«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального
исследовательского центра проблем
химической физики и медицинской химии
Российской академии наук
_____ Колотухина Е.В.
(подпись М. П)
15 января 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академик наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН) (142432, Московская обл., г, Черноголовка, проспект Академика Семенова, д. 1, адрес сайте: https://icp-ras.ru/)

Диссертация «Получение и свойства мономеров типа AB_2 и сверхразветвленных полимеров на основе 1,3,5-триазина» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.7 – «Высокомолекулярные соединения» выполнена в лаборатории полимерных резистов отдела полимерных и композиционных материалов ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Петров Артем Олегович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, в отделе полимерных и композиционных материалов, в лаборатории полимерных резистов в должности младшего научного сотрудника. В настоящее время работает в

отделе полимерных и композиционных материалов, в лаборатории полимерных резистов в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель в 2019 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности 04.05.01. «Фундаментальная и прикладная химия».

В 2019 – 2023 гг. соискатель прошел обучение в очной аспирантуре ФИЦ ПХФ и МХ РАН по направлению подготовки 04.06.01. «Химические науки». Соискателем сданы все кандидатские экзамены. Диплом об окончании аспирантуры № 105024 5887446 выдан 27 июня 2023 г.

Научный руководитель – Малков Георгий Васильевич, кандидат химических наук (02.00.06 «Высокомолекулярные соединения» и 02.00.04 «Физическая химия»), работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, отдел полимерных и композиционных материалов, в должности заведующего отделом.

По итогам обсуждения диссертации «Получение и свойства мономеров типа AB_2 и сверхразветвленных полимеров на основе 1,3,5-триазина» на заседании секции №5 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН принято следующее заключение:

Работа Петрова А.О. посвящена получению новых азидо-ацетиленовых мономеров типа AB_2 на основе 1,3,5-триазина, содержащих в своей структуре различные функциональные группы, синтезу сверхразветвленных полимеров на их основе и изучению физико-химических свойств полученных соединений и оценки перспективы их применения.

Актуальность темы

Разработка новых высокомолекулярных соединений для использования в различных областях деятельности человека является фундаментальной и важной задачей химической науки. Интерес представляют

сверхразветвленные полимеры (СРП), макромолекулы которых обладают статистически разветвленной пространственной структурой. Активное исследование этих полимеров обусловлено рядом уникальных свойств: лучшая, по сравнению с полимерами линейного и разветвленного строения, растворимость в органических растворителях и более низкая вязкость растворов; наличие в структуре полостей для инкапсулирования молекул-гостей; большое количество функциональных групп и возможность их модифицирования. Одним из широко применяемых подходов к образованию СРП является поликонденсация или полиприсоединение полифункциональных мономеров типа AB_n с использованием "клик" реакций, которые протекают быстро и количественно. Такой подход позволяет достаточно быстро получать и модифицировать полимеры в мягких условиях без риска гелеобразования вплоть до глубоких степеней превращения. Однако, данный подход требует разработки эффективных методов получения полифункциональных мономеров типа AB_n, которые не будут самопроизвольно вступать в реакцию образования полимера в ходе их синтеза и хранения.

Ранее были получены азидо-пропаргилоксидные мономеры типа AB_2 на основе 1,3,5-триазина, показана возможность образования триазин-триазольных СРП на их основе и показан положительный эффект при их использовании в качестве модифицирующих добавок к пластифицированным связующим. Разработка новых мономеров и СРП на их основе является важной задачей, позволяющей расширить класс триазин-триазольных сверхразветвленных полимеров, изучить влияние структуры мономера на процесс получения СРП, а также провести комплексный анализ свойств исследуемых соединений для выбора наиболее перспективных областей их практического применения.

