

Протокол № 448

заседания диссертационного совета 24.2.288.04
от 26.06.2025

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 17 человек.
Присутствовали на заседании 13 человек.

Председатель: д. хим. наук, профессор Введенский Александр Викторович

Присутствовали:

1.	Введенский Александр Викторович	д. х. н., 1.4.4
2.	Козадеров Олег Александрович	д. х. н., 1.4.6
3.	Хохлова Оксана Николаевна	к. х. н., 1.4.4
4.	Бобрешова Ольга Владимировна	д. х. н., 1.4.6
5.	Бутырская Елена Васильевна	д. х. н., 1.4.4
6.	Завражнов Александр Юрьевич	д. х. н., 1.4.1
7.	Зарцын Илья Давидович	д. х. н., 1.4.6
8.	Томина Елена Викторовна	д. х. н., 1.4.1
9.	Козадерова Ольга Анатольевна	д. х. н., 1.4.6
10.	Кострюков Виктор Федорович	д. х. н., 1.4.1
11.	Паршина Анна Валерьевна	д. х. н., 1.4.6
12.	Селеменев Владимир Федорович	д. х. н., 1.4.4
13.	Хохлов Владимир Юрьевич	д. х. н., 1.4.4

Из 6 членов совета по специальности 1.4.6. Электрохимия присутствует 5.

Официальные оппоненты по диссертации:

Добровольский Юрий Анатольевич - доктор химических наук, профессор, ООО «Центр водородной энергетики», генеральный директор,

Куриганова Александра Борисовна - доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Химические технологии», профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук, г. Москва – положительный отзыв получен.

Слушали:

Защиту диссертационной работы Папержа Кирилла Олеговича «Повышение электрохимических характеристик платиноуглеродных катализаторов для катода водородо-воздушного топливного элемента путем управления их микроструктурой» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Вопросы задали: д. хим. наук Козадеров О.А., д. хим. наук Зарцын И.Д., д. хим. наук Паршина А.В., д. хим. наук Завражнов А.Ю., д. хим. наук Бобрешова О.В., д. хим. наук Бутырская Е.В., д. хим. наук Томина Е.В., д. хим. наук Введенский А.В.

В обсуждении диссертационной работы приняла участие: д. хим. наук Козадеров О.А., д. хим. наук Зарцын И.Д., д. хим. наук Введенский А.В.

Постановили:

На основании протокола № 1 счетной комиссии считать, что диссертация Папержа К.О. отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Результаты голосования: 13 – «за»; «против» – нет; недействительных бюллетеней – нет.

Стенограмма, Протокол счетной комиссии и Заключение диссертационного совета прилагаются.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

26.06.2025



Введенский Александр Викторович

Хохлова Оксана Николаевна

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.288.04,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.06.2025 г., № 448

О присуждении Папержу Кириллу Олеговичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата химических наук.

Диссертация «Повышение электрохимических характеристик платиноуглеродных катализаторов для катода водородо-воздушного топливного элемента путем управления их микроструктурой» по специальности 1.4.6. Электрохимия принята к защите 17 апреля 2025 г. (протокол заседания № 446) диссертационным советом 24.2.288.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», Минобрнауки России, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, приказ Минобрнауки России № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Паперж Кирилл Олегович, 23.01.1998 года рождения аспирант федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В 2021 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

Диссертация выполнена на кафедре электрохимии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор химических наук, профессор Гутерман Владимир Ефимович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», химический факультет, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Добровольский Юрий Анатольевич - доктор химических наук, профессор, ООО «Центр водородной энергетики», генеральный директор,

Куриганова Александра Борисовна - доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Химические технологии», профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Скундиным Александром Мордухаевичем, доктором химических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории процессов в химических источниках тока и Андреевым Владимиром Николаевичем, доктором химических наук, главным научным сотрудником, заведующим лаборатории электрокатализа,

