

На правах рукописи



Минаев Дмитрий Сергеевич

ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНЫЕ СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЕЙ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.26.03-05 – Пожарная и промышленная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет инженерной экологии» (ФГБОУВПО «МГУИЭ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Клевлеев Валерий Медхатович.

Официальные оппоненты: – доктор физико-математических наук, профессор
Дубовик Александр Владимирович
(Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева, г. Москва);
– доктор технических наук, профессор
Павловец Георгий Яковлевич
(Военная академия РВСН имени Петра Великого,
г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Красноармейский научно-
исследовательский институт механизации»
(ФГУП «КНИИМ»), г. Красноармейск.

Защита состоится 15 декабря 2011 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.15 при РХТУ им. Д.И. Менделеева (125480 г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20) в конференц-зале ректората.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан 14 ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.15

А.Я. Васин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы.

Нарастающие темпы развития нанотехнологий и перспективы широкого применения наноразмерных веществ и материалов на их основе ставят одной из первоочередных задач идентификацию их пожаровзрывоопасности.

Известный факт значительного влияния размера частиц аэрозоли на восприимчивость к иницирующему импульсу и давление взрыва особенно остро ставит вопросы о том, будут ли высокодисперсные вещества опаснее и на сколько, можно ли обеспечить требуемый уровень безопасности технологических процессов получения и применения нанодисперсных веществ требованиями и классификациями действующих норм, подходят ли существующие методики для исследования нанодисперсных материалов и др. Потенциальная опасность аэрозолей наноразмерных частиц обусловлена возрастающей химической активностью вещества с увеличением удельной площади поверхности, возможностью быстрого перехода и долгого пребывания во взвешенном состоянии, а также возможным проявлением свойств, не присущих веществу в микродисперсном состоянии, по причине влияния «поверхностных» атомов на физико-химические свойства вещества, доля которых возрастает с уменьшением размера частиц.

Предпосылки к тому, что вещества на основе наночастиц будут опаснее микродисперсных, и отсутствие требований нормативно-регулирующей базы к безопасности применения нанодисперсных материалов делают особенно актуальными экспериментальные исследования пожаровзрывоопасных свойств веществ нанодисперсной фракции.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью оценки параметров пожаровзрывоопасности аэрозолей наноразмерных частиц, предположительно более опасных, чем микродисперсные.

Цель и задачи исследования.

Цель работы – определение показателей пожаровзрывоопасности ряда органических веществ в форме аэрозолей микро- и наноразмерных частиц и оценка восприимчивости к иницирующему импульсу и силы взрыва аэрозолей наночастиц.

В связи с этим, в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ факторов, оказывающих влияние на значения показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей твердых частиц и на характер зависимости показателей от размера частиц твердой фазы;
2. Разработать методику исследования пожаровзрывоопасных свойств аэрозолей наноразмерных частиц;
3. Экспериментально определить количественные значения показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей на основе наноразмерных и микроразмерных частиц веществ одной и той же партии, провести сравнительный анализ экспериментальных данных и дать научное обоснование режиму горения аэрозолей наноразмерных частиц;
4. Провести оценку требований действующих норм и правил промышленной и пожарной безопасности и разработать рекомендации по их выполнению для технологических объектов, связанных с обращением нанодисперсных систем.

Научная новизна работы:

– впервые экспериментально определены показатели пожаровзрывоопасности аэрозолей гидрохинона ($C_6H_4(OH)_2$), лактозы ($C_{12}H_{22}O_{11}$), резорцина ($C_6H_6O_2$) и уротропина ($C_6H_{12}N_4$) на основе наноразмерных частиц;

– научно обоснованы результаты полученных экспериментальных данных об изменении показателей взрыва, предложен режим горения аэрозвесей наноразмерных частиц;

– усовершенствована существующая методика экспериментального определения основных показателей взрыва аэрозолей микро- и наноразмерных твердых частиц, в том числе добавлены требования по определению средней скорости нарастания давления взрыва и оценке индекса пожаровзрывоопасности (K_{st} , МПа·м/с);

– проведена качественная и количественная оценка опасности нанодисперсных веществ, позволяющая расширить границы научных знаний о влиянии размера частиц на характер горения аэрозолей, а также даны рекомендации по повышению промышленной и пожарной безопасности технологических процессов, связанных с обращением аэрозолей наноразмерных частиц.