Новизна и практическая значимость результатов работы

Научная новизна работы заключается в разработке эффективного подхода к получению азидо-ацетиленовых мономеров типа AB_2 на основе

1,3,5-триазина, содержащих в своей структуре азидные, пропаргилоксидные, пропаргиламинные и *N*-метилпропаргиламинные функциональные группы. На основе данных мономеров получены СРП по реакциям термоиндуцируемого и медь-катализируемого азидо-алкинового циклоприсоединения, исследованы кинетические особенности протекания процессов. Выявлены корреляции между структурными характеристиками полученных СРП и условиями получения полимеров. Данные результаты позволят в дальнейшем получать СРП с заданными свойствами для решения различных материаловедческих задач. Рассчитана энтальпия образования полученных соединений с помощью квантово-химических расчетов и оценены вклады различных функциональных групп в энтальпию образования данных соединений. Данные по вкладу азидных, пропаргилоксидных, пропаргиламинных и *N*-метилпропаргиламинных групп в энтальпию образования замещенных соединений 1,3,5-триазина могут быть использованы для оценки энтальпии образования других перспективных энергоемких соединений, содержащих эти группы и для прогнозирования их термодинамических характеристик. Проведено комплексное исследование физико-химических свойств полученных соединений в качестве компонентов конденсированных энергетических систем. Рассчитаны энергетические параметры процессов детонации, горения и адиабатического превращения как индивидуальных соединений, так и их композиций со связующим – изопреновым каучуком СКИ-3. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о перспективности использования полученных веществ в качестве компонентов ЭКС, в частности, в газогенерирующих составах. Исследована цитотоксичность и антибактериальная активность полученных соединений. Показано, что СРП не проявляют значительной токсичности и могут быть использованы в качестве основы для биосовместимых материалов в биомедицинских приложениях.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается путем выполнения работы с привлечением совокупности современных физико-химических методов анализа на оборудовании ФИЦ ПХФ и МХ РАН, публикацией результатов работы в виде статей в высокорейтинговых журналах, признанием работ лучшими на конференциях и школах молодых ученых (диплом за лучший устный доклад на конференциях «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные нанокомпозиты» (2018 г.), «Ломоносов 2017» (2017 г.), «Ломоносов 2018» (2018 г.)). Результаты работы подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, RSCI, в том числе относящихся к журналам К1 в классификации ВАК Минобрнауки РФ.

Материалы диссертационной работы докладывались на семинарах отдела полимеров и композиционных материалов и на конкурсе научных работ молодых ученых на соискание премии имени С.М. Батурина ФИЦ ПХФ и МХ РАН, а также на 24 международных и всероссийских научно-практических конференциях: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2016” (г. Москва, 2016 г.); VIII Всероссийской конференции "Энергетические конденсированные системы" (г. Черноголовка, 2016 г.); XXIV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов – 2017" (г. Москва, 2017 г.); Международной конференции “Modern trends in dendrimer chemistry and applications” (г. Москва, 2016 г.); XII международной конференции по химии и физикохимии олигомеров «Олигомеры 2017» (г. Черноголовка, 2017 г.); XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2018» (г. Москва, 2018 г.); VII Бакеевской Всероссийской с международным участием конференции

«Макромолекулярные нанообъекты и полимерные нанокомпозиты» (с. Красное, 2018 г.); Открытом конкурсе-конференции научно-исследовательских работ по химии элементоорганических соединений и полимеров "ИНЭОС OPEN CUP" (г. Москва, 2018 г.); 4-ом междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (г. Москва, 2018 г.); XV Международной научно-практической конференции "Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения" (п. Эльбрус, 2019 г.); Восьмой Всероссийской Каргинской конференции "Полимеры–2020" (г. Москва, 2020 г.); V Всероссийском молодежном научном форуме "Наука будущего – наука молодых" (г. Москва, 2020 г.); Всероссийской конференции "Боеприпасы. Конструкция, технология, испытания" (г. Самара, 2021 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых "Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов" (г. Бийск, 2021 г.); Всероссийской школе молодых ученых "Научные школы большой химической физики", (г. Черноголовка, 2021 г.); II Всероссийской научно-технической конференции «Боеприпасы. Конструкция, технология, испытания», памяти академика РАРАН В.В. Калашникова (г. Самара, 2022 г.); XVIII Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (п. Эльбрус, 2022 г.); VII Всероссийской конференции с международным участием «Техническая химия. От теории к практике» (г. Пермь, 2022 г.); Международной конференции по химии "Байкальские чтения-2023" (г. Иркутск, 2023 г.); XXXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов–2024" (г. Москва, 2024 г.); 9-ой всероссийской Каргинской конференции "Полимеры–2024" (г. Москва, 2024 г.); Международной конференции по химии и физикохимии олигомеров "Олигомеры XX" (г. Самара, 2024 г.); Всероссийской научно-технической конференции "Успехи в специальной химии и химической технологии" (г. Москва, 2025 г.); VI

