

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по науке
РХТУ им. Д.И. Менделеева
д.х.н., профессор Р.А. Козловский

« 22 » сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Светоотверждаемые уретан(мет)акрилатные композиции для технологии фотополимеризации в ванне» по научной специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки) выполнена на кафедре химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Руденко Юрий Геннадьевич, «28» июля 1999 года рождения, обучался в аспирантуре на кафедре химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» Срок обучения – с 01 сентября 2022 года по 31 августа 2026 года.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2026 году.

Научный руководитель – кандидат химических наук по специальностям: 02.00.13 – Нефтехимия, 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения, доцент кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Чапала Павел Петрович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Светоотверждаемые уретан(мет)акрилатные композиции для технологии фотополимеризации в ванне» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что фотополимеризация в ванне – одна из наиболее значимых технологий аддитивного производства, которая позволяет получать изделия сложной геометрии с высокой точностью и хорошей воспроизводимостью, что в свою очередь обусловило широкое применение технологии в прототипировании,

стоматологии, медицине, ювелирной промышленности, а также других отраслях.

Наиболее распространёнными материалами для фотополимерной 3D-печати являются светоотверждаемые композиции, проявляющие жёсткие и ударопрочные свойства, применяемые для функционального прототипирования и изготовления медицинских изделий, где дополнительное значение приобретают высокая биосовместимость, стабильность состава и предсказуемость свойств после печати и постобработки.

Вместе с тем развитие технологии требует расширения спектра доступных материалов, включая гибкие, эластичные и мягкие системы. Особый интерес представляет разработка светоотверждаемых материалов для получения мягких изделий, которые одновременно обладали бы низкой твёрдостью, высокой прочностью при растяжении и способностью к самозалечиванию. Несмотря на существующие примеры изготавливаемых гибких изделий методом фотополимеризации в ванне, задача создания действительно мягких материалов остаётся нерешённой в полной мере.

С развитием материалов совершенствуются и технологические подходы к повышению производительности фотополимеризации в ванне: увеличение мощности источников излучения, изменение спектрального диапазона отверждения, повышение механической скорости перемещения платформы, оптимизация толщины слоя и режимов экспонирования. Все эти технологические подходы направлены на увеличение скорости печати. Однако увеличение скорости печати может сопровождаться неполным отверждением, ростом внутренних напряжений, ухудшением межслойной адгезии и изменением конечных механических свойств изделия. Ключевую роль в рецептуре светоотверждаемых композиций для 3D-печати занимают олигомеры. Именно их функциональность и молекулярная масса определяют фундаментальные физико-химические и реологические свойства как самой жидкой композиции, так и комплекс эксплуатационных характеристик конечного изделия, формируемого в процессе 3D-печати. Направленный синтез олигомеров позволяет получать светоотверждаемые композиции с заданным комплексом свойств.

В связи с этим оптимизация состава светоотверждаемых композиций для фотополимеризации в ванне должна рассматриваться совместно с их параметрами печати и постобработки. Таким образом, актуальными направлениями являются синтез новых олигомеров для создания светоотверждаемых композиций для фотополимерной 3D печати и оптимизация как технологических (реологических, реакционной способности), так и эксплуатационных свойств светоотверждаемых составов на их основе.

Научная новизна заключается в следующем:

Установление закономерностей влияния химической структуры уретан(мет)акриловых и уретанмочевинметакриловых олигомеров, фотоинициирующих систем и параметров фотополимеризации на свойства (физико-механические, цитотоксичность, точность) светоотверждаемых композиций, предназначенных для фотополимеризации в ванне.

Показано, что направленное изменение структуры уретанакриловых олигомеров за счёт варьирования акриловой функциональности, введения инертных низкомолекулярных фрагментов и использования различных изоцианатов позволяет целенаправленно регулировать вязкость, реакционную способность олигомера, а также конверсию двойных связей, температуру стеклования, физико-механические характеристики отверждённого материала на его основе.

Показана возможность использования *трет*-бутиламиноэтилметакрилата (*m*-БАЭМА) в качестве эффективного блокирующего агента изоцианатных групп. Выявлена роль *m*-БАЭМА в формировании материалов с выраженным эффектом самозалечивания за счёт способности к ретро-реакции стерически-затруднённых производных мочевины.

Установлено, что формирование взаимопроникающих полимерных сеток при взаимодействии изоцианатных групп с агентами удлинения цепи является эффективным способом повышения прочности и регулирования физико-механических характеристик эластичных материалов.

Установлено, что критическая энергия фотополимеризации (E_c) и глубина проникновения (D_p) зависят от интенсивности излучения. Показано, что изменение длины волны источника света с 385 до 405 нм приводит к изменению E_c и D_p вследствие различий в спектральном перекрытии поглощения фотоинициаторов, пигментов и других компонентов с излучением источника света.

