

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОХИМИИ В РАН

© 2020 г. В. Н. Андреев^a, А. М. Скундин^{a,*}

^a Российская академия наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, Москва, Россия

*e-mail: askundin@mail.ru

Поступила в редакцию 02.07.2019 г.

После доработки 02.07.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

Изложена история исследований по электрохимии в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

Ключевые слова: физическая химия, электрохимия

DOI: 10.31857/S0044453720030024

На протяжении шести тысячелетий человеческая цивилизация обходилась без электричества, эра электричества насчитывает всего двухвековую историю. И своим возникновением эра электричества обязана появлению в самом начале 19-го века химического источника тока – гальванического элемента – и одновременным зарождением электрохимии. Электрохимия определяется как раздел химии, в котором рассматриваются процессы переноса заряда на межфазных границах, то есть процессы непосредственного превращения химической энергии в электрическую и электрической энергии в химическую. Именно такое определение электрохимии дал Владимир Александрович Кистяковский в блестящей статье “Электрохимия” в Энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона в 1904 г. [1]. Долгое время электрохимию рассматривали как определенный раздел физической химии, но все-таки такие события, как учреждение журнала по электрохимии (*Zeitschrift für Elektrochemie*) в 1895 г., создание Электрохимического общества (*The Electrochemical Society*) в 1902 г., создание Международного электрохимического общества (*International Society of Electrochemistry*) в 1949 г. и даже знаменитая фарадеевская речь Гельмгольца в 1881 г., не оставляют сомнений в том, что электрохимия представляет собой самостоятельную науку.

Наука электрохимия является фундаментальной основой многих практических приложений и производств. Будучи рожденной при создании гальванического элемента, электрохимия обеспечивает многочисленные производства аккумуляторов, топливных элементов, суперконденсато-

ров и т.п. “элементов питания”. Многие электрохимические производства (производство алюминия, хлора, фтора, титана) не имеют неэлектрохимической альтернативы. Электрохимия – это основа гальванических производств и рафинирования металлов, основа обработки “необработываемых” материалов и т.д. Наконец, коррозия имеет электрохимическую природу, и именно закономерности электрохимии позволяют вести борьбу с этим природным злом.

Развитие электрохимии в России в 19 и начале 20 веков происходило довольно фрагментарно. История российской электрохимии гордится выдающимися результатами отдельных ученых (Т. Гротгус, Б.С. Якоби, Р. Колли, Э.Х. Ленц, А.С. Савельев, Р.Э. Ленц, П. Вальден, П.Р. Багратиони), но в России не было определенного научного центра по изучению электрохимии. Таким центром стал институт, нуклеация которого началась в 1929 г. с созданием Коллоидно-электрохимической лаборатории (ЛАКЭ) АН СССР. Это событие неразрывно связано с именем В.А. Кистяковского.

Во время краткого (1889–1890 гг.) пребывания в лаборатории В. Оствальда в Лейпциге В.А. Кистяковский проникся духом передовой тогда немецкой физико-химической школы и решил посвятить себя проблемам электрохимии. В частности, в 1912–1916 гг. он издал обстоятельный двухтомный учебник “Электрохимия” [2]. В связи с исследованиями по коррозии и пассивности В.А. Кистяковский был в 1925 г. избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1929 г. – действительным членом АН СССР. Сразу после из-

брана, он получил от Президиума АН СССР предложение организовать специализированную лабораторию. Академия наук СССР, будучи преемницей Санкт-Петербургской Императорской академии, располагалась тогда в Ленинграде. И там же, на Васильевском острове и располагалась Коллоидно-электрохимическая лаборатория. Первоначально эта лаборатория была сосредоточена на трех направлениях, два из которых были чисто электрохимическими: исследования дисперсных систем, исследования коррозии и пассивности и исследования электрокристаллизации. Это последнее направление возглавила аспирантка В.А. Кистяковского, Ксения Михайловна Горбунова.

В 1933 г. ЛАКЭ АН СССР была структурирована, научные направления были оформлены в отделы: отдел дисперсной химии, отдел изучения коррозии металлов и электрохимический отдел (занимавшийся проблемами электрокристаллизации металлов).