указала, что диссертационная работа Папержа Кирилла Олеговича является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная задача в области электрохимической энергетики по разработке способов получения Pt/C электрокатализаторов для реакции восстановления кислорода и повышения их устойчивости к деградации. Диссертационная работа Папержа К.О. соответствует паспорту специальности 1.4.6. Электрохимия (пп. 4,9,10) и полностью удовлетворяет требованиям, установленным пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции, а ее автор, Паперж Кирилл Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Соискатель имеет 87 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 25 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ, 1 патент. Работы посвящены оптимизированию существующих и разработке новых методик синтеза платино-углеродных электрокатализаторов с повышенными электрохимическими характеристиками; исследованию размера и равномерности пространственного распределения наночастиц в катализаторах, площади электрохимически активной поверхности и их активности в реакции электровосстановления кислорода; исследованию по протоколам стресс-тестирования стабильности полученных электрокатализаторов по сравнению с аналогами, синтезированных по стандартным методикам, и коммерческими образцами.

В диссертации Папержа К.О. отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Авторский вклад составляет 65 %, общий объем – 8.25 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации:

1. Paperzh, K. Accelerated Stress Tests for Pt/C Electrocatalysts: An Approach to Understanding the Degradation Mechanisms / K. Paperzh, A. Alekseenko, I. Pankov, V. Guterman // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. — 2024. — Vol. 952. — No. 117972.

2. Paperzh, K. UV radiation effect on the microstructure and performance of electrocatalysts based on small Pt nanoparticles synthesized in the liquid phase / K. Paperzh, A. Alekseenko, O. Safronenko, A. Nikulin, I. Pankov, V. Guterman // *Colloids and Interface Science Communications*. — 2021. — Vol. 45. — No. 100517.

3. Paperzh, K.O. Stability and activity of platinum nanoparticles in the oxygen electroreduction reaction: is size or uniformity of primary importance? / K.O. Paperzh, A.A. Alekseenko, V.A. Volochaev, I.V. Pankov, O.A. Safronenko, V.E. Guterman // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. — 2021. — Vol. 12. — P. 593–606.

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва: 1) **Бауман Юрий Иванович**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела материаловедения и функциональных материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук». Вопросы: 1. Из-за ограниченного объема автореферата усеченное описание методик синтеза катализаторов вызывает ряд вопросов. Например, какой источник УФ-облучения был использован в работе? Какая длина волны? Из чего состоит «реакционная среда», которую подвергают УФ-облучению? 2. Паперж К.О. связывает снижение активности катализатора с деградацией, протекающей по механизмам переосаждения Pt и агломерации НЧ. К сожалению, отсутствуют снимки ПЭМ образцов после реакции или стресс-тестирования, подтверждающие данное

заклучение. Происходят ли при этом изменения с носителем? 3. На странице 13 автор пишет: «Отметим, что использованный метод синтеза Pt/C электрокатализаторов на основе моноразмерных и упорядоченно распределенных НЧ, связан с использованием опасного для здоровья вещества - СО. И далее предлагает применять для синтеза Pt/C электрокатализаторов в качестве восстановителей формальдегид, муравьиную и молочную кислоты? Какой класс токсичности у СО и формальдегида?»

2) **Остапенко Геннадий Иванович**, доктор химических наук, профессор, центр медицинской химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Гольянттинский государственный университет». Вопросы: 1. Из автореферата неясно, какой источник УФ-облучения и с какой длиной волны был использован в работе? Влияет ли используемая длина волны излучения на морфологию и электрохимические характеристики катализаторов? 2. Почему сильно разнятся значения плотности тока, отнесенной к массе платины, для коммерческого материала HiSPEC 3000 на рисунках 3д и бд?

3) **Фалина Ирина Владимировна**, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой физической химии, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет». Вопросы и замечания: 1. Не вполне понятно, какой физический смысл имеет величина R, представленная на рисунке 2е, если в качестве величины радиуса наночастиц (r) используются данные, полученные методом ПЭМ, которые включают кристаллическую и аморфную части металла? 2. В тексте автореферата не указаны условия получения (восстановитель, температура и др.) образцов катализаторов, представленных в таблице 1. 3. На странице 19 написано, что в мембранно-электродном блоке с катализатором, полученным автором, значения напряжений на 4% и 6% выше по сравнению с коммерческим образцом. Насколько существенным является данное повышение? 4. В автореферате использовано неоправданно большое количество сокращений, ряд из которых не расшифровывается, например, УСТ; на страницах 15-17 автореферата автору стоило использовать рисунки большего размера, что позволило бы упростить восприятие содержания автореферата.

