

А.И. БЕЛЯЕВ, О.И. ПАВЛОВА

ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ  
ФЕДОТЪЕВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО • МЕТАЛЛУРГИЯ • 1965

*АННОТАЦИЯ*

Брошюра посвящена научно-педагогической и инженерной деятельности выдающегося электрохимика и электрометаллурга, члена корреспондента Академии наук СССР П. П. Федотьева.

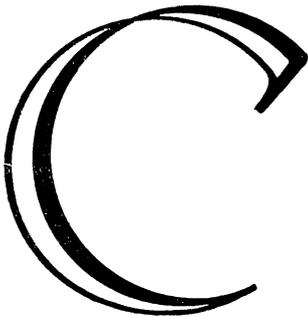
С именем П. П. Федотьева тесно связано развитие химической технологии, электрохимии и электрометаллургии как научных дисциплин и отраслей промышленности в нашей стране. П. П. Федотьев — основоположник школы электрометаллургии цветных металлов. Его разносторонние исследования в области химической технологии и электрометаллургии составляют ценнейший вклад в отечественную и мировую науку. В течение тридцати лет (с 1904 по 1934 г.) протекала педагогическая деятельность П. П. Федотьева — профессора Политехнического, а затем и Технологического институтов в Ленинграде. За это время из его научной школы вышли многочисленные ученики, сами ставшие крупными деятелями науки и промышленности.

В книге рассматривается деятельность П. П. Федотьева в области прикладной электрохимии и электрометаллургии и его роль в создании научной школы.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся электрохимией, электрометаллургией цветных металлов и историей науки и техники.

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ



именем выдающегося русского ученого-металлурга Павла Павловича Федотьева тесно связано развитие химической технологии, электрохимии и электрометаллургии в нашей стране. Он — основоположник отечественной научной школы электрометаллургии цветных металлов. П. П. Федотьев был весьма

разносторонним ученым. Ему принадлежат фундаментальные исследования в химической технологии, электрохимии и электрометаллургии, составившие ценнейший вклад в отечественную и мировую науку.

П. П. Федотьев свои научные исследования неразрывно связывал с потребностями практики и, наоборот, из практики черпал материал для научных теоретических выводов и обобщений. Ставя те или иные научные проблемы, он всегда имел в виду решение определенных прикладных задач, возникавших перед отечественной промышленностью.

Инженерная, научная и педагогическая деятельность П. П. Федотьева может быть разделена примерно на три пе-

риода: первый — с 1889 по 1904 г., когда он как инженер-технолог работал на химических заводах; второй — с 1904 г., когда после защиты диссертации он начал педагогическую и научную деятельность в Петербургском политехническом институте; этот период, продолжавшийся до 20-х годов, был в значительной мере связан с разработкой П. П. Федотьевым вопросов электрохимии и электрометаллургии водных растворов цветных металлов; наконец, третий период, охватывающий 20-е и частично 30-е годы, в большей степени был посвящен решению проблемы получения легких металлов и прежде всего алюминия, а также организации его производства в нашей стране.

Конечно, такая периодизация в научной деятельности П. П. Федотьева условна и отдельные ее этапы нередко развивались параллельно. Так, инженерно-техническая деятельность П. П. Федотьева в течение пятнадцати лет (с 1889 г.) на ряде заводов химической промышленности продолжалась и после, когда он стал профессором Петербургского политехнического института. Научными вопросами электрометаллургии алюминия П. П. Федотьев занимался в 1910—1912 гг., но к практическому решению этой проблемы он смог приступить только в конце 20-х и начале 30-х годов.

В течение 30 лет (с 1904 по 1934 г.) П. П. Федотьев был профессором Политехнического, а затем и Технологического институтов в Ленинграде. Его многочисленные ученики впоследствии сами стали крупными деятелями науки и промышленности.

Перу П. П. Федотьева принадлежат книги по химии, химической технологии и электролизу металлов, обогатившие научную и техническую литературу в этих областях.

Данная работа, подготовленная к столетию со дня рождения П. П. Федотьева, не может считаться в полной мере биографией ученого — в ней, поставлена прежде всего задача кратко проанализировать научное наследие ученого и показать его значение не только для своего времени, но и для современной науки и практики.

Авторы приносят глубокую благодарность ученикам П. П. Федотьева, любезно поделившимся с ними своими воспоминаниями об их учителе.

Особенно же авторы признательны сыну П. П. Федотьева, профессору Н. П. Федотьеву, а также профессору Б. А. Сасс-Тисовскому и профессору Л. А. Фирсановой за ценные рекомендации, сделанные при просмотре рукописи.

# 1

## ЖИЗНЕОПИСАНИЕ ПАВЛА ПАВЛОВИЧА ФЕДОТЬЕВА

П

авел Павлович Федотьев родился 9 (22) июня 1864 г. в семье старшего фельдшера в городе Благовещенске на Амуре<sup>1</sup>. Среднее образование будущий ученый получил в Сибирской военной гимназии в городе Омске<sup>2</sup> (рис. 1), по окончании которой в 1881 г. поступил в Николаевское инженерное училище.

Однако в 1882 г. он его оставил и перешел на химическое отделение Петербургского технологического института, который и окончил в 1888 г. Этот шаг, надо полагать, был продиктован проявившейся уже тогда склонностью будущего ученого к химическим наукам.

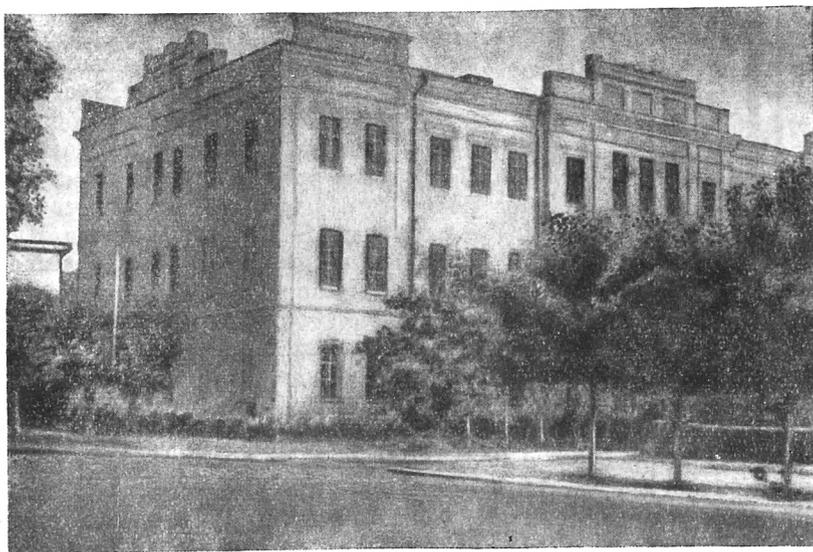
Еще будучи студентом, Павел Павлович проявил незаурядные творческие способности. Он внес изменения в одно из определений качественного анализа и сообщил об этом в письме к профессору Н. А. Меншуткину, автору общепри-

<sup>1</sup> Архив ЛПИ, д. 435, л. 9

<sup>2</sup> Ныне в здании б. гимназии помещается общеобразовательная трудовая политехническая школа № 19 Центрального района Омска.

нятого тогда руководства по аналитической химии. В следующем же издании своего учебника Меншуткин воспользовался предложением студента Федотьева.

Завершив свое образование, П. П. Федотьев поступил химиком на Бондюжский завод Товарищества П. К. Ушкова и К<sup>о</sup> близ Елабуги в Вятской губернии. Этот завод, расположенный в полутора верстах от Камы, им основан в 1868 г. Благодаря энергии Ушкова он превратился в крупнейшее химическое предприятие. В первое время основным продуктом, выпускаемым заводом, была серная кислота. В семидесятых годах стали получать поташные квасцы из красноуфимской глины, в начале восьмидесятых годов квасцы вытеснил сернокислый глинозем. П. К. Ушков был владельцем также Кокшанского завода. С начала 90-х годов XIX в. производство на заводах Ушкова значительно расширилось. Начали выпускать сульфат, соляную кислоту, каустическую соду и белильную известь. Изготавливали глиняную кислотоупорную посуду. Сырье использовали отечественное: уральские колчеданы, марганец, приволжские железняки и соль, донецкий каменный уголь, нефть.



*Рис. 1. Здание бывш. гимназии в Омске (1963 г.)*

К 1890 г. химические заводы П. К. Ушкава выпускали 150000 пудов серной кислоты, 100000 пудов квасцов, 50000 пудов сернокислого глинозема, 60000 пудов калиевого и натриевого хромпика, 30000 пудов медного купороса, 10000 пудов меди, 40000 пудов (древесного) поташа и 86000 пудов других продуктов (железного купороса, глауберовой соли, соляной и азотной кислот).

Заводы располагали большими механическими мастерскими. Для измельчения материалов и прокатки свинца в листы были построены водяные мельницы. Паровые котлы и печи работали на нефти, которая подавалась с пристани по нефтепроводу. Химические лаборатории были снабжены новейшим оборудованием. На Бондюжском заводе П. П. Федотьев мог пользоваться прекрасной специальной библиотекой.

В 1891—1893 гг. Федотьев заведовал химической лабораторией по испытанию материалов при Либаво — Роменской железной дороге в городе Минске. После этого он переехал в Петербург, где некоторое время заведовал аммиачными отделениями Петербургских газовых заводов, находящихся в эксплуатации «Общества Любимов, Сольве и К<sup>о</sup>». В 1894—1902 гг. П. П. Федотьев занимал технические должности на Охтенских заводах по производству пороха и других взрывчатых веществ в Петербурге. Летом 1896 г. во время первых опытов перехода Николаевской железной дороги на донецкий уголь (вместо древесного топлива) П. П. Федотьев был представителем этой дороги на каменно-угольных рудниках Донецкого бассейна по приемке и испытанию минерального топлива.

Работа П. П. Федотьева в течение 15 лет на различных химических заводах позволила ему приобрести значительные практические знания и опыт в области химико-технологических производств.

Вместе с тем в течение этого времени П. П. Федотьев написал и издал 7 книг и брошюр, в которых он обобщил приобретенный им опыт по отдельным химическим производствам.

Это книги: 1) Производство серной кислоты (1896 г.); 2) Добывание поташа из золы (1896 г.); 3) Современное состояние химической промышленности в России (1897 г. и II изд., 1902 г.); 4) Содовое дело и связанные с ним производства (1898 г.); 5) Заводское приготовление минеральных солей (1899 г.); 6) Азотная кислота и ее соли (1900 г.) и 7) Физико-химические таблицы (1901 г.).

Они явились существенным вкладом в русскую техническую литературу того времени по вопросам химической технологии. Ценность этих книг будет понятна, особенно если представить себе бедность в этой области русской литературы в 90 годах.

Лишь в 1862 г. в России была издана книга по технологии проф. П. А. Ильенкова. В 1895 г. профессор Киевского университета Н. А. Бунге издал курс химической технологии (I том). Со многими производствами автор не был знаком практически и руководство носило несколько кабинетный характер.

Одно из лучших руководств по технической электрохимии принадлежало профессору Московского университета Н. Н. Любавину. В 1898 г. появилось руководство инженера-технолога К. Г. Дементьева «Фабрично-химический контроль основных производств минеральной химии». Дементьев описывал приемы химического анализа для контроля производств содового процесса Леблана и химических производных глинозема.

Труды П. П. Федотьева — автора ряда ценных книг по химической технологии, не могли остаться незамеченными. В начале 1903 г., по рекомендации Д. И. Менделеева, он был командирован только что учрежденным Петербургским политехническим институтом за границу для подготовки к профессорской деятельности.

Будучи за границей, П. П. Федотьев изучал химию в Лейпцигском университете и интенсивно работал в Оствальдовском физико-техническом институте.

Свое исследование в этом институте Павел Павлович выполнял под наблюдением проф. Лютера. Сначала работа не ладилась; после изучения трудов Гиббса и Вант-Гоффа о фазовом равновесии Павел Павлович успешно применил в своей работе правило фаз.

По возвращении из этой заграничной командировки, через год после начала работы, П. П. Федотьев написал и в 1904 г. успешно защитил диссертацию на тему «Аммиачно-содовый процесс с точки зрения учения о фазах». Он получил звание адъюнкта и был избран Петербургским политехническим институтом экстраординарным профессором по кафедре технической электрохимии и минеральной технологии.

В результате изучения за рубежом химической и электрохимической промышленности П. П. Федотьев написал книгу «Современное состояние химической и электрохими-

ческой промышленности на континенте Европы», опубликованную в 1907 г.

Основной задачей заграничной командировки было изучение теоретической химии в Лейпцигском университете. Свободное же время весной 1903 г. и летом 1904 г. П. П. Федотьев уделил осмотру заводов Австрии, Германии, Швейцарии и Бельгии, где знакомился с минеральными химическими и электрохимическими производствами, электрометаллургией. За это время П. П. Федотьев посетил многие предприятия. Он был на Баденской анилино-содовой фабрике, на предприятиях Общества химических фабрик в Маннгейме, на заводах Австрийского общества химических и металлургических производств в Ауссиге, на объединенных химических фабриках в Леопольдсгалле, заводах акционерного общества цинковой промышленности в Гамборне (Рейнская область), посетил немецкое предприятие по разделению золота и серебра, металлургическое общество во Франкфурте-на-Майне, медные заводы в Бельгии, химические заводы во Франции и др.

Электрохимическая промышленность Европы занималась электролизом водных растворов и расплавленных веществ, а также электротермическими процессами. Электролитическим методом получали кислород и водород, хлор, едкие щелочи, соли хлорноватистой и хлорноватой кислот и др. На заводах рафинировали медь, никель, цинк, серебро, золото. Электролизом расплавленных электролитов получали натрий, калий, магний, кальций и алюминий. Все большее значение приобретала электрометаллургия железа.

Павел Павлович ознакомился с огромным числом различных производств. Широта его профессионального кругозора при этом поистине поразительна, так как в наши дни многие интересовавшие Федотьева вопросы минеральной технологии и промышленной электрохимии развились в самостоятельные отрасли техники.

На европейских заводах царил атмосфера обостренной конкуренции и многие предприниматели стремились сохранить свои производства в тайне. Федотьеву при осмотре этих заводов помогло то, что он был представителем Политехнического института, не заинтересованного в «секретах» предпринимателей. На ряде предприятий его поэтому знакомили с некоторыми тонкостями технологии, действующим и находящимся в ремонте оборудованием. Во время своего пребывания в Англии П. П. Федотьев предполагал осмот-

реть заводы нескольких крупных фирм, интересуясь общей обстановкой, масштабом производства. Англия к этому времени утратила ведущее положение в химической промышленности, и фабриканты с особым рвением старались сохранить свои секреты, считая, что в противном случае они потерпят еще больший ущерб. К осмотру заводов в Англии Федотьева так и не допустили. Все же он ознакомился с основными в то время производствами крупной минеральной химической промышленности. Он изучил камерный и контактный способы получения серной кислоты.

В 1906 г. П. П. Федотьев издал «Учебник товароведения» (выдержавший затем еще три издания — в 1907, 1910 и 1914 гг.), принятый почти во всех коммерческих училищах России.

В 1910 г. П. П. Федотьев был избран ординарным профессором, а летом 1911 г. был вторично командирован Петербургским политехническим институтом за границу, но теперь для ознакомления с заводскими электрическими печами. По материалам этой командировки П. П. Федотьев написал книгу «Электрические печи в металлургии стали», изданную в 1912 г.

К 1910 г. было завершено оборудование организованных П. П. Федотьевым в Петербургском политехническом институте лабораторий технической электрохимии и минеральной технологии.

В лаборатории технической электрохимии в 1910—1912 гг. П. П. Федотьев совместно с В. П. Ильинским выполнил очень важную научно-исследовательскую работу «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия», положившую начало глубокому научному изучению процесса электролитического получения алюминия.

Во время наступившей первой мировой войны П. П. Федотьеву пришлось вновь вернуться к инженерно-технической деятельности. Как крупный специалист он был привлечен Центральным военно-промышленным комитетом, а также Военным ведомством к разработке вопросов по химическим специальностям. В 1915 г. П. П. Федотьев был назначен председателем комиссии (при Главном артиллерийском управлении) по расширению производства хлора на юге России. В начале 1916 г. он был директором завода «Электрон» Южно-Русского общества в городе Славянске Харьковской губернии. А с лета 1916 г. до лета 1917 г. Федотьев занимал должность директора всех заводов Южно-

Русского общества по производству соды и других химических продуктов в городе Славянске. Здесь под его руководством был сооружен новый электрохимический завод по выпуску хлора и едкой щелочи и завод по производству мелинита. При строительстве электрохимического завода возникло много неожиданных сложных вопросов, в особенности в области выбора способов производства, конструкции аппаратов, приемов работы и т. п., требовавших четких ответственных решений.

В годы первой мировой войны он сотрудничал и на Славянском содовом заводе. Ближайшим его помощником здесь был Борис Андреевич Сасс-Тисовский; окончивший в 1909 г. Петербургский технологический институт.

Сопоставив главнейшие факторы, влияющие на процесс электролиза, Павел Павлович обратил особое внимание на качество электродов. На заводе в цехе электролиза приме-



*П. П. Федотьев на заводе Славсода (1916 г.)*



*П. П. ФЕДОТЬЕВ*  
(1916 г.)

няли два сорта электродов — угольные собственного производства и магнетитовые, импортные. Повышение качества угольных электродов и возможность изготовления на месте отечественных магнетитовых представляла для него задачу, полную научного и практического значения. Изготовление угольных электродов проходило под личным наблюдением Федотьева.

Проверялись исходные материалы, режим формовки сырых электродных заготовок, их обжиг. В результате производство угольных электродов в Славянске увеличилось более чем вдвое и обеспечило потребности электролиза, очень возросшие в период войны.

После Великой Октябрьской социалистической революции участие П. П. Федотьева в делах южных химических заводов не прекратилось. Ни один крупный вопрос в области реконструкции и расширения Донецкого и Славянского содовых заводов не решался без непосредственного участия П. П. Федотьева. Он был консультантом ряда заводов и не-

изменным экспертом всех проектов, появившихся в области производства соды и хлора. Ценные советы его касались не только технической сущности проектов, но и новейшей практики.

В 1920 г. П. П. Федотьев был командирован Химическим отделом ВСНХ в Славянск и на Северный Кавказ.

В Славянске в период первой мировой войны были сооружены два опытных электролизера новых конструкций: Сименс — Биллитер и Биллитер — Лейкам. Павел Павлович видел, что достигнуть желаемого пониженного напряжения на электролизере не удавалось ввиду отсутствия графитированных электродов.

Много позднее, возвратившись к профессорской деятельности в Политехническом институте, ученый не забыл об электролизе в Славянске. Он пересылает Б. А. Сасс-Тисовскому брошюру Ч. Мантелла (США) о производстве угольных электродов с просьбой скорейшим образом перевести ее на русский язык. Брошюра Мантелла была издана у нас в 1926 г. [3]. Федотьев же предложил при производстве угольных электродов в Славянске добавить стадию графитации, выпускать графитированные электроды, как это практикуется в настоящее время.

Успешное распространение в Англии электролизеров цилиндрической формы дало повод Павлу Павловичу прислать Сасс-Тисовскому соответствующую информацию<sup>1</sup>. Как известно, впоследствии электролизеры данного типа долгие годы применялись в Советском Союзе.

В 1920 г. П. П. Федотьев был избран Химическим факультетом Петроградского (ныне Ленинградского) технологического института профессором по специальному курсу технической электрохимии; эту должность он занимал до 1930 г. В 1921—1923 гг. он работал деканом химического факультета Политехнического института. Одновременно он был членом Областного научно-технического совета химической промышленности при ВСНХ в Москве.

В это же время П. П. Федотьев издал монографию «Электрометаллургия», вышедшую тремя отдельными выпусками. В 1922—1926 гг. П. П. Федотьев опубликовал руководство «Технический анализ минеральных веществ» (в пяти выпусках), а в 1925 г. — обобщение «Крупная химическая и электрохимическая промышленность за последнее десятилетие».

---

<sup>1</sup> Сообщение Б. А. Сасс-Тисовского.

В 1924 г. П. П. Федотьев по инициативе Валютного управления организовал в Ленинграде крупную мастерскую для электролитического рафинирования дельного серебра.

По заданию Ленинградского областного совета народного хозяйства П. П. Федотьев в 1929 г. провел работу по получению алюминия в укрупненном масштабе на заводе «Красный Выборжец» (Ленинград), что сыграло большую роль в организации у нас отечественной алюминиевой промышленности.

На протяжении ряда лет и до конца своей жизни П. П. Федотьев был консультантом исследовательских и проектных институтов (ГИПХ, НИИ Салюминий, Гипроалюминий), связанных с организацией алюминиевой промышленности.

С самого начала своей профессорской деятельности, в 1904 г., П. П. Федотьев большое внимание уделял организации и развитию электрохимической и электрометаллургической лабораторий в Политехническом институте, в которых под его руководством было выполнено свыше 45 исследовательских работ в области прикладной электрохимии и электрометаллургии.

П. П. Федотьев подготовил и читал ряд разнообразных курсов: 1) техническая электрохимия; 2) электрометаллургия; 3) минеральная технология; 4) огнеупорные материалы; 5) курс вяжущих веществ; 6) ферросплавы и др.