Практическая значимость работы:

– результаты экспериментального определения показателей пожаровзрывоопасности наноразмерных веществ могут быть использованы при составлении технологических регламентов, национальных стандартов, при классификации помещений и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, при классификации зон по взрывоопасности и пожарной опасности;

– количественная оценка опасности веществ в нанодисперсном состоянии позволит принимать рациональные и обоснованные решения при разработке мер обеспечения пожаро- и взрывобезопасности;

– модернизированная установка исследования показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей может быть рекомендована для применения, в том числе, в исследованиях пожаровзрывоопасных свойств наноразмерных материалов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Научной конференции студентов и молодых учёных МГУИЭ (Москва, 2009 г. и 2011 г.), на III Международном форуме по нанотехнологиям «Rusnanotech» (Москва, 2010 г.), на VIII Международной научно-практической конференции-выставке «Экологические проблемы промышленных мегаполисов» (Донецк, 2011 г.), на XXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24» (Пенза, 2011 г.).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано пять печатных работ, в том числе две статьи в журнале, рекомендованном ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 175 страницах машинописного текста, включает 64 иллюстрации, 15 таблиц и 84 библиографические ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, отражена научная новизна и практическая значимость исследования.

Глава 1 содержит обзор литературы по теме исследования. Рассмотрены особенности и последствия пылевых взрывов на основе статистики фактических аварий на производственных объектах химической, угольной, сельскохозяйственной промышленности. Обзор исследований, проведенных учеными по всему миру, позволил выявить перечень основных факторов и степень их влияния на пожаровзрывоопасность аэрозолей твердых частиц. Одним из наиболее значимых параметров пылевоздушной смеси является размер частиц дисперсной фазы. Как показал анализ литературы, установленная в настоящее время количественная оценка показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей твердых частиц касается исключительно порошков микродисперсной фракции, а значения, регламентированные нормативно-технической документацией, приняты без учета гранулометрического состава и отражают предельные значения показателей, необходимые для проведения расчетов и разработки мероприятий пожаровзрывозащиты на предприятиях, связанных с обращением аэрозолей микроразмерных частиц. Развитие нанотехнологий и перспективы широкого применения нанодисперсных веществ и материалов на их основе делают особенно актуальной задачу оценки изменения пожаровзрывоопасных свойств материалов в зависимости от их дисперсности. Проведенный обзор литературы показал отсутствие количественной оценки пожаровзрывоопасных свойств аэрозолей наноразмерных частиц. Теоретический анализ, построенный на изменении химической активности вещества с уменьшением размера, предпосылках того, что наноразмерные частицы проявляют уникальные отличные от микроразмерных частиц свойства вследствие большого влияния свойств поверхности и тенденции к увеличению пожаровзрывоопасности аэрозолей, обнаруженной в исследованиях фракций микродисперсного гранулометрического состава, позволяет предположить, что аэрозоли наноразмерных материалов легче воспламеняются и проявляют большую силу взрыва по сравнению с аэрозолями микродисперсных фракций. Логической задачей на пути к предотвращению взрывов нанодисперсных веществ, разработке рациональных и обоснованных превентивных мер обеспечения пожаровзрывобезопасности на производствах становится экспериментальная оценка показателей взрыва аэрозолей наноразмерных частиц, а именно максимального

давления взрыва ($P_{\max}$, кПа), максимальной и средней скорости нарастания давления взрыва $((dP/dt)_{\text{ср.}}$ и $(dP/dt)_{\max}$, МПа/с), нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР, г/м³), индекса пожаровзрывоопасности (K_{st} , МПа·м/с), которые и определены в данной работе.

На основании проведенного обзора литературы сформулированы задачи исследования диссертационной работы.

