

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Таратайко Андрея Игоревича

«Синтез альдонитронов и нитроксильных радикалов с флуоресцентными заместителями в составе молекулы», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.03 – органическая химия

Актуальность избранной темы. Нитроны и нитроксильные радикалы - важные с синтетической точки зрения классы органических соединений. Благодаря специфике химического строения, нитроны, в молекуле которых имеется реакционноспособный азометинноксидный фрагмент, являются ценными полупродуктами в органическом синтезе и вступают в разнообразные химические превращения. Наиболее значимыми из них являются реакции внутри- и межмолекулярного 1,3-диполярного присоединения, открывающие путь к широкому кругу труднодоступных ациклических и циклических азотсодержащих органических молекул. Среди других реакций следует отметить возможность химической трансформации нитронов при определенных условиях в нитроксильные радикалы. В свою очередь, нитроксильные радикалы, благодаря наличию в них неспаренного электрона, способны улавливать свободные радикалы в протекающих химических реакциях и поэтому перспективны в органическом синтезе как ингибиторы и регуляторы процессов полимеризации и прочих химических превращений. Способность нитроксильных радикалов подвергаться химической модификации без затрагивания нитроксильной группы открывает возможность синтеза широкого круга органических материалов с нитроксильной группой. Особого внимания заслуживают практически полезные свойства нитронов и нитроксильных радикалов. Нитроны известны как терапевтические агенты, спиновые ловушки в биологических исследованиях и светочувствительные материалы. Нитроксильные радикалы перспективны как светозащитные добавки к полимерам, компоненты электрохимических источников тока, реагенты в аналитической химии, тушители возбужденных молекулярных состояний. Одним из самых ценных свойств нитроксильных радикалов является их парамагнетизм, который может быть зарегистрирован методом ЭПР. Парамагнитные свойства нитроксильных радикалов - превосходный инструмент в экспериментальной химии для установления механизмов химических реакций, измерения их скоростей и изучения поведения молекул. Наиболее интересным является использование нитроксильных радикалов в молекулярной биологии, медицине и фармакологии для создания спин-меченых биологических макромолекул с целью изучения разнообразных биохимических и биофизических процессов, в том числе для исследования окислительно-восстановительных процессов в организмах. Введение в молекулу нитрона или нитроксильного радикала флуоресцентного заместителя дает возможность осуществлять мониторинг радикальных процессов флуориметрически: нитрон с флуоресцентным заместителем превращаясь в нитроксильный радикал дает падение интенсивности флуоресценции за счет ее тушения, а нитроксильный радикал с флуоресцентным заместителем, восстанавливаясь, наоборот - возрастание флуоресценции. При этом чувствительность данного метода становится существенно выше по сравнению с методом ЭПР, а сам он становится технически более простым. Диссертационное исследование Таратайко Андрея Игоревича нацелено на разработку методов синтеза ранее неизвестных нитронов и нитроксильных радикалов с флуоресцентными заместителями в молекуле - новых и перспективных инструментов изучения биохимических и биофизических процессов в живых системах. В этой связи, нет никакого сомнения, что тема представленной Таратайко Андреем Игоревичем работы является актуальной.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа написана в соответствии с общепринятыми правилами оформления кандидатских диссертаций по органической химии. Она состоит из оглавления, списка используемых сокращений названий современных физико-химических методов, органических растворителей, реагентов и органических функциональных заместителей, введения, обзора литературных данных, главы обсуждения результатов исследования, экспериментальной части, выводов и списка цитируемой литературы, включая публикации автора по теме диссертации. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 78 схем, 11 рисунков и 2 таблицы. Список литературы представлен 114 источниками.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулирована ее цель, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы. В нем приведена информация о публикациях по теме диссертации и об апробации работы на различных химических конференциях, краткие данные об объеме и структуре диссертации, личном вкладе автора в диссертационное исследование. Кроме того, в нем автор представил список благодарностей сотрудникам, оказавшим помощь при выполнении работы и благодарность своему руководителю - декану факультета естественных наук ФГБОУ ВПО Новосибирского национального исследовательского государственного университета профессору Резникову Владимиру Анатольевичу.

Литературный обзор посвящен методам синтеза профлуоресцентных нитроксильных радикалов, развитие путей получения которых является одной из задач диссертационной работы. Обзор состоит из шести самостоятельных разделов, в нем детально рассмотрены методы построения циклов, соед ржащих радикальный центр, описаны методы синтеза и свойства следующих соединений: профлуоресцентных радикалов - производных пиперидина, пирролидина, изоиндолина, имидазола, 2- и 3-имидазолина, имидазолидина и дано обоб-

щающее заключение. Он включает 76 зарубежных и отечественных литературных источников, содержит 58 химических схем и изложен на 31 страницах машинописного текста.

