

В диссертационный совет  
Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(ОИВТ РАН)

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на работу **Аунга Мьята Хеина** «Гибридная плазма газовых смесей как инструмент комбинированного воздействия на полимерные материалы с целью повышения их биосовместимости», предоставленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 –

физика плазмы

В настоящее время поиск и разработка экологически безопасных и энергосберегающих методов воздействия на вещество, являются крайне актуальными практически для всех областей техники и технологий, особенно – для микроэлектроники, производства новых функциональных и конструкционных материалов, а также материалов медицинской техники. Так, в частности, использование функциональных полимерных материалов, обладающих высокой биосовместимостью с тканями человеческого организма, способно решить множество сложных проблем, возникающих перед современной лабораторной и клинической медициной (предотвращение роста микроорганизмов и тромбообразования на поверхности имплантатов и протезов, ускорение клеточной регенерации и ранозаживления, организация адресной доставки лекарственных препаратов, создание чувствительных диагностических систем и др.). Среди разнообразных методов функционализации полимеров плазмохимические технологии представляют особый интерес, поскольку имеют целый ряд преимуществ: высокая скорость обработки, модификация лишь поверхностных слоев без изменения свойств самого материала, возможность одновременной его стерилизации. Наиболее известны и достаточно детально изучены физико-химические процессы модификации полимеров в низкотемпературной плазме (НТП) газовых разрядов различных частотных диапазонов, генерируемой в газах с давлениями от сотых долей Торр вплоть до атмосферного. Известны и недостатки газоразрядных реакторов, ограничивающие их использование. В первую очередь – это контракция газового разряда при повышении давления, затрудняющая, а в большинстве случаев делающая невозможным формирование больших реакционных



объемов. Такие реакционные объемы, как правило, неоднородны: в них могут возникать зоны с высоким энерговыделением, в которых происходит значительный локальный разогрев плазмообразующей среды и помещенных в плазму объектов. Умеренное понижение рабочего давления до долей Торр позволяет отчасти преодолеть указанные недостатки, однако существенно снижает производительность процесса. С этой точки зрения нахождение способов максимально возможного повышения форвакуумного давления в реакционном объеме с сохранением его однородности и управляемости является весьма продуктивным направлением в разработке плазменных технологий. Решению проблемы получения биосовместимых полимерных материалов за счет использования гибридной плазмы и посвящена диссертационная работа Аунга Мьята Хеина, что обуславливает ее **актуальность**.

Отличительной особенностью подхода, предложенного автором в диссертационной работе, является успешная попытка применить плазму, генерируемую совместным воздействием на плазмообразующую среду нескольких ионизаторов (так называемую гибридную плазму), для плазмохимической модификации полимеров. Такой способ генерации плазмы до сих пор применяется очень редко, а сама гибридная плазма практически не изучена. Следует также отметить, что исследований по модификации полимеров в гибридной НТП к моменту начала диссертационной работы не было, а сама постановка задачи получения биосовместимых полимерных материалов посредством воздействия гибридной НТП является нетрадиционной для плазмохимии. Сказанное выше позволяет сделать вывод, что защищаемая работа обладает несомненной **научной новизной**.

Диссертационная работа имеет несомненную **практическую значимость**, поскольку получаемые в гибридной НТП биосовместимые высокомолекулярные материалы и изготовленные из них изделия могут быть использованы для решения многих задач имплантационной хирургии и стоматологии. Разработанная автором методика плазмохимической функционализации полимеров в гибридной плазме может быть полезна и для создания антимикробных покрытий, получения тканевых матриц, культуральных пластиков.

**Достоверность** полученных результатов и обоснованность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывают сомнений и подтверждается тщательной отработкой методик проводившихся экспериментов, применением современного диагностического и аналитического оборудования, а также апробацией результатов работы на научных конференциях и семинарах и наличием публикаций в авторитетных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных РИНЦ, Scopus, Web of Science.

