

## 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

Представленная диссертация Хлюстовой А.В. на тему: «Влияние процессов переноса нейтральных и заряженных частиц на физико-химические свойства системы плазма-раствор» посвящена решению комплексной проблемы связанной с рассмотрением электрических разрядов в контакте с жидкостью как единой системы.

При разработке технологических процессов с применением плазмы критически важными являются процессы, влияющие на режимы горения разряда. В системе плазма-раствор такими факторами являются не только процессы в самой плазме, в жидкости, но и на границе раздела фаз плазма-раствор. Поэтому работа является актуальной. Автор последовательно рассматривает процессы переноса на границе раздела фаз плазма-раствор, химические и физико-химические процессы в газовой и жидкой фазах, и применение результатов этих исследований при рассмотрении прикладных задач.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы из 523 источников. Объем диссертации составляет 345 страниц, включает 161 рисунок и 47 таблиц. Кроме обсуждения представленных результатов, работа содержит актуальный обзор литературных источников.

Работа апробирована на высоком уровне. По тематике диссертации опубликовано более 40 научных статей в ведущих российских и международных журналах, а результаты исследований были представлены на различных российских и международных конференциях. Это свидетельствует о высоком уровне востребованности полученных автором результатов в научном сообществе.

Работа производит большой интерес как обширностью полученных результатов, их разноплановостью и глубиной понимания, так и интерпретацией. Так, например, были разработаны методики измерений процессов массопереноса, выбраны подходы для расчета скоростей массопереноса с учетом естественного испарения, рассмотрены факторы, влияющие на скорость переноса. Все это позволило установить наличие обратной связи в системе плазма-раствор. Полученные количественные оценки позволяют предсказать режимы горения разряда при заданных параметрах. Представлен новый

подход к оценке скорости генерации короткоживущих активных частиц в растворе, учитывающий наиболее вероятные каналы образования и гибели активных частиц.

Принимая во внимание наличие процессов переноса, впервые были проведены кинетические расчеты состава газовой фазы (зоны плазмы). Это позволило объяснить высокую окислительную способность системы плазма-раствор и наличие атомов металла в зоне разряда. Процессы переноса также были учтены и в представленных кинетических моделях для жидкой фазы. Эти данные позволяют предсказать протекание окислительно-восстановительных процессов, что важно с точки зрения применимости. Критически рассмотрена модель тлеющего разряда с одним жидким электродом; показано влияние состава раствора на физические характеристики разрядов, предложены возможные механизмы эмиссии электронов из жидкого катода; проведены оценки каналов распределения энергии.

Представленное выше, является результатами только экспериментальных и теоретических исследований, в работе так же представлены результаты практического применения системы плазма-раствор. В рамках предложенных механизмов переноса рассмотрены процессы синтеза наноструктурированных материалов. С позиции генерации и накопления химически активных частиц, как в жидкой, так и в газовой фазах, рассмотрены процессы разложения органических красителей, синтеза гидроксипроизводных бензойной кислоты, оксидов металлов, модификации природных и синтетических полимерных материалов, удаление ионов тяжелых металлов и биологических объектов. Несомненным достоинством является то, что апробация метода проводилась не только на модельных растворах но и на реальных промышленных сточных водах.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Формулировку задачи исследования «Определение химического состава в зоне плазмы путем разработки кинетической модели, учитывающей параметры плазмы и наличие процессов переноса компонентов раствора» следовало сделать менее категоричной. Здесь лучше говорить об оценке химического состава в зоне плазмы, поскольку это расчеты;
2. Вывод № 7 «Предложена динамическая модель торцевого разряда...» в тексте диссертации и автореферате речь идет только о «диафрагменном разряде»;
3. Одним из существенных достоинств диссертации является детальное изучение процессов массопереноса под действием электрических разрядов как в практическом, так и в теоретическом плане. Очень интересно, наблюдалось ли формирование аэрозоля, о

котором упоминает автор? Думаю, фото- и видеотехника, используемая в работе, позволяла его регистрировать, но в диссертации этих фотографий нет;

4. Обсуждение возможного механизма превращений органических соединений в разделах 7.2.1–7.2.3 выглядит достаточно обоснованным, однако применение методов хромато-масс-спектрометрии могло бы существенно расширить понимание протекающих процессов;

5. Раздел, посвященный деструкции органических соединений, показывает перспективу использования изученных систем для решения экологических задач. Образующиеся продукты деструкции модельных соединений достаточно токсичные. В Ивановском государственном химико-технологическом университете был выполнен ряд работ на подобную тему, при этом авторы проводили биологическое тестирование раствора после очистки. Почему не в этом случае? Данное замечание можно отчасти применить и к процессу удаления металлов из промышленных стоков, остаточная концентрация ионов в основном выше ПДК, были ли предприняты попытки оптимизации процесса?

6. В разделе 7.2.7 «Плазменная медицина» представлены очень интересные и многообещающие результаты, но как они связаны с исследованными разрядами? Нужно было хотя бы эту связь показать. Считаю, что в диссертацию этот материал включать не следовало, имеющегося более чем достаточно;

7. Зачастую в конце разделов отсутствует обобщение полученных результатов либо оно приводится в тезисном виде, что затрудняет восприятие диссертации;

8. В тексте автореферата и диссертации встречаются досадные опечатки. Оформление графических материалов выполнено в разном стиле, кроме этого на одних графиках есть обозначения доверительных интервалов, на других нет, и непонятно почему. Это касается и форматирования текста в целом.

Приведенные замечания не являются принципиальными, не ставят под сомнение основные положения и выводы диссертации Хлюстовой А.В., не снижают ее научной новизны и практической значимости.

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  
(02.00.13 – Нефтехимия), Федеральное  
государственное бюджетное учреждение  
науки Институт химии нефти  
Сибирского отделения РАН  
(ИХН СО РАН), заведующий лабораторией  
физико-химических методов исследования

Кудряшов  
Сергей  
Владимирович

«13» 02 2026 г.  
E-mail: [ks@ipc.tsc.ru](mailto:ks@ipc.tsc.ru),  
Тел: 8-(3822)-491820

Подпись Кудряшова С.В. заверяю  
Ученый секретарь ИХН СО РАН,  
кандидат химических наук



Степанов  
Андрей  
Александрович