Как известно, в 1934 г. Академия наук СССР переезжает из Ленинграда в Москву. Вместе со всей академией переезжает и ЛАКЭ АН СССР, точнее, переезжают только два электрохимических отдела. При этом переезде Коллоидно-электрохимическая лаборатория была преобразована в Коллоидно-электрохимический институт (КЭИН) АН СССР. Директором Института и руководителем отдела по изучению коррозии, естественным образом стал В.А. Кистяковский, а электрохимическим отделом фактически руководила К.М. Горбунова, которая продолжала исследования в области электрокристаллизации металлов и уже готовила докторскую диссертацию.

В первое пятилетие своей деятельности (1934–1939 гг.) Институт активно развивал исследования в области электрохимии и коррозии. Именно в этот период широко развивались представления о пленочной теории коррозии. Именно в это время К.М. Горбунова подвела определенный итог исследованиям электрокристаллизации индивидуальных металлов, защитив в 1936 г. докторскую диссертацию, и значительно расширила область исследования разнообразных процессов на межфазных границах, в частности, процессов образования новой фазы. Совместно с Павлом Давидовичем Данковым она сформулировала оригинальную теорию образования единичных кристаллов и дендритов при катодном осаждении металлов.

В 1939 г. комиссия АН СССР проводила проверку деятельности КЭИН за истекшие 5 лет. Работа института была признана вполне удовлетворительной, направления научных исследований актуальными. Сразу после окончания проверки В.А. Кистяковский, которому тогда было 74 года, оставил должность директора, и остался руково-

дителем отдела коррозии. В этом статусе он работал до конца жизни (1952 г.). Директором КЭИН был назначен академик Александр Наумович Фрумкин, вся деятельность которого к тому времени была посвящена электрохимии. В 1940 г. А.Н. Фрумкин возглавил новую лабораторию электродных процессов, которая в 1946 г. была преобразована в отдел электрохимии.

Во время Второй мировой войны, с 1939 по 1945 гг., деятельность КЭИН была в значительной мере ориентирована на нужды обороны. В частности, уже тогда А.Н. Фрумкин с сотрудниками начал работы в области радиационной химии, которые в первые послевоенные годы были продолжены в рамках советского атомного проекта. Работа по атомному проекту охватывала исследования в разнообразных областях. В 1951 г. А.Н. Фрумкин, П.И. Долин и Р.Х. Бурштейн были удостоены Сталинской премии за разработку методов борьбы с коррозией на диффузионном заводе. Вместе с другими академическими институтами КЭИН на некоторое время был эвакуирован в Казань.

Несмотря на то, что шла война, в электрохимических подразделениях КЭИН продолжались фундаментальные исследования, в основном, инициированные А.Н. Фрумкиным. Важно отметить, что с приходом А.Н. Фрумкина в КЭИН очень сильно укрепились творческие связи электрохимиков КЭИН с сотрудниками Физико-химического института им. Л.Я. Карпова (где А.Н. Фрумкин работал с 1922 г.) и с кафедрой электрохимии МГУ, которую А.Н. Фрумкин возглавлял с 1933 г. Карповский институт стал, по сути дела, кадровым резервом КЭИН (и впоследствии, ИФХ) АН СССР.

В 1940 г. в КЭИН пришел ближайший сотрудник А.Н. Фрумкина, Борис Николаевич Кабанов. До этого он работал в Карповском институте и уже провел фундаментальные исследования трехфазной границы металл/жидкость/газ, которые легли в основу исследований влияния адсорбции на процессы электрохимического осаждения и растворения металлов. (В 1966 г. эти результаты были обобщены в монографии “Электрохимия металлов и адсорбция” [3]). Исследования трехфазных границ позволили Б.Н. Кабанову найти возможность измерения потенциалов нулевого заряда для твердых электродов. (Введенная ранее А.Н. Фрумкиным концепция потенциалов нулевого заряда оказалась очень плодотворной для теоретической электрохимии, но экспериментальные определения этой величины в тридцатых годах 20 века ограничивались жидкими электродами, главным образом, ртутью и амальгамами). В этот же период (1939–1945 гг.) Б.Н. Кабанов продолжил исследования процессов, протекающих в свинцовом аккумуляторе, и эти работы ста-

ли примером теснейшей связи фундаментальных исследований механизма и кинетики анодного растворения и пассивации свинца с практическими рекомендациями по улучшению технических характеристик реальных свинцовых аккумуляторов.

