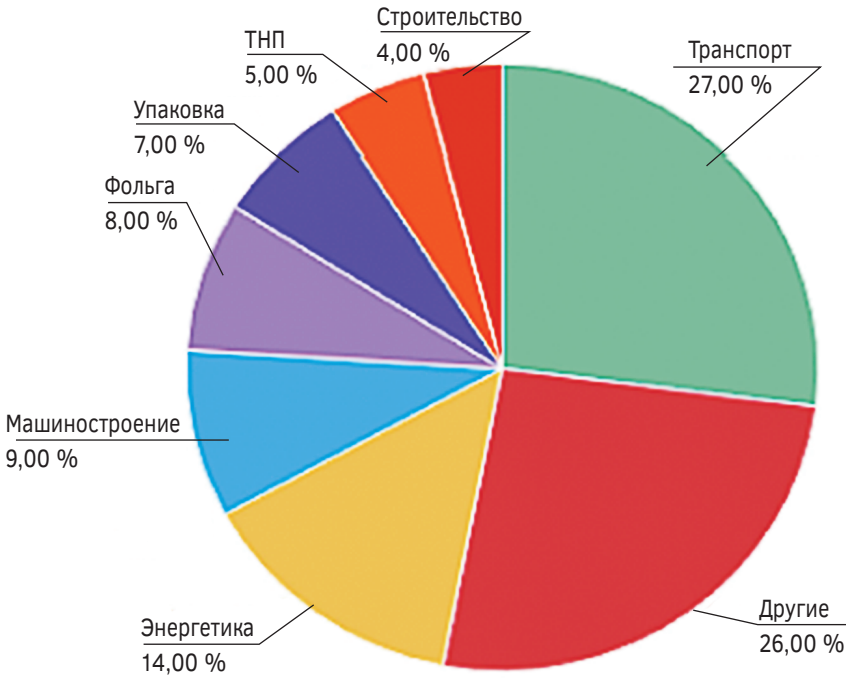



*Рис. 9.15*. Структура потребления алюминия по отраслям за 2017 г.

*Таблица 9.15*. Структура потребления алюминия по регионам

| Регион | 2016 г. | | 2017 г. | | Прирост, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | млн т | % | млн т | % | |
| Северная Америка | 4,7 | 8 | 5,0 | 7,8 | 6,8 |
| Южная Америка | 1,4 | 2 | 1,5 | 2,3 | 6,6 |
| Западная Европа | 4,8 | 8 | 5,1 | 7,9 | 7,0 |
| Восточная и Центральная Европа | 3,6 | 6 | 3,8 | 5,9 | 6,6 |
| Африка | 1,6 | 3 | 1,6 | 2,5 | 4,5 |
| Азия (без Китая) | 8,2 | 14 | 8,7 | 13,5 | 6,5 |
| Китай | 32,1 | 54 | 34,9 | 54,4 | 8,7 |
| Австралия и Океания | 1,8 | 3 | 1,9 | 2,9 | 5,7 |
| Оценочный незарегистрированный | 1,8 | 3 | 1,8 | 2,8 | 0,0 |
| МИР В ЦЕЛОМ | 60,0 | 101,0 | 59,7 | 100 | 7,5 |

В обозримой перспективе основным фактором, определяющим рыночную ситуацию, останется соотношение спроса и предложения алюминия в Китае, а также состояние запасов на бирже LME.

Состояние мирового рынка алюминия характеризуется как умеренно-дефицитное.

Как повлияют события, связанные с введенными антироссийскими санкциями против компании АО «Русал», на мировой рынок, пока говорить рано, но аналитики не исключают, что мировой рынок алюминия ждет реконфигурация.

## Перспективные направления в производстве алюминия

Инертные аноды всегда были целью производителей алюминия. Для инертного анода пытались использовать многие материалы. На самом деле полностью инертных материалов не существует, но некоторые материалы могут расходоваться с замедленной скоростью, и количество примесей, получаемых за счет растворения инертных анодов, может быть приемлемо для промышленного производства.

На сегодняшний день у «РУСАЛа» уже есть материал для инертного анода, который позволяет производить алюминий с более низкой себестоимостью по сравнению с технологией угольных анодов. На Красноярском алюминиевом заводе технология электролиза с инертными анодами на силу тока > 100 кА проходит опытно-промышленные испытания в опытном корпусе электролиза.