Обращает на себя внимание большое разнообразие этих курсов, касающихся различных сторон химической технологии и электрометаллургии. Всесторонняя эрудиция П. П. Федотьева позволила ему не только свободно ориентироваться, но и сказать новое слово во многих областях прикладной химии и металлургии.

Последние годы жизни П. П. Федотьева ознаменовались избранием его членом-корреспондентом Академии наук СССР и назначением председателем Государственной квалификационной комиссии по цветным металлам при Ленинградском металлургическом институте<sup>1</sup>.

В Государственной квалификационной комиссии по цветным металлам он провел свой последний рабочий день — 14 марта 1934 г. После непродолжительной болезни 20 марта 1934 г. П. П. Федотьев скончался.

---

<sup>1</sup> Образованном при реорганизации Ленинградского политехнического института.

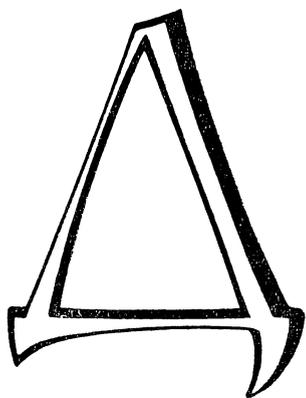
Научная и педагогическая деятельность П. П. Федотьева в области прикладной электрохимии и электрометаллургии цветных металлов получила воплощение в его последнем капитальном труде «Электролиз в металлургии», вышедшем в двух выпусках в 1933 и 1934 гг., который до сих пор является настольным руководством не только советских, но и зарубежных электрохимиков и электрометаллургов.

Труды П. П. Федотьева, объединяющие огромный фактический материал и охватывающие целую эпоху в развитии прикладной электрохимии и электрометаллургии, не только исключительно интересны историкам науки и техники, но не утратили своего научного значения и в наше время.

---

# 2

## ДИССЕРТАЦИЯ П. П. ФЕДОТЬЕВА И ЕГО РАБОТЫ ПО ХИМИИ И ЭЛЕКТРОХИМИИ



Диссертация П. П. Федотьева «Аммиачно-содовый процесс с точки зрения учения о фазах» (1903—1904 гг.) была первой крупной научной работой ученого, в которой он исследовал физико-химические основы промышленного способа производства соды по Сольве. Тема этой диссертации возникла в результате желания П. П. Федотьева глубже познать сущность процесса, с которым он сталкивался на практике, работая на химических заводах. До этого П. П. Федотьев написал такие книги, как «Содовое дело и связанные с ним производства» (1898 г.) и «Заводское приготовление минеральных солей» (1900 г.), в которых он описал технологию производства соды и других солей. Но состояние теории способа Сольве его не удовлетворяло.

Описывая аммиачно-содовый процесс в книге «Содовое дело и связанные с ним производства», П. П. Федотьев уже обращал внимание на то, что «производство соды по аммиачному способу в течение последних тридцати лет получило

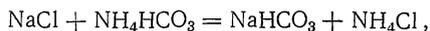
громадное развитие, но сведения по этой части отличаются до сих пор крайней неполнотой и отрывочностью. Особенно желательно появление исследований, касающихся чисто химической стороны процесса. Какова концентрация растворов, каково отношение между аммиаком и поваренной солью, применяемое на практике, об этом неизвестно почти ничего. Даже относительно теории способа известно весьма немного» [2].

Об этом же писал П. П. Федотьев и в предисловии к своей диссертации шесть лет спустя: «Аммиачно-содовый способ является одним из важнейших технических процессов настоящего времени. Однако, несмотря на... старость способа, мы до сих пор не имеем еще его теории. Имеются лишь отдельные отрывочные и случайные наблюдения, выполненные без строго обдуманного плана».

И далее:

«Настоящая работа, задуманная мною еще в С. Петербурге, выполнена в Оствальдском физико-химическом институте в Лейпциге в зимний семестр 1903—1904 года» [2, стр. 7].

Говоря о цели своей работы и указывая на недостаточность исследований по теории процесса Сольве, П. П. Федотьев подчеркивает, что его... «интересовала физико-химическая сторона реального процесса, и в этом цель... работы». Исходя из этой задачи, П. П. Федотьев изучил реакцию обменного разложения:

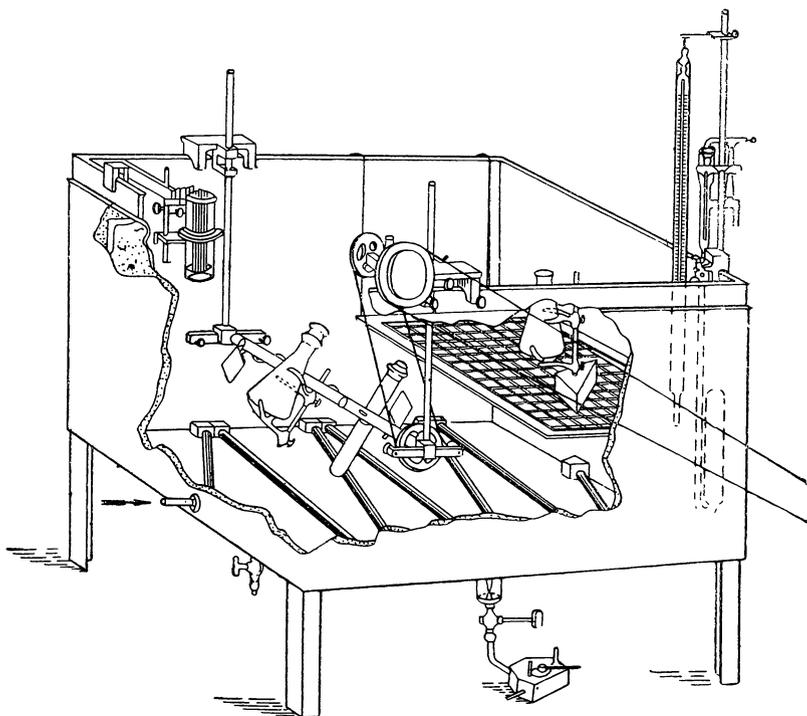


лежащую в основе способа получения соды по Сольве. Для этого в термостате (рис. 2) была систематически исследована растворимость каждой соли в отдельности, а также пар солей с положительными или отрицательными радикалами и, наконец, триад солей, участвующих в реакции. Графическое изображение полученных результатов дало возможность проанализировать процесс с точки зрения учения о фазах, а исследование влияния на полноту реакции таких факторов, как концентрация растворов и температура, — сделать выводы о теоретически возможном выходе продукта (т. е. твердого  $\text{NaHCO}_3$ ).

В конце диссертации П. П. Федотьев писал: «С чисто химической точки зрения я не могу считать «способ Сольве», т. е. карбонизацию аммиачно-соляных растворов, за наилучшую форму аммиачно-содового процесса. Более рациональный способ — это пользоваться прямо поваренной солью (в

растворе или в твердом виде) и твердым двууглекислым аммонием...» [2, стр. 43].

По опубликовании в журнале «Zeitschrift für physikalische Chemie» работа Федотьева обратила на себя внимание ученых и инженеров. Свое мнение об этом исследовании вы-



*Рис. 2. Термостат П. П. Федотьева (1903—1904 гг.)*

сказали такие ученые, как Майергофф, Креман, Ост, Финдли и другие.

Они подчеркнули обстоятельность опытов Федотьева, отметили, что исследование стало классическим для аммиачно-содового процесса.

Однако техники диссертационную работу П. П. Федотьева встретили критически. Возражали, например, против того, что условия выполнения опытов не совпадали с технологией. Так, в своих опытах Федотьев получал бикарбонат действием углекислого газа на аммиачно-соляной раствор,

а не реакцией обменного разложения. При этом возникало некоторое давление при несколько повышенной температуре. Критики указывали и на непрочность растворов двууглекислых солей, разлагающихся с выделением угольной кислоты.

Позже в Химико-технологических очерках Федотьев ответил на замечания оппонентов [5, стр. 5—6]. Он писал, что определенные им условия равновесия при давлении  $p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ атм}$  при температурах 0 и 15° С не вызывают сомнений. При температуре же окончания заводского процесса, равной 30° С, экстраполяция дала только приближенные результаты, так как при этой температуре и давлении 1 атм равновесие несуществимо. Исследование его является теоретическим обоснованием уже имеющихся практических достижений. Принимая во внимание только конечные состояния системы, дальнейшего повышения выхода в аммиачно-содовом процессе путем изменения условий работы достигнуть не удастся. Федотьев отмечает, что его работа ко времени написания Технологических очерков (1930 г.) получила полное подтверждение.

К разработке теории аммиачно-содового процесса П. П. Федотьев затем обращался дважды. В 1913 г. под его руководством студент-дипломник И. Колтунов в работе «Другая форма аммиачно-содового процесса» исследовал обменную реакцию, где поваренная соль была заменена натриевой селитрой. Наконец, в 1930 г. была опубликована работа П. П. Федотьева и А. Колосова (также студента-дипломника) «Третий вид аммиачно-содового процесса», в которой, подобно предыдущему, была исследована обменная реакция, но в качестве исходной соли служил сульфат натрия.

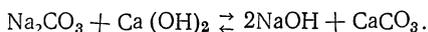
Сопоставляя в этой работе результаты всех трех исследований (выполненных с перерывами на протяжении 25 лет), П. П. Федотьев пришел к заключению, что «В отношении степени обменного разложения существующие зависимости в случае  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  находятся в менее благоприятном положении, чем в случае  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$ » [2, стр. 62].

Этими исследованиями, выполненными с применением идентичной методики, была внесена ясность в физико-химическую сущность аммиачно-содового процесса. Одновременно были получены новые фактические данные о равновесных системах в водной среде.

К 1913 г. относится работа П. П. Федотьева «К теории каустицирования растворов углекислых щелочей». Причи-

на, которая заставила ученого заняться этим вопросом, изложена им следующим образом: «Несмотря на распространение электролитических приемов приготовления едких щелочей, способ получения последних путем каустицирования растворов углекислых солей (главным образом, соды) сохраняет свое значение в заводской практике.

В процессе каустицирования мы имеем дело с обратимой реакцией:



При техническом ведении реакции каустицирования очень важно работать с возможно концентрированными растворами, чтобы избежать больших расходов на топливо при сгущении. С другой стороны, не менее важно вести реакцию до возможной полноты вправо. Эти два условия, по данным заводской работы и по имеющимся исследованиям, оказываются не вполне совместимыми» [2, стр. 62].

В этой работе П. П. Федотьев не приводит собственных экспериментальных данных, но, обрабатывая данные других исследователей, приходит к важному для практики заключению относительно условий, в которых необходимо осуществлять каустификацию соды.

Данные, полученные П. П. Федотьевым, в полной мере сохранили свое значение и в наше время. Это прежде всего относится к технологии производства глинозема из бокситов по способу Байера, где каустификация соды является обязательной операцией.

В 1910—1911 гг. П. П. Федотьев изучал реакции образования йодистой меди, что нашло отражение в двух работах.

Первая работа «Реакция образования йодной меди с физико-химической точки зрения» была поставлена, потому что, как пишет П. П. Федотьев,— «Некоторые опыты электролиза йодистоводородной кислоты с медными анодами привели меня к изучению йодистых соединений меди. При электролизе йодисто-водородной кислоты анод растворяется с образованием йодистой меди  $\text{CuJ}$  и выделением свободного йодида... Заинтересовавшись вопросом, в какой мере возможно существование йодной меди в водном растворе, я систематически исследовал реакцию:  $\text{CuJ}_2 = \text{CuJ} + \text{J}$ » [2, стр. 71].

В связи с этим в работе исследована область существования водных растворов йодной меди и изучено влияние температуры. Кроме того, определена константа равновесия

реакции образования йодной меди, а также путем измерения общего потенциала йодного и медного электродов были вычислены их нормальные потенциалы.

Во второй научно-исследовательской работе, посвященной изучению йодистой меди, «Особый случай гетерогенного равновесия» была исследована реакция между азотнокислой медью и йодистым свинцом с образованием азотнокислого свинца и йодистой меди. Равновесие исследовали и химическим и электрохимическим путем. Причем, как пишет П. П. Федотьев: «Результаты настоящего исследования находятся в тесной связи с процессами дробного осаждения, играющими такую важную роль в анализе и в некоторых других приложениях» [2, стр. 102].

Ряд научно-исследовательских работ П. П. Федотьева был посвящен электролизу водных растворов щелочных и щелочноземельных металлов.

Зимой 1914—1915 гг. П. П. Федотьев и студент-дипломник В. Солнышкин провели исследовательскую работу «Электролитическое приготовление надборнатриевой соли» (т. е.  $\text{NaBO}_3$ ). Задача этой работы — изучение условий электролиза раствора буры, представлявшего значительные трудности.

«Наиболее ответственными условиями для электролитического приготовления надсоли являются условия электролиза относительно концентрированных растворов при невысокой температуре и при большой анодной плотности тока. Но бура как исходный материал вообще мало растворима в воде, особенно же при невысоких температурах. Электропроводность раствора при слабой концентрации и незначительной электролитической диссоциации этого соединения очень невелика. При большой же плотности тока и необходимости охлаждения сопротивление и вольтаж будут слишком значительны. Условия электролиза, следовательно, весьма неблагоприятны. Поэтому изучение вопроса с электрохимической точки зрения представлялось очень желательным» [2, стр. 106].

В результате проведенных исследований электролиза растворов одной буры, смеси буры с едкой щелочью и смеси буры с содой было установлено, что только в последнем случае процесс электролиза приводит к образованию пербората. Растворимость буры в растворах соды значительно возрастала, что и давало возможность подвергать электролизу с положительным результатом сравнительно концентрированные растворы.

Зимой 1912—1913 гг. студент-дипломник И. Вейцер под руководством П. П. Федотьева экспериментально исследовал электролиз растворов хлористого бария с ртутным катодом с целью получения едкого бария. В работе ставилась задача экспериментально выяснить наиболее благоприятные условия электролиза растворов хлористого бария применительно к двум известным способам электролиза с ртутным катодом — Кастнера и Кельнера — Сольве. Исследователи пришли к заключению, что целесообразнее применять последний способ, причем «разложение амальгамы следует вести при нагревании, например, при 60° С. Получаемый таким образом раствор по охлаждению до обыкновенной температуры прямо выделяет кристаллы едкого барита» [2, стр. 124].

В 1928 г. П. П. Федотьев совместно с А. С. Драчевым провел экспериментальную работу «Опыты получения бертолетовой соли электролизом с применением графитовых анодов». Говоря о цели этой работы, авторы писали: «В начале 1914 года в нашей лаборатории в Политехническом институте параллельно с электролизом хлористого калия с платиновым анодом были произведены опыты с применением графитовых (ачесоновских) электродов... В общем опыты велись непродолжительное время, и длительность службы электродов не была установлена. Летом 1924 года на заводе в Славянске, по предложению П. П. Федотьева, одна ванна системы, оборудованной магнетитовыми анодами, была пущена в работу с графитовыми анодами... По началу аноды держались, выход соли был удовлетворителен. Разрушение было приписано присутствию в электролите сернокислой соли... Настоящие опыты предприняты были для определения влияния температуры и присутствия сернокислой соли на длительность службы графитовых анодов» [2, стр. 113—114].

В результате проведения опытов при различной температуре и с различным содержанием сернокислого калия в электролите П. П. Федотьев и А. С. Драчев пришли к заключению, что примесь сернокислого калия не оказывает существенного влияния на прочность и срок службы графитовых анодов, а «наиболее подходящая, в отношении прочности их, температура соответствует 40° С» [2, стр. 115].

Краткое рассмотрение основных исследовательских работ, выполненных П. П. Федотьевым в области химии и электрохимии водных растворов, показывает, что в большинстве из них ученый ставил задачи глубокого изучения

теоретической, физико-химической стороны процессов. Особенно показательна в этом отношении его диссертация и последующие в этом направлении работы по изучению аммиачно-содового процесса. К подобного же рода исследованиям принадлежат работы, связанные с изучением реакций образования йодной меди. В других работах П. П. Федотьев ставил прикладные задачи. Это — экспериментальные исследования по проверке двух способов электролиза хлористого бария с ртутным катодом, а также опыты по получению бертолетовой соли с графитовыми анодами.

Однако из результатов теоретических работ П. П. Федотьев всегда стремился делать выводы для практики.

---

# 3

## П. П. ФЕДОТЬЕВ — ОСНОВОПОЛОЖНИК ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

П

ереходя к роли П. П. Федотьева в области электрометаллургии цветных металлов, прежде всего нужно отметить, что в своих работах по электролитическому получению цинка, никеля, кобальта, марганца, отчасти меди, а также магния и алюминия он в большинстве случаев не имел предшественников.

Поэтому П. П. Федотьева по праву следует считать основоположником электрометаллургии цветных металлов в нашей стране. Первым исследованием П. П. Федотьева по электролитическому выделению металлов из водных растворов была работа «Электролитическое получение железа с применением нерастворимых анодов», проведенная в 1914 г. и опубликованная в 1915 г.

Эта работа выполнялась в лаборатории технической электрохимии под руководством П. П. Федотьева студентами (в том числе будущим профессором доктором Н. Н. Мурачем), которые проводили предварительные опыты еще в 1912 и 1913 гг.

«Ближайшим поводом к исследованию затронутого вопроса в нашей лаборатории,— писал П. П. Федотьев,— послужило изыскание способа использования железных солей, которые нередко получают в качестве побочных продуктов, не находящих себе применения и являющихся иногда отбросом» [2, стр. 127].

Исследование включало обширный круг вопросов по выяснению зависимости выхода по току осаждаемого на катоде железа, а также его внешнего вида, содержания водорода, физико-механических свойств (магнитные свойства, пластичность) от таких факторов, как температура, кислотность раствора, плотность тока, состав и концентрация электролита.

Исследования осуществлялись с сернокислым и с хлористым железом, были проведены с большой тщательностью и завершились микроскопическим исследованием полученных катодных осадков. В результате при электролизе растворов хлористого железа были найдены такие условия, которые давали возможность получать чистое пластичное железо.

В заключительных строках работы П. П. Федотьев делает далеко идущие практические выводы:

«Электролиз растворов хлористого железа с прибавкой  $\text{CaCl}_2$  или  $\text{NaCl}$  дает возможность непрерывного получения мягкого железа в листах любых размеров и толщины, а также приготовления труб без шва...

Электролиз с применением нерастворимых анодов намекает техническую возможность непосредственного добывания железа из руд. Полученный при этом хлор может быть использован для приготовления хлорных продуктов (белильной извести, бертолетовой соли) или служить для регенерации соляной кислоты» [2, стр. 140].

Работы П. П. Федотьева, посвященные электрометаллургии меди, касались преимущественно электролитической переработки медных сплавов.

Первая мировая война оставила в наследство огромное количество лома и отходов медных сплавов, и в период восстановления нашей промышленности возникла необходимость переработки этих материалов на медь. В начале 1923 г. после шестилетнего перерыва на заводе «Красный Выборжец» в Ленинграде было решено ввиду острой необходимости в красной меди восстановить электролиз. Исходным материалом служили преимущественно медноцинковые сплавы — латуни.

Так как в данном случае анодный процесс заключался в растворении меди и цинка, а катодный состоял только в выделении меди, то дефицит меди в растворе необходимо было пополнять из особо притотовленной медной соли.

В 1924 г., по предложению П. П. Федотьева, на заводе для этой цели был осуществлен электролиз латуни в солянокислом растворе с получением на катоде медного порошка, из которого после окисления и растворения в серной кислоте получался медный купорос, шедший на пополнение дефицита меди в основном электролизе.

В процессе анодного растворения в солянокислом растворе медь принимала участие в электролизе в виде одновалентного иона, расход электроэнергии составлял 0,5 *квт·ч* на 1 кг меди, т. е. примерно в четыре раза меньше, чем в сернокислом электролите. Этот способ, предложенный П. П. Федотьевым, был внедрен на заводе. Установка работала в течение двух лет главным образом в качестве подсобного источника получения медного купороса для добавок, необходимых при электролитической переработке бронзы и латуни.

Эта прикладная работа побудила затем П. П. Федотьева специально заняться исследованиями условий выделения меди из однохлористой соли, ибо возможность снижения таким образом расхода электроэнергии представляла заманчивую задачу. В результате было установлено, что электролиз раствора однохлористой меди осуществим при обыкновенной температуре, практически приемлемой плотности тока и значительном (до 95%) выходе по току с получением плотного осадка меди на катоде.

В 1923 г. П. П. Федотьев совместно с В. В. Стендером (тогда студентом-дипломником, ныне профессором доктором наук) впервые у нас обстоятельно исследовал выделение цинка электролизом водных растворов сульфата цинка — единственным промышленным способом, который применяется в настоящее время в гидрометаллургии этого металла.

Со времени первых опытов по получению цинка методом электролиза, осуществленных в 80-х годах прошлого столетия, и до первой мировой войны предпочтение отдавалось электролизу водных растворов хлористого цинка. Причиной этого была возможность применения в качестве анодов графитированных электродов, а также меньший потенциал выделения хлора на графите, чем кислорода на свинце (при электролизе раствора сульфата цинка). Вместе с тем необ-

ходимость применения диафрагм при электролизе хлорида цинка обусловила значительное повышение напряжения на ванне, а следовательно, и больший удельный расход электроэнергии, что делало электролиз сульфата цинка более экономичным.