В 1940 году в КЭИН также пришел талантливый ученый — двадцатитрехлетний Вениамин Григорьевич Левич, который развернул активные исследования новой отрасли знания — физико-химической гидродинамики.

В 1941 г. в КЭИН перешла работать Наталья Алексеевна Бах, которая до того работала в отделе А.Н. Фрумкина в Карповском институте. В начале работы в КЭИН Н.А. Бах продолжала исследования электрокинетических эффектов и их связи со строением двойного электрического слоя. Кроме этих фундаментальных работ Н.А. Бах занималась также практическими работами по технологии производства марганцево-цинковых элементов с соевым электролитом (элементов Лекланше, наиболее распространенных первичных источников тока того времени). Как специалист в области дисперсных углеродных материалов, Н.А. Бах обосновала возможность использования отечественной сажи в агломератах элементов Лекланше.

В 1946 г., в связи с работами по атомному проекту, Н.А. Бах полностью переключилась на исследования в области радиационной химии. В первое время основным объектом исследования был радиолит воды (что непосредственно связано с работой ядерных реакторов), а затем Н.А. Бах переключилась на исследования радиолита органических соединений, передавая тематику радиолита воды П.И. Долину и В.И. Медведовскому.

В этот же период К.М. Горбунова продолжала исследования по электрокристаллизации, при этом она привлекла молодого аспиранта Ашота Тиграновича Ваграмяна. С 1941 г. А.Т. Ваграмян работал в лаборатории электродных процессов.

В 1945 году КЭИН был преобразован в Институт физической химии (ИФХ АН СССР). А.Н. Фрумкин остался на посту его директора и одновременно руководителя электрохимического отдела. За период 1945–1949 гг. в этом отделе были получены принципиальные результаты, во многом определившие последующее развитие электрохимии. Работы В.Г. Левича по физико-химической гидродинамике привели к созданию вращающегося дискового электрода — мощного инструмента исследований по электрохимической кинетике. В это же время получили развитие работы по применению переменного тока для исследований строения двойного электрического слоя, а также кинетики электродных процессов. Именно в этот период была опубликована пионерская статья А.Н. Фрумкина “О распределении

коррозионного процесса по длине трубки” [4], давшая импульс последующим исследованиям пористых электродов (и вообще, систем с распределенными параметрами), что имело огромное значение для развития химических источников тока.

В 1946 г. в отдел электрохимии ИФХ АН СССР пришла проф. Р.Х. Бурштейн, работавшая до этого в Карповском институте. Она уже имела опыт совместной работы с А.Н. Фрумкиным, в частности, по исследованиям адсорбции газов на активированном и платинированном угле и в 1943 г. была удостоена Сталинской премии за создание устойчивых в зимних условиях новых типов гальванических элементов и батарей (железо-угольного элемента), что имело особое значение во время войны.

Большое значение для престижа электрохимиков Института физической химии была публикация нескольких статей (А. Frumkin. Hydrogen overvoltage [5]; В. Levich. The theory of concentration polarization [6]; В. Kabanov, R. Burstein, A. Frumkin. Kinetics of electrode processes on the iron electrode [7]) в первом номере Discussions of Faraday Society в 1947 г., посвященном электродным процессам.

В 1948–1954 годах Институт физической химии вместе со всей страной переживал мрачный период, получивший эвфемистическое название “борьбы с космополитизмом”. В 1949 г. А.Н. Фрумкин был отстранен от руководства Институтом, а директором ИФХЭ АН СССР был назначен чл.-корр. АН СССР Георгий Владимирович Акимов, бывший до этого времени руководителем лаборатории коррозии металлов и сплавов. Основные научные интересы Г.В. Акимова концентрировались на электрохимической теории коррозии (локальные микроэлементы), в частности, на коррозии многокомпонентных сплавов как многоэлектродных электрохимических систем.