Химическая реакция производства алюминия в электролизерах с инертными анодами может быть представлена в следующем виде:

$$Al_2O_3 \rightarrow 2Al + 1{,}5O_2.$$

Таким образом, если при использовании обожженных анодов в электролизе при получении 1 т алюминия сгорает 0,5 т углерода с образованием 1,4 т оксида и диоксида углерода, то при использовании нерасходуемых инертных анодов в атмосферу будет выделяться 0,9 т кислорода. Кроме того, использование инертных анодов позволит исключить выбросы диоксида серы и смолистых веществ, значительно снизить выбросы пыли и фторидов за счет высокой герметизации электролизеров.

Для очистки от фтористых соединений и пыли при эксплуатации электролизеров с инертными анодами предусматривается установка сухой очистки газов (реактор + рукавный фильтр) с эффективностью по фтористым соединениям 98–99%.

Удельное количество ЗВ, поступающих в атмосферу при электролизе с инертными анодами, может составить:

– пыль — до 2 кг/т Al;
– фтористый водород — до 0,3 кг/т Al;
– твердые фториды — до 0,4 кг/т Al.

## Перспективные направления в производстве глинозема

Последние годы большое внимание уделяется исследованиям по усовершенствованию технологии спекания нефелинов, а именно переводу печей спекания на сухой или полусухой способ термообработки шихты в коротких печах с теплообменниками.

Подобная технология внедрена в цементной промышленности для обжига клинкера и дала значительный экономический и экологический эффекты (экономия топлива — более 30%).

Реконструкция существующих печей спекания «мокрой» шихты или сооружение подобных установок при строительстве новых глиноземных заводов позволит достичь подобного эффекта. Однако валовые выбросы $NO_x$ могут быть существенно снижены только за счет установки на печах горелок с низким выделением оксидов азота и внедрения специальных

перспективных технологий — технологии селективного некаталитического восстановления (SNCR) и технологии селективного каталитического восстановления (SCR), что позволит снизить выбросы $NO_x$ от печей глиноземного производства в атмосферу до 70%.

SNCR заключается в инжекции водного раствора аммиака (до 25% $NH_3$), водных растворов соединений аммиака или мочевины в дымовые газы для восстановления NO до $N_2$. В SCR NO и $NO_2$ восстанавливаются до $N_2$ с помощью $NH_3$ и катализатора.

Перспективными технологиями следует также считать применение современного газоочистного оборудования — электрофильтров и рукавных фильтров, обеспечивающих концентрацию пыли в выбросе менее 50 мг/нм$^3$, а также систем контроля, управления ремонтом, обслуживания при эксплуатации ГОУ.

Образование производственных отходов (шлама) неизбежно. Для его складирования постоянно требуются дополнительные площади. В настоящее время ведутся разработки, направленные на использование красного шлама в строительстве, извлечение из шлама ценных компонентов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ


1. Алюминиевая промышленность мира // География. — 2001. — № 10. — С. 21.
2. Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения / [Н. А. Белов и др.] ; под ред. А. Е. Миронова, Н. А. Белова, О. О. Столяровой. — М. : МИСиС, 2016. — 222 с.
3. Алюминий: Свойства и физическое металловедение : пер. с англ. / под ред. Дж. Е. Хэтча. — М. : Металлургия, 1981. — 423 с.
4. *Беляев, А. И.* Металловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов [и др.]. — М. : Металлургия, 1983. — 280 с.
5. *Борисоглебский, Ю. В.* Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. — Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. — 438 с.
6. ИТС НДТ 11–2016. Производство алюминия / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2016. — 156 с.
7. Отчет ФГУП «НИИ Атмосфера» «Анализ систем нормирования выбросов ЗВ и гигиенических нормативов, установленных к производству глинозема и алюминия в России и зарубежных странах (Европа и Северная Америка)», 2007–2009 гг.
8. Передовой опыт производства и переработки алюминия : информационный бюллетень. — СПб., 2000.
9. Перспективы развития технологических процессов глиноземного производства : сб. науч. тр. / АО «ВАМИ». — СПб., 1992. — 137 с.
10. Сайт об алюминии [электронный ресурс]. — URL: https://aluminiumleader.ru (дата обращения: 29.10.2019). — Загл. с экрана.
11. Современные технические решения электролитического получения алюминия и их реализация в промышленности : информационный бюллетень. — СПб., 1999.