Однако, «...в момент проведения опытов,— писали П. П. Федотьев и В. В. Стендер в своей работе «Получение цинка электролизом сернокислых растворов»,— в литературе имелись лишь неполные, общие сведения об электролизе (цинка — авт.), не дающие представление об условиях электролиза на основании экспериментальных данных» [2, стр. 146].

Это и заставило П. П. Федотьева экспериментально разработать все необходимые условия для электролитического получения цинка из сернокислых растворов с точки зрения выхода по току и расхода электроэнергии. Было исследовано влияние концентрации и кислотности раствора, плотности тока, температуры, а также ряда примесей в электролите; были установлены наивыгоднейшие условия для получения высоких выходов по току при малом расходе электроэнергии.

В. В. Стендер подчеркивает, что в области электролитического получения цинка из сернокислых растворов Павел Павлович правильно ориентировал своих учеников: В. Стендера (1921 г.), Н. Александрова (1926 г.) и В. Александрову (1928 г.) на применение возможно высоких плотностей тока и повышенных температур<sup>1</sup>. Уже в 1933 г. П. П. Федотьев считал, что применение высоких плотностей тока позволит механизировать процесс электролиза, даст возможность улавливать кислород и вредный кислотный туман. «Затруднения значительны, но нельзя сказать, что непреодолимы». Предположения ученого полностью оправдались. Определенное Павлом Павловичем направление в изучении электролитического цинка получило развитие в последующие годы. В наши дни электролитическое получение цинка при очень высоких плотностях тока и высоких температурах дает возможность увеличить производительность и улучшить условия труда рабочих в результате создания автоматизированных электролизеров.

В дальнейшем, в 1927 и 1929 гг., под руководством П. П. Федотьева были дополнительно изучены условия электролитического выделения цинка в зависимости от различ-

---

<sup>1</sup> Сообщение В. В. Стендера.

ных факторов. П. П. Федотьев значительно развил и расширил экспериментальные основы современной электрометаллургии цинка.

П. П. Федотьев также впервые экспериментально исследовал условия осаждения никеля и кобальта электролизом с нерастворимыми анодами.

В 1916 г. при переработке на одном из наших заводов мельхиоровых отходов на чистую медь он провел опыты получения чистого сульфата никеля и электролитического выделения металла. Уже эти опыты дали некоторые указания на условия процесса и были затем опубликованы П. П. Федотьевым в 1921 г. в первом выпуске его «Электрометаллургии».

В 1923 г. и затем в 1927—1928 гг. в Ленинградском политехническом институте под руководством П. П. Федотьева были проведены систематические опыты электролиза водных растворов сульфата никеля и одновременно (в 1927—1928 гг.) были выполнены аналогичные работы по электролитическому осаждению кобальта.

В результате этих исследований, так же как и в случае цинка, были установлены условия для электролитического выделения никеля и кобальта из их сернокислых солей, выявлено влияние температуры, плотности тока, концентрации и других факторов на выход по току, а также на свойства осаждаемых металлов.

Зимой 1915 г. в лаборатории Петроградского политехнического института под руководством П. П. Федотьева было исследовано получение металлического марганца электролизом его хлористой и сернокислой солей. Исследователи задались целью найти способ получения марганца повышенной степени чистоты, причем им пришлось преодолеть большие экспериментальные трудности для предупреждения окисления марганца на катоде.

В этой работе было исследовано влияние на процесс плотности тока, концентрации электролита, температуры и материала катода. И хотя здесь П. П. Федотьеву не удалось найти окончательных условий для электролитического осаждения из водных растворов чистого марганца, тем не менее эта работа позволила выявить специфические трудности, преодоление которых бесспорно должно было привести (а в дальнейшем и привело) к положительным результатам.

В своей научной деятельности П. П. Федотьеву часто приходилось заниматься практическими задачами, стоящи-

ми перед отечественной промышленностью, требующими быстрого решения.

В начале 1924 г. Валютное управление предложило П. П. Федотьеву разработать способ электролитической переработки дельного серебра на высокопробный металл. Под руководством П. П. Федотьева в течение 2 месяцев была оборудована вначале небольшая мастерская для переработки серебра. Первые же партии полученного металла обнаружили его высокую чистоту.

Осенью 1924 г. производительность мастерской была увеличена и мастерская стала крупнейшей в то время в Советском Союзе.

Существенная технологическая особенность, установленная П. П. Федотьевым при электролитическом рафинировании серебра, — это возможность доведения содержания меди в электролите без всякого ущерба для рафинирования до 8—9%. Анодный материал, поступавший на переработку в аффинажную мастерскую, содержал 86,5% Ag, остальное составляла медь. В качестве катодов с успехом были применены листы из алюминия; выход по току достигал 90—95%. Катодное серебро по сплавлению давало чистоту от 999-й до 9999-й пробы.

Работа аффинажной мастерской под руководством П. П. Федотьева представляет пример быстрого решения поставленной государственной задачи — получение больших количеств металла высокой чистоты из дельного серебра при минимальных затратах на оборудование. Вся аппаратура обошлась в 25000 руб. и была изготовлена местными средствами. Ввиду временного характера работы установка должна была быть амортизирована в кратчайший срок. В период действия мастерской — в течение 1,5 лет — было переработано большое количество дельного серебра.

Второй пример быстрого решения П. П. Федотьевым практической задачи в области электрометаллургии цветных металлов — установление им технологии и реализация процесса получения олова из вторичной жести.

Зимой 1928 г. кооперативные организации обратились к П. П. Федотьеву с просьбой осуществить процесс снятия олова со вторичной жести. Было решено остановиться на электролитическом способе с применением щелочного электролита. Созданная установка для переработки 2 т жести в сутки состояла из четырех электролизеров на 700 а, анодами в которых служили корзины с жестяными отходами, а катодами — железные листы.

При первоначальном содержании в жести 1,9% Sn отработанная жесьть содержала всего 0,06% Sn. Переплавленный металл отличался высокой степенью чистоты и содержал 99,75% Sn. Установка находилась в работе в течение ряда лет, переработав несколько сот тонн вторичной жести.

Таким образом, так же как и в научно-исследовательских работах по химии и электрохимии, П. П. Федотьев при изучении электрометаллургии тяжелых металлов решал задачи и теоретические и сугубо прикладные, но важные для экономики нашего государства. Одновременно он развивал электрометаллургию цветных металлов как отрасли промышленности и создавал свою научную школу.

---

# 4

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ МАГНИЯ

З

имой 1914—1915 г. в лаборатории технической электрохимии и электрометаллургии Петербургского политехнического института студент-дипломник Н. Н. Воронин под руководством П. П. Федотьева выполнил работу по изучению технического электролиза расплавленного карналлита. Эта работа была первым в России систематическим исследованием условий электролитического получения магния и преследовала, помимо научной, практические цели. «Опыты в нашей лаборатории, — писал П. П. Федотьев, — намечены были в довольно большом масштабе с целью приблизиться, по возможности, к условиям заводского получения магния» [2, стр. 232].

Перед проведением опытов собственно электролиза расплавленного карналлита исследователям пришлось разработать способ получения безводного электролита. За неимением естественного карналлита (Соликамское месторождение карналлитов на Урале было открыто только десять лет спустя, в 1925 г.) электролит готовили из смеси компонен-

тов — хлористого калия и шестиводного хлористого магния — нагреванием и переплавкой. Безводный хлористый магний, применявшийся в качестве добавок при электролизе, П. П. Федотьев и Н. Н. Воронин получали обезвоживанием шестиводного хлористого магния (бишофита) в присутствии хлористого аммония.

Практические приемы приготовления безводного магниевого электролита, разработанные тогда П. П. Федотьевым, не утратили своего значения до сего времени и сейчас нередко применяются в лабораторной практике.

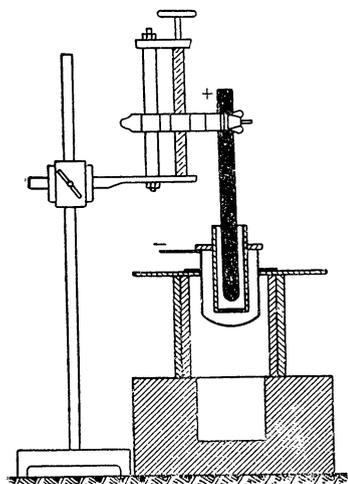


Рис. 3. Магниевый лабораторный электролизер П. П. Федотьева (1914 г.)

Для опытов электролиза расплавленного карналлита была сооружена небольшая газовая печь (рис. 3). На кладке из огнеупорного кирпича был установлен шамотный цилиндр, обернутый снаружи асбестом и стянутый железным кожухом. Цилиндр был покрыт асбестовым картоном, через отверстие в котором внутрь печи опускали чугунный тигель высотой 16 см и диаметром 12 см, являвшийся электролизером и одновременно катодом. Тигель вмещал около 1,5 кг электролита. Анодом служил угольный электрод диаметром 3 см, окружен-

ный диафрагмой — фарфоровым цилиндром от гальванических элементов. Исследователи вели опыт электролиза расплавленного карналлита при температуре выше и ниже точки плавления магния ( $651^{\circ}\text{C}$ ); в последнем случае магний выделялся в твердом состоянии.

В случае электролиза карналлита при  $700^{\circ}\text{C}$  и плотности тока  $6,8\text{—}4,2\text{ а/дм}^2$  (силе тока от 20 до 120 а) выход по току оставался примерно постоянным и равным около 60%. При более длительном электролизе с добавками в карналлит хлористого магния выход по току повышался и расход электроэнергии возрастал до  $34\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$  магния.

Интересные результаты были получены П. П. Федотьевым и Н. Н. Ворониным при электролизе карналлита ниже точки плавления магния. В этом случае металл выделялся

на служащей катодом внутренней поверхности тигля в виде рыхлого слоя довольно крупных кристалликов. Опыты при пониженных температурах показали возможность достижения выхода по току 85% и выше при расходе электроэнергии около 20 квт.ч/кг металла.

Далее были проведены опыты по изучению влияния добавок фторида кальция, присутствия окиси магния и добавок не вполне обезвоженного электролита. Добавки 1% фторида благоприятно действовали на слияние мелких коралков магния в один или несколько крупных слитков. Присутствие до 5% окиси магния не вызывало снижения выхода по току. Были проведены также опыты электролиза расплавленной смеси хлористого магния с поваренной солью.

Уже это краткое рассмотрение вопросов, изучавшихся при электролизе расплавленного карналлита в первой русской работе по электролитическому получению магния, говорит о ее глубине и достаточной полноте охвата не только теоретических, но и практических вопросов.

Оценивая позднее свои опыты по электролизу расплавленного карналлита, П. П. Федотьев в Химико-технологических очерках писал: «Результаты этих многочисленных и выполненных в довольно крупном размере опытов дали много очень ценных указаний, которые могут найти непосредственное приложение к практике» [5].

Действительно, обстоятельное изучение процесса электролиза карналлита в лабораторных условиях позволило П. П. Федотьеву и его сотрудникам в 1916 и 1917 гг. получить магний в большом масштабе в опытной мастерской при Военно-химическом комитете (ныне Государственный институт прикладной химии — ГИПХ). Здесь магний получали килограммами. Это позволяло уже реально ставить вопрос об организации отечественной магниевой промышленности. Однако, как и в случае алюминия, эта задача была решена только в условиях Советского государства.

П. П. Федотьев указывал, что наша страна располагает необходимыми сырьевыми ресурсами и возможностями для организации магниевой промышленности собственными силами. В Химико-технологических очерках он писал:

«В наших условиях естественно прибегнуть к хлористому магнию, добываемому на крымских озерах. Впоследствии могут быть применены соли Соликамского района. Установление магниевого производства не связано ни в какой мере с импортом сырья или аппаратуры и могло бы быть организовано внутренними средствами» [5].

И далее:

«Из предшествующего легко усмотреть, что для немедленного установления у нас производства магния электролизом хлористой соли нет никаких технических препятствий. Исследовательским учреждениям можно рекомендовать изучение этого нового способа получения магния, исследования способов рафинирования магния и свойств его сплавов» [5].

Работа П. П. Федотьева и Н. Н. Воронина по изучению технического электролиза карналлита сыграла также свою роль при организации магниевой промышленности СССР, став исходной для последующих исследований.

В 1929 г. в Ленинградском электротехническом институте под руководством П. Ф. Антипина были проведены систематические опыты получения магния в полузаводской ванне на 600 а. Эти опыты подтвердили полную возможность электролиза карналлита с показателями, близкими к промышленным.

В Государственном институте прикладной химии (Ленинград) разрабатывался способ получения магния электролизом безводного хлорида и прежде всего метод обезвоживания шестиводного хлорида магния. Эти работы были положены в основу проектирования опытного магниевого завода.

Одновременно Уральский научно-исследовательский химический институт УНИХИМ (Свердловск) занялся вопросом переработки на металлический магний природных соликамских карналлитов. Здесь под руководством И. Г. Щербакова был проведен ряд научно-исследовательских работ в лабораторном и крупнолабораторном масштабах.

В марте 1931 г. в Ленинграде состоялся пуск опытного магниевого завода. На этом заводе, а также впоследствии во Всесоюзном алюминиево-магниево-институте были разработки и освоены технологические схемы производства для первых крупных магниевых заводов в нашей стране — Днепровского в Запорожье и Уральского в Соликамске. Здесь же была изобретена и испытана аппаратура для этих заводов и подготовлены первые кадры инженерно-технического персонала.

В 1933 г. Павел Павлович в связи с предстоящим строительством магниевых заводов предложил своим ученикам пойти «развернутым фронтом на магний»<sup>1</sup>. Под руко-

---

<sup>1</sup> Сообщение А. И. Журина.

водством П. П. Федотьева и В. А. Суходского на кафедре технической электрохимии и минеральной технологии были поставлены научно-исследовательские работы в области исследования физико-химических свойств расплавов солевых систем, составляющих основу электролита магниевых ванн. Часть этих исследований была закончена уже после смерти Павла Павловича его учениками.

Результаты этих работ явились существенным научным вкладом в новую тогда для нашей металлургии область электролитического получения магния.

---

# 5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ АЛЮМИНИЯ

**В**

1912 г. в Известиях Санкт-Петербургского политехнического института была опубликована большая научно-исследовательская работа «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия», выполненная П. П. Федотьевым совместно с В. П. Ильинским. Появление научного исследования П. П. Федотьева и

В. П. Ильинского было выдающимся событием в развитии металлургии алюминия и прежде всего потому, что в этом исследовании впервые с достаточной глубиной и полнотой были изучены теоретические основы электролитического способа производства алюминия.

Ко времени выполнения и опубликования работы П. П. Федотьева и В. П. Ильинского (1910—1912 гг.) мировая алюминиевая промышленность, основывающаяся на электролитическом способе производства алюминия, насчитывала уже 25 лет своего существования.

С момента открытия в 1886 г. Эрру (во Франции) и Холлом (в США) процесса электролиза глинозема, растворенно-

го в расплавленном криолите, начался бурный подъем алюминиевой промышленности. Первые же годы промышленного применения электролитического способа производства алюминия ознаменовались интенсивным строительством в различных странах заводов, работавших по этому способу. Все заводы, выпускавшие алюминий и его сплавы с помощью других способов, вскоре прекратили свое существование или же перешли на этот новый прогрессивный способ.

К началу текущего столетия электролитическое производство алюминия существовало в Швейцарии, США, Франции, Англии, Германии и Австрии, а к своему двадцатипятилетию и, следовательно, к моменту выхода в свет работы П. П. Федотьева и В. П. Ильинского (1912 г.) алюминиевая промышленность была представлена девятью странами: к названным выше присоединились Канада, Италия и Норвегия.

За 25 лет своего существования электролитическое производство алюминия развилось в крупную отрасль промышленности, достигнув выплавки примерно 60 тыс. т алюминия в год. С каждым годом расширялись существующие и возникали новые области применения алюминия, что в свою очередь толкало алюминиевую промышленность на еще большие масштабы производства.

Однако это быстрое развитие электролитического производства алюминия базировалось почти целиком на эмпирических данных и практическом опыте. Техника, технология производства здесь сильно опережали теорию, которая до исследования П. П. Федотьева и В. П. Ильинского оставалась почти не разработанной, причем ряд представлений здесь восходил к первым эмпирическим данным изобретателей электролитического способа производства алюминия — Эру и Холла.

Это положение хорошо охарактеризовано П. П. Федотьевым и В. П. Ильинским, которые во введении к работе «Экспериментальное исследование по теории электрометаллургии алюминия» писали:

«В сочинениях, посвященных алюминиевой промышленности..., многое относится ко времени начала производства алюминия и оказывается устарелым; многие данные вызывают сомнение. Что касается теорий процесса, условий плавкости применяемых электролитов, растворимости в них глинозема, наконец, электролиза, то в этом отношении мы встречаем в литературе отрывочные и нередко противоречивые данные» [2, стр. 172].

И далее:

«Едва ли в чем-либо из соприкасающегося с электрометаллургией алюминия остается столько не выясненного и противоречивого, как в вопросе растворимости глинозема в криолите. До сих пор цитируются иногда слова Ch. Hall'a, обратившего внимание на значительную растворимость глинозема в расплавленном криолите, именно, что глинозем растворяется в криолите, как сахар в воде... Столь же неопределенные указания относительно влияния растворенного глинозема на температуру плавления криолита. Приводимые цифры колеблются от 800 до 1000° С...» [2, стр. 180].

Эти слова ясно показывают, насколько скудны были в то время даже элементарные физико-химические данные, связанные с электролизом криолито-глиноземных расплавов, не говоря уже о том, что оставались совершенно не изученными принципиальные теоретические стороны процесса.

Это не могло не влиять и на промышленную практику электролитического производства алюминия. Весьма небольшие, а нередко и неверные сведения о свойствах электролита, в частности о его плавкости, соотношении удельных весов электролита и металла, растворимости в электролите глинозема, явились причиной того, что на протяжении первых 25 лет развития электролитического производства алюминия подход к составу электролита — выбор соотношения между его важнейшими компонентами и применение тех или иных добавок — был сугубо эмпирическим.

В то время стремились вести процесс электролиза при возможно более высоком содержании глинозема, считая, что расход электроэнергии будет тем меньше, чем выше концентрация глинозема в электролите. При этом глинозем вводили в электролизеры без учета его растворимости в расплавленном электролите — в количестве 14—16% и даже выше.

По данным, например, Габера и Гюнерта, относящимся к 1902 г., наиболее подходящей в качестве электролита алюминиевой ванны считалась смесь из равных частей фтористого алюминия, криолита и окиси алюминия. Следовательно, концентрация окиси алюминия в электролите в данном случае составляла 33%.

Для понижения температуры плавления электролита в него часто вводили большие количества фтористого алюминия или значительные количества фторидов щелочных и щелочноземельных металлов и в первую очередь фтористо-

го кальция. Содержание его в электролите достигало иногда 20—25%. Из-за отсутствия каких-либо данных о влиянии фтористого кальция на плотность расплавленного криолита столь высокая концентрация этого фторида в электролите приводила к всплыванию алюминия на поверхность электролита.

Применение высоких концентраций фтористого кальция как составной части электролита алюминиевых ванн было, по-видимому, характерно для первоначальной практики работы американских алюминиевых заводов.

Так, Фонзес-Диакон, характеризуя американский способ работы, в 1905 г. писал: «Предпочтительно применяется электролит из двойного фторида алюминия и кальция; чистый глинозем вводят с небольшими перерывами, чтобы избежать больших колебаний тока; алюминий обладающий меньшей плотностью, чем электролит, счерпывают с поверхности с помощью сифона» [5].

С современной точки зрения такое положение кажется удивительным, но объяснялось оно в первую очередь недостаточным знанием в то время элементарных физико-химических свойств криолитовых расплавов.

Опубликованная в 1912 г. работа П. П. Федотьева и В. П. Ильинского «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия» и явилась поэтому по существу первым фундаментальным исследованием, касавшимся, в частности, физико-химических свойств электролита алюминиевой ванны.

Одновременно в работе были изучены и многие другие стороны процесса электролитического получения алюминия, что пролило свет на сущность наблюдавшихся в нем явлений.

Уже одно только перечисление вопросов, изученных в работе П. П. Федотьева и В. П. Ильинского, говорит о ее важном значении для электрометаллургии алюминия:

1. Исследование двойной системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ .
2. Исследование криолитоглиноземных сплавов.
3. Электродвижущая сила разложения растворов глинозема в криолите.
4. Растворимость алюминия в криолитоглиноземных сплавах.
5. Образование карбида.
6. Опыты электролиза.
7. Применение фтористого кальция как составной части ванн для электролиза.

Следует при этом отметить, что ряд перечисленных вопросов был изучен исследователями впервые. Это прежде всего относится к системам  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  и  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$  с построением соответствующих диаграмм плавкости.

Многие разноречивые указания в литературе того времени о температуре плавления криолита и плавкости электролита алюминиевых ванн П. П. Федотьев и В. П. Ильинский объясняли тем, что исследователи пользовались для экспериментов природным криолитом, содержащим значительное и непостоянное количество примесей и прежде всего кремнезема. Поэтому для своих опытов по исследованию систем они впервые применили тщательно очищенные фтористый натрий и фтористый алюминий. При этом фтористый алюминий возгоняли при нагревании выше  $1000^\circ \text{C}$ , для чего исследователи разработали несложный способ, который применялся П. П. Федотьевым в его последующих работах, а также другими исследователями при изучении физико-химических свойств криолитовых расплавов.