“Электрохимия как наука зародилась в России” — это из резолюции Третьего Всесоюзного совещания по электрохимии, которое проходило в Москве в 1950 г. Эта цитата, как нельзя лучше, передает дух того времени. Третье совещание по электрохимии было организовано, в основном, усилиями сотрудников отдела электрохимии ИФХ АН СССР. Несмотря на тяжелую обстановку, на Третьем совещании были рассмотрены принципиальные проблемы теоретической и прикладной электрохимии (включая исследования строения двойного электрического слоя, механизм выделения водорода, проблему абсолютных потенциалов, электрохимическую теорию коррозии), и были продемонстрированы несомненные успехи отечественных электрохимиков.

Важным событием для отечественной электрохимии было издание в 1952 г. первого в мире учебника по электрохимической кинетике (А.Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа, Б.Н. Кабанов “Кинетика электродных процессов” [8]). Хотя эта книга была издана от имени Московского университета, два из четырех авторов были сотрудниками ИФХ АН СССР.

Успехи советских электрохимиков отчетливо показали необходимость существенного укрепления материально-технической базы для электрохимических исследований и разработок, а конкретно – необходимости организации специального Института электрохимии. Впервые этот вопрос был поставлен весной 1955 г. при обсуждении доклада А.Н. Фрумкина об источниках тока на заседании энергетической секции Совета по радиоэлектронике при Министерстве обороны СССР. Председателем на этом заседании был замминистра обороны академик А.И. Берг. Именно А.И. Берг обратился с письмом в Академию наук с обоснованием необходимости организации Института электрохимии. В июле 1955 г. Химическое отделение АН СССР приняло решение о необходимости создания Института электрохимии. В начале 1957 г. был составлен первый проект правительственного постановления об организации Института электрохимии, а реально Институт электрохимии начал функционировать только в 1958 г.

В программной статье “Задачи Института электрохимии” [9], опубликованной в Вестнике Академии наук СССР в октябре 1957 г., А.Н. Фрумкин указывал, что “организация Института электрохимии позволит расширить работы по теоретической электрохимии”. Казалось бы, фундаментальные исследования и должны быть основной целью академического института. Однако далее А.Н. Фрумкин пишет: *“Развитие электрохимической кинетики и термодинамики делает возможным более широкое использование теоретической электрохимии при решении ряда задач большого практического значения, что следует рассматривать как основную задачу института. В первую очередь необходимо указать на проблему создания новых химических источников тока”*. (В то время под “новыми химическими источниками тока” подразумевали серебряно-цинковые аккумуляторы и топливные элементы). Хотя с приписываемым И. Канту афоризмом “Нет ничего более практичного, чем хорошая теория” никто не спорил, все-таки основной задачей нового академического института признавались разработки практических устройств.

Вначале весь Институт электрохимии дислоцировался в здании ИФХ в помещениях бывшего Отдела электрохимии, причем специально для расширения работ по новым химическим источ-

никам тока (серебряно-цинковым аккумуляторам) в соответствии с правительственным постановлением от февраля 1954 г. (никак не связанным с созданием Института электрохимии) была сооружена пристройка к зданию ИФХ. Окончание строительства совпало по времени с созданием Института электрохимии. В 1962 г. для Института элементоорганических соединений было построено новое здание, и освободившийся корпус (Ленинский просп., 31, корп. 5, строение 1) был передан Институту электрохимии. В 1967 г. в связи с расширением работ по топливным элементам Институту электрохимии был передан корпус Института высоких давлений (Ленинский просп., 31, корп. 5 строение 2), который переехал в новую пристройку в Троицке.

Кадровой основой Института электрохимии, естественно, стали сотрудники отдела электрохимии ИФХ АН СССР. Отдельные подразделения в новом институте возглавили Б.Н. Кабанов, Р.Х. Бурштейн, Н.А. Бах, В.Г. Левич. Вскоре после создания института в него были приглашены Павел Дмитриевич Луковцев (возглавивший лабораторию электрохимических преобразователей), а несколько позже – Гурами Акакиевич Теодордзе и Лев Исаевич Кришталик.

В 1956 г., в период подготовки создания Института электрохимии было проведено Четвертое всесоюзное совещание по электрохимии, которое уже кардинально отличалось от Третьего совещания и представило гораздо более объективную картину состояния электрохимической науки в СССР. На Четвертом совещании сотрудники Института электрохимии представили 12 докладов, в том числе, обстоятельные обзорные доклады А.Н. Фрумкина и В.Г. Левича.

