

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию**  
**Хлюстовой Анны Владимировны**  
**на тему: «Влияние процессов переноса нейтральных и заряженных**  
**частиц на физико-химические свойства системы плазма-раствор»**  
**представленную на соискание ученой степени доктора химических наук**  
**по специальности 1.4.4 Физическая химия**

Диссертация Хлюстовой Анны Владимировны на тему: «Влияние процессов переноса нейтральных и заряженных частиц на физико-химические свойства системы плазма-раствор» посвящена решению проблемы выявления взаимосвязи между физико-химическими процессами в системе газоразрядная плазма-раствор, протекающими и в жидкой, и в газовой (зона плазмы) фазами. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.4.4 Физическая химия.

Тематика работы является актуальной. Одним из наиболее перспективных направлений получения новых материалов являются технологии, основанные на применении плазмы. В последние времена повышенным вниманием пользуются системы, в которых плазма контактирует с жидкостью. В такой системе присутствует межфазная граница, которая инициирует протекание химических превращений, недоступных для традиционных систем. Химически активные частицы формируются и в зоне плазмы, и в тонком слое жидкости, граничащей с плазмой. Частицы из раствора оказывают влияние на физические характеристики плазмы, в то время как частицы, формирующиеся в зоне плазмы, способствуют протеканию химических превращений в жидкой фазе. Помимо инициирования химических процессов в растворе, плазма также оказывает и тепловое воздействие, что инициирует локальный нагрев и испарение раствора. Все эти процессы необходимо учитывать при описании кинетики протекания процессов, как в жидкой, так и в газовой (зона плазмы) фазах. Процессы переноса частиц между раствором и зоной разряда оставались практически не исследованы.

Автором установлена взаимосвязь между составом жидкой фазы и параметрами газового разряда (плазмы), предложены наиболее вероятные механизмы процессов переноса. Впервые предложена методика количественной оценки процессов переноса. Разработаны кинетические модели химических превращений, которые учитывают процессы массопереноса. Приведено объяснение высокой окислительной способности системы газоразрядная плазма – раствор. Предложен и реализован подход

описания кинстики генерации и накопления химически активных частиц (атомов, радикалов) в жидкой фазе.

Большой объем полученных новых результатов не оставляет сомнений в научной значимости проделанной работы. Не меньшее и практическое значение проведенного исследования для решения проблемы разработки новых технологических решений. Речь идет как о возможности получения чистых наноструктур без применения химических реагентов, так и о решении вопроса очистки сточных вод от органических, неорганических и биологических объектов. Важно, что исследования применимости установленных эффектов воздействия на водные среды выполнены не только на «модельных объектах», но на реальных промышленных стоках. Полученные в процессе работы результаты являются технологически оправданными и могут быть использованы для создания новых портативных установок. Сильной стороной работы является то, что даны рекомендации по использованию результатов работы, а также намечены и показаны перспективы ее дальнейшего развития.

Автором выносятся на защиту семь основных положений: 1) закономерности протекания процессов переноса нейтральных и заряженных частиц (компонентов раствора) и влияние внешних факторов на количественные характеристики процессов переноса; 2) результаты расчета химического состава зоны плазмы по разработанной кинетической модели с учетом наличия процессов переноса; 3) кинетическая модель накопления  $H_2O_2$ ; 4) кинетические закономерности протекания химических процессов с участием активных частиц в жидкой фазе; 5) анализ размеров катодной области плазменного разряда с жидким катодом и режим движения ионов в этой области; 6) факторы, влияющие на изменение кислотности растворов в процессе воздействия газового разряда; 7) результаты практического применения плазменно-растворных систем.

Эти защищаемые положения, а также выводы, сделанные по итогам диссертационной работы, представляются достоверными и хорошо обоснованными. Они подтверждены большим объемом оригинальных данных, полученных при помощи комплекса современных экспериментальных и теоретических методов с использованием исследовательских приспособлений и подходов, разработанных соискателем, основываясь на опыте ведущих отечественных и зарубежных научных групп, исследования которых лежат в области физической и неорганической химии, а также физики плазмы и плазмохимии. В рамках работы были использованы следующие методологические подходы: анализ, эксперимент, сравнение, обобщение и математическое моделирование. В практической части работы

применен широкий спектр физико-химических методов анализа, включая рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопию, электронную спектроскопию поглощения, сканирующую электронную микроскопию. Высокая достоверность результатов обеспечена использованием комплекса независимых методов физико-химического анализа на современном научном оборудовании, работоспособность которого проверялась по соответствующим стандартным методикам, большим статистическим набором хорошо воспроизводимых экспериментальных данных, применением строгих математических процедур обработки результатов измерений и их интерпретацией на основе современных теоретических представлений. Подтверждением достоверности может также служить многократная научная экспертиза результатов в ходе рецензирования статей в ведущих научных журналах по тематике исследований, представление результатов на конференциях и конкурсах различного уровня.

