

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Хмельницкой Алины Гайфетдиновны
«Синтез поли(диметил)(метилвинил)силоксанов в активной среде, их модификация
тиолами и композиции на их основе»

представленной на соискание ученой степени кандидата химических наук по
специальности 1.4.7 - Высокомолекулярные соединения (химические науки)

Тема диссертационного исследования посвящена разработке «зеленых» методов синтеза функциональных полиорганосилоксанов и созданию на их основе материалов для диэлектрических эластомерных актуаторов (ДЭА). **Актуальность** работы обусловлена растущим интересом к бесхлорным методам синтеза силиконов, что соответствует современным экологическим тенденциям, а также, и вероятно в первую очередь, весьма актуальна потребность в функциональных полимерных материалах с управляемыми свойствами для применения в мягкой робототехнике, гибкой электронике и других областях. **Практическая значимость** диссертационной работы заключается в изучении возможностей получения высокотехнологичного устройства - диэлектрического эластомерного актуатора (ДЭА) с улучшенными диэлектрическими и механическими характеристиками, способного работать при низких напряжениях. Не вызывает сомнения **научная новизна** рассматриваемой диссертационной работы. Автор убедительно обосновывает выбор темы, подчеркивая ограниченность существующих методов получения винилсодержащих полисилоксанов и большой потенциал их модификации с помощью реакции тиол-ен присоединения для получения новых силиконовых материалов с необходимым комплексом свойств.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов, списка литературы и приложений. Общий объем — 154 страницы, включая 63 рисунка, 19 таблиц и 181 ссылку. Структура работы логична и соответствует стандартным требованиям к научным исследованиям.

Во **Введении** хорошо обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования. Определена научная новизна, включая разработку новых методов синтеза и модификации функциональных полисилоксанов как линейного, так и

микроделевого строения. Показаны теоретическая и практическая значимость работы, а также результаты, выносимые на защиту. Ясность формулировок и логичность изложения вводят в область исследования, и позволяют оценить ценность осуществленной работы.

В Литературном обзоре, который составляет первую главу, проведен глубокий анализ имеющихся методов синтеза винилсодержащих полиорганосилоксанов, включая гидролитическую поликонденсацию и полимеризацию с раскрытием цикла. Особое внимание уделено рассмотрению разработанного ранее синтетического подхода с использованием реакции гидролитической поликонденсации органоалкоксисиланов в «активной среде», как наиболее эффективному и управляемому способу синтеза винилсодержащих полиорганосилоксанов. Рассмотрены современные подходы к модификации винил-содержащих метилсилоксанов различного строения полярными группами. Большой интерес вызывает раздел литературного обзора, посвященный применению метилсилоксановых полимеров в устройствах диэлектрических актуаторов, рассмотрены как их преимущества, так и ограничения их использования, а также и альтернативные методы оптимизации свойств полисилоксановых диэлектрических эластомеров. Суммируя литературный обзор, автор убедительно показывает, что наиболее перспективным направлением в создании эластомерных композиций для ДЭА является создание ПДМС/MQ-композиций. При этом поликонденсация алкоксисиланов в активной среде позволяет наиболее эффективно регулировать структуру, состав и молекулярно-массовые характеристики компонентов ПДМС/MQ.

Отдельного внимания заслуживает публикация проведенного литературного анализа в части, касающейся диэлектрических эластомерных актуаторов и применения полиорганосилоксанов в качестве основы ДЭА, в качестве литературного обзора в высокорейтинговом журнале «Успехи химии», что подтверждает высокую квалификацию Хмельницкой А.Г. в области проводимых исследований.

В Экспериментальной части, представляющей собой 2ую главу диссертации, подробно описаны методики получения линейных и MQ-сополимеров, способы их модификации, а также получение композиций на их основе. Все соединения

проанализированы комплексом современных физико-химических методов, таких как ЯМР, ГПХ, ТГА, ДСК, ИК-спектроскопия, СЭМ и др.