Глава "обсуждение результатов" построена из 8 самостоятельных разделов. Ее содержание посвящено поиску и разработке путей синтеза нитронов ряда пирролина и нитроксильных радикалов ряда пирролидина и имидазолидина, содержащих флуоресцентный заместитель, а также изучению флуоресцентных свойств некоторых полученных соединений.

Раздел 2.1. данной главы является вводным. В нем, на основании анализа литературных данных, автором предложено 4 подхода к синтезу альдонитронов - производных пирролин-1-оксида, имеющих в молекуле флуоресцентный заместитель. Результаты изучения возможности их реализации рассмотрены в разделах 2.2.-2.5. диссертации.

В разделе 2.2. оценена перспектива синтеза нитронов ряда пирролина путем присоединения замещенных нитроалканов с флуоресцентным заместителем к акролеину и последующего восстановления и циклизации образующихся аддуктов - 1,4-нитроальдегидов. Для реализации этого подхода предпринята попытка синтеза в качестве нитроалкана этилового эфира α -нитро-(1-нафтил)уксусной кислоты посредством нуклеофильной замены атома галогена на нитрогруппу в этиловом эфире α -бром-(1-нафтил)уксусной кислоты. Кроме того, изучено присоединение натриевых солей арил(циано)замещенных нитроалканов к акролеину и возможность циклизации образующихся при этом аддуктов - 4-арил-4-нитро-4-цианоакролеинов в ожидаемые нитроны. И хотя автору не удалось в обоих случаях достичь поставленной цели из-за неожиданных превращений на этапе получения аддукта - в первом случае и циклизации - во втором, результатом данного раздела диссертации является синтез ряда новых и ценных в синтетическом плане соединений.

Раздел 2.3. посвящен исследованию возможности синтеза альдонитронов пирролинового ряда путем модификации сложноэфирной группы 2-этоксикарбонил-2-метил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксида. Изучены реакция этого альдонитрона с избытком этилендиамина и возможность конденсации образующихся при этом моноамидов с 2,4-динитрофторбензолом и 5-диметиламинафталин-1-сульфонилхлоридом в основной среде. Результатом данного раздела работы является успешный синтез целевых нитронов - (2-(2,4-динитрофениламино)этил)амида и (2-(5-диметиламинафталин-1-сульфониламино)этил)амида 2-метил-1-окси-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-2-карбоновой кислоты, соответственно. Зафиксированы и изучены флуоресцентные свойства у нитрона, содержащего нафталиновое ядро в молекуле.

В разделе 2.4. представлены результаты изучения реакции 3,3,5-триметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксида с реактивами Гриньяра как возможного пути синтеза нитронов пирролинового ряда с флуоресцентным заместителем. Исследована возможность взаимодействия исходного альдонитрона с бензилмагнийхлоридом, 1-нафтилмагнийбромидом и (1-нафтил)метилмагнийхлоридом. Показано, что нафтилмагнийбромид не реагирует с альдонитроном, а в остальных случаях возможно получение аддуктов - циклических гидросиламинов, которые легко окисляются двуокисью марганца в ожидаемые альдонитроны - 2-бензил-2,4,4-триметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксид и 2-(1-нафтилметил)-2,4,4-триметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксид, соответственно. Выявлены и изучены флуоресцентные свойства у 2-(1-нафтилметил)-2,4,4-триметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксида.

В разделе 2.5. продемонстрирована возможность функционализации пирролиновых нитронов флуоресцентными заместителями, в основе которого лежит конденсация 3,3,5-триметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксида с ароматическими альдегидами в основной среде. Показано, что продукты этой конденсации кетонитроны - 5-(2-арилвинил)-3,3-диметил-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды могут быть далее трансформированы в целевые альдонитроны с флуоресцентным остатком двумя путями. Первый из них заключается в присоединении метиллития к соответствующим арилвинилкетонитронам, последующем гидролизе образующихся аддуктов в гидросиламины и их окислении двуокисью марганца в 2,4,4-триметил-2-(2-арилвинил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды. Второй - в каталитическом гидрировании арилвинилкетонитронов в 3,3-диметил-5-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды, присоединении к ним метилмагнийиодида, последующем гидролизе образующихся аддуктов в гидросиламины и их окислении двуокисью марганца в 2,4,4-триметил-2-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды. В качестве ароматических альдегидов на начальном этапе синтеза были выбраны нафталин-1-карбоксальдегид и его 4-метоксипроизводное, антрацен-9-карбоксальдегид и индол-3-карбоксальдегид. Обнаружены и изучены флуоресцентные свойства у всех 3,3-диметил-5-(2-арилвинил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов, у 2,4,4-триметил-2-(2-арилвинил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов с нафталиновыми и антраценовыми заместителями, а также 3,3-диметил-5-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов и у 2,4,4-триметил-2-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов с нафталиновыми ядрами.

