ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу
Жумадилова Бауыржана Ерболсынұлы на тему «Углеродные наностены и их гибридные композиты как электрокаталитические материалы для водородной энергетики», предоставленную на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D07110 – Материаловедение и технология новых материалов».

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам:	Работа соответствует приоритетному направлению «Научные исследования в области естественных наук»,. Работа выполнена в рамках научных и научно-технических проектов грантового финансирования и программы целевого финансирования: 1. BR28712419 «Углеродные наностены: комплексное исследование синтеза, свойств и применения в современных электронных устройствах» 2025-2027 гг. 2. AP23484100 «Углеродные наностены: функционализация и модификация поверхности для эффективного фото- и электрохимического расщепления воды» 2024-2026 гг.
		1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы);	
		2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы);	
		3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).	
2.	Важность для науки	Работа **вносит**/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность **хорошо раскрыта**/не раскрыта.	Диссертационная работа посвящена актуальной задаче разработки углеродных и гибридных электрокаталитических материалов для реакции выделения водорода. Автором получены новые экспериментальные результаты, раскрывающие взаимосвязь между составом, структурой и электрохимическими характеристиками исследуемых материалов. Работа вносит существенный вклад в развитие исследований в области

			электрокаталитических материалов, а ее актуальность и научно-практическая значимость хорошо раскрыты в диссертации. Предложенные подходы позволяют повысить эффективность и стабильность электрокатализаторов.
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1**) высокий;** 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.	Соискателем продемонстрирован высокий уровень самостоятельности при выполнении диссертационного исследования. Его существенный личный вклад подтверждается авторством в опубликованных научных работах, а также непосредственным личным участием в синтезе углеродных наностен и N-допированных углеродных наностен, модификации их поверхности каталитическими материалами, получении, обработке и анализе основных экспериментальных результатов.
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) **обоснована;** 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	Актуальность диссертационной работы определяется глобальной потребностью перехода к низкоуглеродной энергетике, в рамках которой водород рассматривается как один из наиболее перспективных экологически чистых энергоносителей. Ключевым узким местом развития водородных технологий остаётся высокая стоимость платиновых электрокатализаторов реакции выделения водорода, что сдерживает масштабирование электролизного производства водорода. В этой связи разработка автором гибридных электрокаталитических систем на основе углеродных наностен, модифицированных оксидом вольфрама и тиомолибдатом аммония, представляется своевременной и научно обоснованной. Работа напрямую отвечает мировым тенденциям поиска недорогих альтернатив благородным металлам и соответствует приоритетным направлениям развития возобновляемой энергетики, что подтверждает высокую актуальность выбранной темы исследования.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) **отражает;** 2) частично отражает;	Диссертационная работа построена по логически обоснованной схеме: введение, четыре раздела, заключение и библиографический список, что полностью соответствует заявленной теме и обеспечивает последовательное изложение

		3) не отражает.	материала, от анализа современного состояния проблемы до создания и оптимизации прикладных электрокаталитических систем. Введение содержит развёрнутое обоснование актуальности темы, связанной с разработкой недорогих электрокатализаторов реакции выделения водорода на основе углеродных наноструктур, а также формулирует цель, задачи и защищаемые положения работы. Первый раздел представляет собой аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены современные представления о структуре и свойствах углеродных наноматериалов, методы их получения, а также существующие стратегии гибридизации углеродных наностен с оксидными и сульфидными соединениями переходных металлов. Второй раздел носит фундаментальный характер и посвящена систематическому изучению закономерностей роста углеродных наностен методом CCP-PECVD на различных типах подложек в зависимости от времени синтеза, установлению взаимосвязи между морфологией, структурой и электрохимическими характеристиками полученных материалов. Третий раздел представляет этап, создание гибридного электрода Ti/УНС/WO_3, где углеродная матрица выступает проводящим каркасом, а оксид вольфрама активным каталитическим компонентом, приведены результаты структурного анализа и электрокаталитических испытаний. Четвёртый раздел развивает концепцию гибридизации на примере электрода Ti/N-УНС/АТМ, где рассмотрены вопросы оптимальной загрузки молекулярных кластеров тиомолибдата аммония, кинетики реакции и долговременной эксплуатационной стабильности разработанной системы. Заключение содержит систематизированные выводы, отражающие ключевые научные и практические результаты диссертационного исследования.