4) **Пономарева Валентина Георгиевна**, доктор химических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных твердофазных систем, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук». Вопросы и замечания: 1. В автореферате не достаточно подробно представлены данные по особенностям жидкофазного синтеза наночастиц платины при использовании различных восстановителей (формальдегида, муравьиной и молочной кислот), по влиянию температуры, времени, скорости перемешивания, дозах УФ-облучения и т.д. 2. В автореферате говорится о снижении активности катализатора вследствие реорганизации структуры наночастиц платины с уменьшением доли наиболее каталитически активных граней. Как определялись каталитически активные грани электрокатализатора в реакции восстановления кислорода и их доля? 3. В таблице 1 представлены данные по размерам кристаллитов Pt/C, рассчитанным по уравнению Шеррера, и просвечивающей электронной микроскопии, но не оценена погрешность в определении этих параметров.

Все отзывы положительные, в них отмечается актуальность работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также достоверность

результатов. Замечания носят частный характер и определяют перспективу дальнейших исследований в предложенном диссертантом направлении.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый подход к получению платиноуглеродных катализаторов, основанный на облучении ультрафиолетом углеродного носителя реакционной системы в процессе жидкофазного синтеза и позволяющий повысить равномерность размерного и пространственного распределения наночастиц по поверхности носителя;

предложен способ оценки равномерности пространственного распределения наночастиц металлов по поверхности углеродного носителя, базирующийся на учете числа пересечений изображений наночастиц на микрофотографиях, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии;

доказано, что однородность наночастиц платины по размеру и равномерность их распределения по поверхности углеродного носителя повышают площадь электрохимически активной поверхности и активность катализатора в реакции электровосстановления кислорода, а также замедляют процессы его деградации;

введены подходы к изучению механизмов деградации, прогнозированию и оценке стабильности платиноуглеродных катализаторов, включающие комбинацию методов просвечивающей электронной микроскопии и вольтамперометрии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана гипотеза о положительном влиянии равномерности размерного и пространственного распределения наночастиц платины по поверхности углеродного носителя на устойчивость платиноуглеродного катализатора к деградации при различных условиях стресс-тестирования;

изложены доказательства того, что результаты оценки относительной стабильности катализаторов при использовании различных протоколов стресс-тестирования согласуются между собой;

раскрыта роль нуклеации в процессе образования наночастиц платины в условиях облучения углеродного носителя ультрафиолетом до начала или в процессе синтеза платиноуглеродных электрокатализаторов;

изучена взаимосвязь между условиями многократного вольтамперометрического циклирования при стресс-тестировании, скоростью и механизмами деградации электрокатализаторов;

проведена модернизация методики исследования процесса фазообразования платины в присутствии углеродного носителя, состоящая в последовательном отборе проб катализатора в процессе синтеза с последующим установлением их состава и микроструктуры методами гравиметрии, рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны платиноуглеродные электрокатализаторы, характеризующиеся сопоставимой стабильностью и повышенной активностью в реакции электровосстановления кислорода и мощностью в мембранно-электродном блоке по сравнению с коммерческими материалами HiSPEC 3000 и HiSPEC 4000 от компании Johnson Matthey;

определены оптимальные для выявления устойчивости платиноуглеродных электрокатализаторов к деградации условия стресс-тестирования, проводимого в атмосфере кислорода, базирующиеся на наложении на электрод прямоугольных импульсов потенциала;

созданы научные основы оптимизации микроструктуры платиноуглеродных катализаторов и прогнозирования их стабильности при различных условиях стресс-тестирования, которые могут быть использованы при разработке перспективных электрокатализаторов для топливных элементов с протонообменной мембраной;

представлен способ оценки пространственной равномерности распределения наночастиц платины по поверхности углеродного носителя, который может быть адаптирован для других систем наночастицы-носитель.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с использованием комплекса физических и физико-химических методов анализа с применением современного сертифицированного оборудования;