По изложению результатов в диссертации и публикациях, виден высокий уровень проведенной работы, умение формулировать задачи, планировать и выполнять работы, получать, обрабатывать, интерпретировать и обобщать полученные результаты. Текст автореферата полностью и верно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 523 источников. Материал диссертационной работы изложен на 345 странице печатного текста, содержит 47 таблиц, 161 рисунок. Это серьезное, тщательно выполненное исследование, результаты которого обстоятельно представлены.

Работа прошла очень хорошую аprobацию. Ее основные результаты опубликованы в более 40 научных статьях в ведущих международных журналах. Работы соискателя хорошо известны научной общественности по публикациям и докладам на многочисленных национальных и международных научных конференциях.

В то же время, по работе можно сделать некоторые замечания:

1. Литературный обзор написан очень хорошо: прекрасно структурирован, показывает хорошее знание литературы, критически анализирует и обобщает имеющиеся публикации, однако есть некоторые аспекты, которые следовало бы прояснить:

- Обсуждается значительный разброс в оценках концентрации электронов (от  $10^{17}$  до  $10^{24}$  м<sup>-3</sup>), полученных разными методами (микроволновое поглощение, уширение линии H<sub>β</sub>, расчет по проводимости). Какой

метод, по мнению автора, является наиболее достоверным для данной системы и почему?

- В разделе, посвященном практическому применению результатов (например, разложение красителей, Таблица 1.8), приведены значения энергетических выходов ( $G$ , г/кВт\*ч). Однако эти значения сильно отличаются даже для одного и того же красителя. В тексте отсутствует критический анализ таких различий, а также пояснения, насколько предлагаемые технологии энергоэффективны по сравнению с существующими методами (озонирование, УФ-облучение, мембранные методы).

2. Автором разработано несколько моделей: кинетическая для плазмы, модель накопления пероксида водорода, модель для оценки генерации активных частиц. Однако до конца неясно, как эти модели связаны между собой. Требуется пояснить, является ли эта работа шагом вперед к созданию комплексной самосогласованной модели, описывающей всю систему «плазма-раствор» целиком, или эти модели существуют изолированно.

3. При описании практического применения плазменно-растворных систем (глава 7) было показано увеличение гидрофильности полимерных пленок после обработки. Однако, не указано, исследовалась ли стабильность этих модифицированных поверхностей при хранении (эффект "старения").

4. Синтез оксида молибдена проводился из молибденового анода. Однако, в работе отсутствует заключение о том, какой механизм образования наночастиц считается основным: испарение/окисление анода с последующей конденсацией из газовой фазы или электрохимическое растворение анода с последующим восстановлением/осаждением ионов в жидкой фазе под действием плазменных факторов, и какие экспериментальные данные это подтверждают.

5. При описании синтезированных наночастиц ( $\text{Ag}$ ,  $\text{MoO}_3$ ) не указано, исследовалась ли их катализическая активность или другие функциональные свойства. Если да, то требуется пояснить, как они соотносятся с свойствами наночастиц, полученных традиционными химическими методами.

Указанные замечания не умаляют значимости и научной ценности диссертационного исследования. В рецензируемой научно-квалификационной работе на основании выполненных автором исследований разработаны

теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физической химии, в частности, в области физической химии гетерогенных систем.

Работа соответствует паспорту специальности 1.4.4. Физическая химия в части п. 5. «Изучение физико-химических свойств изолированных молекул и молекулярных соединений при воздействии на них внешних электромагнитных полей, потока заряженных частиц, а также экстремально высоких/низких температурах и давлениях»; п. 6. «Химические превращения, потоки массы, энергии и энтропии пространственных и временных структур в неравновесных системах»; п. 7. «Макрокинетика, механизмы сложных химических процессов, физико-химическая гидродинамика, растворение и кристаллизация»; п. 8. «Динамика элементарного акта химических реакций. Механизмы реакции с участием активных частиц»; п. 12. «Физико-химические основы процессов химической технологии и синтеза новых материалов».

Диссертация «Влияние процессов переноса нейтральных и заряженных частиц на физико-химические свойства системы плазма – раствор» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с пунктами 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции, а ее автор, Хлюстова Анна Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия.

Официальный оппонент:

Доктор химических наук,

Старший научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Булычев Николай Алексеевич

29.12.2025 г.



г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

+7(916) 137-65-86 nbulychev@mail.ru

Подпись Булычева Н.А. заверяю  
Заместитель начальника *отдела кадров*  
управления по работе с персоналом



М.А. Иванов