**Личный вклад** автора достаточно весом: диссертантом проделана большая экспериментаторская работа по изучению способов генерации и техники диагностики гибридной НТП в условиях, когда плазменная



обработка применяется для обработки термолабильных полимерных материалов с целью повышения их биосовместимости.

Подробный анализ отечественных и зарубежных литературных данных, проведенный автором в **1 главе**, показывает, что развитие плазмохимических методов обработки и модификации материалов происходит по пути интенсификации использования уже хорошо изученной плазмы газовых разрядов различных частотных диапазонов и давлений. В своей работе автор исследовал технологические возможности НТП другого типа, а именно плазмы возбуждаемой инъекцией пучка высокоэнергетических электронов в область ВЧ-разряда. Предложенный диссертантом подход к функционализации полимеров является перспективным, т.к. гибридная плазма обладает чрезвычайно важными дополнительными преимуществами – возможностью практически безинерционного управления свойствами и геометрией реакционного объема с помощью электронного пучка, высокой устойчивостью реакционного объема к контракции при повышении давления. К преобладающим в газоразрядной плазме химически активным возбужденным частицам добавляются и активные ионы, в значительных концентрациях нарабатываемые в газе электронным пучком. В гибридной НТП возможно также образование новых частиц, которые возникают только при комбинированном воздействии ВЧ-разряда и пучка электронов.

В качестве материалов для модификации в гибридной плазме автор выбрал часто используемые в медицине полимеры – полиметилметакрилат (ПММА) и силиконовые резины. Диссертантом были отработаны адекватные методики исследования структуры и свойств поверхностей этих полимеров, изменяющихся в результате их модификации в гибридной плазме. Подробному описанию этих методик, а также обоснованию постановки экспериментов посвящена значительная часть **главы 2**. В этой же главе дается вполне убедительное обоснование выбора в качестве плазмообразующих сред кислорода и гексафторида серы.

Конструкция гибридного плазмохимического реактора, работа его отдельных подсистем, включая диагностический комплекс, блок автоматического управления параметрами электронного пучка и плазмообразующей среды, а также их интеграция в единую плазмотехническую систему подробно описаны в **главе 3**. Важно отметить, что реактор создавался под конкретную технологическую задачу – целенаправленное управление свойствами и биологической активностью полимерных материалов плазмохимическими методами. Успех в решении этой задачи достигнут за счет того, что в предложенном диссертантом гибридном реакторе могут быть реализованы различные процессы плазмохимической обработки полимеров: их активация, формирование поверхностных химически активных группировок, синтез и осаждение покрытий. Отработка реактора и оптимизация режимов модификации полимеров проведена диссертантом во множестве экспериментов.

Кроме того, Аунг Мьят Хеин выполнил компьютерное моделирование процессов, происходящих в реакционном объеме плазмохимических



реакторов, что позволило, во-первых, снизить трудоемкость экспериментальных исследований, а во-вторых, повысить достоверность полученных результатов и их воспроизводимость. Методика моделирования и результаты вычислительных экспериментов представлены в **главе 4**. Убедительно показано, что оптимизация рабочего процесса в реакторе требует системной увязки характеристик электронной пушки, источника ее высоковольтного питания, выводного окна и ряда вспомогательных систем, в первую очередь системы сканирования электронного пучка и системы автоматического управления давлением и составом плазмообразующей среды.

На основе проведенного компьютерного моделирования и последующей экспериментальной верификации его результатов автором были предложены способы позиционирования зоны плазмохимического воздействия на поверхности изделий сложной формы и способы управления температурой поверхности в этой зоне, что крайне важно для достижения однородности при обработке материалов и предотвращения их радиационного и/или термического повреждения.