В 3 главе **Обсуждение результатов** рассматриваются как результаты синтетических исследований, так и результаты создания актуатора на основе полученных соединений. Показано, что сополиконденсация метилвинилдиметоксисилана и диметилдиэтоксисилана в активной среде приводит к получению поли(диметил)(метилвинил)силоксанов с заданным содержанием винильных групп, статистически распределенных по цепи. Кроме того, данный метод показал свою эффективность при получении винилсодержащих MQ-сополимеров с регулируемым содержанием винилди(метил)силильных звеньев. Обращает на себя внимание тщательность анализа полученных микрогелевых структур, что является нетривиальной задачей, с использованием современных спектральных методов. Убедительно показано, что сополиконденсация в активной среде позволяет регулировать содержание винилфункциональных групп и М- и Q-звеньев в структуре MQ-сополимеров.

Важно, что метод рассматривался с учетом возможного масштабирования процесса.

Далее исследовалась химическая модификация тиолами различного строения поли(диметил)(метилвинил)силоксанов и винилсодержащих MQ-сополимеров. Показано, что модификация проходит полностью, и был получен ряд серусодержащих сополимеров с регулируемым содержанием модифицированных звеньев.

Важным результатом является демонстрация влияния минимальных количеств серусодержащих MQ- и ПДМС-сополимеров при получении композитов на основе высокомолекулярного ПДМС на диэлектрические свойства материала. Это свидетельствует о практической перспективности синтезированных сополимеров.

Несомненным достоинством работы является доведение синтетического исследования до создания действующего устройства и серьезного изучения его характеристик на последнем этапе. Были сконструированы актуаторы двух типов, причем использовали для сравнения немодифицированный композит и выбранные модифицированные составы. Важнейшим результатом является снижение рабочих

напряжений для деформации актуатора при введении серусодержащих соединений в состав молекулярных композитов.

Существенных недостатков в работе не обнаружено. Диссертация хорошо оформлена, содержит хороший иллюстративный материал.

В качестве **замечаний** можно отметить следующее:

1. При большой работе по введению различных серусодержащих групп в структуру метилсилоксанов нет сформулированного вывода о преимуществах и недостатках каждого из них.

2. Есть ряд опечаток в работе, на стр. 73 рис. 20 не хватает функциональных винильных групп у исходного метилвинилдиметоксисилана; стр. 76, рис. 24 в соотношениях звеньев не дописана последняя цифра, рис. 25 формула блокированного продукта не содержит триметилсилильные звенья; стр. 80 в последнем столбце таблицы 8, по всей видимости, перепутаны местами звенья.

Несмотря на отдельные замечания, диссертация заслуживает высокой оценки. Это профессиональное, логически выстроенное исследование, а достоверность результатов свидетельствует о высоком уровне диссертанта.

Таким образом, представленная работа Хмельницкой Алины Гайфетдиновны «Синтез поли(диметил)(метилвинил)силоксанов в активной среде, их модификация тиолами и композиции на их основе» представляет собой самостоятельное, законченное научное исследование, в котором решена научная проблема, имеющая как теоретическое, так и прикладное значение. Автор демонстрирует глубокие профессиональные знания, владение современными экспериментальными методиками, умение ставить цели и получать новые, научно обоснованные результаты. По новизне, научной и практической значимости, объему и полученным результатам работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 01 января 2025 г.), а ее автор Хмельницкая А.Г. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.7 – Высокомолекулярные соединения (химические науки).

Официальный оппонент

Лахтин Валентин Георгиевич

28.11.2025

доктор химических наук (02.00.08 - «Химия элементоорганических соединений»),
ведущий научный сотрудник Лаборатории «Композиционных материалов и особо
чистых компаундов» Государственного Ордена Трудового Красного Знамени научно-
исследовательского института химии и технологии элементоорганических
соединений» (АО «ГНИИХТЭОС»)

e-mail: vlachtin@rambler.ru

Акционерное общество «Государственный Ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических
соединений». Адрес: 105118, Россия, г. Москва, ш. Энтузиастов, 38. E-mail: info@eos.ru;
тел.: 8 (495) 673-79-46, сайт организации <http://www.eos.su>.

Подпись доктора химических наук, ведущего научного сотрудника Лахтина Валентина
Георгиевича  заверяю,

Ученый секретарь

ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»



Н.И. Кирилина

М.П.

«28» 11. 2025 г.