Всероссийская научно-техническая конференция «Боеприпасы. Конструкция, технология, испытания» (г. Самара, 2026 г.).

Плановый характер работы

Исследования по теме диссертации проводились в рамках государственных заданий по тем. картам № FFSG-2024-0005 «Создание научных основ разработки новых энергетических конденсированных систем различного назначения (СТРТ, порохов, ВМ, пиротехнических составов) с заданными эксплуатационными и технологическими свойствами» (номер государственной регистрации 124020100045-5), № FFSG-2024-0012 «Разработка перспективных прототипов мишень-ориентированных лекарственных средств на основе малых молекул, синтетических полимеров и супрамолекулярных систем, изучение их физико-химических свойств, биологической активности и связи «структура-активность» (номер государственной регистрации 124020500019-2) и № FFSG-2024-0017 «Научные основы разработки инновационных полимерных материалов для биомедицины и микроэлектроники» (номер государственной регистрации 124020800013-7).

Часть полученных результатов была апробирована в результате выполнения гранта РФФИ (№ 16-29-01076 "Новые представители класса энергоемких гетероцепных полимеров ¬ сверхразветвленные поли(триазин-триазолы) как перспективные компоненты энергетических систем: синтез, модифицирование и свойства") и НИР (соглашение Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-15-2020-803 "Высокоэнергетические соединения как фундаментальная основа создания энергонасыщенных материалов и систем двойного назначения").

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

В ходе выполнения диссертации были опубликованы 8 печатных работ в журналах, рекомендованных ВАК, и 26 тезисов докладов,

опубликованных в сборниках тезисов всероссийских и международных конференций.

Статьи по результатам работы:

1. Petrov A.O. Kinetic Study of the Polyaddition of Azide-Alkyne AB2 Monomers in Nonisothermal Conditions / A.O. Petrov, G.V. Malkov, S.V. Karpov, A.V. Shastin, A.V. Bakeshko // Key Eng. Mater. – 2019. – Vol. 816. – P. 151–156. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.816.151.

2. Шастин А.В. Синтез азидопропаргиламинозамещенных 1,3,5-триазинов – новых мономеров для получения энергоемких полимеров / А.В. Шастин, А.О. Петров, Г.В. Малков, Т.Н. Гавришова // Химия гетероциклических соединений. – 2021. – Т. 57, № 7/8. – С. 866–870. – DOI: https://doi.org/10.1007/6262.

3. Karpov S.V. The Gaussian G4 enthalpy of formation of propargylamine and propargyloxy derivatives of triazido-s-triazine / S.V. Karpov, A.O. Petrov, G.V. Malkov, E.R. Badamshina // Mendeleev Commun. – 2022. – Vol. 32, N 3. – P. 338–340. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.05.015.

4. Petrov A.O. New non-symmetric azido-diacetylenic s-triazine monomer for polycycloaddition / A.O. Petrov, S.V. Karpov, G.V. Malkov, A.V. Shastin, E.R. Badamshina // Mendeleev Commun. – 2022. – Vol. 32, N 4. – P. 464–466. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.07.012.