П. П. Федотьев и В. П. Ильинский построили диаграмму плавкости системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ , снимая кривые охлаждения, причем самым простым способом, без каких-либо особых мер предосторожности. И тем не менее это исследование было выполнено настолько тщательно, что многократное повторное построение диаграммы плавкости системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  другими исследователями (как нашими, так и зарубежными) приводило к тем же самым результатам лишь при небольших колебаниях температуры в отдельных точках диаграммы.

В табл. 1 для подтверждения сказанного приведены основные точки системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ , полученные П. П. Фе-

Т а б л и ц а 1

Основные точки системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$

Основные точки	Федотьев и Ильинский		Лундина	
	$\text{AlF}_3$ % (мол.)	температура, $^\circ\text{C}$	$\text{AlF}_3$ % (мол.)	температура, $^\circ\text{C}$
Чистый NaF . . . . .	0	990	0	989
Первая эвтектика . . . . .	14	885	13,75	886
Криолит . . . . .	25	1000	25	1011
Хиолит (плавление) . . . . .	37,5	850	37,5	861
Точка перехода хиолита . . . . .	40	725	41	735
Вторая эвтектика . . . . .	46,5	685	47	684

дотьевым и В. П. Ильинским (1910 г.) и 25 лет спустя (1935 г.) З. Ф. Лундиной [7, стр. 67].

Как видно, в обеих работах получены практически одни и те же результаты.

На рис. 4 сопоставлены диаграммы плавкости системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ , построенные П. П. Федотьевым и В. П. Ильинским (а), З. Ф. Лундиной (б), а также в последнее время (1956 г.) К. Гротгеймом [8]. Как видно, все три диаграммы плавкости идентичны. Отличие диаграммы, построенной Гротгеймом, заключается только в том, что он предложил изучение системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  до концентрации 65% (мол.)

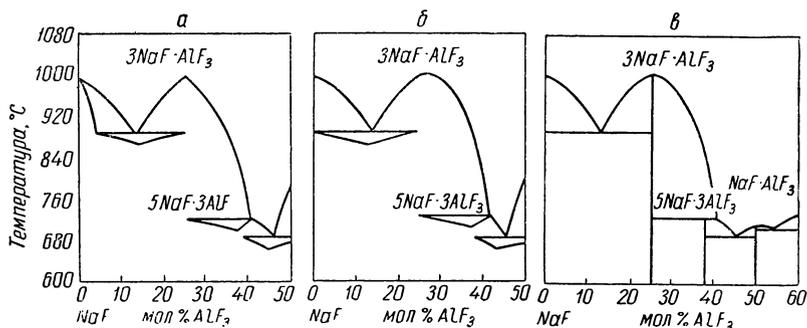


Рис. 4. Сопоставление диаграмм плавкости системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ :  
 а — по Федотьеву и Ильинскому (1910—1912 гг.); б — по Лундиной (1935 г.);  
 в — по Гротгейму (1956 г.)

$\text{AlF}_3$  и установил при 50% (мол.)  $\text{AlF}_3$  еще одно химическое соединение в системе с температурой плавления  $731^\circ\text{C}$ .

В той же области системы, которая была исследована П. П. Федотьевым и В. П. Ильинским [до 50% (мол.)  $\text{AlF}_3$ ], диаграмма плавкости Гротгейма практически полностью совпадает с диаграммой этих исследователей.

Таким образом, результаты исследования П. П. Федотьевым и В. П. Ильинским системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  имеют не только историческое значение как первая работа в этой области, но и не потеряли своей научной и практической ценности и до настоящего времени.

Подводя итог этому разделу своей работы, П. П. Федотьев и В. П. Ильинский писали:

«Что касается прямой нашей задачи, то исследованием двойной системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  мы устанавливаем точно температуру плавления криолита и показываем, до каких гра-

ниц можно понизить эту температуру прибавлением к криолиту фтористого натрия или фтористого алюминия. При сплаве с 46,5% (мол.)  $\text{AlF}_3$  мы достигаем наиминишей температуры  $685^\circ\text{C}$ , мало отличающейся от температуры плавления алюминия  $657,3^\circ$ . Растворением в этих сплавах  $\text{Al}_2\text{O}_3$  можно еще несколько понизить температуру плавления» [2, стр. 180]. Справедливость этих слов целиком сохраняется и более пятидесяти лет спустя.

Как мы отмечали выше, П. П. Федотьев и В. П. Ильинский особо подчеркивали неопределенность и противоречивость сведений в литературе того времени о растворимости глинозема в криолите и плавкости криолитоглиноземных сплавов. Поэтому в своем экспериментальном исследовании они изучили систему  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$  и впервые построили достаточно подробную диаграмму плавкости этой столь же важной для электролитического получения алюминия системы, как и предыдущая.

Первые попытки определить плавкость смесей криолита с глиноземом были сделаны Мольденгауером [2, стр. 180]. Однако П. П. Федотьев и В. П. Ильинский справедливо критически отнеслись к полученным им результатам, так как исследователь пользовался загрязненными примесями — природным криолитом и угольными тиглями.

П. П. Федотьев и В. П. Ильинский проводили эксперименты с тщательно очищенными исходными материалами в платиновых тиглях, что и позволило получить им более достоверные результаты, чем Мольденгауеру. Так, например, по Мольденгауеру температура плавления чистого криолита равна  $975^\circ\text{C}$ , а по Федотьеву и Ильинскому —  $1000^\circ\text{C}$ ; температурный минимум в системе  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$  Мольденгауер установил при  $880$  и  $20\%$  (вес.)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а Федотьев и Ильинский — при  $935^\circ\text{C}$  и  $15,5\%$  (вес.)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

П. П. Федотьев и В. П. Ильинский исследовали также растворимость глинозема в криолитовых расплавах, содержащих избыток  $\text{NaF}$  и  $\text{AlF}_3$ , причем данные, полученные ими в 1912 г., полностью достоверны и сейчас.

Резюмируя этот раздел исследования, авторы пишут:

«Сопоставляя здесь результаты опытов сплавления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с криолитовыми смесями, можно сделать следующее заключение. Растворимость глинозема в криолите составляет при  $1000^\circ\text{C}$  и обыкновенном давлении  $20,7\%$  (вес.) (в 100 весовых частях сплава). Прибавление к криолиту  $\text{NaF}$  повышает растворимость глинозема. Начиная с эвтектической смеси криолита —  $\text{NaF}$  до фтористого натрия раствори-

мость глинозема понижается. Во фтористом натрии  $Al_2O_3$  не растворяется.

Для сплавов криолита с  $AlF_3$  повышение содержания последнего ведет к понижению растворимости  $Al_2O_3$ » [2, стр. 184].

В последующем система  $Na_3AlF_6 - Al_2O_3$  изучалась неоднократно различными исследователями, в частности З. Ф. Лундиной в 1935 г. [7], В. П. Машовцом в 1938 г. [7], Филлипсом и др. в 1955 г. [9]. В табл. 2 приведены данные отдельных исследователей по системе  $Na_3AlF_6 - Al_2O_3$ .

Таблица 2

Некоторые данные по системе  $Na_3AlF_6 - Al_2O_3$

	Федотьев и Ильин- ский 1912 г.	Лундина 1935 г.	Машовец 1938 г.	Филлипс и др. 1955 г.
Эвтектика (температурный минимум):				
а) $Al_2O_3$ , % (вес.) . . .	15,5	14,8	12,0	10,0
б) температура, °С . . .	935	938	948	968
Предел растворимости $Al_2O_3$ , % (вес.) при 1000° С . . . . .	20,7	16,2	15,8	12,0

На рис. 5 сопоставлены диаграммы плавкости (линии ликвидуса) системы  $Na_3AlF_6 - Al_2O_3$ , построенные теми же исследователями. В таблице и на рисунке видно, что чем позже проведено исследование, тем меньшая концентрация глинозема определена в температурном минимуме, тем выше его температура и меньше предел растворимости глинозема в криолите при 1000° С. А так как все исследователи проводили свои эксперименты в одинаковых условиях: тщательно очищенные исходные материалы, платиновая аппаратура и т. д., то это не может быть объяснено случайными причинами, например влиянием примесей в исходных солях, изменением состава электролита во время экспериментов и др.

Наиболее существенное различие в условиях проведения опытов разными исследователями — неодинаковая скорость понижения температуры расплава при снятии кривых охлаждения. В работе П. П. Федотьева и В. П. Ильинского она была наибольшей и составляла 15—20° С в минуту, в работах З. Ф. Лундиной и В. П. Машовца 8—6° С в минуту и в работе Филлипса и др. всего лишь 0,1° С в минуту. А так как

криолитоглиноземные расплавы склонны к переохлаждению, которое сказывается тем сильнее, чем больше скорость охлаждения расплава, то это и явилось причиной различия в положениях температурного минимума на диаграммах плавкости системы  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$ , построенных в разное время различными исследователями.

Это, однако, нисколько не умаляет значения исследования плавкости криолитоглиноземных расплавов, выполнен-

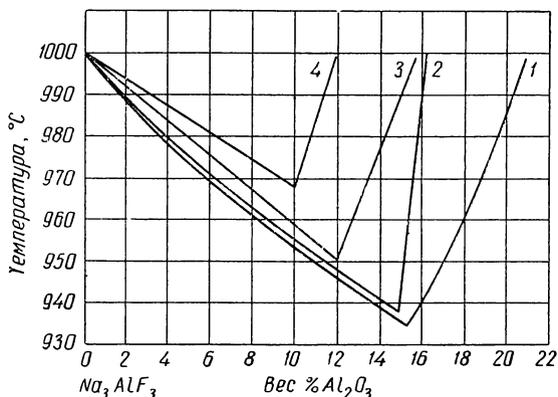


Рис. 5. Сопоставление диаграмм плавкости (линий ликвидуса) системы  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$ :  
 1 — по Федотьеву и Ильинскому (1910—1912 гг.); 2 — по Лундиной (1935 г.); 3 — по Машовцу (1938 г.); 4 — по Филлипсу и др. (1955 г.)

ного более 50 лет тому назад П. П. Федотьевым и В. П. Ильинским. Не только для своего времени, но и на протяжении последующих нескольких десятков лет диаграмма плавкости системы  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$ , построенная этими исследователями, была наиболее достоверной и впервые внесла достаточную ясность в вопрос о растворимости глинозема в электролите алюминиевых ванн.

В исследовании П. П. Федотьева и В. П. Ильинского впервые были определены потери алюминия в криолитовых расплавах. Авторы при этом разграничивают понятие растворимости и потерь металлов в расплавленных солях.

«Под растворимостью металлов в расплавленных солях при определенной температуре, в закрытом пространстве, — говорится в их работе, можно понимать количество переходящего в сплав металла. При нагревании металла в рас-

плавленной соли в открытом сосуде получается неравновесная система, так как вследствие указанных причин уменьшение веса металла не ограничено каким-либо пределом» [2, стр. 189].

Эта важная формулировка вошла в учебники и монографии по электрохимии и электролизу расплавленных солей.

Исследователи выполнили небольшое число опытов по определению потерь алюминия в электролитах различного состава в открытых графитовых тиглях по методике, которая сохранилась до нашего времени.

Эти опыты позволили установить определенную зависимость потерь алюминия от состава электролита, которые, в частности, оказались меньшими в криолитовых расплавах с избытком фтористого алюминия и большими — с избытком фтористого натрия.

И хотя сами исследователи оценивали эти опыты как ориентировочные, они позволили сделать заключение о связи между выходом по току и потерями алюминия в электролите:

«Конечно, эти немногие опыты не могут претендовать на большую точность, однако из них можно видеть, что потери тока при получении алюминия вследствие его «растворимости» могут быть довольно значительны» [2, стр. 190].

В исследовании П. П. Федотьева и В. П. Ильинского сделаны важные наблюдения над характером образования карбида алюминия при электролизе криолито-глиноземных расплавов. Образование карбида алюминия в алюминиевой ванне было известно уже давно, однако оно связывалось со специфическим действием постоянного тока.

Опыты П. П. Федотьева и В. П. Ильинского опровергли эту точку зрения, так как карбид алюминия образовывался и при отсутствии постоянного тока. При этом карбид алюминия появлялся на поверхности корольков алюминия и в толще электролита со стенками угольного тигля.

Очень интересные наблюдения были сделаны над влиянием состава криолитового расплава на угольный тигель в присутствии алюминия. Исследователи по этому поводу писали:

«Мы обнаружили существенную разницу в отношении действия на уголь между криолито- и хиолитоглиноземными сплавами, с одной стороны, и эвтектической смесью, с другой; первые могут находиться в расплавленном состоянии в течение нескольких часов в угольных тиглях, не действуя на них разрушающим образом; при охлаждении с

названными сплавами тигли остаются целыми без трещин. Эвтектическая же смесь<sup>1</sup> с глиноземом действует на уголь сильно разрушающим образом. Уже через 20—30 мин замечается понижение уровня жидкости в тигле вследствие ее просачивания; края тигля начинают обсыпаться; при охлаждении на тигле наблюдаются трещины» [2, стр. 191].

Такое влияние на уголь криолитового расплава с избытком фтористого натрия П. П. Федотьев и В. П. Ильинский приписывали образующемуся, по их мнению, в таком расплаве алюминату.

С современной точки зрения образование трещин в стенках угольного тигля и усиленное просачивание через них расплава  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaF}$  объясняются поверхностной активностью такого расплава на границе с углем, а также выделением (под влиянием алюминия) натрия, внедряющегося в пространственную решетку углеродистого материала.

Тем не менее такое наблюдение было сделано исследователями впервые и имеет существенное теоретическое и практическое значение.

В своей работе П. П. Федотьев и В. П. Ильинский затронули также вопрос о напряжении разложения глинозема, придя к выводу, что «непрерывное выделение алюминия начинается при 2,1 вольта» [2, стр. 203].

Исследуя явление «искрового разряда», т. е. анодного эффекта при электролизе криолито-глиноземных расплавов, П. П. Федотьев и В. П. Ильинский писали «... что это явление может наступить не только при истощении в растворе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , но и при значительном общем его содержании, если при продолжительном спокойном электролизе значительно повысится концентрация глинозема у анода» [2, стр. 203].

Другими словами, анодный эффект может наступить и при недостатке, и при избытке глинозема в электролите.

Это перекликается с современными исследованиями и практикой электролитического производства алюминия, когда на ваннах иногда появляются так называемые негаснущие вспышки, т. е. трудно устранимые длительные анодные эффекты, обусловленные содержанием в электролите избыточного (нерастворенного) глинозема.

Заключительной частью Экспериментального исследования П. П. Федотьева и В. П. Ильинского были проведенные ими опыты электролитического получения алюминия на небольшой ванне (рис. 6), конструкция которой и теперь

---

<sup>1</sup> Т. е.  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaF}$ .

еще применяется в лабораторной практике. Внутреннее пространство квадратного железного кожуха с поперечным сечением  $25 \times 25$  см и высотой 20 см облицовывали угольными (а иногда и графитовыми) плитками. На дно кожуха укладывали толстую угольную плиту со вставленной в нее плиткой из графита. Собственно рабочим пространством ванны, таким образом, явился угольный (или графитовый) тигель сечением  $15 \times 15$  см и глубиной 12 см. Угольный анод диаметром 7 см укрепляли в штативе с винтовой нарезкой. Отрицательный полюс источника постоянного тока — динамо-машины с независимым возбуждением<sup>1</sup> присоединяли непосредственно к железному кожуху. Ванна работала при средней силе тока 200 а, что соответствовало анодной плотности тока  $3,5\text{—}4$  а/см<sup>2</sup>. Общее количество электролита в ванне составляло 5 кг, причем первоначально он расплавлялся с помощью угля сопротивления (диаметром 1 см), зажимаемого между анодом и подиной. Когда количество электролита было достаточным, уголь сопротивления извлекали, и начинался электролиз.

Продолжительность каждого опыта составляла 4 ч; в ванну регулярно вводили добавки глинозема. Выделившийся алюминий накапливался на дне ванны, откуда извлекался по окончании опыта и затвердевания электролита.

Целью опытов электролиза была проверка пригодности для электролитического получения алюминия электролита различных составов, вытекающих из полученных исследователями данных по системам  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  и  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$ .

<sup>1</sup> Эта динамо-машина, установленная в лаборатории кафедры электрометаллургии ЛПИ, до сих пор используется в лабораторной практике электролиза.

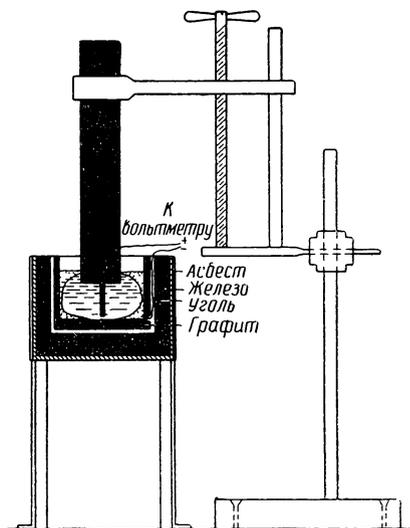


Рис. 6. Алюминиевый лабораторный электролизер П. П. Федотьева (1910—1912 гг.)

Их интересовала возможность применения наиболее легкоплавкого электролита, но в то же время обладающего достаточной растворяющей способностью по отношению к глинозему.

«Для сравнительной оценки, — пишут в своей работе исследователи, — мы остановились на трех растворителях: чистом криолите, хиолите и эвтектической смеси  $\text{NaF} - \text{Al}_3\text{AlF}_6$ . Из сплавов криолита с  $\text{AlF}_3$  мы остановились на хиолите вследствие его срединного, так сказать, положения между криолитом и эвтектикой<sup>1</sup>, плавящейся при  $685^\circ$ . Последний сплав казался нам неподходящим по сравнительно малой растворимости в нем глинозема. Хиолит же при невысокой относительно температуре плавления растворяет свыше 10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ » [2, стр. 193].

И далее: «Мы не можем здесь не обратить внимания, какое прекрасное средство для понижения температуры представляет фтористый алюминий. Один взгляд на диаграмму плавкости показывает, как падает кривая температур от хиолита до точки перехода; изменение в составе всего на  $2\frac{1}{2}$   $\text{AlF}_3$  дает понижение температуры на  $130^\circ$ » [2, стр. 193].

Последние слова весьма знаменательны: впервые после 25 лет существования электролитического производство алюминия в результате экспериментального исследования П. П. Федотьева и В. П. Ильинского получило возможность при выборе состава электролита отойти от эмпиризма, приобрело научное обоснование.

В итоге проведения опытов электролиза глинозема в криолите, хиолите и эвтектической смеси криолита с фтористым натрием исследователи пришли к заключению о непригодности последней смеси в качестве электролита для получения алюминия: «Опыты электролиза растворов глинозема в эвтектической смеси криолита и фтористого натрия не оставляют сомнения в том, что этот электролит, несмотря на более низкую температуру плавления сравнительно с криолитом, оказывается мало пригодным для получения алюминия» [2, стр. 198].

Этот вывод, сделанный более 50 лет тому назад, полностью справедлив и сейчас; щелочные электролиты, т. е. с избыточным содержанием  $\text{NaF}$  против состава криолита, в современной практике промышленного электролиза алюминия никогда не применяются.

---

<sup>1</sup> Второй.

Вместе с тем авторы рассматриваемой работы подтверждают благоприятное действие фтористого алюминия, понижающего температуру плавления электролита. Но они здесь же отмечают как существенный недостаток очень богатых фтористым алюминием электролитов значительную летучесть  $AlF_3$ . По этому поводу они пишут: «...это, конечно, удорожает производство, кроме того, представляет неудобство в гигиеническом отношении ввиду очень вредного действия фтористых соединений на организм. Конечно, при отсутствии большого перегрева при работе названные неудобства могут быть, если не вполне устранены, то в значительной мере ослаблены» [2, стр. 199—200].

Это вполне отвечает современной практике промышленного электролитического производства алюминия, в которой отказались от электролитов, содержащих очень большой избыток фтористого алюминия, но всегда применяют несколько кислые электролиты, т. е. с небольшим избытком  $AlF_3$  против состава криолита.

В экспериментальном исследовании также затрагивается вопрос об использовании солевых добавок к электролиту, таких как фтористый калий, фтористый литий, хлористый натрий и фтористый кальций для снижения температуры плавления электролита. П. П. Федотьев и В. П. Ильинский провели некоторые опыты по изучению влияния фтористого кальция на свойства электролита. При этом они констатировали, что при введении в электролит фтористого кальция «температура плавления (криолита — *авт.*) может быть заметно понижена, но вместе с тем понижается растворимость глинозема и повышается удельный вес сплавов»<sup>1</sup> [2, стр. 203].

Таковы основные вопросы, которые были разработаны в Экспериментальном исследовании П. П. Федотьева и В. П. Ильинского. Появление этой научной работы оказало весьма важное влияние на электролитическое производство алюминия, так как оно впервые заложило научные основы этой отрасли металлургии.

Результаты исследований П. П. Федотьева и В. П. Ильинского и в первую очередь систем  $NaF - AlF_3$  и  $Na_3AlF_6 - Al_2O_3$  сделали достоянием мировой специальной литературы и вошли во многие учебники и монографии.