теория, основанная на известных механизмах нуклеации/роста металлических наночастиц при их химическом синтезе в жидкой среде, и предложенный автором новый способ синтеза платиноуглеродных электрокатализаторов, включающий воздействие ультрафиолетового излучения на реакционную систему в процессе формирования платиновых наночастиц, взаимно дополняют друг друга при установлении оптимальных условий в процессе синтеза катализаторов;

идея базируется на обобщении результатов изучения взаимосвязи между условиями синтеза платиноуглеродных электрокатализаторов, их микроструктурой и электрохимическим поведением, систематизации и развитии современных подходов к повышению каталитической активности и стабильности электрокатализаторов;

использовано сравнение структурно-морфологических и электрохимических характеристик полученных в работе и коммерческих (от компании Johnson Matthey) платиноуглеродных катализаторов с массовой долей металла 20 и 40%;

установлено, что полученные в диссертационном исследовании результаты не противоречат фундаментальным физико-химическим закономерностям и согласуются с результатами других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и создании лабораторных образцов электрокатализаторов, перспективных для использования в водородовоздушных топливных элементах, выполнении синтеза материалов, изучении их состава, интерпретации данных о микроструктуре, изучении электрохимического поведения катализаторов, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов. Выполнение экспериментов, обработка полученных результатов выполнялись автором самостоятельно. Совместно с руководителем были сформулированы цель и задачи, составлен план диссертационного исследования, обсуждены полученные результаты. Написание статей выполнено совместно с соавторами, вклад автора заключался в получении и анализе экспериментальных данных, обсуждении полученных результатов, написании первичного варианта статей и участии в их последующем редактировании.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Заданы следующие вопросы:

1) Облучение ультрафиолетом приводит к трем эффектам: снижается размер, дисперсия и более равномерным распределение становится. Все-таки могли бы вы подробнее пояснить сам механизм действия ультрафиолета, это влияет только на

активацию? 2) Почему в этом случае не может быть эффект, связанный с хемосорбцией? Сколько длится этот эффект после облучения ультрафиолетом на самом углеродном носителе? 3) Распределение наночастиц по размерам в Ваших системах можно было охарактеризовать математически какой-либо функцией распределения? Характеристики гауссовской функции – дисперсию, вы не использовали? У вас были и не совсем гауссовские материалы? 4) Скажите, емкость двойного электрического слоя не использовали в характеристике площади поверхности? 5) Дает ли платина вклад в площадь? То есть частицы платины по сравнению с емкостью дают большой вклад в площадь? Площадь платиновых частиц во сколько раз больше, чем площадь углерода? 6) Видите ли Вы ограничения подхода, который Вы использовали, для оценки равномерности распределения наночастиц по количеству пересекающихся соседей? То есть в каких диапазонах размеров частиц и их массового содержания такой подход может быть связан именно с равномерностью? Можно ли называть результат равномерностью или это просто низкая концентрация, которая не обуславливает еще агломерацию, но при этом распределение может быть и неравномерным? 7) У Вас в работе нетривиальный эффект показан с уменьшением размера и концентрации увеличивалась активность и устойчивость к деградации. И Вы это связываете, с улучшением равномерности при низких концентрациях и размерах наночастиц. Но можно ли говорить, что опосредованно это взаимосвязано, потому что, может быть, не равномерность влияла, а условия нуклеации, механизм закрепления наночастиц? 8) Протоколы стресс-тестирования Вы разрабатывали сами? У меня вопрос к вашему положению на защиту, что любой протокол позволяет правильно определить относительную стабильность. Что такое правильно и относительно чего? 9) Что такое относительная стабильность катализатора? Это количественная характеристика или качественная у Вас? И какие проценты в разных протоколах, разные или примерно одинаковые? 10) Степень кристалличности, которую можно посчитать, Вы считали? А степень метаморфизации? 11) На схеме я не очень понимаю, что такое d-металл. На схеме у Вас уходит какой-то d-металл. Платина же тоже d-металл? Что имеется в виду здесь? Это играет какую-нибудь роль в работоспособности катализатора? С d-металлом, без d-металла? 12) Вы можете сравнить энергию вашего ультрафиолетового излучения с энергией сдвига графеновых слоев в графите, который в воде находится? 13) И в первом, и во втором положении, в выводах Вы пишете, что активность ультрамалых наночастиц, по-видимому, обусловлена узостью их размерной дисперсии. Но все-таки почему-то нигде не ставится запятая и не говорится, что увеличивается площадь электрохимически активной поверхности? 14) В процессе деградации свойств надо выделить, по Вашим данным, три основных фактора: изменение микроструктуры, а значит, изменение электрохимически активной поверхности; изменение химического состава поверхностного слоя; и изменение природы процесса, определяющего свойства деградации. Как Вы полагаете, все эти факторы в данном случае проявляются или был какой-то один ключевой? От метода стимуляции зависит результат? 15) По Вашим данным, основным механизмом процессов деградации катализаторов является укрупнение наночастиц, слипание их в более крупные. При этом скорость данного процесса зависит от ультрафиолетового облучения. Каков механизм этого воздействия? Почему при ультрафиолетовом облучении меняется размерность? Определяющим фактором, что в конечном итоге является? 16) Вы полагаете, что структурно-морфологические, а значит и функциональные параметры катализатора можно регулировать уже на стадии синтеза катализатора. Но тогда надо предположить, что химическое состояние, опять остается неизменным. Значит,