5. Петров А.О. Расчет термохимических и детонационных параметров азидоацетиленовых производных s-триазина / А.О. Петров, С.В. Карпов, А.В. Даровских, А.С. Джалмуханова, Т.А. Пугачева, В.А. Гаранин, Д.Б. Лемперт, Л.С. Яновский, Г.В. Малков, Э.Р. Бадамшина // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59, № 6. – С. 42–51. – DOI: https://doi.org/10.15372/FGV2022.9234.

6. Komov E.V. Topochemical polymerization in microparticles of crystalline triazine-based monomers: Study by conventional and ultra-fast chip calorimetry / E.V. Komov, A.P. Melnikov, A.V. Maryasevskaya, A.O. Petrov, G.V. Malkov, A.V. Shastin, D.V. Anokhin, D.A. Ivanov // Thermochim. Acta. – 2023. – Vol. 728. – P. 179577. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179577.

7. Tsyganova A.V. Synthesis, Antibacterial Activity, and Cytotoxicity of Azido-Propargyloxy 1, 3, 5-Triazine Derivatives and Hyperbranched Polymers / A.V. Tsyganova, A.O. Petrov, A.V. Shastin, N.V. Filatova, V.A. Mumyatova, A.E.

Tarasov, A.V. Lolaeva, G.V. Malkov // Chemistry (Switzerland). – 2024. – Vol. 6, N 1. – P. 1–12. – DOI: https://doi.org/10.3390/chemistry6010001.

8. Волкова Н.Н. Кинетические закономерности высокотемпературных превращений азидоацетиленовых производных s-триазина / Н.Н. Волкова, А.О. Петров, А.Ф. Жолудев, М.Б. Кислов, Д.А. Черняев, Г.В. Малков, Э.Р. Бадамшина, Л.С. Яновский // Физика горения и взрыва. – 2025. – Т. 61, № 5. – С. 46–59. – DOI: 10.15372/FGV2024.9476.

Все статьи, выполненные в соавторстве, процитированы в диссертации в соответствии с п. 14 критериев Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., с учетом всех последующих изменений. Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах довольно полно изложены основные результаты работы. В работе [1] рассмотрена неизотермическая кинетика процесса полициклоприсоединения в блоке и предложен механизм протекания процесса (раздел 3.2). методы синтеза новых азидо-ацетиленовых мономеров типа AB_2, содержащих пропаргиламинные и *N*-метилпропаргиламинные функциональные группы (раздел 3.1). В работе [3] представлены значения энтальпии образования мономеров и СРП с помощью квантово-ыхимических расчетов (раздел 3.5). В работе [4] рассмотрен синтез несимметричного мономера типа AB_2 (раздел 3.1) и теоретическое исследование региомелективности реакции азид-алкинового циклоприсоединения мономеров (раздел 3.3). В работе [5] представлены результаты теоретического исследования процессов детонации, горения и адиабатического превращения мономеров (раздел 3.5). В работе [6] представлены данные сверхбыстрой нанокалометрии процесса полициклоприсоединения азидо-пропаргилоксидных мономеров в блоке (раздел 3.2). В работе [7] рассмотрена оптимизация методик получения азидо-пропаргилоксидных мономеров (раздел 3.1) и данные исследования цитотоксичности и антибактериальной активности мономеров и полимеров на

их основе (раздел 3.6). В работе [8] рассмотрен процесс горения мономеров в бескислородной среде и предложен механизм протекания процесса (раздел 3.5).

Ценность научных работ соискателя определяется получением новых азидо-ацетиленовых мономеров типа AB_2 и СРП на их основе, содержащих различные функциональные группы, изучением процессов получения полимеров и исследование физико-химических и функциональных свойств полученных соединений для оценки перспективы использования соединений в качестве компонентов энергетических конденсированных систем и в биомедицинских приложениях. По результатам комплексного анализа наиболее обоснованным и приоритетным направлением практического применения полученных соединений является их использование в качестве компонентов энергетических конденсированных систем, особенно в качестве компонентов газогенерирующих составов, что подтверждается сочетанием высокой энтальпии образования, термической стабильности и способности к стабильному горению в безкислородной среде. Биомедицинское применение, основанное на низкой цитотоксичности СРП, также рассматривается как перспективное, но требует дальнейших исследований для подтверждения эффективности и безопасности.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно провел анализ и систематизацию научных статей о СРП, методах их получения, в том числе с помощью клик-реакций. В ходе выполнения анализа литературы, автор проанализировал разные примеры клик-реакций, особенно азидо-алкинового циклоприсоединения. Также, особое внимание было уделено особенностям химических реакций производных 1,3,5-триазина, в частности, хлоридов, азидов и эфиров.