Вместе с тем работа П. П. Федотьева и В. П. Ильинского оказала сильнейшее влияние на дальнейшее развитие науч-

<sup>1</sup> Т. е. расплавов криолит-фтористый кальций.

ных исследований в области физико-химических основ и теории электролитического получения алюминия. Отдельные вопросы, исследованные или поставленные в этой работе, были развиты прежде всего самим П. П. Федотьевым, а также его учениками и другими учеными у нас и за рубежом.

Действительно, П. П. Федотьев продолжил исследования по изучению солевых систем (с построением соответствующих диаграмм плавкости), представляющих интерес для электролитического получения алюминия.

Уже через год после окончания Экспериментального исследования по электрометаллургии алюминия П. П. Федотьев и В. П. Ильинский опубликовали работу «Плавкость тройной системы: криолит, фтористый натрий, фтористый кальций» [10]. Если в предыдущей работе [2] исследователи определили плавкость только двух точек в системе криолит — фтористый кальций с 10 и 20%  $\text{CaF}_2$ , то в работе [10] исследования завершились построением подробной диаграммы плавкости системы  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{NaF} - \text{CaF}_2$ .

В 1915 г. П. П. Федотьев и В. П. Ильинский опубликовали работу «Случай тройной системы с явным и скрытым максимумом у одной из двойных» [11], результатом которой явилось построение диаграммы плавкости тройной системы  $\text{NaF} - \text{CaF}_2 - \text{AlF}_3$ .

Логическим развитием вопроса о солевых добавках для снижения температуры плавления электролита алюминиевых ванн, затронутого в работе «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия», явилось выполнение П. П. Федотьевым и К. Тимофеевым в 1928—1929 гг. и опубликование в 1932 г. [12] работы «Диаграммы плавкости систем  $\text{KF} - \text{AlF}_3$  и  $\text{LiF} - \text{AlF}_3$ ».

Другое важное направление, которое получило развитие в дальнейших исследованиях П. П. Федотьева, — механизм электролиза в алюминиевой ванне.

Этот вопрос уже несколько был затронут в работе «Экспериментальные исследования», где исследователи, говоря о напряжении разложения глинозема, указывают, что «Разложение глинозема в криолите рассматривается в литературе как первичный процесс, причем на аноде происходит разряд иона  $\text{O}^{2-}$ . Нам кажется возможным и другой вид анодного разряда» [2, стр. 185].

В дальнейшем П. П. Федотьев развивает этот вопрос и в окончательном виде свой взгляд на механизм электролиза в алюминиевой ванне он сформулировал в работе «Физико-

химические процессы в криолито-глиноземной ванне», относящейся к 1932 г. [2, стр. 226]. В этой работе П. П. Федотьев писал: «Собственные лабораторные наблюдения, литературные указания, а особенно производившиеся под личным руководством опыты получения алюминия на полузаводской установке в 1929 году побудили меня глубже взглянуть на механизм электролиза и привели к некоторым общим соображениям теоретического характера» [2, стр. 228].

Наконец, третье направление, которое было начато П. П. Федотьевым уже в первой работе «Экспериментальное исследование электрометаллургии алюминия» и развито им в дальнейшем,— это изучение технологии электролитического получения алюминия. Если в этой работе П. П. Федотьев мог изучать электролиз криолито-глиноземных расплавов только в лабораторном электролизере на 200 а, то в 1929 г. на заводе «Красный Выборжец» в Ленинграде этот процесс был осуществлен им в электролизерах на 2000 а, что имело большое значение для организации алюминиевой промышленности в нашей стране [13]. Опытные алюминиевые ванны на 6000 а конструкции Н. П. Федотьева (сына П. П. Федотьева) испытывались затем на Опытном алюминиевом заводе в Ленинграде в 1930 г.

Всеми этими работами была внесена достаточная ясность в характер важнейших солевых систем, составляющих основу электролита алюминиевой ванны, и определены некоторые физико-химические свойства соответствующих расплавов. Было установлено влияние солевых добавок к криолитовому расплаву на снижение температуры плавления электролита, изменение плотностей соответствующих расплавов и растворимость глинозема. Была определена зависимость работы алюминиевых электролизеров от ряда факторов. Обобщение этих данных вошло в книгу П. П. Федотьева «Электролиз в металлургии» (ч. II), опубликованную в 1935 г. [14].

Результаты названных работ, несомненно, существенно повлияли на практику электролитического производства алюминия. В электролитах алюминиевых ванн, применяемых в 20—30-х годах текущего столетия, уже отсутствует глинозем в количестве, насыщающем электроды. Фтористый алюминий и фтористый кальций вводят в умеренных количествах. В практику производства алюминия вошло применение искусственного криолита.

Как мы отмечали выше, исследования П. П. Федотьева были исходными и для других советских ученых, которые

на протяжении 30 лет всесторонне изучали теоретические основы электролитического получения алюминия, в частности, в тех направлениях, которые уже были затронуты в Экспериментальном исследовании П. П. Федотьева и В. П. Ильинского.

Первым таким направлением было дальнейшее исследование физико-химических свойств криолитовых расплавов, содержащих глинозем, различные солевые компоненты и окислы [7, 15—17].

В этой области советскими учеными изучены многочисленные двойные, тройные и взаимные системы, относящиеся к электролиту алюминиевых ванн с построением фазовых диаграмм и комплексным исследованием физико-химических свойств соответствующих расплавов (плавкости, вязкости, электропроводности, летучести, поверхностного натяжения).

Систематически исследованы физико-химические свойства криолитовых расплавов, содержащих различные солевые компоненты (добавки). Такие компоненты, как фтористый алюминий, фтористый кальций, фтористый магний, хлористый натрий и хлористый магний на основании этих исследований не только внедрены в нашу алюминиевую промышленность, но применяются заводами и других стран.

Второе направление — изучение анодного и катодного процессов при электролитическом получении алюминия [18, 19].

В работах советских ученых анодный процесс исследован с позиций современных взглядов на механизм окисления (горения) угля. Дано научно обоснованное объяснение и экспериментально подтверждено возникновение перенапряжения на угольном аноде как результат замедленности и сложности процесса окисления угольного анода с образованием промежуточных кислородно-углеродистых соединений. Эта точка зрения в настоящее время общепринята у наших и зарубежных ученых.

Работами советских ученых показано, что катодный процесс при электролитическом получении алюминия заключается в основном в первичном разряде ионов трехвалентного алюминия. Однако в зависимости от величины катодной плотности тока он может включать стадии возникновения и разряда ионов одновалентного алюминия, а также ионов натрия. Советские ученые показали влияние натрия на разрушение угольного катода алюминиевой ванны с установлением механизма этого явления.

Третье направление — взаимодействие алюминия с криолитовыми расплавами.

Взаимодействие алюминия с электролитом, приводящее к потерям алюминия, имеющее большое значение для теории и практики электролиза алюминия, всесторонне исследовано в трудах советских ученых. Установлено влияние различных факторов, температуры, состава электролита, плотности тока и т. д., а также раскрыт механизм этого явления применительно к различным условиям взаимодействия.

Четвертое направление — исследование влияния различных факторов на выход по току при электролитическом получении алюминия [20, 21].

Вопрос об установлении влияния различных факторов на выход по току при электролизе криолито-глиноземных расплавов получил в работах советских ученых развитие прежде всего в форме многочисленных экспериментальных работ; кроме того, предложен ряд полуэмпирических формул, устанавливающих зависимость выхода по току от плотности тока, межполюсного расстояния и температуры и позволяющих вычислить значения выхода по току.

Пятое направление — исследование природы анодного эффекта [15, 16].

В ряде экспериментальных работ советских ученых показана решающая роль поверхностных явлений в возникновении анодного эффекта, что дало возможность глубже проникнуть в его природу.

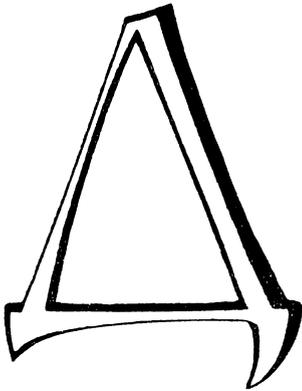
Эти направления (а мы перечислили их не все) так или иначе были затронуты в исследовании П. П. Федотьева и В. П. Ильинского, выполненного более 50 лет тому назад. Советские ученые развили эти направления, внося существенный вклад в теорию и практику электролитического производства алюминия.

Работу П. П. Федотьева и В. П. Ильинского по развитию основных научных направлений в электролитическом производстве алюминия трудно переоценить: она заложила основу науки об электрометаллургии алюминия.

---

# 6

## П. П. ФЕДОТЪЕВ И ЕГО РОЛЬ В СОЗДАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



революционная Россия не имела собственного алюминиевого производства. Объясняется это прежде всего низким уровнем общего индустриально-технического развития страны, отсутствием в России больших количеств дешевой электроэнергии, полной неизученностью сырьевой базы. Созданию в

России собственного алюминиевого производства препятствовали также концерны мировой алюминиевой промышленности, располагавшие патентами и производственными данными и не желавшие терять выгодный рынок сбыта.

О необходимости производства своего алюминия в России говорилось еще со времени русско-японской войны 1904 г. В разгар первой мировой войны царское правительство, переживая затруднения со снабжением военных заводов цветными металлами, сделало попытку создать собственную алюминиевую промышленность.

Однако только после Великой Октябрьской социалистической революции, когда началась электрификация страны

и стали планомерно разведываться ее богатейшие недра, были созданы реальные условия для организации и развития алюминиевой промышленности в нашей стране.

Большую роль сыграли труды ряда русских ученых, представлявших важность решения этой проблемы.

Профессор Н. А. Пушкин, с 1909 г. изучавший возможности получения алюминия в России, в своих работах показывал возможность выплавки этого металла из отечественного сырья электролитическим путем. В 1913 г. он опубликовал обширное исследование «Равновесие в бинарных системах, составленных из фтористых солей», выполненное им совместно с А. В. Басковым в Петербургском электротехническом институте.

В 1914 г. Н. А. Пушкин, Э. Э. Дишлер и М. С. Максимова опубликовали работу «О получении алюминия из русских минералов», в которой содержалось описание выполненных ими лабораторных опытов по электролитическому получению алюминия из сырья, извлеченного из уральского минерала саймонита.

В 1915 г. профессор А. Н. Кузнецов и Е. И. Жуковский предложили оригинальный способ получения глинозема из низкосортных алюминиевых руд. Этот способ был осуществлен в 1933 г. на Днепровском алюминиевом заводе.

В довольно крупном масштабе (электролизер на 800 а) опыты по электролитическому получению алюминия были проведены Е. И. Жуковским в Московской горной академии в 1928 г.

В 20-х годах профессор А. А. Яковкин и И. С. Лилеев в Государственном институте прикладной химии в Ленинграде разработали способ извлечения глинозема из тихвинских бокситов, положенный в основу технологии Волховского алюминиевого завода.

Почетное место среди русских ученых, работавших над созданием отечественной алюминиевой промышленности, принадлежит П. П. Федотьеву.

Электролитическое получение алюминия интересовало П. П. Федотьева по существу на протяжении большей части его научной деятельности. Он занимался и чисто теоретическими вопросами, касающимися физико-химических свойств электролита и механизма электролиза, и вопросами прикладными, связанными с технологией этого процесса и организацией алюминиевой промышленности в нашей стране.

Как мы видели в предыдущей главе, первой работой,

выполненной П. П. Федотьевым в 1910—1912 гг., по изучению процесса электролитического получения алюминия было «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия», заложившее научные основы этого процесса.

Исследования в этом же направлении были продолжены П. П. Федотьевым в 1913—1914 гг., а затем в начале 30-х годов. В конце 20-х годов П. П. Федотьев занимался практическим решением проблемы создания в нашей стране собственной алюминиевой промышленности.

Хорошо представляя трудности решения этой проблемы, П. П. Федотьев, тем не менее, считал ее вполне осуществимой. Он писал: «В старой России была сделана единственная попытка производства алюминия; в конце 80-х годов прошлого столетия под Москвою возникло небольшое предприятие для производства алюминия химическим способом, но должно было прекратиться по невыгодности<sup>1</sup>. В то время в Европе и Америке получал уже развитие новый способ. В заботах развития в стране новых отраслей промышленности в начале текущего столетия был организован в С.-Петербурге Политехнический институт, при Metallургическом факультете (отделении) которого учреждался Электрохимический подотдел ввиду того, что электричество получает все большее применение в металлургии для сварки металлов, их добычи и очистки». С 1910 г. по завершении обородования в лаборатории технической электрохимии и электрометаллургии прежде всего были начаты работы по производству легких металлов.

В обширном «Экспериментальном исследовании по электрометаллургии алюминия» впервые с большой полнотой разъяснены были многие стороны процесса. С 1911 г. начато было получение алюминия в лабораторном масштабе килограммами. Лаборатория (технической электрохимии и электрометаллургии Политехнического института — *авт.*) пользовалась импортными материалами; но в то время глинозем для химических целей готовился из французского боксита на трех наших заводах; плавиковая кислота также производилась на одном заводе. Несколько позже, в 1913 г., опы-

---

<sup>1</sup> Первый завод по производству алюминия химическим способом (Сен Клер Девилля, а затем Розе) работал с 1885 по 1889 г. Он находился вблизи теперешнего г. Загорска Московской области и принадлежал А. А. Нововейскому. Завод прекратил свое существование из-за недостатка оборотных средств, так как не мог конкурировать с ввозным алюминием, продажная цена которого была ниже [24]. (*Прим. авт.*)

ты получения алюминия в лабораторном масштабе производились в С.-Петербургском электротехническом институте проф. Н. Пушиным, который получал глинозем переработкой уральского минерала соймонита (63%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 18%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 13%  $\text{SiO}_2$  и другие примеси). Получение алюминия вошло постепенно в постоянную лабораторную практику, сначала в Политехническом институте и затем в других учебных заведениях.

Потребность России в алюминии оставалась до войны незначительной. Ввоз в последние годы перед войной не превышал 2000 т. Во время войны он раза в два вырос. Приходилось подчиняться очень тяжелым условиям поставщиков. Около четверти века тому назад (в 1916 г.— авт.) при Главном артиллерийском управлении была организована комиссия по обеспечению страны алюминием собственного производства. Ждать каких-либо ценных результатов от этого учреждения, конечно, было нельзя. К сожалению, традиция его долгое время удерживалась в разных позднее возникавших комиссиях по созданию у нас алюминиевой промышленности.

Реализация крупного производства алюминия в СССР, как дело очень сложное при недостаточной, кроме того, обеспеченности собственным высококачественным сырьем для приготовления глинозема, представлялась очень трудной. Обнаруженное в 1916 г. месторождение Тихвинского боксита возбуждало большой интерес. Опыты приготовления из этого боксита глинозема, начатое производство фтористых соединений (в том числе также искусственного криолита), расширение электродного производства, наконец, расчеты на получение в недалеком будущем дешевой энергии (на Волхове, Днепре, Свири и в других местах) в значительной мере оживили интерес к алюминиевому делу. В вопросах организации этого дела приходилось руководствоваться не только одними экономическими соображениями.

Надежды на иностранную техническую помощь в течение долгого времени представлялись довольно проблематичными, если принять в расчет ту организованность алюминиевой промышленности в Европе и в Америке, на которую указано было выше. Необходимо было намечать собственные пути» [14, стр. 203—204].

Последнее замечание было весьма характерным для П. П. Федотьева, который всегда утверждал, что советским ученым и инженерам по плечу собственными силами организовать производство алюминия без помощи извне.

Весной 1924 г. состоялся II Всероссийский съезд научных деятелей по металлургии, который посвятил алюминию и его сплавам специальное заседание, проходившее на заводе «Красный Выборжец» им. С. М. Кирова в Ленинграде.

На этом съезде П. П. Федотьев выступил с докладом «О технических условиях установления алюминиевого производства в России», в котором он отметил, что «при наличии дешевой энергии, а также соответственных материалов производство алюминия могло бы быть установлено у нас в относительно короткий срок без всякого содействия иностранцев» [14, стр. 204].

П. П. Федотьев исходил из уже достаточной практической изученности к тому времени электролитического способа производства алюминия, немалую роль в которой сыграли его собственные исследования.

«За 40 лет со времени установления производства алюминия по способу Эру-Холла,— писал П. П. Федотьев,— процесс электролиза был изучен с достаточной полнотой. Нашими исследованиями в б. Политехническом институте в значительной степени была разъяснена теоретическая сторона вопроса. В области химических и металлургических производств все усовершенствования и возникновение новых процессов получают начало в лаборатории. Эта лабораторная стадия пройдена у нас уже двадцать лет тому назад» [1, стр. 177]. Все это давало основание для постановки работ по получению алюминия в более крупном масштабе.

В конце октября 1928 г. по инициативе Ленинградского областного совета народного хозяйства было намечено провести укрупненные опыты по получению металлического алюминия на заводе «Красный Выборжец». Эти опыты выполнялись под руководством П. П. Федотьева.

Все исходные материалы — глинозем, криолит и угольные аноды — были отечественного происхождения. Глинозем был получен на опытном заводе Государственного института прикладной химии в Ленинграде, криолит доставлен с Царицынской опытной станции под Москвой, углеродистые материалы (аноды и плиты для футеровки ванн) изготовлены Кудиновским заводом «Электроугли».

Прежде чем эти материалы подвергнуть электролизу в крупном масштабе, их проверили в лабораторных условиях.

«До начала работы на заводе мною совместно с инж. Н. П. Федотьевым<sup>1</sup>,— писал П. П. Федотьев,— в лабора-

<sup>1</sup> Н. П. Федотьев — сын П. П. Федотьева, ныне профессор Ленинградского технологического института им. Ленсовета.

тории б. Политехнического института были произведены в небольшой ванне на 200 а предварительные опыты с доставленными криолитом и глиноземом» [1, стр. 181]. При этом обнаружилась необходимость предварительного прокаливания криолита.

На заводе «Красный Выборжец» были установлены ванны на силу тока 2000 а (рис. 7). Железные прямоугольные кожухи ванн были изнутри футерованы магнезитовым кирпичом, а затем угольными плитами. Подины ванн выложены двумя рядами угольных плит. Внутренние размеры ванн составляли  $100 \times 50 \times 24$  см.

По длине у краев ванн были установлены изолированные стойки с закрепленной на них горизонтальной шиной с зажимами для анодов. Угольные аноды, полученные с Кудиновского завода, имели длину 50 см и квадратное сечение со стороной 14 см.

Для подвода тока в аноды ввертывали медные трубки. В каждой ванне помещалось по шесть анодов: анодная плотность тока составляла  $2,0—2,25$  а/см<sup>2</sup>. Всего было шесть ванн, однако в работе находились две-три. Для выпуска металла ванны были снабжены летками.

В таком относительно крупном масштабе процесс элек-

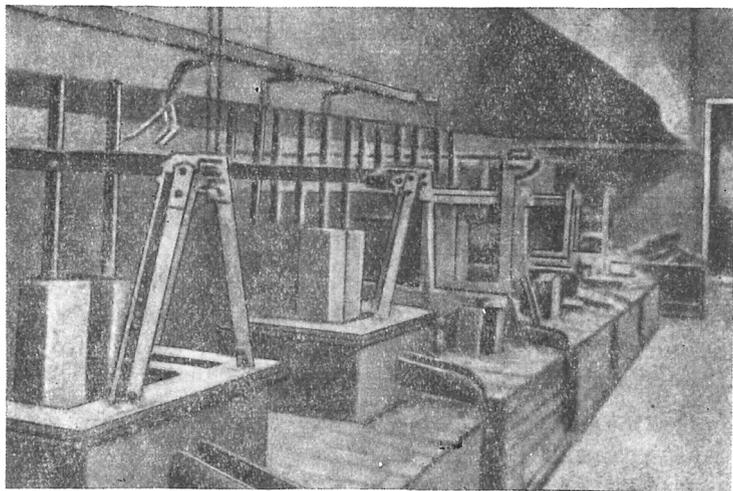


Рис. 7. Алюминиевые ванны на 2000 а, работавшие на заводе «Красный Выборжец» (1929 г.)

тролитического получения алюминия у нас осуществлялся впервые и поэтому вполне естественно, что экспериментаторам приходилось быть готовым к возможным неожиданностям.

По этому поводу П. П. Федотьев писал:

«Хотя в области алюминиевого производства со времени истечения срока действия главных привилегий многие чисто практические данные (общее устройство ванн, состав применяемого электролита, условия электролиза) стали всеобщим достоянием, на заводе предстояло тем не менее перейти от собственных лабораторных опытов к крупному масштабу. Подобный же переход, как известно, не является простым перенесением лабораторных наблюдений и навыков в заводскую обстановку. Предстояло решать задачу со многими неизвестными и, прежде всего, определить пригодность принятого соотношения конструктивных элементов ванны. Управление последовательно включенными ваннами, работа с разным числом анодов, характер их обгорания, одиночная и групповая их регулировка, изменение температуры и зависимости от разных факторов, установление соответственного всем наличным условиям режима работы, выпуск металла — все это надлежало изучить и установить путем непосредственного опыта. Дело приходилось начинать с совершенно неподготовленным персоналом...»

И далее: «Самые первые опыты начаты были без знания того, что представлял собой прокаленный криолит» [22].