Впервые систематически показано влияние интенсивности излучения и температуры процесса фотополимеризации на конверсию двойных связей, присутствующих в строении олигомера, и прочностные свойства изделий на основе уретанакриловых светоотверждаемых материалов.

Установлено, что увеличение интенсивности света при постоянной энергетической дозе может приводить к снижению конверсии двойных связей, тогда как повышение температуры способствует её увеличению.

Впервые изучен широкий ряд коммерчески-доступных ацилфосфиноксидных фотоинициаторов, применяемых для фотополимеризации в ванне. Показано, что строение и концентрация фотоинициатора влияет на цитотоксичность, точность печати и реакционную способность композиций.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в создании комплексных подходов в разработке светоотверждаемых композиций для VPP с регулируемыми технологическими и эксплуатационными свойствами. Показано, что варьирование структуры и функциональности уретанакриловых олигомеров, а также введение инертных фрагментов позволяют управлять вязкостью, реакционной способностью исходной светоотверждаемой композиции, физико-механическими свойствами изделий, что может быть использовано при разработке новых материалов для 3D-печати.

Разработаны композиции на основе олигоуретанмочевинметакрилатов, обеспечивающие получение эластичных материалов перспективных для изготовления мягких функциональных изделий методом VPP, отличающихся

повышенной прочностью, высоким относительным удлинением и эффектом самозалечивания.

Полученные данные о влиянии интенсивности излучения, температуры могут быть использованы для оптимизации режимов печати и постобработки, повышения точности получаемого изделия и конверсии двойных связей, улучшения механических свойств 3D-печатных изделий. Помимо этого, разработан экспресс-метод оценки точности напечатанных изделий.

Результаты исследования ряда фотоинициаторов позволяют обоснованно выбирать фотоиницирующую систему с учётом требований к точности печати, биосовместимости и реакционной способности, что важно при разработке светоотверждаемых материалов медицинского и инженерного назначения.

Внедрен на производстве светоотверждаемый материал HARZ Labs Dental Model Light Grey.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 11 научных работах, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2023, 2024, 2026), девятой всероссийской Каргинской конференции «Полимеры – 2024» (Москва, 2024), международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (с. Эльбрус, 2025), XI молодежной конференции ИОХ РАН к 165-летию со дня рождения академика А.Е. Фаворского (Москва, 2025).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. **Rudenko Yu. G.**, Lozovaya A. S., Asanova L. R., Fedyakova N. V., Chapala P. P. Light intensity influence on critical energy and penetration depth for vat photopolymerization technology // Progress in Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 553–561. – DOI: 10.1007/s40964-023-00474-z (Scopus).

2. **Rudenko Yu. G.**, Prosyankin E. E., Mustafina A. R., Fuki M., Borisov R. S., Fedyakova N. V., Bermeshev M. V., Chapala P. P. Investigation of the light intensity and temperature influences on double bond conversion in resins for vat photopolymerization via Fourier transform infrared spectroscopy // Macromolecular Chemistry and Physics. – 2025. – Vol. 226, No. 9. – 2400398. – DOI: 10.1002/macp.202400398 (Scopus).

3. **Rudenko Yu. G.**, Kozlov V. A., Burmistrov D. E., Fedyakova N. V., Bermeshev M. V., Chapala P. P. Comprehensive investigation of phosphine oxide photoinitiators for vat photopolymerization // Progress in Additive Manufacturing. – 2025. – Vol. 10. – P. 8405–8418. – DOI: 10.1007/s40964-025-01128-y (Scopus).

4. **Rudenko Yu. G.**, Fedyakova N. V., Bermeshev M. V., Chapala P. P. Oligourethane Urea Methacrylates Based on tert-Butylaminoethylmethacrylate for

Photopolymer 3D Printing // Polymer Science, Series B. – 2026. – Vol. 68, No. 2. – 8. – DOI: 10.1134/S1560090426600385 (Scopus).

5. **Rudenko Yu. G.**, Bazhanov D. A., Khasbiullin R. R., Shapagin A. V., Fedyakova N. V., Bermeshev M. V., Chapala P. P. UV curable urethane acrylates for 3D printing: the role of functionality and chemical structure in tuning viscosity, reactivity and mechanical properties // Progress in Additive Manufacturing. – 2026. – DOI: 10.1007/s40964-026-01741-5 (Scopus).

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

1. **Руденко Ю. Г.**, Федякова Н. В., Чапала П. П. Изучение влияния мощности УФ-излучения на параметры фотополимерной 3D-печати // ЛОМОНОСОВ–2023: материалы Международного молодежного научного форума [Электронный ресурс]. – М. : МАКС Пресс, 2023. – Секция «Химия». – С. 119. – ISBN 978-5-317-06952-0.