		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) **соответствуют;** 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Сформулированные цель и задачи диссертационного исследования соответствуют его тематике и научной направленности. Их содержание последовательно раскрывает основные этапы исследования углеродных наностен и гибридных электрокаталитических материалов.
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) **полностью взаимосвязаны;** 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.	Структура диссертации отличается последовательностью и внутренней логической взаимосвязью. Результаты отдельных разделов взаимно дополняют друг друга и последовательно подводят к основным выводам исследования. Положения, выносимые на защиту, соответствуют ключевым научным результатам, полученным в рамках диссертационной работы.
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: 1) **критический анализ есть;** 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; 4) анализ отсутствует.	Предложенные автором подходы к созданию гибридных электрокатализаторов на основе углеродных наностен аргументированы результатами комплексного сравнительного анализа, включающего сопоставление электрохимических характеристик (перенапряжение, наклон Тафеля, сопротивление переноса заряда) разработанных электродов Ti/УНС/WO_3 и Ti/N-УНС/АТМ с литературными данными по катализаторам на основе благородных металлов и другим известным неплатиновым системам. Достигнутые значения перенапряжения и высокая долговременная стабильность убедительно демонстрируют конкурентоспособность предложенных решений. Использование взаимодополняющих методов структурной, спектроскопической и электрохимической характеризации обеспечило надёжность выводов и объективность оценки научной новизны полученных результатов.
5.	Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми? 1) **полностью новые;** 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Представленные в диссертации научные результаты и положения, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые для исследуемых систем на основе углеродных наностен. Новизна подтверждается тем, что ранее в литературе отсутствовали систематические данные о совместном влиянии типа подложки и времени плазмохимического синтеза на

			комплекс структурных и электрокаталитических характеристик УНС применительно к реакции выделения водорода. Впервые предложена и экспериментально реализована композитная архитектура электрода Ti/УНС/WO_3, в которой проводящий углеродный каркас и оксидная каталитическая фаза действуют вместе, обеспечивая электрокаталитические характеристики (η_{10} = 40,9 мВ, наклон Тафеля 76 мВ·дек$^{-1}$), сопоставимые с показателями платиновых катализаторов при значительно меньшей стоимости материала. Новизна также заключается в разработке подхода к иммобилизации молекулярных кластеров ($(NH_4)_2Mo_3S_{13}$) на азот-легированных УНС посредством аэрозольного осаждения с контролируемым числом циклов, что позволило установить ранее неизвестную зависимость каталитической активности от плотности активных Mo-S центров и добиться высокой долговременной стабильности при фарадеевской эффективности, близкой к 100%. Совокупность указанных результатов представляет собой оригинальный научный вклад в область разработки неплатиновых электрокатализаторов водородной энергетики.
		5.2 Выводы диссертации являются новыми? 1) **полностью новые;** 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Сформулированные в диссертации выводы опираются на достоверные экспериментальные данные, полученные комплексом взаимодополняющих методов структурной, спектроскопической и электрохимической характеризации углеродных наностен и разработанных на их основе гибридных электродов. Выводы о влиянии подложки и времени роста на свойства УНС, о высокой эффективности WO_3-модифицированных электродов и о повышенной активности и долговременной стабильности систем на основе тиомолибдата аммония логически согласуются с представленными в работе результатами, являются научно аргументированными и обладают научной новизной.