и оно не меняется в процессе деградации. Так ли это? То есть вы видите какой-нибудь один фактор, определяющий в данном случае?

Соискатель Паперж К.О. ответил на задаваемые вопросы и привел собственную аргументацию:

1) Для изучения кинетики процесса формирования платины в процессе ультрафиолетового облучения мы использовали два подхода. Во-первых, мы исследовали скорость образования наночастиц посредством отслеживания изменения цвета раствора в процессе фазообразования. Оказалось, что несколько ускоряется индукционный период. Однако особого влияния на период нуклеации и роста замечено не было. При этом получаемые материалы характеризовались близкими структурно-морфологическими и электрохимическими параметрами. Это значит, что на процесс самой нуклеации платины ультрафиолетовое облучение не оказывает особого воздействия. При исследовании же процесса синтеза в углеродной суспензии под облучением ультрафиолетом, оказалось, что уже первые пять минут проведения такого синтеза около 10% из 20% теоретических массы платины находятся на поверхности углеродного носителя. При этом с увеличением продолжительности синтеза у нас все также наблюдается меньший средний размер наночастиц, более узкая размерная дисперсия. Поэтому мы предположили, что данный метод оказывает влияние на углеродный носитель. Когда мы попробовали облучить отдельно углеродный носитель, а потом выключить ультрафиолетовое облучение и внести его в реакционную среду, мы заметили, что не меняется средний размер, но увеличивается площадь электрохимически активной поверхности. А значит, это появляется больше центров сорбции наночастиц, по которым равномерно распределяются частицы. 2) Возможно, это связано и с процессом хемосорбции. Длительность такого состояния облученного углерода в наших исследованиях составила около пятнадцати минут. 3) Да, можно охарактеризовать гауссовской функцией. Однако наши материалы не всегда равномерны по распределению, имеются хвосты в сторону больших значений размеров, в итоге, эта функция может некорректно показывать значения. Материалы, где равномерное распределение наночастиц, например, от 1 до 3 нанометров, дисперсия составляет 20 %. В материалах с более широкой размерной дисперсией - составляет 40 %. 4) Не использовали, так как мы использовали один и тот же углеродный носитель Vulcan XC72, у которого постоянная площадь. 5) Незначительно дает. Они дают большой вклад в площадь электрохимически активной поверхности, определенной по водородной области. Площадь платиновых частиц меньше примерно в три раза. 6) При концентрациях меньше десяти массовых долей, возможно, это уже не сам фактор равномерности, но при повышении данной концентрации, наверное, до 60% масс. мы можем определять равномерность. Данный метод изначально полуколичественный, полукачественный, так как фотографии просвечивающей электронной микроскопии дают 2D изображения, трехмерного материала, и мы не всегда можем учесть правильность этого пересечения. То есть одна наночастица может быть сверху углеродной частицы, а вторая снизу. А на фотографии мы видим, что они пересекаются. И в таком случае нам необходима именно статистическая обработка большого количества таких наночастиц, а также возможное второе ограничение - это использование разных углеродных носителей с разной площадью поверхности. И, возможно, будет не совсем корректно сравнивать равномерность таких разных материалов между собой. 7) Мы считаем, что в данном случае правильно говорить непосредственно о влиянии равномерности распределения, так как мы представили несколько рядов материалов, полученных абсолютно разными методами синтеза. Метод синтеза в атмосфере монооксида углерода предполагает,