Раздел 2.6 посвящен синтезу нитроксильных радикалов пирролинового ряда с флуоресцентным заместителем. Один из разработанных автором многоступенчатых способов основывается на присоединении этилмагнийбромида к ранее синтезированным кетонитронам - 3,3-диметил-5-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидам, гидролизе полученных аддуктов, последующем окислении полученных гидросиламинов двуокисью марганца в 2-этил-4,4-диметил-2-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды, дальнейшем присоединении к ним этилмагнийбромида, очередными гидролизом полученных аддуктов и их окислением двуокисью

марганца в 2,5-диэтил-4,4-диметил-2-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксиды. Полученные с нафталиновым и 4-метоксинафталиновым заместителями нитроны посредством присоединения к ним аллилмагниихлорида, гидролизом аддуктов и окислением соответствующих гидроксиламинов кислородом воздуха были превращены в целевые радикалы - 2-аллил-2,5-диэтил-3,3-диметил-5-(2-арилэтил)пирролидин-1-оксиды. Продемонстрированы возможность восстановления 2-аллил-2,5-диэтил-3,3-диметил-5-(2-(1-нафтил)-этил)пирролидин-1-оксида 9-борбицикло[3.3.1]нонаном в соответствующий гидроксилламин с 3-гидроксипропильным заместителем и его окисления кислородом воздуха в гидрофильный 2,5-диэтил-2-(3-гидроксипропил)-3,3-диметил-5-(2-(1-нафтил)этил)пирролидин-1-оксид. Показана перспектива применения реакций кислотного катализируемого электрофильного ароматического замещения для получения нитроксильных радикалов рассматриваемого ряда. Так, взаимодействием 5,5-диметилпирролин-*N*-оксида с *N*-метил-2-фенилиндолом в кислой среде получен 2,2-диметил-5-(1-метил-2-фенил-1*H*-индол-3-ил)пирролидин-1-ол, который был окислен двуокисью марганца в соответствующий нитрон. Дальнейшее присоединение к нему метиллития и гидролиз приводили к аддукту, окисляющемуся кислородом воздуха в 2,2,5-триметил-5-(1-метил-2-фенил-1*H*-индол-3-ил)пирролидин-1-оксид.

В разделе 2.7. продемонстрирована возможность синтеза нитроксильных радикалов ряда имидазолидина, содержащих флуоресцентный заместитель, модификацией нитроксильных радикалов имидазолинового ряда - путем превращения их в (*N*-метил)метилсульфатные соли действием диметилсульфата и последующего взаимодействия этих солей с 1-формил-2-гидроксиаренами. Из салицилового альдегида таким образом получены 2',2',3',5',5'-пентаалкилспиро[хромен-2,4'-имидазолидин]-1'-оксиды, а из 2-гидроксиафталин-1-карбоксальегида 2',2',3',5',5'-пентаалкилспиро[бензо[*f*]хромен-3,4'-имидазолидин]-1'-оксиды, соответственно. Показано, что метил(3-(1'-оксил-2',3',5',5'-тетраметилспиро[бензо[*f*]хромен-3,4'-имидазолидин]-2'-ил)пропионат подвергается обратимому фотопревращению из спиропирановой в мероцианиновую (открытую) форму. Обнаружена зависимость оптического спектра поглощения данного соединения от кислотности среды. Экспериментально подтверждено наличие эффективного тушения люминесценции в соединениях этого ряда.

В разделе 2.8. оценена перспектива синтеза профлуоресцентных радикалов - парамагнитных лигандов и металлорганических комплексов на их основе. Разработан способ получения (*Z*)-1-(9*H*-карбазол-9-ил)-2-(1-оксил-2,2,5,5-тетраметилимидазолин-4-илидин)этаната конденсацией 1-гидрокси-2,2,4,4,5,5-пентаметилимидазолина с *N*-((этоксикарбонил)метил)карбазолом, промотируемой литийдиизопропиламидом, с последующим окислением (*Z*)-1-(9*H*-карбазол-9-ил)-2-(1-гидрокси-2,2,5,5-тетраметилимидазолин-4-илидин)этаната кислородом воздуха. Из бромистой меди и роданида цинка синтезированы комплексы данного лиганда, содержащие две молекулы лиганда на атом металла. Изучены флуоресцентные свойства полученных комплексов.