		5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными: 1) **полностью новые;** 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Представленные технические и технологические решения имеют экспериментальное подтверждение. Установлено, что изменение типа подложки и времени синтеза УНС методом CCP-PECVD приводит к закономерному изменению их морфологии и электрохимических характеристик. Для электрода Ti/УНС/WO_3 определены перенапряжение, наклон Тафеля, сопротивление переноса заряда и электрохимически активная поверхность, характеризующие его электрокаталитическую эффективность. Для системы Ti/N-УНС/АТМ выявлена зависимость активности и долговременной стабильности от числа циклов осаждения тиомолибдата аммония, что подтверждает обоснованность выбранных технологических параметров.
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы **основаны**/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).	Все основные выводы диссертационной работы основаны на весомых с научной точки зрения экспериментальных доказательствах, полученных с использованием комплекса современных методов физико-химического и электрохимического анализа. Выводы о влиянии условий синтеза на свойства углеродных наностен, а также об эффективности разработанных гибридных электрокатализаторов подтверждены воспроизводимыми количественными данными и их сопоставлением с результатами, представленными в научной литературе, что свидетельствует о достаточной обоснованности и достоверности полученных результатов.
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: 7.1 Доказано ли положение? 1) **доказано;** 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано; 4) не доказано; 5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно.	7.1 Доказано ли положение? Положение 1: 1) **доказано** Положение 2: 1) **доказано** Положение 3: 1) **доказано** Все сформулированные положения, выносимые на защиту, подтверждены достаточным объёмом экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов исследования, и логически соответствуют поставленным цели и

		7.2 Является ли тривиальным?	задачам диссертационной работы.
		1) да;	
		2) **нет;**	7.2 Является ли тривиальным? Положение 1: 2) **нет** Положение 2: 2) **нет** Положение 3: 2) **нет**
		3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.	
		7.3 Является ли новым?	
		1) **да;**	Представленные закономерности не являются тривиальными и получены на основании самостоятельной обработки и интерпретации экспериментальных данных автором, в том числе с привлечением сопоставления с результатами других исследователей в данной области.
		2) нет;	
		3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.	
		7.4 Уровень для применения:	
		1) узкий;	
		2) средний;	7.3 Является ли новым? Положение 1: 1) **да** Положение 2: 1) **да** Положение 3: 1) **да**
		3) **широкий;**	
		4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.	
		7.5 Доказано ли в статье?	Каждое из положений содержит оригинальные научные результаты, ранее не описанные в научной литературе для аналогичных систем материалов и условий их получения, что подтверждает научную новизну проведённого исследования.
		1) **да;**	
		2) нет;	
		3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	7.4 Уровень для применения: Положение 1: 3) **широкий** Положение 2: 3) **широкий** Положение 3: 3) **широкий**
			Практическая значимость установленных закономерностей подтверждена экспериментально. Разработанные гибридные электрокаталитические системы обладают выраженным потенциалом для внедрения в технологии электролитического получения водорода как экономичная альтернатива

			катализаторам на основе благородных металлов. 7.5 Доказано ли в статье? Положение 1: 1) **да**, результаты, легшие в основу данного положения, опубликованы в следующих работах: Zhumadilov B.Y. et al. Influence of Substrate Type and Synthesis Time on Morphological and Structural Properties of Carbon Nanowalls // Advanced Physics Research. – 2025. – 4(12). – e00156 (IF 2,8, Q2); Zhumadilov B.Y., Zhumadilov R.Y., Nemkayeva R.R., Markhabayeva A.A., Gabdullin M.T., Yerlanuly Y. Role of synthesis time in shaping the morphology and structure of carbon nanowalls // Recent Contributions to Physics. – 2025. – 94(3). – P. 80–86; Жумадилов Б.Е. Влияние длительности синтеза на морфологию и структуру углеродных наностенок на поверхности углеродной бумаги // Recent Contributions to Physics. – 2026. – 96(1). – P. 39–47. Положение 2: 1) **да**, соответствующие результаты представлены в публикациях: Zhumadilov B.Y. et al. WO3-Modified Carbon Nanowall Electrodes for Efficient Hydrogen Evolution Reaction // International Journal of Hydrogen Energy. – 2026. – 223. – 154356 (IF 8,3, Q1); Zhumadilov R.Y., Zhumadilov B.Y., Nemkayeva R.R., Kondo H., Markhabayeva A.A., Yerlanuly Y., Gabdullin M.T., Hori M. In-situ Raman analysis of carbon nanowalls during electrochemical measurement // Physical Sciences and Technology. – 2025. – 12(1-2). – P. 57–67. Положение 3: 1) **да**, данное положение подтверждается публикацией: Zhumadilov R.Y., Markhabayeva A.A., Zhumadilov B.Y. et al. Ammonium thiomolybdate ((NH4)2Mo3S13) coatings on N-doped carbon nanowalls as optimal and durable electrocatalysts for hydrogen evolution // Chemical Engineering Journal Advances. –