Тем не менее, несмотря на ряд возникавших трудностей, опыты электролитического получения алюминия на заводе «Красный Выборжец» были успешно проведены. Эти опыты продолжались с 25 марта по 2 июня 1929 г., причем первый алюминий в количестве 8 кг был выпущен из ванны 27 марта 1929 г. «Этот момент, — писал впоследствии П. П. Федотьев, — можно считать возникновением производства алюминия в СССР на Волховской энергии целиком из материалов собственного приготовления» [14, стр. 207].

Полученный алюминий на этом же заводе был подвергнут различным испытаниям и из него был изготовлен ряд изделий. Образцы алюминия и изделий были преподнесены от Ленинграда V Всесоюзному съезду Советов.

Результаты укрупненных опытов электролитического получения алюминия нашли отражение в докладе Председателя ВСНХ В. В. Куйбышева на этом съезде о первом пятилетнем плане. Говоря о задачах в области металлургии, он

заметил, что огромная инициатива, проявленная ленинградскими товарищами в деле разработки методов производства алюминия, привела к тому, что они сумели произвести пробную партию алюминия в лабораторном и мелкозаводском масштабе. В связи с этим предполагалось уже в 1929 г. начать постройку опытного завода в Ленинграде для производства алюминия.

2 августа 1929 г. постановлением Совета Труда и Обороне с развитием цветной металлургии было принято решение о сооружении двух алюминиевых комбинатов — Волховского и Днепровского. Для строительства этих заводов был организован трест «Алюминстрой».

Одной из важнейших предпосылок для этого решения, несомненно, были успешные опыты П. П. Федотьева на заводе «Красный Выборжец».

«Опыты на «Красном Выборжце», — писал П. П. Федотьев, — сразу сдвинули дело с мертвой точки и повели к организации Алюминстроя и Опытного алюминиевого завода» [1, стр. 195].

И далее: «Опыты на «Красном Выборжце», а затем начата постройка Опытного завода стали вскоре достоянием заграничной печати. Выше уже были отмечены неудовлетворительные результаты переговоров с иностранными фирмами относительно содействия по постройке заводов. Теперь обстоятельства изменились. Французское общество *Compagnie de produits chimiques et electrometallurgiques Alais, Froges et Samargue* пошло навстречу Советскому правительству. Контракт, подписанный 20 января 1930 года названной компанией и Алюминстроем, вступил в силу 10 февраля после утверждения Советом Народных Комиссаров. Опыты на Красном Выборжце и решение продолжать их на Опытном заводе повлияли на сговорчивость французских капиталистов» [12, стр. 209].

Сооружение Опытного алюминиевого завода (ОАЗ) началось в Ленинграде (во Фризовом переулке) в том же 1929 г. Завод должен был освоить в производственных условиях электролитическое получение алюминия и испытание различных конструкций ванн, лучшая из которых предназначалась для оборудования Волховского и Днепровского комбинатов. Кроме того, в задачу ОАЗ входила подготовка основных кадров рабочих и инженерно-технического персонала для строящихся алюминиевых заводов, в первую очередь для Волховского комбината. Опытный завод был оборудован 20 ваннами на 6000 а пяти разных конструкций.

П. П. Федотьев дает следующее краткое описание конструкций первых ванн Опытного алюминиевого завода: «Первые две ванны на Опытном заводе были спроектированы (но уже без всякого моего участия) моим сотрудником инж. Н. П. Федотьевым. Общий вид подобной ванны в 6000 а показан на рис. 8. Конструкция отличается своей простотой. Железный кожух частью сварен, частью склепан. Дно и стенки ванны имеют выпуклую форму. К служащему катодному корпусу прикреплен железный угольник с присоединенными к нему алюминиевыми шинами. Бронзовые анодные шины изолированно прикреплены к швеллеру. Форма зажимов для анодов и регулировочное приспособление были взяты с модели «Красного Выборжца». Дно ванны выложено угольными блоками  $300 \times 200 \times 80$  мм в два слоя. Стенки облицованы сначала магнезитовым кирпичом для теплоизоляции, а затем одним рядом угольных плит...

Эта первая советская ванна, сконструированная без всякой иностранной технической помощи, дала гораздо лучшие результаты, нежели небольшие ванны «Красного Выборжца» [1, стр. 197]. В конце апреля 1930 г. была закончена постройка Опытного алюминиевого завода, а 11 мая были получены первые партии алюминия.

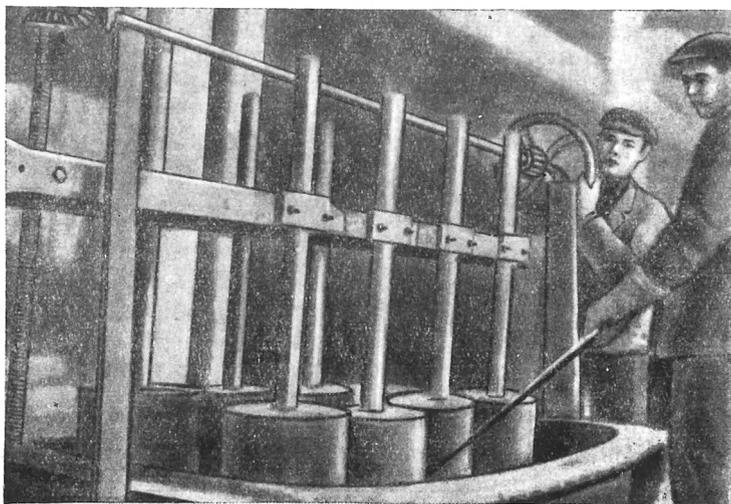


Рис. 8. Алюминиевая ванна на 6000 а Опытного алюминиевого завода конструкции Н. П. Федотьева (1930 г.)

РАБОТЫ  
ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

В

последние годы своей жизни (1933 и 1934) П. П. Федотьев опубликовал две выдающиеся работы, которые явились как бы завершением, итогом его многолетней научной деятельности в области электрометаллургии цветных металлов. Это — статья «Физико-химические процессы в криолито-глиноземной

ванне» и книга «Электролиз в металлургии». В первой из них П. П. Федотьев описал разработанную им наиболее законченную и обоснованную по тому времени теорию механизма электролиза криолито-глиноземных расплавов, т. е. высказал соображения о природе ионов, переносящих заряды к электродам в алюминиевой ванне. Как мы отмечали раньше, этот вопрос П. П. Федотьев затронул в работе «Экспериментальные исследования по электрометаллургии алюминия» в 1912 г., правда, не высказав по нему определенного суждения.

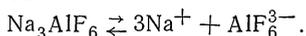
В первоначальном виде теория переноса тока в алюминиевой ванне была рассмотрена П. П. Федотьевым в 1923 г.

во втором выпуске его книги «Электрометаллургия» (рис. 9). Однако в окончательном виде она была сформулирована им после наблюдений при проведении укрупненных опытов электролиза алюминия на заводе «Красный Выборжец», проведенных под его руководством в 1929 г.

Оценивая научные итоги этих опытов, П. П. Федотьев подчеркивал, что именно они позволили ему построить теорию электролиза криолито-глиноземных расплавов.

«Не могу не указать в заключение,— пишет П. П. Федотьев,— еще на один результат работы на заводе «Красный Выборжец». Произведенные опыты явились в некоторой степени завершением наших экспериментальных исследований по электрометаллургии алюминия, дали возможность глубже проникнуть в механизм электролиза и наметить теорию электролиза криолито-глиноземных расплавов» [1, стр. 197].

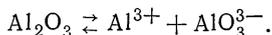
Принципиально новым в теории П. П. Федотьева было то, что он впервые рассматривал криолит как химическое соединение, существующее в расплавленной среде в форме присущих ему ионов:



В расплавленном состоянии криолит почти полностью ионизирован, поэтому основная доля тока при электролизе криолито-глиноземных расплавов переносится к электродам именно этими ионами ( $\text{Na}^+$  и  $\text{AlF}_6^{3-}$ ). В существовавших до этого представлениях криолит рассматривали как смесь фтористого алюминия и фтористого натрия, не считая, что он участвует в электрохимическом процессе как определенное химическое соединение.

В своих взглядах П. П. Федотьев опирался на характер диаграммы плавкости системы  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$  и некоторые, известные тогда, данные по электропроводности криолито-глиноземных расплавов. Однако последующее кристаллохимическое изучение криолита в наше время подтвердило, что элементами структуры кристаллической решетки криолита действительно являются ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{AlF}_6^{3-}$ , в виде которых он и будет находиться в расплаве.

Что касается глинозема, растворенного в расплавленном криолите, то П. П. Федотьев (на основании данных о строении некоторых аналогичных химических соединений) полагал, что он ионизирован в расплаве лишь в малой степени по следующей схеме:



Серия Монографии по химико-техническим и химико-экономическим вопросам.

П. П. Федотьев.

Профессор Петроградского Политехнического Института

# ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ.

—  
ВЫПУСК ВТОРОЙ.

НАУЧНОЕ ХИМИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ В. С. Н. Х.

ПЕТРОГРАД

1923

Рис. 9. Титульный лист книги П. П. Федотьева «Электрометаллургия» (1929 г.)

П. П. Федотьев считал, что положительные заряды переносятся к катоду поэтому в основном только ионами натрия, но в соответствии с более положительным потенциалом алюминия на катоде происходит первичный разряд его ионов.

Отрицательные же заряды переносятся к аноду в основном ионами  $\text{AlF}_6^{3-}$ , причем они разряжаются на аноде с участием неионизированного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с выделением его кислорода.

Современные данные о строении кристаллической решетки глинозема показали, что и она является ионной, и поэтому есть основания считать, что глинозем в криолито-глиноземных расплавах также будет ионизирован. Отсюда вытекает возможность первичного разряда на аноде кислородсодержащих анионов глинозема.

П. П. Федотьев, естественно, не располагал этими данными и поэтому уподоблял глинозем растворителю, который, как вода, сам диссоциирован в ничтожной степени. Тем не менее он в 1933 г. впервые связал процесс переноса тока в алюминиевой ванне (механизм электролиза) с присутствием в электролите ионов, образование которых можно было тогда только предполагать исходя из конструкционных химических формул криолита и глинозема. Это было большой заслугой ученого.

В последующее время советские (В. П. Машовец, В. А. Пазухин и др.) и зарубежные ученые, развивая представления о механизме переноса тока в алюминиевой ванне, опирались на теорию П. П. Федотьева, которая в принципиальной своей части не утратила своего значения и поныне.

П. П. Федотьев как основатель кафедры технической электрохимии и электрометаллургии Политехнического института с 1904 г. читал курс электрометаллургии, им же созданный. По мере углубления теоретического и технического содержания курса по нему издавались учебные пособия. Так, в 1921—1923 гг. П. П. Федотьев опубликовал книгу «Электрометаллургия» в трех выпусках, а в 1933 и 1934 гг. двумя последовательными выпусками — фундаментальный научный труд «Электролиз в металлургии» (рис. 10).

В первом выпуске рассматривался электролиз водных растворов, а во втором — электролиз расплавленных веществ.

В этой книге — одновременно монографии и учебном пособии по электрометаллургии — был обобщен многолетний

П. П. ФЕДОТЬЕВ

# ЭЛЕКТРОЛИЗ В МЕТАЛЛУРГИИ

Выпуск II

## ЭЛЕКТРОЛИЗ РАСПЛАВЛЕННЫХ ВЕЩЕСТВ



ГОСХИМТЕХИЗДАТ 1934  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

*Рис. 10. Титульный лист книги П. П. Федотьева  
«Электролиз в металлургии» (1934 г.)*

научный и педагогический опыт выдающегося русского ученого. В ней нашли отражение результаты оригинальных научно-исследовательских работ П. П. Федотьева и его учеников, выполненных в лаборатории технической электрохимии и электрометаллургии Политехнического института, а также был обобщен известный в то время литературный материал по данному вопросу.

А так как эта книга была результатом многолетнего чтения П. П. Федотьевым в Политехническом институте курса «Электрометаллургия», то характер построения ее в целом, а также изложения материала в отдельных главах позволяют судить и о методике преподавания автором этого курса.

В первом выпуске книги после теоретической вводной части «Об электролизе в применении к металлургии» последовательно излагаются вопросы преимущественно технологического характера по электрометаллургии меди, серебра, золота, свинца, никеля, железа, цинка и более сжато некоторых упругих тяжелых цветных металлов (висмута, сурьмы, кобальта, кадмия, марганца). Каждая глава начинается с описания процесса электролиза с растворимыми анодами (электролитического рафинирования), а затем — с нерастворимыми анодами (первичного электролиза). Заканчивается первый выпуск изложением основных положений гальванотехники.

Во втором выпуске этой книги П. П. Федотьев во Введении рассматривает особенности электролиза расплавленных электролитов по сравнению с электролизом водных растворов. Далее следует описание электрометаллургии и других щелочных металлов, магния, бериллия, щелочноземельных металлов и алюминия. Описанию электрометаллургии алюминия ввиду его важности посвящена половина всего второго выпуска. Заканчивается второй выпуск кратким рассмотрением процессов электролитического получения металлов редких земель.

Как отмечалось выше, в обоих выпусках вначале рассматриваются вопросы теоретического порядка, общие для данной группы металлов, а затем — конкретные процессы, показывающие условия применения электролиза водных растворов и расплавленных солей к тем или иным металлам.

Это позволило «сосредоточить воедино теорию и, не повторяясь, затем комплексно излагать технологию и инженерную часть, имея возможность делать сравнения и обобщения».

ния на примерах критического сопоставления техники производства многих металлов» [23].

Курс «Электрометаллургия», созданный П. П. Федотьевым, был развит его учениками. В 1939—1945 гг. профессор Ю. В. Баймаков выпустил учебное пособие «Электролиз в металлургии» в трех томах.

Как говорится в предисловии ко II тому: «Книга в значительной мере построена на данных работ, выполненных П. П. Федотьевым и его учениками, а также многочисленными учениками кафедры электрометаллургии цветных металлов Ленинградского политехнического института им. Калинина» [20].

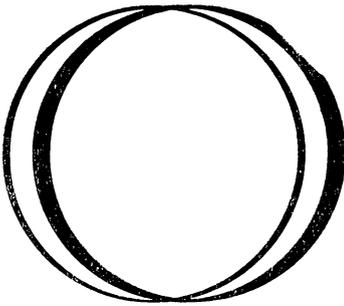
В 1963 г. Ю. В. Баймаков и А. И. Журин на основе дальнейшего углубления и расширения материала I тома «Электролиз в металлургии» (выпущенного в 1939 г.) опубликовали учебное пособие «Электролиз в гидрометаллургии», в котором (так же как и предыдущем его выпуске) сохранены основные принципы построения и изложения предмета, заложенные еще П. П. Федотьевым.

Так, в течение 30 лет (с 1904 по 1934 г.) П. П. Федотьев создавал и совершенствовал одну из важнейших для металлургии научных и учебных дисциплин, связанную с электролизом в металлургии различных металлов. Ученики и последователи П. П. Федотьева углубляют и расширяют эту область науки и техники, следуя основным научным, учебным и методическим принципам выдающегося ученого.

---

# 8

## ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ П. П. ФЕДОТЬЕВА И ЕГО УЧЕНИКИ



Открытие Петербургского политехнического института сыграло большую роль в развитии высшего технического образования России. В конце XIX в. в полной мере давала себя знать отсталость царской России в этой области. Высшая школа не могла удовлетворить потребностей развивающейся промышленности в квалифицированных специалистах, имеющих специальную подготовку. К этому времени почти третью предприятий руководили иностранцы. В 1895 г. в стране в 8 технических и 4 сельскохозяйственных учебных заведениях обучалось всего 5497 студентов [25]. Сложившееся положение сковывало развитие отечественной промышленности.

По предложению министерства финансов (во главе которого стоял С. Ю. Витте) в 1899 г. был организован Петербургский политехнический институт.

К созданию института были привлечены такие ученые, как Д. И. Менделеев, Д. К. Чернов и А. С. Попов. В выборе

направления работы института приняли участие также известные ученые профессора Н. Г. Егоров, Н. И. Тавилдаров, М. А. Шателен, Н. А. Меншуткин, А. Н. Крылов, А. А. Воронов, А. С. Посников и др.

Политехнический институт имел отделения: экономическое, электромеханическое, кораблестроительное и металлургическое с подразделениями металлургическим и электрохимическим.

Особенно остро сказывался недостаток в инженерах — специалистах по электрохимии и электромеханике. В «Сображениях», представленных в ноябре 1900 г. Государственному Сенату, отмечалось что ...«Ввиду того, что электричество получает все большее применение в металлургии для сварки металлов, их добычи и очистки, на металлургическом отделении предполагается выделение особой специальности — электрохимии» [26].

Директором института был назначен Андрей Григорьевич Гагарин, до этого работавший помощником начальника Петербургского оружейного завода. Гагарин окончил Петербургский университет по математике и прошел курс Михайловской артиллерийской академии. Он имел большой авторитет и пользовался всеобщим уважением.

Первым деканом металлургического факультета был профессор Н. А. Меншуткин. Осенью 1902 г. Меншуткин предложил Павлу Павловичу Федотьеву занять должность профессора минеральной технологии и технической электрохимии.

При организации института вопросы, относящиеся к металлургическому отделению, разрабатывала комиссия под председательством главного металлурга Обуховского завода А. А. Ржешотарского. Всего в институт предполагалось зачислить 1850 студентов, из них на металлургическое отделение 160 человек, из которых 40 человек подготовить по электрохимической специальности.

Будущие электрохимики изучали в институте металлографию, общую металлургию, металлургию цветных и черных металлов, физическую химию, теоретическую электрохимию, минеральную технологию и техническую электрохимию.

После заграничной командировки и успешной защиты диссертации П. П. Федотьев 1 сентября 1904 г. был утвержден экстраординарным профессором кафедры технической электрохимии и минеральной технологии. Вакансия оказалась последней, не замещенной в институте, и это ска-

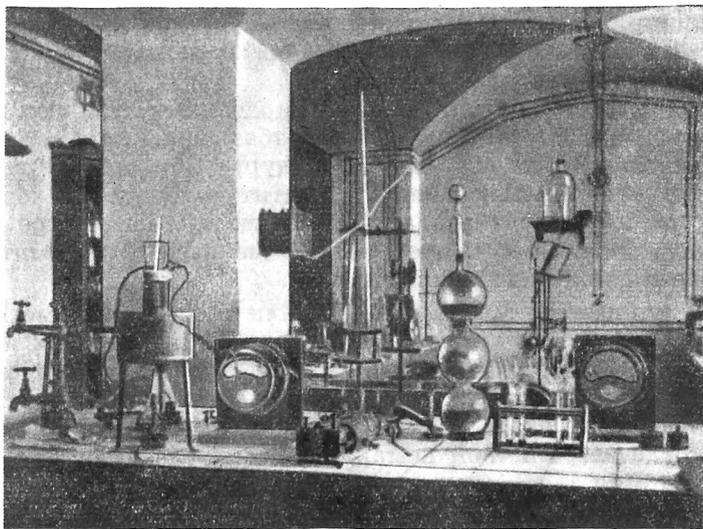
залось на организации лаборатории. Лучшие помещения были уже распределены, ощущался недостаток денежных средств.

Однако атмосфера серьезного научного творчества, окружавшая П. П. Федотьева на металлургическом факультете и вообще в Политехническом институте, взаимное сотрудничество передовых ученых в значительной мере помогли ему в научно-педагогической деятельности [27].

Среди этих ученых необходимо назвать Н. А. Меншуткина (химия), Н. С. Курнакова (физическая химия), Ф. Ю. Левинсона-Лессинга (петрография), А. А. Байкова (теория металлургических процессов), М. А. Павлова (металлургия), В. Е. Грум-Гржимайло (теплотехника).

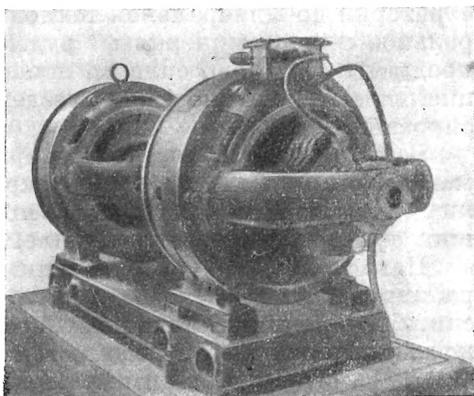
Павел Павлович Федотьев со всей энергией принялся за создание лабораторий технической электрохимии и минеральной технологии, которые должны были соответствовать последнему слову науки.

Лаборатории разместились в химическом павильоне. На рис. 11 показана лаборатория технической электрохимии. Здесь были установлены рабочие столы на 30 человек, вытяжные шкафы. Рядом помещались кабинеты Павла Павловича и лаборанта и весовая, имелась справочная библиотека.



*Рис. 11. В лаборатории технической электрохимии (1914 г.)*

*Рис. 12. Умформер  
в лаборатории  
технической электрохимии*



Большие трудности возникли при снабжении лаборатории технической электрохимии током. Намеченные в этом направлении Павлом Павловичем планы осуществлялись в течение нескольких лет. Сначала пользовались переносными аккумуляторами. В 1907 г. лаборатория была соединена собственными кабелями с центральной электрической станцией института. С 1910 г. применяли аккумуляторную батарею на 12 элементов — емкостью 324 а·ч при трехчасовом разряде. В 1911 г. был приобретен умформер (рис. 12). При силе тока 220 а он давал напряжение от 10 до 65 в и применялся для электролиза, для работ с электрическими печами и зарядки аккумуляторов. Была установлена распределительная доска, соединенная с центральной электрической станцией института.