2. **Руденко Ю. Г.**, Просянкин Е. Е., Мустафина А. Р., Федякова Н. В., Чапала П. П. Влияние мощности УФ-излучения и температуры на конверсию фотополимерной композиции // ЛОМОНОСОВ–2024 : материалы Международного молодежного научного форума [Электронный ресурс]. – 2024. – Секция «Химия». – С. 88. – ISBN 978-5-901-64042-5.

3. **Руденко Ю. Г.**, Просянкин Е. Е., Мустафина А. Р., Федякова Н. В., Чапала П. П. Влияние мощности УФ-излучения и температуры на физико-механические свойства изделий на основе фотополимерного материала // Девятая Всероссийская Каргинская конференция «Полимеры – 2024» : сборник тезисов. – М., 2024. – С. 419.

4. **Руденко Ю. Г.**, Кланица В. А., Нарвидас К. Р., Федякова Н. В., Чапала П. П. Синтез олигоуретанметакрилатов с динамическими ковалентными связями и их применение в фотополимерной 3D-печати // XI Молодежная конференция ИОХ РАН : сборник тезисов докладов, 8–10 октября 2025 г. – М., 2025. – С. 190.

5. **Руденко Ю. Г.**, Кукушкина Е. А., Федякова Н. В., Чапала П. П. Синтез и исследование функциональных олигоуретанакрилатов для фотополимеризации в ванне // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: материалы XXI Международной научно-практической конференции. – Нальчик: Принт-центр, 2025. – С. 244. – ISBN 978-5-907951-46-4.

6. **Руденко Ю. Г.**, Нарвидас К. Р., Федякова Н. В., Чапала П. П. Влияние химической структуры уретанакрилового олигомера на свойства светоотверждаемой композиции и материала на его основе // ЛОМОНОСОВ–2026: материалы Международного молодежного научного форума, секция «Химия» [Электронное издание]. – М. : Издательство «Перо», 2026. – С. 916. – ISBN 978-5-00270-960-1.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов в части:

п. 1. Физико-химические основы технологии синтетических и природных полимеров, разработка рецептуры; процессы синтеза (в том числе нетрадиционные) в эмульсии, суспензии, процессы в расплаве и твердой фазе, очистка готового продукта и его характеристика.

п. 2. Полимерные материалы и изделия: пластмассы, волокна, каучуки, резины, пленки, покрытия, нетканые материалы, натуральные, искусственные и синтетические кожи, клеи, компаунды, композиты, бумага, картон, целлюлозные и прочие композиционные материалы, включая наноматериалы; свойства синтетических и природных полимеров, фазовые взаимодействия; исследования в направлении прогнозирования состав-свойства, технологии изготовления изделий и процессы, протекающие при этом; последующая обработка с целью придания специальных свойств; процессы и технологии модификации; вулканизация каучуков; сшивание пластмасс; фазовое разделение растворов; отверждение олигомеров.

п. 6. Полимерное материаловедение; методы прогнозирования и прототипирования; разработка принципов и условий направленного и контролируемого регулирования состава и структуры синтетических и природных полимерных материалов для обеспечения заданных технологических и эксплуатационных свойств; разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры; испытание и определение физико-механических и эксплуатационных характеристик синтетических и природных полимерных материалов и изделий; теоретические и прикладные проблемы стандартизации новых синтетических и природных полимерных материалов и технологических процессов их производства, обработки и переработки.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Руденко Юрия Геннадьевича является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Руденко Юрию Геннадьевичу; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Светоотверждаемые уретан(мет)акрилатные композиции для технологии фотополимеризации в ванне» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Диссертация рассмотрена на совместном заседании кафедры химической технологии пластических масс, кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий, кафедры технологии переработки пластмасс, состоявшемся «03» июня 2026 года, протокол № 1.

В обсуждении приняли участие:

Председатель комиссии, профессор кафедры химической технологии пластических масс, доктор химических наук, профессор, Киреев В.В.

Заместитель председателя комиссии, доцент кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий, кандидат химических наук, доцент, Нестерова А.Г.

Заведующий кафедрой технологии переработки пластмасс, доктор химических наук, профессор, Горбунова И.Ю.

Доцент кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий, кандидат химических наук, Солдатов М.А.

Профессор кафедры химической технологии пластических масс, доктор химических наук, доцент, Чистяков Е.М.

Секретарь комиссии, доцент кафедры технологии переработки пластмасс, кандидат технических наук, Калинина Н.К.

Принимало участие в голосовании 6 человек. Результаты голосования: «За» - 6 человек, «Против» - 0 человек, «Воздержались» - 0 человек, протокол № 1 от «03» июня 2026 г.

Председатель комиссии

В.В. Киреев

Секретарь заседания

Н. К. Калинина