В главе 2 приведено описание объектов и методов их исследования. Определение пожаровзрывоопасных свойств аэрозолей микро- и наноразмерных частиц проводилось на модернизированной установке производства ФГБУ «ВНИИПО» (г. Балашиха) по существующей методике, изложенной в ГОСТ 12.1.044-89 и усовершенствованной в целях увеличения количества определяемых параметров и учета факторов, способных повлиять на достоверность полученных результатов экспериментальных исследований нанодисперсных фракций. Экспериментальная установка представляет собой стальной реакционный сосуд объемом 4,25 л с пневматической обвязкой, блоками измерения, записи, отображения и хранения данных, синхронизации процессов распыления и зажигания смеси. В качестве источника зажигания предусмотрена спираль накаливания с температурой 1050 ± 50 °С, расположенная в центре сосуда. Равномерное распределение дисперсной фазы аэрозоли по объему сосуда достигалось применением стандартизированной конструкции распылителя и форкамеры. Модернизация экспериментальной установки включила в себя замену датчика давления на быстродействующий преобразователь давления пьезорезистивного типа, компьютеризацию системы обработки, записи и хранения данных, а также замену ряда комплектного оборудования на современное более высокой точности и более широкого диапазона измерений. После модернизации работоспособность установки была подтверждена проверкой по эталонному веществу (ликоподию). Результатом замены оборудования, настройки программного обеспечения и переработки методики исследования стало уменьшение погрешности технических измерений, повышение удобства представления данных (в графическом и цифровом виде с дискретностью измерения по давлению 10 Па, по времени 1 мс) и расширение возможностей обработки

экспериментальных данных (автоматическое экспортирование данных в программный комплекс математического моделирования «MATLAB»).

Исследования проводились на аэрозолях органических взрывоопасных веществ (НКПР < 65 г/м³), представленных микро- и нанодисперсными фракциями, полученными из одного исходного (таблица 1).

Таблица 1. Средний размер частиц исследуемых фракций

Наименование органического вещества	Средний размер частиц		
	20-40 мкм	до 90 мкм	50-63 мкм
Ликоподий по ГОСТ 22226 (эталон)			
Лактоза C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	74 мкм		46 нм
Резорцин C ₆ H ₆ O ₂ по ГОСТ 9970	75 мкм		108 нм
Уротропин C ₆ H ₁₂ N ₄ по ГОСТ 1381	90 мкм		105 нм
Гидрохинон C ₆ H ₄ (OH) ₂ по ГОСТ 19627	76 мкм		128 нм

Пример гистограммы гранулометрического состава микродисперсного вещества представлен на рисунке 1, нанодисперсного – на рисунке 2. Нанодисперсные фракции веществ получали криохимическим методом – вакуумно-сублимационной сушкой предварительно кристаллизованного жидким азотом раствора. В процессе получения нанодисперсного вещества было выявлено уменьшение температуры плавления вещества по сравнению с данными для микродисперсных фракций, что согласуется с существующими экспериментальными и теоретическими исследованиями. Определение среднего размера нанодисперсной фракции проводилось в автоматическом режиме на сертифицированном приборе ДАС 2702 (диффузионный аэрозольный спектрометр).

Доля частиц, %

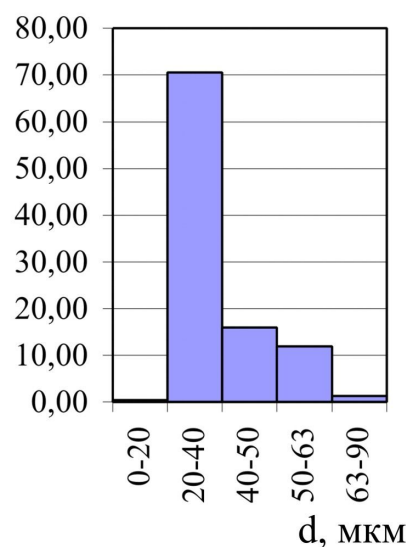


Рис. 1. Гранулометрический состав ликоподия фракции до 90 мкм

Основными условиями проведения экспериментов стало обеспечение системы распыления по ГОСТ 12.1.044-89, минимального допуска влажности веществ (до 1 %), подбора параметров синхронизации распыления и зажигания смеси (время открытия клапана 8,0 с, закрытия 8,3 с; время работы источника зажигания 9,0 с; время цикла 10,0 с; временной период регистрации 17,0 с).