Соискатель принимал активное участие в разработке подходов к эффективному синтезу новых азидо-ацетиленовых мономеров типа AB_2 и оптимальных методов получения СРП с использованием термоиндуцируемых и медь-катализируемых реакций азид-алкинового циклоприсоединения.

Автором предложен механизм реакций полиприсоединения в блоке мономера, который теоретически обоснован с помощью квантово-химических методов расчета.

Соискателем самостоятельно выполнялся анализ полученных веществ с помощью методов ИК, УФ, ЯМР, ГПХ, ДСК и ТГА, а также интерпретация результатов. Были самостоятельно освоены и применены изоконверсионные подходы к расчету кинетических параметров процессов образования СРП в блоке, изучены особенности взаимодействия СРП с ионами меди в растворе. Автор принимал активное участие в систематизации и обработки результатов комплексного изучения процессов детонации, горения и адиабатического превращения синтезированных соединений.

Публикации по материалам, изложенным в диссертации, выполнены в соавторстве. В работах [1 – 8] соискателем проведены анализ литературных данных, синтез исследуемых соединений и металлосополимеров, участие в планировании и проведении экспериментальных исследований, обработка и интерпретация спектральных, термических, структурных, физико-химических и механических данных. Соискатель принимал участие в обсуждении результатов, формулировании основных выводов, подготовке первичных версий статей и их последующем редактировании.

Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки

Диссертация Петрова А.О. «Получение и свойства мономеров типа AB_2 и сверхразветвленных полимеров на основе 1,3,5-триазина» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены задачи по получению и исследованию новых азидо-ацетиленовых мономеров и СРП на их основе, установлению взаимосвязи между строением мономеров и кинетикой протекания процесса получения СРП, их физико-химическими и функциональными свойствами, а также оценке направления практического применения полученных соединений.

Работа соответствует паспорту специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения в п. 2 (Синтез олигомеров, в том числе специальных мономеров, связь их строения и реакционной способности. Катализ и механизмы реакций полимеризации, сополимеризации и поликонденсации с применением радикальных, ионных и ионно-координационных инициаторов, их кинетика и динамика. Разработка новых и усовершенствование существующих методов синтеза полимеров и полимерных форм), в п. 3 (Основные признаки и физические свойства линейных, разветвленных, в том числе сверхразветвленных, и сетчатых полимеров, их конфигурация (на уровнях: звена, цепи, присоединения звеньев, присоединения блоков) и конформация. Учет влияния факторов, определяющих конформационные переходы. Роль межфазных границ. Надмолекулярная структура и структурная модификация полимеров) и в п. 9 (Целенаправленная разработка полимерных материалов с новыми функциями и интеллектуальных структур с их применением, обладающих характеристиками, определяющими области их использования в заинтересованных отраслях науки и техники).

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Петрова Артема Олеговича «Получение и свойства мономеров типа AB_2 и сверхразветвленных полимеров на основе 1,3,5-триазина» соответствует всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. с учетом всех последующих изменений, применительно к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения.

Заключение принято на заседании секции №5 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН (протокол №1 от 25 декабря 2025 г.). Присутствовало на заседании 14 членов совета из 21. Результаты голосования: «за» – 14, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель секции № 5
Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
кандидат химических наук _____/Малков Г.В.

Секретарь секции № 5
Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
кандидат химических наук _____/ Файнгольд Е.Е.