Одной из главных задач Института электрохимии было создание научных основ топливных элементов. Вначале решение этой задачи было сосредоточено в лаборатории Р.Х. Бурштейн, куда в конце пятидесятых годов пришли молодые выпускники Александр Георгиевич Пшеничников и Михаил Романович Тарасевич, ставшие впоследствии известными учеными в этой области. В середине шестидесятых годов прошлого века масштаб работ по топливным элементам был расширен, в Институт электрохимии из ВНИИТа перешла группа молодых ученых во главе с профессором Владимиром Сергеевичем Багоцким. Лаборатория В.С. Багоцкого также была нацелена на решение проблем топливных элементов. Непосредственно перед образованием Института электрохимии и в первые годы его существования в штат Института были зачислены Юрий Викторович Плесков, Владимир Евгеньевич Казаринов, Юрий Александрович Чизмаджев, Борис Михайлович Графов, Анатолий Вениаминович Ванников, Юрий Борисович Васильев, Захар

Аронович Ротенберг, Алексей Дмитриевич Давыдов. Все они были создателями основных научных результатов, принесших славу Институту электрохимии.

Уже в начальный период разработки топливных элементов были выделены два научных направления, обеспечивающих прогресс в таких разработках: создание электрокатализа, как самостоятельного научного направления, и разработка электрохимической теории пористых электродов, или в более общем смысле систем с распределенными параметрами. Разработки фундаментальных проблем электрокатализа не прекращаются до сих пор, из наиболее интересных результатов следует выделить электрокатализ при анодном окислении простых органических соединений (В.С. Багоцкий, Ю.Б. Васильев, В.Н. Андреев), электрокатализаторы на носителях (А.М. Скундин), электрокатализ пирополимерами (М.Р. Тарасевич, В.А. Богдановская). Существенными результатами по теории пористых электродов была теория систем с регулярной структурой (Ю.А. Чизмаджев), концепция бипористых газодиффузионных электродов (А.Г. Пшеничников), разработка метода эталонной порометрии (Ю.М. Вольфович).

В первое двадцатилетие функционирования Института электрохимии были широко развернуты работы по электрохимии органических соединений, как с целью создания топливных элементов с органическим топливом (В.С. Багоцкий, А.Г. Пшеничников, Ю.Б. Васильев), так и с целью создания технологии электросинтеза ценных соединений (Г.А. Тедорадзе, Л.Г. Феоктистов). Институт электрохимии был инициатором проведения первых совещаний по электрохимии органических соединений (ЭХОС).

В это же время в Институте электрохимии развивались исследования строения двойного электрического слоя и кинетики электродных процессов с применением переменного тока, берущие свое начало с довоенных исследований Б.В. Эршлера и А.Н. Фрумкина. Здесь следует упомянуть книгу Б.М. Графова и Е.А. Укше “Электрохимические цепи переменного тока” [10] и докторскую диссертацию Д.И. Лейкис. А.Я. Гохштейн развил в этот период метод эстанса.

В то же время Л.И. Кришталек теоретически обосновал и экспериментально подтвердил существование безбарьерного разряда при электрохимическом процессе.

В лаборатории Б.Н. Кабанова в продолжение работ по электрохимии металлов и особенностям процессов при сверхвысоких плотностях тока было развито новое направление — электрохимические методы обработки металлов, в особенности, тех металлов, механическая обработка которых невозможна или нерентабельна (А.Д. Давыдов). В рамках этого направления исследовались меха-

низм депассивации металлов, особенности естественной конвекции, конвективная неустойчивость в электрохимических системах, была создана теория электрохимического формообразования, разработаны приемы лазерно-электрохимической обработки металлов, а также методы повышения производительности электрохимических процессов.