Глава "обсуждение результатов" изложена на 35 страницах машинописного текста, содержит 20 схем и 11 рисунков.

В экспериментальной части диссертации приводятся методики синтеза новых соединений и некоторых полупродуктов и физико-химические доказательства их строения. Она написана на 36 страницах машинописного текста и содержит 2 таблицы с данными спектров флуоресценции и рентгеноструктурного анализа.

Выводы диссертации емко отражают основные результаты проделанной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации Таратайко Андрея Игоревича, не вызывает сомнения и подтверждается большим объемом проделанной работы и ее важными практическими результатами. Несмотря на то, что по теме диссертации опубликовано всего лишь 2 работы в рецензируемых журналах, автором получено достаточно большое количество новых соединений и экспериментальных данных. Ему удалось не только разработать различные способы получения широкого круга новых нитронов и нитроксильных радикалов, в том числе с флуоресцентными заместителями, но и исследовать флуоресцентные свойства некоторых соединений. При этом автор осуществил всестороннюю интерпретацию и сопоставление полученных результатов с имеющимися литературными данными. В работе использован широкий арсенал современных синтетических и физико-химических методов.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность результатов диссертации обеспечена использованием в ходе ее выполнения современных подходов и методов органического синтеза и передовых физико-химических методов. Для доказательства строения вновь полученных органических соединений автором использованы ЯМР¹H-, ЯМР¹³C- и ЭПР-спектроскопия, электронно-ионизационная масс-спектрометрия высокого разрешения, ИК-Фурье спектроскопия, а также данные рентгеноструктурного и элементного анализа. Кроме того, в процессе выполнения работы были подтверждены и изучены флуоресцентные свойства ряда полученных соединений.

Оценивая новизну исследования следует отметить его следующие основные результаты:

-Продемонстрирована возможность введения флуорофорного заместителя путем модификации входящей в состав молекулы пирролин-1-оксида сложноэфирной группы.

-Разработан метод синтеза флуоресцентных альдонитронов, основанный на взаимодействии гетероциклических нитронов с металлоорганическими соединениями, содержащими в своем составе флуоресцентный фрагмент.

-Синтезирован ряд новых флуоресцентных альдонитронов с использованием последовательности реакций конденсации кетонитронов с флуоресцентными альдегидами и взаимодействия с металлорганическими реагентами.

-Получены профлуоресцентные радикалы ряда пирролидина посредством взаимодействия нитронов с металлоорганическими соединениями, содержащими в своем составе флуоресцентный фрагмент с последующей функционализацией синтезированных радикалов.

-Синтезированы профлуоресцентные радикалы ряда пирролидина путем введения в состав молекулы нитрона флуорофора кислотно-катализируемой реакцией нитронов с донорными ароматическими субстратами по типу реакции Фриделя-Крафтса.

-Синтезирован ряд имидазолидиновых радикалов с фотохромным спиропирановым заместителем взаимодействием парамагнитных имидазолиниевых солей с салициловым альдегидом или с 2-гидроксинафталин-1-карбоксальдегидом и изучены их физико-химические свойства.