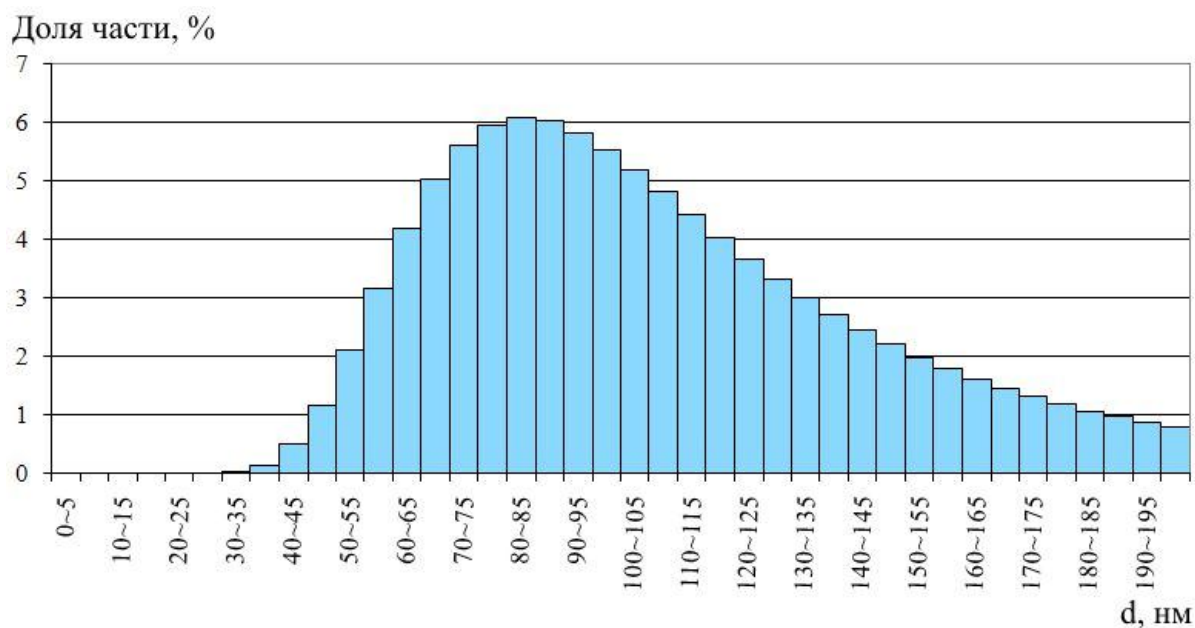


Рис. 2. Гранулометрический состав фракции наноразмерных частиц (на примере уротропина)

В главе 3 приведены результаты экспериментального определения показателей пожаровзрывоопасности микро- и нанодисперсных фракций лактозы, гидрохинона, резорцина, уротропина и трех микродисперсных фракций ликоподия. Для всех исследуемых веществ получены количественные значения показателей пожаровзрывоопасности. Проведено сравнение показателей для аэрозолей микро- и наноразмерных частиц, которое показало увеличение средней и максимальной скорости нарастания давления взрыва и нижнего концентрационного предела распространения пламени для фракций наноразмерных частиц; при этом максимальное давление взрыва осталось без изменений (на примере уротропина и резорцина, рисунки 3-10). Изменение показателей в процентном соотношении при уменьшении частиц с микро размеров до наноразмеров составило от 20 до 70 % (таблица 2).

Наибольшего внимания заслуживают результаты, полученные при испытании резорцина и уротропина, которые показали четкую зависимость увеличения НКПР (на 37 и 68 %, соответственно), $(dP/dt)_{\max}$ (на 39 и 22 %, соответственно), $(dP/dt)_{\text{ср}}$, (на 30 и 50 %, соответственно), что подтверждает выдвинутую гипотезу об увеличении указанных характеристик с уменьшением размера частиц исследованных веществ и возможность использования модернизированной установки «Универсал» для работы с нанодисперсными материалами.