Как было отмечено выше, свойства самой гибридной плазмы практически не изучались. Вместе с тем такие характеристики, как компонентный состав плазмы, локализация энерговыведения в реакционном зоне, оказывают существенное влияние на свойства получаемых в результате модификации материалов. Экспериментальные результаты масс- и оптической спектроскопии реакционного объема приводятся в **главе 5**. Показано, что инжекция электронного пучка значительно расширяет диапазон рабочих давлений реакторов гибридного типа: ВЧ-разряд в воздухе остается стабильным и достаточно однородным при повышении давления плазмообразующего газа вплоть до 10 Торр. Также автором на модельной смеси  $O_2+N_2+Ar$  был показан синергизм действия электронного пучка и ВЧ-разряда. Полученные данные можно рассматривать как самостоятельный фундаментальный результат диссертационной работы. Обнаруженное диссертантом явление синергизма действия двух различных ионизаторов вполне вероятно позволит получить уникальные по своим свойствам полимерные поверхности, которые невозможно сформировать, используя только электронно-пучковую или только газоразрядную НТП.

Таковыми свойствами, крайне важными для использования полимерных материалов (особенно в медицине и биологии), являются их гидрофильно-гидрофобные характеристики (**глава 6**). С этой точки зрения несомненное достоинство работы – подробное исследование смачиваемости полимеров, модифицированных в гибридной НТП кислорода или гексафторида серы. Диссертантом были найдены условия обработки современных высокомолекулярных материалов, обеспечивающие существенное повышение гидрофильности или гидрофобности (в зависимости от желаемого результата) их поверхности, изучена связь условий плазменной обработки материалов с такими параметрами как краевой угол смачивания и свободная поверхностная энергия. В **главе 6** также приведены результаты



биологических исследований (на культурах клеток, а также с привлечением клинических испытаний) полимеров, модифицированных в гибридной НТП. Эти результаты убедительно демонстрируют повышение биосовместимости использовавшихся в работе полимеров в результате плазмохимической модификации. Автором были получены изделия из стоматологических ПММА-пластмасс, биосовместимые со слизистой оболочкой ротовой полости, а также силиконовые резины, обладающие повышенной тромборезистентностью. Это указывает на то, что диссертанту удалось достигнуть цели своего исследования.

Тем не менее, следует указать на некоторые недостатки диссертационной работы.

- 1) В предложенной автором модели воздействия электронно-пучковой плазмы на вещество, приводящего к появлению у обрабатываемых материалов новых биологических свойств, делается попытка совместно учесть наработку химически активных частиц в плазме и реакции в поверхностных слоях материала. Однако, при этом не принимается во внимание наработка частиц из газов, адсорбированных материалом, и газов, выделяющихся из материала при его облучении быстрыми электронами, например, за счет деструкции полимера, сопровождающейся газовой выделением.
- 2) Остался до конца не изученным вопрос, что определяет приобретенную биологическую активность изученных в работе плазменно-модифицированных материалов: изменение структуры поверхности, или плазмохимические превращения в поверхностном слое материала.
- 3) Автором достаточно подробно обсуждаются преимущества гибридной НТП перед электронно-пучковой плазмой с точки зрения повышения гидрофильности полимерных материалов. Однако сравнение гидрофильных свойств полимеров, модифицированных в гибридной плазме и плазме ВЧ-разряда не приводится. Следовало бы четко сформулировать преимущества гибридной НТП в этом контексте.

Перечисленные замечания не ставят под сомнение основные научные положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации; они не снижают научной и практической значимости полученных автором результатов и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы.

Результаты диссертации **опубликованы** в авторитетных научно-технических журналах и докладывались на представительных научных конференциях и семинарах. Работа хорошо оформлена, подбор иллюстраций способствует легкому восприятию и пониманию излагаемого материала. Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Аунга Мьята Хеина "Гибридная плазма газовых смесей как инструмент комбинированного воздействия на

полимерные материалы с целью повышения их биосовместимости" соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

Профессор, доктор технических наук (05.27.06),  
профессор кафедры "Радиоэлектроника,  
телекоммуникации и нанотехнологии"  
ФГБОУ «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
125993 г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
+7(495)915-57-19, [vm\\_e@mail.ru](mailto:vm_e@mail.ru)  
Елинсон Вера Матвеевна

Подпись Елинсон Веры Матвеевны заверяю