В годы расцвета Института электрохимии был зарегистрирован целый ряд открытий, сделанных его сотрудниками, в том числе, “Явление выделения (внедрения) щелочных металлов на твердых катодах в водных средах с образованием твердых растворов и/или интерметаллических соединений с металлом катода” (Б.Н. Кабанов, Д.П. Александрова, И.И. Астахов, И.Г. Киселева, Д.И. Лейкис, 1962 г.), “Закон электронной фотоэмиссии из металлов в растворы электролитов” (А.М. Бродский, Ю.Я. Гуревич, Ю.В. Плесков, В.А. Бендерский, Я.М. Золотовицкий, Л.И. Коршунов, 1968), “Свойство ферментов участвовать в переносе электронов (биоэлектрокатализ)” (И.В. Березин, В.А. Богдановская, С.Д. Варфоломеев, М.Р. Тарасевич, А.И. Ярополов, 1978 г.).

Огромное значение для развития отечественной электрохимии было учреждение журнала “Электрохимия” в 1965 г.

В мае 1976 г. не стало основателя и бессменного директора Института электрохимии А.Н. Фрумкина. Руководство Институтом перешло к В.Е. Казаринову, который в 1971–1976 гг. был заместителем директора Института. Собственные научные интересы В.Е. Казаринова были связаны с применением радиоактивных изотопов к исследованиям строения двойного слоя, адсорбции и кинетики электродных процессов. С 1999 по 2005 г. Институт электрохимии возглавлял Б.М. Графов. В 1983 г. Институту электрохимии было присвоено имя А.Н. Фрумкина.

В период с 1976 по 2005 г. Институт электрохимии продолжал традиции, заложенные А.Н. Фрумкиным, при этом незамедлительно откликнулся на все новые направления в электрохимии. Широкое развитие получили исследования электронпроводящих полимеров (в частности, исследования катодного допирования и фотоэлектрохимического поведения таких полимеров). Институт электрохимии был первой отечественной организацией, где были развернуты работы по литиевым источникам тока. Была создана оригинальная область электрохимии — электрохимия алмаза (Ю.В. Плесков).

В 2005 г. произошло объединение Института электрохимии им. А.Н. Фрумкина и Института физической химии. Электрохимическое направление в объединенном институте было представлено лабораториями межфазных границ и электрокатализа (зав. лаб. В.Н. Андреев), биоэлектро-

химии (зав. лаб. Ю.А. Чизмаджев), процессов в химических источниках тока (зав. лаб. А.М. Скундин), физической электрохимии (зав. лаб. А.Д. Давыдов), электроанализа и электрохимических сорбционных процессов (зав. лаб. В.П. Луковцев), электрокатализа и топливных элементов (зав. лаб. М.Р. Тарасевич), а также сектором электрохимических преобразователей информации. В последнее время в соответствии с кадровой политикой Института, к руководству лабораториями были привлечены молодые сотрудники — Т.Л. Кулова в лаборатории процессов в химических источниках тока и О.В. Батищев в лаборатории биоэлектрохимии.

В свете реализации национальных проектов ученые-электрохимики ИФХЭ РАН основным направлением своей работы считают разработку основ технологии высоковольтных суперконденсаторов, литий-ионных аккумуляторов нового поколения, натрий-ионных и литий-кислородных аккумуляторов, высокотехнологичных топливных элементов и фотоэлектрохимических преобразователей энергии. И далее создание на их основе опытных производств аккумуляторов и суперконденсаторов нового поколения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кистяковский В.А.* Электрохимия // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. 1904. Т. XLA (80). С. 596–618.
2. *Кистяковский В.А.* Электрохимия, части 1 и 2 (в трех книгах). Петроград: Типография Р.Г. Шредера, 1912–1916. 400 с.
3. *Кабанов Б.Н.* Электрохимия металлов и адсорбция. М.: Наука, 1966. 222 с.
4. *Фрумкин А.Н.* // Журн. физ. химии. 1949. Т. 23. № 12. С. 1477
5. *Frumkin A.* // Disc. Faraday Soc. 1947. № 1. P. 57
6. *Levich B.* // Ibid. 1947. № 1. P. 37
7. *Kabanov B., Burstein R., Frumkin A.* // Ibid. 1947. № 1. P. 259.
8. *Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н.* // Кинетика электродных процессов. М.: Изд. МГУ, 1952. 319 с.
9. *Фрумкин А.Н.* // Вестн. АН СССР. 1957. № 11. С. 122.
10. *Графов Б.М., Укше Е.А.* Электрохимические цепи переменного тока. М.: Наука, 1973. 128 с.