Как указывалось выше, в Политехническом институте Павел Павлович читал курсы технической электрохимии, электрометаллургии, минеральной технологии, огнеупорных материалов, вязущих веществ, ферросплавов и др. Помимо слушания лекций, студенты-электрохимики выполняли обязательные лабораторные работы и участвовали в научной работе кафедр.

В начале профессорской деятельности Павла Павловича в курс технической электрохимии входили электрохимические производства и электрометаллургия. Курс минеральной технологии включал специальные химические производства и производство искусственных силикатов. На лабораторных занятиях по технической электрохимии студенты изучали электролиз водных растворов и расплавленных веществ, а также электротермические реакции; в ла-

боратории по минеральной технологии анализировали минеральное сырье: минералы, руды, заводские химические продукты, металлы, сплавы, шлаки, топливо. С 1912 г. специальное помещение было отведено для дипломного проектирования.

В конце 1907 г. состоялся первый выпуск инженеров-металлургов по электрохимической специальности. Окончили институт 48 специалистов, прекрасно зарекомендовавших себя затем на производстве.

Павел Павлович был хорошим организатором и кафедра технической электрохимии и минеральной технологии считалась одной из лучших. С необыкновенной добросовестностью относился он к своим профессорским обязанностям. Федотьев был блестящим педагогом. Лекции его были исключительно четкими и ясными. Он умел не только строго научно излагать фактический материал и физико-химические особенности процессов, но и показать историю вопроса, перспективы технического прогресса. Учебные работы со студентами в лабораториях, руководимых П. П. Федотьевым, затрагивали основные электрохимические и электрометаллургические процессы, применявшиеся в то время в промышленности.

Работы состояли из трех основных разделов: электролиз водных растворов, электролиз расплавленных веществ и электротермические реакции. Электролиз водных растворов включал электролиз с растворимыми анодами (получение соединений свинца, меди, рафинирование металлов), электролиз с нерастворимыми анодами (электролиз галогидных щелочей, процессы окисления и восстановления неорганических соединений).

На рис. 13 показана установка для электролиза хлористых щелочей с ртутным катодом. К электролизу расплавленных веществ относилось получение легких металлов, а также свинца и цинка. Электротермическим путем изготавливали карбиды, ферросилиций и другие сплавы [26].

Большие требования предъявлял П. П. Федотьев при проверке знаний студентов.

Ученик Федотьева В. В. Стендер вспоминает: «Студенческий экзамен по прикладной электрохимии я сдавал Павлу Павловичу у него дома, в длинном узком кабинете за столом, стоявшим у окна, я сидел спиной к комнате, по которой мерным шагом ходил Павел Павлович. Было задано сразу три солидных вопроса, на подготовку давалось минимальное время, минут пять. Страшно было начинать, страх

не проходил долго потому, что Павел Павлович за время ответа не проронил ни слова и только в конце сказал: «Ну хорошо-с, давайте Вашу книжку». — Это была высшая похвала.

После, при выполнении дипломной исследовательской работы, консультации Павла Павловича происходили примерно следующим образом: один раз в неделю он приходил к моему рабочему месту и спрашивал: «Как дела-с?», затем молчал, слушал сообщение студента; если был со всем согласен, говорил «Хорошо-с, продолжайте-с» и уходил; если Павел Павлович имел поправки, он говорил: «об этом почитайте-с (там-то)» или «подумайте, как сделать лучше-с». Замечательный метод поощрения самостоятельности студента!»<sup>1</sup>.

Под руководством и при участии Павла Павловича выполнено свыше 30 дипломных исследовательских работ. Высокая научная квалификация Федотьева и его умение видеть главное в развитии электрохимической и минеральной промышленности делали эти исследования актуальными.

---

<sup>1</sup> Сообщение В. В. Стендера.

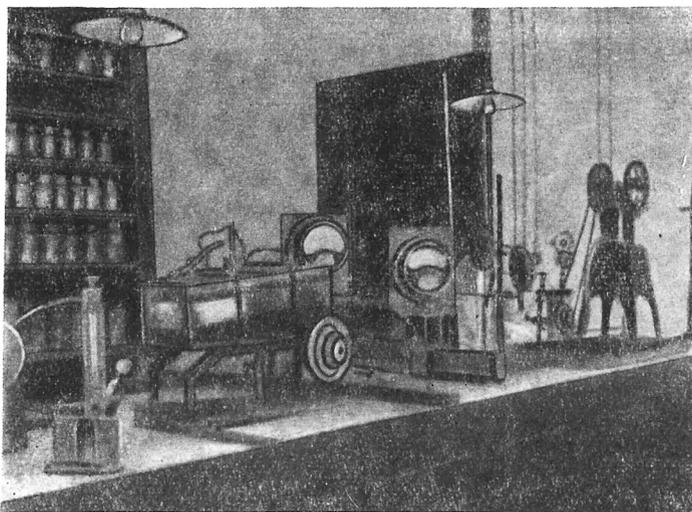


Рис. 13. Установка для электролиза хлористых щелочей со ртутным катодом

Б. Н. Меншуткин писал об особенностях научной работы Федотьева следующее:

«Все его работы являются по существу приложением науки к технике, разработкою промышленных процессов с точки зрения теоретических положений физической химии — или созданием новых производств на твердой почве научных достижений» [28, стр. 91].

Такой метод решения научных и практических проблем свойствен и ученикам П. П. Федотьева.

В архиве Академии наук СССР сохранился список опубликованных работ, выполненных под руководством ученого к 1928 г. \*. Всего в списке 12 исследований, многие из них

---

\* Архив АН, ф. 326, оп I, № 194, лл. 26—27.



*П. П. Федотьев на заседании ученого совета в Технологическом институте им. Ленского (1928 г.)*

являются дипломными работами студентов электрохимической специальности.

Исследования И. Б. Колтунова и А. К. Колосова посвящены аммиачно-содовому процессу [29]. С. Гутман и Н. Мурач в своих дипломных работах электролитическим путем с нерастворимыми анодами получали железо [30]. И. С. Вейцер занимался электролизом растворов хлористого бария с ртутным катодом [31]. В. И. Солнышкин электролитическим путем получал надборнонатриевую соль [32], С. Н. Городков изучал электролиз водных растворов солей марганца [33]. Н. Н. Воронин занимался техническим электролизом расплавленного карналлита [34]. Т. Н. Петренко интересовали методы изготовления железных нерастворимых анодов [35]. В. В. Стендер получал электролизом цинк [36]. Д. Н. Недригайлов посвятил свое исследование реакциям в сульфидах меди [37]. Электролитическим способом осаждал медь из растворов ее полухлористой соли Н. П. Федотьев [38].

В 1924 г. на кафедру приняли первых аспирантов. Павел Павлович ежедневно бывал в лаборатории, уделял много времени руководству ими. Он стремился передать ученикам свое умение решать технические задачи на прочной научной основе.

Аспиранты кафедры электрометаллургии цветных металлов под руководством П. П. Федотьева получали серьезную теоретическую подготовку. Программа подготовки аспирантов, составленная Павлом Павловичем, требовала углубленных знаний по новейшим материалам<sup>1</sup>.

В начале 30-х годов аспиранты изучали электрометаллургию водных растворов, включавшую электрометаллургию благородных металлов и электрометаллургию цинка. Программа по электрометаллургии расплавленных веществ включала электрохимию расплавленных солей и получение металлов электролизом расплавленных солей.

Научно-исследовательские работы аспирантов, предложенные П. П. Федотьевым, были посвящены актуальным вопросам металлургии легких металлов<sup>2</sup>.

В связи с предстоящим строительством магниевых заводов П. П. Федотьев предложил аспирантам «навалиться всем фронтом на магний»<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Архив ЛПИ, д. 2, л. 54

<sup>2</sup> Архив ЛПИ, д. 2, л. 53.

<sup>3</sup> Сообщение А. И. Журина.

Особое внимание уделялось изучению процесса обезвоживания хлористого магния в лабораторных условиях. Изучали условия получения магния с наименьшим расходом энергии. Проводили электролиз при низких температурах с получением твердого металла. Рафинировали магний. Разрабатывали способы получения магния из его окиси.

С 20 апреля по 20 июня 1931 г. аспиранты под руководством Павла Павловича работали на Опытном магниевом заводе в цехах обезвоживания и электролиза. Они участвовали в монтаже опытного магниевых завода, изучали оборудование, проводили на нем исследования.

В цехе обезвоживания хлористого магния изучали влияние температуры на процесс в печи первой стадии обезвоживания, составляли тепловой и материальный балансы процесса. Исследовали влияние температуры в печи второй стадии обезвоживания, добавок кокса в шихту и количества пропускаемого в печи хлора на степень обезвоживания хлористого магния. Составляли тепловой и материальный балансы печей второй стадии обезвоживания. Здесь изучали изменения состава хлористого магния, наличие в нем остатка кокса и его выгорание. Разрабатывали способы удаления вредных примесей.

В электролизном цехе изучали влияние состава электролита, добавок, температуры и других факторов на выход по току и свойства получаемого металла, в том числе на его чистоту. Сопоставляли особенности различных конструкций ванн. Для каждой конструкции составляли электрический, материальный и тепловой балансы. Исследовали отсасываемый из ванны хлор и возможности его применения при обезвоживании. Аспиранты изучали степень поглощения хлора в поглотительной башне, переплавку полученного магния, применяемые при этом флюсы.

Способность Павла Павловича выделять наиболее перспективные проблемы развития металлургии и электрохимии во многом определила общее направление исследовательских работ кафедры. Успешному выполнению исследований содействовало и умение Павла Павловича привить своим ученикам любовь к углубленным физико-химическим изысканиям.

Значительный вклад в развитие науки и промышленности внесен учениками П. П. Федотьева. Кратко остановимся на деятельности некоторых из них.

Ученик П. П. Федотьева Николай Николаевич Воронин (1892—1956 гг.) поступил на металлургический фа-



*Н. Н. ВОРОНИН*

культет Петербургского политехнического института в 1909 г. Дипломную работу, посвященную техническому анализу расплавленного карналлита, рассмотренную нами выше, Воронин выполнил под руководством П. П. Федотьева. Результаты ее были опубликованы в совместной статье Н. Н. Воронина и П. П. Федотьева [34].

В 1916 г. Воронин начал свою инженерную деятельность на химическом заводе «Электрон» в Славянске.

В 1930 г. Н. Н. Воронин, имея пятнадцатилетний стаж производственной деятельности и большую эрудицию в области теоретической и прикладной электрохимии, перешел на научно-педагогическую работу. Он стал заведовать кафедрой технологии электрохимических производств в Киевском политехническом институте (в то время Киевский химико-технологический институт), в котором работал до конца своей жизни.

В Киевском политехническом институте Н. Н. Воронин изучал электролиз растворов поваренной соли, процессы в свинцовых аккумуляторах, выполнил ряд работ по исследованию перенапряжения водорода и кислорода. В послевоен-



*Н. Н. МУРАЧ*

ные годы основное внимание он уделил исследованию катодных процессов, протекающих при кислородной деполяризации на пористых катодах, образованию перекиси водорода, снижению перенапряжения водорода и т. д. [51].

Другой ученик Федотьева Николай Никифорович Мурач (1890—1962 гг.) в декабре 1913 г. окончил металлургическое отделение Политехнического института с дипломом I степени. Его дипломная работа, выполненная под руководством П. П. Федотьева, «Получение и исследование электролитического железа» была опубликована в Известиях Политехнического института [30].

Заинтересовавшись новыми в Советском Союзе производствами, Н. Н. Мурач с 1926 г. начал свою научно-исследовательскую деятельность в области цветной металлургии в б. Московской горной академии (с 1930 г. — в выделившемся из состава Академии Институте цветных металлов и золота им. М. И. Калинина).

Н. Н. Мурач был крупнейшим советским специалистом в области металлургии олова.

Н. Н. Мурач и его ученики выполнили исследовательские работы по изучению основных процессов металлургии олова. Эти исследования явились основой схем оловянных концентратов советских месторождений, отличающихся высоким содержанием примесей и малым содержанием олова.

В 1950 г. Н. Н. Мурач в Институте цветных металлов и золота им. М. И. Калинина организовал кафедру металлургии радиоактивных металлов. С 1953 г. он стал руководителем проблемной лаборатории чистых металлов и полупроводниковых материалов. В результате работ Н. Н. Мурача и его сотрудников получило развитие новое направление в металлургии редких и радиоактивных металлов — металлотермия.

Талантливым учеником Павла Павловича Федотьева был Георгий Алексеевич Абрамов (1906—1953 гг.). В 1927 г. он поступил в Ленинградский горный институт. После реорганизации его был переведен в Ленинградский металлургический институт (ныне вошедший в состав Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина), который и окончил в 1931 г. После окончания института Георгий Алексеевич был оставлен аспирантом по кафедре электрометаллургии цветных металлов. Его научным руководителем стал Павел Павлович Федотьев [40].

Под руководством Федотьева Г. А. Абрамов выполнил диссертационную работу «Исследование методами термического анализа и микроструктуры тройной системы, образованной хлоридами натрия, калия и магния».

В 1936 г. Г. А. Абрамов исследовал зависимость выхода по току от условий электролиза расплавленных солей. Он вывел математическую зависимость выхода по току от температуры, плотности тока и расстояния между электродами при электролизе расплавов. Формула легла в основу расчетов выхода по току при электролизе алюминия. Абрамов аналитически подошел к вопросу наименьшего удельного расхода электрической энергии при электролизе расплавов. В 1946 г. он защитил докторскую диссертацию на тему «Определение оптимальных условий работы электролизеров для получения алюминия», а в 1949 г. был утвержден профессором той же кафедры.

Результатом экспериментальных исследований Г. А. Абрамова, М. М. Ветюкова и др. стала монография «Теоретические основы электрометаллургии алюминия», изданная в 1953 г. [41]. Этот труд авторы посвятили памяти своего учителя Павла Павловича Федотьева.



Г. А. АБРАМОВ

Ученик Павла Павловича А. К. Колосов по окончании в 1915 г. Политехнического института не порывал связи со своим учителем. В 1915—1919 гг., работая в Комитете по заготовке взрывчатых веществ при Главном артиллерийском управлении, он консультировался с Федотьевым по вопросу о постройке первого русского завода азотной кислоты и аммиачной селитры в Юзовке б. Екатеринославской губ.<sup>1</sup>

Научная деятельность А. К. Колосова, старейшего ученика П. П. Федотьева, относится к области метрологии и химии. С 1919 г. он сотрудничает во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева и с 1931 г. возглавляет кафедру общей химии Ленинградского кораблестроительного института.

Значительная часть исследований сына и ученика П. П. Федотьева Николая Павловича Федотьева посвящена гальванотехнике [42]. Основные направления этих работ —

<sup>1</sup> Сообщение А. К. Колосова.

интенсификация осаждения металлических покрытий, технология осаждения сплавов, изучение механических свойств осадков металлов, рационализация процессов электрополировки и оксидирования. Изучается электрокристаллизация металлов и процессы окисления в водных растворах. Работы Н. П. Федотьева по электрорафинированию никеля использованы при проектировании первого в нашей стране никелевого завода. Практическое применение получила разработанная им технология электротермического получения фосфора из кольских апатитов. Совместно с сотрудниками Норильского никелевого комбината Н. П. Федотьев разработал новые производственные процессы. Педагогическая деятельность Н. П. Федотьева с 1932 г. связана с Ленинградским технологическим институтом им. Ленсовета, где с 1938 г. он заведует кафедрой электрохимии. В годы войны Н. П. Федотьев организовал кафедру электрохимии в Казанском технологическом институте. Созданные им учебные пособия и справочники широко используются студентами-технологами и специалистами в области прикладной электрохимии. Н. П. Федотьев неоднократно работал под руководством Павла Павловича или по его советам. Под руководством Павла Павловича им была выполнена дипломная работа по электролизу растворов однохлористой меди. Еще будучи студентом, Николай Павлович совместно с В. В. Стендером получал медный порошок на заводе «Красный Выборжец», участвовал в строительстве установки по рафинировке дельного серебра для Наркомфина. По совету Павла Павловича он составил проект, по которому была смонтирована и сдана в эксплуатацию установка для снятия олова с жестяных обрезков. Под руководством отца Н. П. Федотьев проектировал первую опытную установку по электролизу алюминия на заводе «Красный Выборжец», на которой впоследствии работал.

Ученик Н. П. Федотьева Владимир Вильгельмович Стендер после окончания Политехнического института продолжил свою деятельность по совершенствованию электролиза, которым его заинтересовал еще в студенческие годы Павел Павлович Федотьев. Около двух лет (1922—1923 гг.) В. В. Стендер был научным сотрудником кафедры Н. П. Федотьева в Петроградском политехническом институте. Научная и практическая деятельность В. В. Стендера направлена на решение важнейших задач электрохимической промышленности [44]. Он много лет работал на хлорных и других заводах, участвовал в составлении перспективных планов

освоения производительных сил Алтая, Центрального и Южного Казахстана.

Очень плодотворна педагогическая деятельность В. В. Стендера. Он организовал кафедру электрохимии и электрометаллургии в Казахском горно-металлургическом институте, лабораторию электрохимии в Институте химических наук Академии наук Казахской ССР, кафедру химии в Кемеровском горном институте, кафедру технологии электрохимических производств в Днепропетровском химико-технологическом институте.

Созданная им совместно с рядом сотрудников монография «Электролитическое производство хлора и щелочей» является основным руководством для подготовки инженеров-производственников и исследователей в данном направлении [45].

Исследования Стендера в области гидроэлектрометаллургии цветных и черных металлов начались дипломной работой «Электроосаждение цинка из серноокислых растворов», выполненной им под руководством П. П. Федотьева и опубликованной в печати [36]. В дальнейшем его интересовали медь, цинк, железо, марганец, олово, ванадий, хром, магний, редкие и рассеянные металлы. Научные исследования Стендера содействовали возникновению и развитию в нашей стране электролитического получения цинка.

Стендер уделял большое внимание совершенствованию анодов и диафрагм, основных деталей электролизеров, недостатки которых ограничивают интенсивный электролиз водных растворов и расплавов.

Вместе со своими учениками он работал над созданием анодов из свинца и его сплавов для гидроэлектрометаллургии серноокислых растворов.

Стендеру принадлежат выполненные на большом числе металлов работы по перенапряжению водорода. Поверхность электрода при этом рассматривается как поверхность катализатора.

В 1961 г. В. В. Стендер при участии других авторов издал руководство по прикладной электрохимии для химиков-технологов. Книга содержит основы теории и технологии электрохимических производств — электролиза водных растворов, расплавленных сред, химических источников тока. Используя опыт Павла Павловича Федотьева, особое внимание авторы уделили теоретическим проблемам [46].

Ученику П. П. Федотьева и В. А. Кистяковского Василию Михайловичу Гуськову принадлежат более 100 науч-

ных работ по металлургии алюминия, магния, титана, натрия, калия, кальция, лития и галлия [47].

Гуськова интересуют проблемы получения алюминия и магния высокой частоты, вакуум-термическое получение калия, натрийтермическое получение титана.

Многолетняя научная деятельность В. М. Гуськова связана с Всесоюзным алюминиево-магниевым институтом. В Ленинградском горном институте им подготовлено много специалистов по металлургии легких металлов. Широко известны книги Гуськова «Электролитическое получение алюминия» [48], «Электролитическое рафинирование алюминия» [49] и «Производство магния» [50].

В течение многих лет кафедру электрометаллургии цветных металлов Ленинградского политехнического института возглавляет профессор доктор технических наук Юрий Владимирович Баймаков, который продолжает дело П. П. Федотьева — ученого и педагога высшей школы.

Ю. В. Баймаков широко известен своими многочисленными исследованиями в области электролитического получения и рафинирования легких и тяжелых цветных металлов, развивающими научные направления П. П. Федотьева.

Опубликованный в 1939—1946 гг. трехтомный труд Ю. В. Баймакова «Электролиз в металлургии» существенно расширил и дополнил одноименную монографию П. П. Федотьева. Дальнейшее развитие эти вопросы получили в книге Ю. В. Баймакова и А. И. Журина «Электролиз в гидрометаллургии», вышедшей в 1963 г. [23].

Научная школа Павла Павловича Федотьева в области прикладной электрохимии и электрометаллургии занимает выдающееся место. Его ученики и последователи продолжают дальше развивать принцип П. П. Федотьева — тесную связь глубоких теоретических исследований с нуждами практики, промышленности.

---

**СПИСОК  
ЛИТЕРАТУРНЫХ  
РАБОТ  
П. П. ФЕДОТЬЕВА**

1896 г.

*Добывание поташа из золы. Практическое руководство к приготовлению древесного и травяного поташа. Спб., 1896, изд. Ф. В. Щепанского.*

*Производство серной кислоты. Спб, 1896, издание Ф. В. Щепанского. Современное состояние химической промышленности в России. Записки РТО, 1896, № 12, декабрь.*

1897 г.

*Современное состояние химической промышленности в России. Спб., тип. Академии наук, Отдельная брошюра, отгиск из Записок РТО, 1896 г., № 12.*

1898 г.