			2026. – 101163 (IF 7,1, Q1).
8.	Принцип достоверности.	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана:	Методический подход диссертационного исследования является обоснованным и соответствует поставленным научным задачам. Для комплексной характеристики материалов использованы взаимодополняющие методы исследования их морфологии, состава, структуры, электронных и электрохимических свойств. Экспериментальные условия и параметры основных процедур приведены в диссертации в объёме, необходимом для оценки достоверности и воспроизводимости полученных результатов.
	Достоверность источников и предоставляемой информации	1) **да;**	
		2) нет.	
		8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий:	Полученные в диссертации результаты базируются на использовании современных инструментальных методов исследования наноструктурированных материалов и их электрохимических свойств, включая комплекс микроскопических (СЭМ, ПЭМ, АСМ), спектроскопических (XPS, Раман, UPS) и дифракционных (XRD) методов, а также электрохимических методик тестирования электрокатализаторов. Обработка полученных данных, включая построение поляризационных кривых, расчёт наклонов Тафеля и анализ спектров импеданса, выполнена с применением специализированного программного обеспечения, что соответствует современному уровню методической базы в области электрохимии и материаловедения и подтверждает достоверность полученных научных результатов.
		1) **да;**	
		2) нет.	
		8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента):	Установленные в диссертации закономерности между условиями синтеза углеродных наностен (тип подложки, время роста) и их структурно-электрохимическими характеристиками, а также выявленные взаимосвязи между составом гибридных электродов (Ti/УНС/WO_3, Ti/N-УНС/АТМ) и их каталитической активностью и стабильностью надёжно подтверждены совокупностью экспериментальных данных, включая результаты

		1) **да;**	электрохимических измерений, структурного и спектроскопического анализа как до, так и после длительных испытаний электродов, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сформулированных теоретических положений.
		2) нет.	
		8.4 Важные утверждения **подтверждены**/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.	Ключевые утверждения диссертационной работы, включая интерпретацию электрокаталитических характеристик разработанных электродов Ti/УНС/WO_3 и Ti/N-УНС/АТМ, подтверждены ссылками на актуальные публикации в высокорейтинговых рецензируемых журналах. Сопоставление полученных результатов (перенапряжение, наклон Тафеля, стабильность) с литературными данными по аналогичным и платиновым катализаторам выполнено корректно и обоснованно, что свидетельствует о достаточной степени подтверждённости сделанных автором выводов актуальной научной литературой.
		8.5 Использованные источники литературы **достаточны**/не достаточны для литературного обзора.	Использованные в диссертационной работе источники литературы (213 наименований) являются достаточными как по объёму, так и по содержанию для проведения полноценного литературного обзора. Приведённые ссылки отражают современное состояние исследований в области углеродных наноструктурированных материалов и их гибридных композитов для электрокатализа, включая недавние публикации по родственной тематике, что свидетельствует о хорошей осведомлённости автора о текущих достижениях в выбранной научной области.
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:	Диссертационная работа обладает значимым теоретическим вкладом в области электрохимии наноуглеродных материалов. Установленные закономерности взаимосвязи между условиями синтеза углеродных наностен методом CCP-PECVD и их структурно-электрохимическими характеристиками, а также выявленные механизмы синергетического взаимодействия проводящей углеродной матрицы с каталитически активными компонентами расширяют существующие представления о
		1) **да;**	
		2) нет.	

