

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Голубцова Георгия Викторовича на тему: «Синтез, структура и электрокаталитические свойства композитных материалов на основе многослойных углеродных нанотрубок и оксидов переходных металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.14 — «Кинетика и катализ»

В настоящее время развитие водородной энергетики с целью решения экологических проблем является одной из приоритетных задач в мире. Такие устройства как обратимые топливные элементы и металл-воздушные батареи позволяют эффективно накапливать и использовать энергию из возобновляемых источников. Однако кинетические ограничения реакций электровосстановления кислорода (РВК) и электроокисления воды (РОВ) в значительной степени снижают энергоэффективность данных устройств. В качестве электрокатализаторов процессов РВК и РОВ используются системы на основе благородных металлов, которые имеют высокую стоимость, ограниченную доступность, а также низкую бифункциональную активность, что делает поиск высокоэффективных и недорогих бифункциональных электрокатализаторов крайне важной и актуальной задачей. Одним из основных подходов по улучшению бифункциональной активности электрокатализаторов является объединение в единую систему недорогих оксидов переходных металлов, обеспечивающих высокую активность в РВК и РОВ, и углеродных наноматериалов, предоставляющих необходимую электропроводность, большую площадь поверхности и повышенную электрохимическую стабильность системы.

Таким образом, диссертационная работа Г.В. Голубцова, **целью** которой является выявление закономерностей формирования одно-, двух- и трехкомпонентных композитных материалов на основе оксидов переходных металлов (Fe, Co, Ni, Mn) и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), функционализированных кислород- и/или азотсодержащими группами, и установление зависимостей «строение - электрокаталитические свойства» полученных материалов, является важной и **актуальной**.

**Научная новизна** данной диссертационной работы состоит в проведении комплексного исследования, которое позволило впервые выявить характеристики смешанных оксидных электрокатализаторов Fe, Co, Ni, Mn/(N-)МУНТ-Ох,

обеспечивающие их высокую бифункциональную активность и стабильность в РВК и РОВ в щелочной среде. На основе полученных результатов был выбран оптимальный электрокатализатор, который позволяет достигать низкой разницы потенциалов РВК и РОВ и при этом имеет высокую селективность в РВК.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в установлении взаимосвязи между отдельными компонентами композитного материала «оксидные наночастицы-МУНТ», что позволяет прогнозировать их электрокаталитические характеристики. Результаты диссертационной работы вносят вклад в развитие подходов к улучшению эффективности работы бифункциональных электрокатализаторов РВК/РОВ в щелочной среде. Кроме того, выявленные закономерности могут быть применены в разработке катализаторов для других практически важных реакций.

Автором проведено детальное исследование влияния состава катализатора синтеза МУНТ на характеристики, полученных на его основе нанотрубок. Установлено влияние функционализации МУНТ азот- и кислородсодержащими группами на морфологию и дефектность нанотрубок, а также на локализацию и фазовый состав нанесенных одно-, двух- и трехкомпонентных оксидных наночастиц. Выявлены характеристики композитных материалов, оказывающие влияние на их электрокаталитические свойства. Определены наиболее активные и стабильные электрокатализаторы, которые представлены трехкомпонентными оксидными системами, содержащие высокодефектные монооксидные и шпинельные фазы.

Автореферат в полной мере дает представление о содержании и объеме диссертационной работы и глубине проработки темы. Текст автореферата написан ясно, профессиональным языком и полностью раскрывает смысл защищаемых положений. **Достоверность** результатов, полученных соискателем, подтверждается воспроизводимыми и согласующимися между собой результатами исследований образцов современными физико-химическими методами и их корректной интерпретацией. Материалы диссертации прошли широкую апробацию, многократно докладывались на конференциях и достаточно полно представлены в статьях, опубликованных в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах.

При общей положительной оценке работы имеются следующие **замечания**:

1. Среди критериев, предъявляемых к углеродным нанотрубкам как носителю электрокатализаторов, автор выделяет дефектность. В работе дефектность МУНТ автор



оценивал по соотношению интенсивностей линий D и G в КР-спектрах. Из текста автореферата неясно, какие именно интенсивности были использованы для расчёта соотношений: интегральные (площади пиков) или амплитудные (высоты пиков). На стр. 14 указано, что оптимальная дефектность углеродных нанотрубок обеспечивает им высокую электропроводность (стр. 14). Однако в тексте автореферата отсутствуют сведения об электропроводности МУНТ и взаимосвязи между дефектностью и электропроводностью.

2. В автореферате нет данных о том, влияет ли металл-катализатор, который использовался для получения МУНТ и, очевидно, входит в их состав, на свойства электрокатализаторов в реакциях РОВ и РВК. Можно предположить, что в ходе предварительной окислительной обработки МУНТ происходит вымывание частиц этого катализатора, однако в автореферате информации об этом нет.

3. На стр. 20 и 21 представлены результаты ПЭМ, из которых автор делает заключение о локализации оксидных частиц в зависимости от состава. Для многих образцов доля частиц, локализованных внутри каналов МУНТ, довольно высока (вплоть до 77%, рис. 4). Неясно, каким образом на основании снимков ПЭМ автор определял локализацию частиц внутри каналов, поскольку при определённом (фронтальном) ракурсе частицу на поверхности нанотрубки не отличить от частицы внутри канала нанотрубки.

Перечисленные замечания носят исключительно уточняющий характер и не снижают высокого уровня и ценности результатов диссертационной работы Г.В. Голубцова.

В целом диссертационная работа Голубцова Г.В. «Синтез, структура и электрокаталитические свойства композитных материалов на основе многослойных углеродных нанотрубок и оксидов переходных металлов» представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, которое по актуальности проблемы, научной новизне, объёму, практической и теоретической значимости полученных результатов удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842). Автор диссертации – Голубцов Георгий Викторович – заслуживает присуждения

учёной степени кандидата химических наук по специальности 1.4.14 — «Кинетика и катализ».

Я, МIRONENKO Роман Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Голубцова Георгия Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Отзыв подготовил:

Старший научный сотрудник Отдела каталитических процессов

Центра новых химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» (Омский филиал),  
д.х.н. (1.4.14 – Кинетика и катализ),

05.06.2025

Роман Михайлович МIRONENKO

Почтовый адрес: 644040, г. Омск, ул. Нефтезаводская, д. 54, ЦНХТ ИК СО РАН

Тел.:

Подпись Р.М. МIRONENKO

Учёный секретарь ЦНХТ ]

к.х.н.

А.В. Сырьева