что наночастицы формируются в объеме раствора и затем оседают на углеродный носитель. А в случае ультрафиолетового синтеза, наоборот, у нас осаждение и нуклеация происходят в присутствии и на углеродном носителе. И два этих материала оказались близки по значениям равномерности распределения наночастиц, с близким значением размера, а их устойчивость также оказалась близка, и они устойчивей, чем материалы с изначально большим средним размером. Это геометрический фактор, в котором процесс переосаждения металла будет замедляться. Так как равномерно распределенным наночастицам с одинаковым размером по поверхности углеродного носителя невыгодно переосаждаться на соседние частицы, потому что термодинамически нет более выгодных мест, они подрастворяются и обратно осаждаются. 8) Протоколы стресс-тестирования разрабатывали не сами. В данном случае имеется в виду, что данный материал в любом из трех исследованных протоколов будет проявлять большую стабильность. Относительно исходного состояния катализатора. 9) У нас имеются значения электрохимических характеристик до стресс-тестирования и после него, по ним рассчитывается относительная стабильность. В данном случае это количественная характеристика, оценивается в процентах. Проценты разные. 10) Нет, не считали. 11) Эта схема придумана нами как для чисто платиноуглеродных материалов, так и для платиносодержащих материалов, то есть имеющие наночастицы с неблагородным d-металлом - это медь, никель, кобальт и железо. И этот d-металл в процессе стресс-тестирования может растворяться намного быстрее, чем чистая платина. Существуют исследования, в которых показано, что легирование d-металлом повышает электрохимическую активность в реакции электровосстановления кислорода. Но данные исследования мы не проводили. 12) В данной работе мы не сравнивали, но сравнить можно. 13) Активность в реакции электровосстановления кислорода более восприимчива к равномерности распределения наночастиц. Как мы видели, повышение площади активной поверхности материала за счет равномерности увеличивается на 10-15 м²/г, в то время как активность в реакции электровосстановления кислорода - на 50-100 А/г. Это более существенное изменение значение. 14) Все зависит от условий самого стресс-тестирования. При использовании протокола стресс-тестирования с верхним предельным потенциалом более 1.0 В, превалирующим механизмом деградации будет являться окисление углеродного носителя. Если использовать протокол с меньшим верхним предельным потенциалом, то уже превалировать будут процессы агломерации и переосаждения платины. Но также процессы частичного окисления носителя, отрыва наночастиц будут протекать просто не настолько выражено по скорости, как агломерация и переосаждение. Да, от метода стимуляции зависит результат. 15) В материалах, полученных под ультрафиолетовым облучением, уменьшается скорость деградации. Процесс увеличения наночастиц более медленный по сравнению с аналогами, так как в таких материалах более равномерно распределены наночастицы, они все однородны по размеру. И им просто не выгодно переосаждаться, двигаться по поверхности, и это замедляет процесс укрупнения. Основными являются два фактора - это размерность распределения и размерная однородность. 16) Нет. В процессе деградации химическое состояние может меняться, у нас может происходить процесс окисления носителя и, соответственно, на его поверхности будет появляться больше кислородсодержащих групп, химия такого носителя меняется: гидрофобность, гидрофильность и так далее. Нет, одного определяющего фактора нет.

На заседании 26.06.2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, заключающейся в установлении корреляции между структурно-морфологическими характеристиками платиноуглеродных электрокатализаторов, их каталитической активностью и устойчивостью к деградации в процессе катодного восстановления кислорода, имеющей значение для развития электрокатализа и электрохимии низкотемпературных топливных элементов, присудить Папержу К.О. ученую степень кандидата химических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 13, «против» – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

26.06.2025 г.



Введенский Александр Викторович

Хохлова Оксана Николаевна