*Содовое дело и связанные с ним производства. Производство сульфата соляной кислоты, соды и белильной извести. Спб., изд. Ф. В. Щепанского.*

*К характеристике угля Рутченковского месторождения Донецкого каменноугольного бассейна, Горный журнал, 1898, № 2, стр. 262—268*

1899 г.

*Заводское приготовление минеральных солей. Спб., 1899, издание книжного магазина В. Эриксон.*

1900 г.

*Азотная кислота и ее соли. Получение, свойства, испытание, применение. Библиотека промышленных знаний под ред. Д. И. Менделеева. 1900, т. IX, ч. 6.*

1901 г.

*Физико-химические таблицы и технический анализ. Руководство для химиков, электрохимиков, инженеров, заводчиков и студентов, 1901, Спб., ч. I, физико-химические таблицы, издание книжного магазина В. Эриксона.*

1902 г.

*Современное состояние химической промышленности в России. 2-е значит. дополненное издание, Спб., типо-литография и переплетная Ю. А. Мансфельд.*

1904 г.

*Аммиачно-содовый процесс с точки зрения учения о фазах. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1904, т. I вып. 3—4, технические отделения, стр. 281—334.*

1906 г.

*Технический анализ минеральных веществ. 1906, Спб., типо-литография Шредера. Учебник товароведения. 1906, Спб., Тип. Ю. Мансфельд.*

1907 г.

*Современное состояние химической и электрохимической промышленности на континенте Европы. Известия С.-Петербургского политехнического института 1907, т. VII, вып. I, отдел техники, естествознания и математики, стр., 3—108, вып. 2, стр. 237—357.*

1910 г.

*Реакция образования подной меди с физико-химической точки зрения. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1910 (1911), т. XIV, вып. I, отдел техники, естествознания и математики, стр. 173—191.*

1911 г.

*Особый случай гетерогенного равновесия. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1911, т. XV, вып. 2, отдел техники, естествознания и математики, стр. 725—755.*

1912 г.

*П. П. Федотьев и В. П. Ильинский. Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1912, т. XVIII, вып. I, отдел техники, естествознания и математики, стр. 147—196.*

*Электрические печи в металлургии стали. (Отчет о заграничной командировке). Известия С.-Петербургского политехнического института. 1912, т. XVIII, вып. I, отдел техники, естествознания и математики, стр. 355—368.*

1913 г.

К теории каустицирования растворов углекислых щелочей. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1913, т. XIX вып. 2, отдел техники, естествознания и математики, стр. 495—508.

Федотьев П. П. и Ильинский В. П. Плавкость тройной системы: криолит, фтористый натрий, фтористый кальций. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1913, т. XX, вып. 2, отдел техники, естествознания и математики, стр. 745—753.

П. П. Федотьев и Ив. Колтунов. Другая форма аммиачно-содового процесса. Известия С.-Петербургского политехнического института. 1913, т. XX, вып. I, отдел техники, естествознания и математики, стр. 405—422.

П. П. Федотьев (по опытам сотруд. И. Вейцера). Электролиз растворов хлористого бария со ртутным катодом. Известия СПб. политехнического института, т. XX, вып. 2, отдел техники, естествознания и математики, стр. 713—727.

1915 г.

П. П. Федотьев и В. П. Ильинский. Случай тройной системы с явным и скрытым максимумом у одной из двойных. Известия Петроградского политехнического института, отдел техники, естествознания и математики, 1915, т. XXIII, вып. 2, стр. 407—423.

П. П. Федотьев (по опытам студентов С. Гутмана и Н. Мурача). Электролитическое получение железа с применением нерастворимых анодов. Известия Петроградского политехнического института, т. XXII, вып. 1, отдел техники, естествознания и математики, стр. 305—328.

1916 г.

П. П. Федотьев (по опытам В. Солнышкина). Электрическое приготовление надборнатриевой соли. Известия Петроградского политехнического института. 1916, т. XXVI, отдел техники, естествознания и математики, стр. 281—292.

П. П. Федотьев (по опытам С. Городкова). Опыты получения марганца электролизом водных растворов его солей. Известия Петроградского политехнического института. 1916, т. XXVI, отдел техники, естествознания и математики, стр. 293—300.

П. П. Федотьев (по опытам Н. Воронина). При участии В. П. Ильинского. Технический электролиз расплавленного карналлита. Известия Петроградского политехнического института. 1916, т. XXVI, отдел техники, естествознания и математики, стр. 301—316.

1918 г.

Сборник химических работ. Из лаборатории профессора П. П. Федотьева при Петроградском политехническом институте. Петроград, 1918. (К тридцатилетию научно-технической деятельности П. П. Федотьева).

1921 г.

Электрометаллургия. 3 т. Пг. Науч. хим.-техн. изд-во, 1921—1923 гг., вып. 1. Электролиз водных растворов, 1921; вып. 2, 1923 г.; вып. 3. Электротермические процессы, 1922.

1922 г.

Природная серно-натриевая соль и русская химическая промышленность. Сборник «Карабугаз и его промышленное значение», 1922, 2-е изд.

Технический анализ минеральных веществ. Пг. Науч. химико-техническое издательство, 1922—1926 гг., вып. 1, 1922 г.; вып. 2, 1924 г.; вып. 3, 1925 г.; вып. 4. 1926 г., вып. 5, 1926 г.

1923 г.

П. П. Федотьев, А. Колосов. Третья форма амиачно-содового процесса. В кн. П. П. Федотьев. Сборник исслед. работ.

1924 г.

П. П. Федотьев и А. Лебедев. Спектры поглощения окрашенных стекол. Известия Ленинградского политехнического института, отдел техники, естествознания и математики, 1927, т. XXX, стр. 389—403.

1925 г.

Крупная минеральная, химическая и электрохимическая промышленность за последнее десятилетие. Л., 1925 г, Научный химико-технический издательский отдел ВСХН.

П. П. Федотьев (по опытам Т. Н. Петренко). Механизм окисления железа водяным паром, воздухом и углекислотой при высоких температурах, Известия Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, т. XXIX, отдел техники, естествознания и математики, 1925, стр. 229—235.

П. П. Федотьев (по опытам Т. Н. Петренко). Окислы железа как материал для нерастворимых анодов. Известия Ленинградского политехнического института, отдел техники, естествознания и математики, 1925, т. XXIX, стр. 248—250.

1926 г.

Производство угольных электродов. Пер. с англ. Н. Н. Воронина, В. Н. Голованова и Б. А. Сасс-Гисовского. Под ред. и с доп. П. П. Федотьева, проф. Политехнического института. Л., Научное химико-техническое издательство, 1926.

1928 г.

П. П. Федотьев и Н. П. Федотьев. Электролитическое выделение меди из растворов полухлористой ее соли. Известия Технологического института им. Ленсовета. 1928, т. 2, (XXVI) юбилейный, Л., издание Технологического института, стр. 335—343.

1929 г.

Алюминий в мировом хозяйстве и возникновение алюминиевой промышленности в СССР, *Химия и хозяйство*, 1929, № 1, стр. 77—81.

1930 г.

Химико-технологические очерки. Из практики последнего десятилетия, Л., 1930, Всехимпром ВСНХ СССР.

1931 г.

Товароведение, Всехимпром ВСНХ СССР, Л., 1931.

1932 г.

Теория электролиза криолита-глиноземных сплавов (из доклада на Всесоюзной конференции по вопросам производства алюминия), *Легкие металлы*, 1932, № 4, стр. 15—16.

1933 г.

Физико-химические процессы в криолито-глиноземной ванне, сб. «Производство и обработка цветных металлов и сплавов», вып. 1, Л., 1933, стр. 5—6.

Опыты получения алюминия на заводе «Красный Выборжец», (из работ по электрометаллургии алюминия), *Металлург*, 1933, стр. 63—72

П. П. Федотьев и Р. Тимофеев. Исследования плавкости систем  $KF - AlF_3$  и  $LiF - AlF_3$  (из работ по электрометаллургии алюминия), *Металлург*, 1933, № 7, стр. 60—63.

Электролиз в металлургии, допущено Главным управлением учебными заведениями в качестве учебного пособия для химических вузов, Л., ОНТИ, Химтеорет, тип. «Красный печатник» 1933—1934, вып. 1.

Электролиз водных растворов. Гостехиздат, Л., 1933—1934; вып. 2. Электролиз расплавленных веществ, 1934. Развитие алюминиевой промышленности. Плановое хозяйство, 1934, № 2, стр. 46—56.

П. П. Федотьев и А. А. Чижик. О производстве хлористого алюминия. В кн «Неорганические хлоропродукты» Гос. институт прикладной химии (Труды), т. 20., Л., 1934, стр. 76—86.

---

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Русские ученые в цветной металлургии. Научные труды по металлургии алюминия. Под ред. А. И. Беляева, Металлургиздат, 1950, стр. 71—78.
2. П. П. Федотьев. Сборник исследовательских работ. Под ред. Н. П. Федотьева. ОНТИ—Химтеорет, Л., 1936.
3. Charles L. Mantell. Производство угольных электродов. Пер. с англ. инж. Н. Н. Ворошина, В. Н. Голованова и Б. А. Сасс-Тисовского. Под ред. и с доп. П. П. Федотьева, Л., 1926.
4. П. П. Федотьев. Содовое дело и связанные с ним производства. Изд. Ф. В. Щепанского, Спб., 1898, стр. 271.
5. П. П. Федотьев. Химико-технологические очерки, ОНТИ—Химтеорет, Л., 1930.
6. *Traite de chimie mineral*, publie sous la direction de H. Moissan, IV, 1905.
7. В. П. Машовец. Электрометаллургия, ОНТИ, 1938.
8. K. Grjotheim. Contribution to the Theory of Aluminium Electrolysis, Trondheim, 1956.
9. N. T. Phillips, R. N. Singleton, E. A. L. Hollingsched, *Electrochem. Soc.*, 1955, p. 152.
10. П. П. Федотьев и В. П. Ильинский. Известия С.-Петербургского политехнического института, т. XX, 1913.
11. П. П. Федотьев и В. П. Ильинский. Известия С.-Петербургского политехнического института, т. XXIII, 1915.
12. П. П. Федотьев и К. Тимофеев. *Z. fur anorg. Chemie*, 206, 1932, S. 263—266.
13. А. И. Беляев. Очерки по истории металлургии легких металлов, Металлургиздат, 1950, стр. 94—97.

14. П. П. Федотьев. Электролиз в металлургии, часть II, Электролиз расплавленных веществ, ОНТИ, Химтеорет, 1935.

15. А. И. Беляев. Физико-химические процессы при электролизе алюминия. Металлургиздат, 1947.

16. Г. А. Абрамов и др. Теоретические основы электрометаллургии алюминия. Металлургиздат, 1958.

17. А. И. Беляев. Электролит алюминиевых ванн. Металлургиздат, 1961.

18. С. И. Ремпель. Анодный процесс при электролитическом производстве алюминия, Металлургиздат, 1961.

19. В. И. Машовец. Научно-исследовательские работы по изучению анодного и катодного процессов при электролитическом получении алюминия, Труды ВАМИ, № 39, 1957.

20. Ю. В. Баймаков. Электролиз в металлургии, часть II, 1945.

21. А. И. Беляев, М. Б. Рапопорт, Л. А. Фирсанова. Электрометаллургия алюминия, Металлургиздат, 1953.

22. П. П. Федотьев. Опыты получения алюминия на заводе «Красный Выборжец», Металлург, № 7, 1933, стр. 63.

23. Ю. В. Баймаков, А. И. Журин. Электролиз и гидрометаллургия, Металлургиздат, 1963.

24. П. М. Лукьянов. О первом русском алюминиевом заводе, Известия вузов, Цветная металлургия, № 6, 1962, стр. 145.

25. В. В. Данилевский. История основания Ленинградского политехнического института. Труды ЛПИ, 1948, № 1, стр. 3—58.

26. С.-Петербургский политехнический институт императора Петра Великого. Металлургическое отделение. Спб., 1914. Ред. М. А. Павлов, стр. 1.

27. И. И. Леви. Научные школы Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина за XXX лет Советской власти. Труды ЛПИ, 1947, № 6, стр. 3—14.

28. Б. Н. Меншуткин. Памяти профессора П. П. Федотьева. Природа, 1934, № 5, стр. 89—91.

29. П. П. Федотьев и И. Колтунов. Другая форма аммиачно-содового процесса. Известия Политехнического института, 1913, т. XX.

30. П. П. Федотьев, С. Гутман, Н. Мурач. Электролитическое получение железа с применением нерастворимых анодов. Известия Политехнического института, 1915, т. XXIII, стр. 305—328.

31. П. П. Федотьев и И. Вейцер. Электролиз растворов хлористого бария со ртутным катодом. Известия Политехнического института, 1913, т. XX, вып. 2, стр. 713—727.

32. П. П. Федотьев и В. Солнышкин. Электролитическое приготовление надборнатриевой соли. Известия Политехнического института, 1916, т. XXVI, XXVII.

33. П. П. Федотьев и С. Городков. Опыты получения марганца электролизом водных растворов солей. Известия Политехнического института, 1916, т. XXVI, XXVII.

34. П. П. Федотьев, Н. Н. Воронин. Технический электролиз расплавленного карналлита. Сборник исследовательских работ, 1936.

35. P. Fedotteff, T. Petrenko. Die Gewinnung der unlöslichen Anoden durch oxydation die eisernen Stangen. Z. f. anorg. Chem. 1923, Bd. 130.

36. P. Fedotteff, W. Stender. Die Gewinnung d. Zinks durch Electrolyse von Sulfatlosungen. Z. f. anorg. chemie. 1923, Bd. 130.

37. П. П. Федотьев и Д. Н. Недригайлов. Neben die Ursache der Haarkupfer Bildung in Kupferstein. Z. f. anorg. Chemie, 1927, Bd. 167.

38. П. П. Федотьев и Н. П. Федотьев. Электролитическое выделение меди из солянокислых растворов в виде плотного осадка. Известия Технологического института, 1928.

39. Н. Н. Мурач. Металлургия олова. Учебник для вуза, 1947.

40. П. Я. Агеев, А. Ф. Алабышев и др. Георгий Алексеевич Абрамов (1906—1953). Цветные металлы, 1954, № 2, стр. 72—73.

41. Г. А. Абрамов, М. М. Ветюков, И. П. Гупало, А. А. Костюков, Л. Н. Лошкин. Теоретические основы электрометаллургии алюминия, Metallurgizdat, М., 1953.

42. Н. Н. Никитин и Л. К. Симонова. Николай Павлович Федотьев. (К 60-летию со дня рождения). Журнал прикладной химии, 1957, т. XXX, № 3, стр. 337—338.

43. Н. П. Федотьев, А. Ф. Алабышев, А. Л. Ротинян, П. М. Вечеслова, П. Б. Животинский, А. А. Гальнбек. Прикладная электрохимия. Под ред. проф. Н. П. Федотьева. Химиздат, Л., 1962.

44. Г. З. Кирьяков, Л. Н. Шелудков и П. И. Заботин. Владимир Вильгельмович Стендер. Журнал прикладной химии, 1958, т. XXXI, № 1, стр. 3—4.

45. В. В. Стендер и др. Электролитическое производство хлора и щелочей, Л., ОНТИ, 1935.

46. В. В. Стендер и др. Прикладная электрохимия. Издательство Харьковского университета. Харьков, 1961.

47. Василий Михайлович Гуськов. (К шестидесятилетию со дня рождения). Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия, 1962, № 1, стр. 158—160.

48. В. М. Гуськов. Электролитическое получение алюминия, М.—Л., ОНТИ, 1936.

49. В. М. Гуськов. Электролитическое рафинирование алюминия, Metallurgizdat, 1945.

50. В. М. Гуськов. Производство магнезия. Л.—М., ОНТИ, 1938.

51. И. Б. Бармашенко, Д. П. Зюсимович. Николай Николаевич Воронин. Укр. хим. журнал, 1956, т. XXII, вып. 5, стр. 697—700.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i> . . . . .	3
<b>1.</b> <i>Жизнеописание Павла Павловича Федотьева</i> . . . . .	5
<b>2.</b> <i>Диссертация П. П. Федотьева и его работы по химии и электрохимии</i> . . . . .	16
<b>3.</b> <i>П. П. Федотьев — основоположник отечественной электрометаллургии цветных металлов</i> . . . . .	24
<b>4.</b> <i>Исследования по электрометаллургии магния</i> . . . . .	31
<b>5.</b> <i>Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия</i> . . . . .	36
<b>6.</b> <i>П. П. Федотьев и его роль в создании отечественной алюминиевой промышленности</i> . . . . .	54
<b>7.</b> <i>Работы последних лет</i> . . . . .	63
<b>8.</b> <i>Педагогическая деятельность П. П. Федотьева и его ученики</i> . . . . .	70
<i>Список литературных работ П. П. Федотьева</i> . . . . .	86
<i>Использованная литература</i> . . . . .	91

---

Авторы:

*БЕЛЯЕВ Анатолий Иванович*

*ПАВЛОВА Ольга Игоревна*

Редактор издательства  
*М. С. Архангельская*

Технический редактор *Е. Б. Вайнштейн*  
Супперобложка художника  
*Е. В. Никитина*

\* \*

\*

Сдано в производство 23/IX — 1964 г.

Подписано в печать 26/I — 1965 г.

Бумага  $60 \times 90^{1/16} = 3,0$  бум. л. = 6 печ. л.

Уч.-изд л. 4,99

T-01229            Зак. 736            Изд. № 4578

Тираж 932 экз.            Цена 15 коп.

Сводный темплан по металлургии  
на 1965 г. № 172

\* \*

\*

Издательство «Металлургия»  
Москва Г-34, 2-й Обыденский пер., 14

Московская типография № 12  
Главполиграфпрома Государственного  
комитета Совета Министров СССР  
по печати, Цветной бульвар, 30

**НОВЫЕ КНИГИ**  
**по электрометаллургии и электрохимии**  
**выпустит в 1965 г. издательство**  
**«Металлургия»**

**Заборонок Г. Ф. и др. Электронная плавка металлов, 20 л., ц. 1 р. 20 к.**

Обобщен обширный материал по плавке металлов методом электронной бомбардировки. Освещены вопросы фокусировки электронных пучков и электропитания плавильных установок. Рассмотрены конструкции плавильных агрегатов, а также вакуумное оборудование электронных плавильных установок. Изложена теория физико-химических процессов. Приведены многочисленные данные по исследованию металлов, выплавленных в электронных печах. Показаны основные преимущества электронного метода плавки.

**Физико-химия и электрохимия в металлургии цветных металлов. Сб. трудов Ленинградского политехнического института, 15 л., ц. 1 р. 25 к.**

Освещаются вопросы электролиза водных растворов (электролитическое получение никеля, марганца и хрома высокой чистоты, приводятся данные по испытанию титано-графитовых анодов в процессе электролитического получения кобальта); электролиза расплавленных солей (исследование стойкости угольного анода при электролизе алюминия, вопросы выхода по току при электролизе расплавленных солей, электрохимия хрома в расплавленных солях). Рассматриваются термодинамические исследования в области полупроводниковых интерметаллидов и кинетики некоторых реакций в металлургии.

*Цены и объемы книг указаны ориентировочно*

**Тиражи книг устанавливаются на основании спроса покупателей.**

**ЗАКАЗЫВАЙТЕ ЗАБЛАГОВРЕМЕННО ИНТЕРЕСУЮЩИЕ  
ВАС ИЗДАНИЯ.**

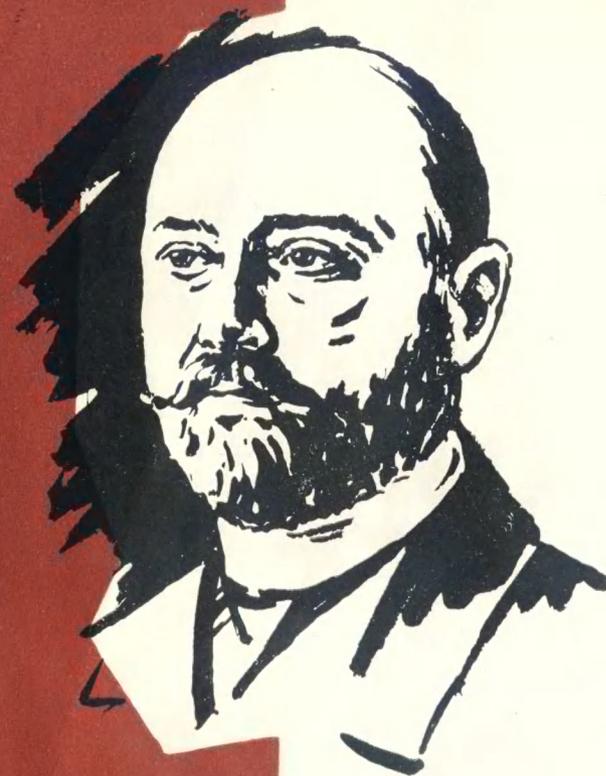
*Предварительные заказы принимают магазины республиканских, краевых и областных книготоргов*

### ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
65	Подпись под рисунком	<i>1929 г.</i>	<i>1923 г.</i>
68	19 св.	упругих	других

Зак. 736

А. И. БЕЛЯЕВ, О. И. ПАВЛОВА



ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ  
ФЕДОТЪЕВ

1864 · 1934

15 к.



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
·МЕТАЛЛУРГИЯ·  
1965