			принципах конструирования гибридных электрокаталитических систем. Полученные данные углубляют фундаментальное понимание кинетики реакции выделения водорода на неплатиновых катализаторах и могут служить теоретической основой для дальнейших исследований в области водородной энергетики.
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: 1) **да;** 2) нет.	Работа обладает значительным прикладным потенциалом, обусловленным высокой вероятностью внедрения полученных результатов в реальные технологические процессы. Предложенные методы синтеза УНС и их последующей функционализации оксидом вольфрама и молекулярными кластерами тиомолибдата аммония отличаются относительной технологической простотой и масштабируемостью. Достигнутые электрокаталитические характеристики разработанных систем (низкое перенапряжение, малый наклон Тафеля, высокая внутренняя каталитическая активность и стабильность при длительной эксплуатации) свидетельствуют о реальной конкурентоспособности предложенных электрокатализаторов по сравнению с дорогостоящими платиновыми аналогами. Это создаёт предпосылки для практического использования разработанных материалов в электролизёрах для генерации водорода, что особенно актуально в контексте развития водородной энергетики и снижения зависимости от благородных металлов.
		9.3 Предложения для практики являются новыми: 1) **полностью новые;** 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Несмотря на то что отдельные компоненты предложенных систем (углеродные наностены, оксид вольфрама, тиомолибдат аммония) по отдельности описаны в литературе, их целенаправленная интеграция в единые гибридные электрокаталитические архитектуры Ti/УНС/WO_3 и Ti/N-УНС/АТМ представляет собой оригинальное и полностью новое техническое решение, не имеющее прямых аналогов в области водородной энергетики. Именно синергетическое сочетание проводящего наноуглеродного каркаса с оксидной либо

			сульфидной каталитической фазой, а также найденные автором оптимальные режимы их формирования, обеспечивает предложенным решениям практическую и научную оригинальность.
10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) **высокое;** 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Диссертация написана грамотным научным языком, характеризуется чёткой структурой изложения и логической связностью между разделами. Формулировки цели, задач, положений, выносимых на защиту, и выводов выполнены корректно и однозначно, а используемая терминология соответствует принятым в области электрохимии и материаловедения стандартам. В целом качество академического письма работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным исследованиям.
11.	Замечания к диссертации	В процессе рецензирования диссертационной работы выявлены следующие замечания уточняющего характера: 1. Недостаточно объяснено, почему в качестве оптимальной платформы для дальнейшей гибридизации был выбран именно Ti/УНС, а не другие исследованные подложки (кварц, SS304, Ta). 2. В тексте встречаются отдельные стилистические шероховатости и элементы прямого перевода. 3. Не рассмотрена возможность применения разработанных электродов в нейтральных или щелочных средах, помимо исследованной кислой (0,5 M H_2SO_4). Высказанные замечания носят уточняющий характер и не влияют на общее качество диссертационной работы и достоверность полученных результатов.	
12.	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи	Материалы диссертации в достаточной степени апробированы через публикации в рецензируемых научных изданиях. Наиболее значимыми являются статьи, опубликованные в журналах Scopus/Web of Science: работа по WO_3-модифицированным электродам УНС для реакции выделения водорода (International Journal of Hydrogen Energy, IF = 9.2, Q1), исследование покрытий на основе тиомолибдата аммония на N-легированных УНС (Chemical Engineering Journal Advances, IF = 6.9, Q1) и статья, посвящённая влиянию типа подложки и времени синтеза на морфологию и структуру УНС (Advanced Physics Research, Q2). Дополнительно результаты представлены в трёх публикациях изданий, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, включая работы «Role of synthesis time in shaping the morphology and structure of carbon nanowalls», «In-situ Raman analysis of carbon nanowalls during electrochemical measurement» и «Влияние длительности синтеза на морфологию и структуру углеродных наностенок на поверхности углеродной бумаги». Тематика и содержание всех публикаций полностью соответствуют разделам диссертационной работы, а наличие двух статей в журналах первого	

	докторанта по теме исследования)	квартиля с высоким импакт-фактором подтверждает высокий научный уровень исследования и его актуальность для мирового научного сообщества.
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	Диссертационная работа Жумадилова Бауыржана Ерболсынұлы на тему «Углеродные наностены и их гибридные композиты как электрокаталитические материалы для водородной энергетики» является завершённым научным исследованием, обладающим как теоретической, так и практической ценностью для развития водородной энергетики. Полагаю, что диссертация полностью соответствует требованиям КОКСНВО МНВО РК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание степени доктора философии (PhD), а соискатель заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D07110 – Материаловедение и технология новых материалов».

Официальный рецензент:
PhD, доцент,кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий
Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева _____ Шлимас Дмитрий Игорьевич