-Оценена перспектива синтеза ковалентно связанных профлуоресцентных радикалов – парамагнитных лигандов на основе карбазола и 2,2,4,5,5-пентаметиимидазолин-1-оксида и металлических комплексов меди и цинка на их основе. Показано, что при образовании хелатных комплексов профлуоресцентного радикала с ионами переходных металлов не происходит значимых изменений в квантовом выходе флуоресценции в отличие от того, как это отмечается в литературе.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов. Практическая и научная значимость полученных Таратайко Андреем Игоревичем результатов заключается в том, что им разработаны препаративно удобные способы получения следующих основных групп нитронов и нитроксильных радикалов, в том числе с флуоресцентным заместителем в молекуле: 2-этилзамещенных амидов 2-метил-1-окси-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-2-карбоновой кислоты, 2,4,4-триметил-2-(2-арилметил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов, 2,4,4-триметил-2-(2-арилвинил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов, 3,3-диметил-5-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов, 2,4,4-триметил-2-(2-арилэтил)-3,4-дигидро-2*H*-пиррол-1-оксидов, 2-аллил-2,5-диэтил-3,3-диметил-5-(2-арилэтил)пирролидин-1-оксидов, 2,5-диэтил-2-(3-гидроксипропил)-3,3-диметил-5-(2-арилэтил)-пирролидин-1-оксидов, 2,2,5-триметил-5-(1-метил-2-фенил-1*H*-индол-3-ил)пирролидин-1-оксидов, 2',2',3',5',5'-пентаалкилспиро[хромен-2,4'-имидазолидин]-1'-оксидов, 2',2',3',5',5'-пентаалкилспиро[бензо[*f*]хромен-3,4'-имидазолидин]-1'-оксидов и (*Z*)-1-(9*H*-карбазол-9-ил)-2-(1-оксил-2,2,5,5-тетраалкилимидазолин-4-илидин)-этаноатов. Выявлены и изучены флуоресцентные свойства у некоторых представителей перечисленных групп соединений.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Разработанные Таратайко Андреем Игоревичем пути синтеза альдонитронов и нитроксильных радикалов с флуоресцентными заместителями могут быть полезны для получения широко круга данных соединений – новых инструментов выявления и изучения радикальных процессов в живой и неживой природе. Кроме того, соединения такого строения перспективны как потенциальные органические, в том числе парамагнитные, лиганды, новые материалы для микроэлектронных устройств, антиоксиданты, биологически активные вещества.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности. Диссертационная работа Таратайко Андрея Игоревича является достойным продолжением и развитием работ в области химии азотистых соединений, проводимых на протяжении многих лет в Лаборатории азотистых соединений ФГБУН Новосибирского института органической химии им. Н.Н. Ворожцова. Это высококвалифицированное, цельное и завершенное исследование, выполненное на достойном экспериментальном и теоретическом уровне, объем которого соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по органической химии. Оно вносит ощутимый вклад в химию нитронов и нитроксильных радикалов. Автором синтезировано много новых соединений, преимущественно хорошими выходами. Очень важно отметить, что в ходе выполнения работы ему удалось преодолеть ряд больших синтетических препятствий, в ряде случаев отыскать альтернативные пути синтеза целевых соединений. По теме диссертации опубликованы 2 статьи в рецензируемых отечественном и зарубежном журналах и материалы на 3-х конференциях. Опубликованные материалы раскрывают и передают содержание диссертации. Автореферат отражает суть и выводы проделанной работы.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации. Диссертация написана в традиционном стиле, ее содержание изложено ясно. В ней использован грамотный и благозвучный русский язык. Важно отметить аналитический подход при написании литературного обзора и указание выходов соединений в химических схемах данного раздела. При изложении материала использована сквозная нумерация соединений. Работа выполнена и оформлена хорошо, содержит незначительное количество погрешностей, а уровень обсуж-

дения и качество полученных результатов не оставляют возможности для выявления каких-либо недостатков по существу. Все это свидетельствует о высокой научной квалификации Таратайко Андрея Игоревича. Вместе с тем считаю целесообразным высказать следующие небольшие замечания:

1. Во введении диссертационной работы основное внимание сосредоточено на роли нитронов и нитроксильных радикалов как инструментах анализа. На мой взгляд, введение нужно было дополнить информацией о роли этих соединений в органическом синтезе в целом.
2. В разделе 2.8. главы «обсуждение результатов» говорится о получении комплексов меди и цинка на основе синтезированного им органического лиганда. Вместе с тем в диссертации не приводятся методики синтеза и какие-либо доказательства строения этих комплексов.
3. В разделе 2.8. главы «обсуждение результатов» и в экспериментальной части диссертации не приведены полные номенклатурные названия соединений 258а-в и 259а-в.
4. В разделе 2.6. главы «обсуждение результатов» автором не сказано ни слова о флуоресцентных свойствах полученных им нитроксильных радикалов.
5. В списке литературы диссертации литературные источники пронумерованы почему-то цифрами, представленными верхним надстрочным шрифтом, что не общепринято.

Разумеется, эти замечания ни в коей мере не снижают ценности и значимости выполненной работы и положительного впечатления о ней.

Заключение

Таким образом, диссертация Таратайко Андрея Игоревича, представленная на соискание ученой степени кандидата химических наук, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи – разработка методов синтеза ряда новых альдонитронов и нитроксильных радикалов с флуоресцентными заместителями в составе молекулы, имеющей существенное значение для органической химии, что соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, пункты 9-14), а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 02.00.03 – органическая химия.

Официальный оппонент,
научный сотрудник,
кандидат химических наук
Лаборатории механизмов реакций
ФГБУН «Института химической
кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения
Российской академии наук»

Барабанов Игорь Иванович

e-mail: barabanov@kinetics.nsc.ru
рабочий телефон: +7(383) 333-13-78

22 сентября 2016 г

Ученый секретарь ФГБУН «Института химической
кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения
Российской академии наук»,
доктор физико - математических наук



Какуткина Наталья Александровна

ФГБУН «Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск, 630090, ул. Институтская, д. 3