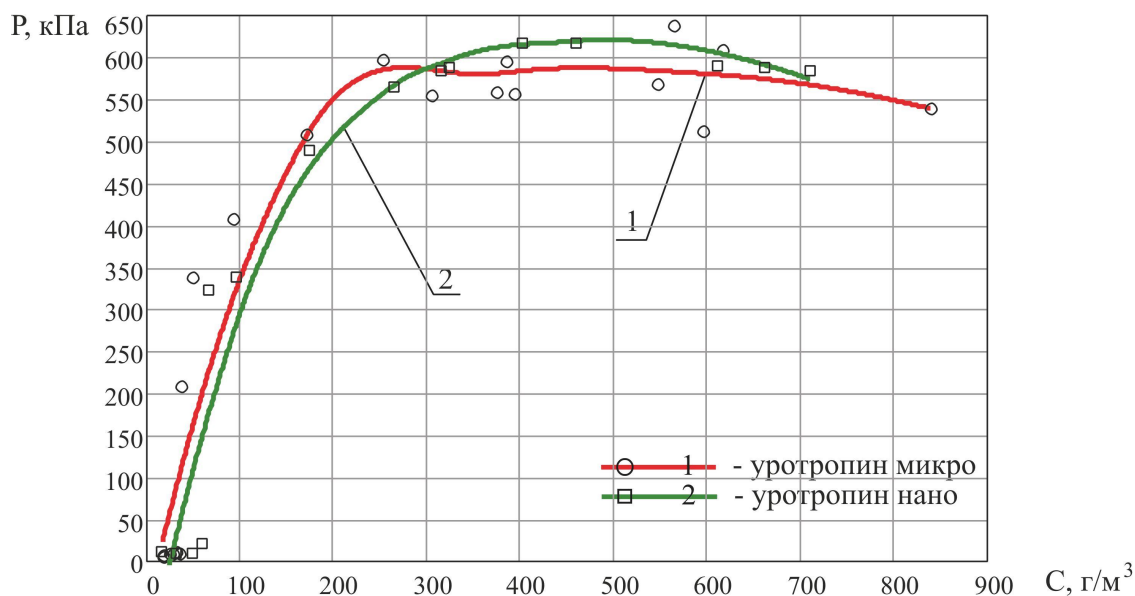


Рис. 3. Зависимость давления взрыва от концентрации уротропина микро- и нанодисперсного состава

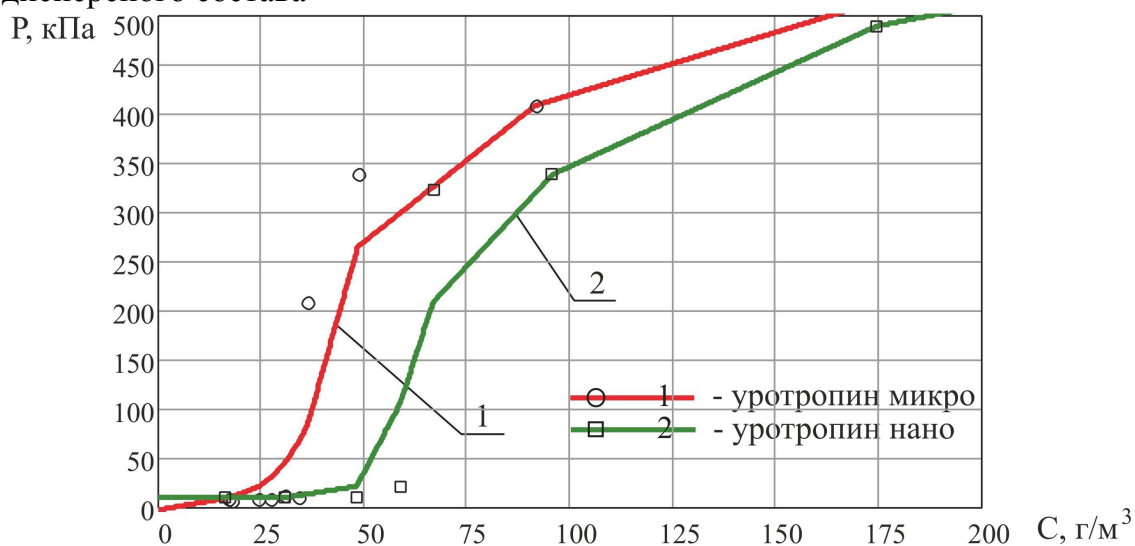


Рис. 4. Нижний концентрационный предел распространения пламени уротропина микро- и нанодисперсного состава

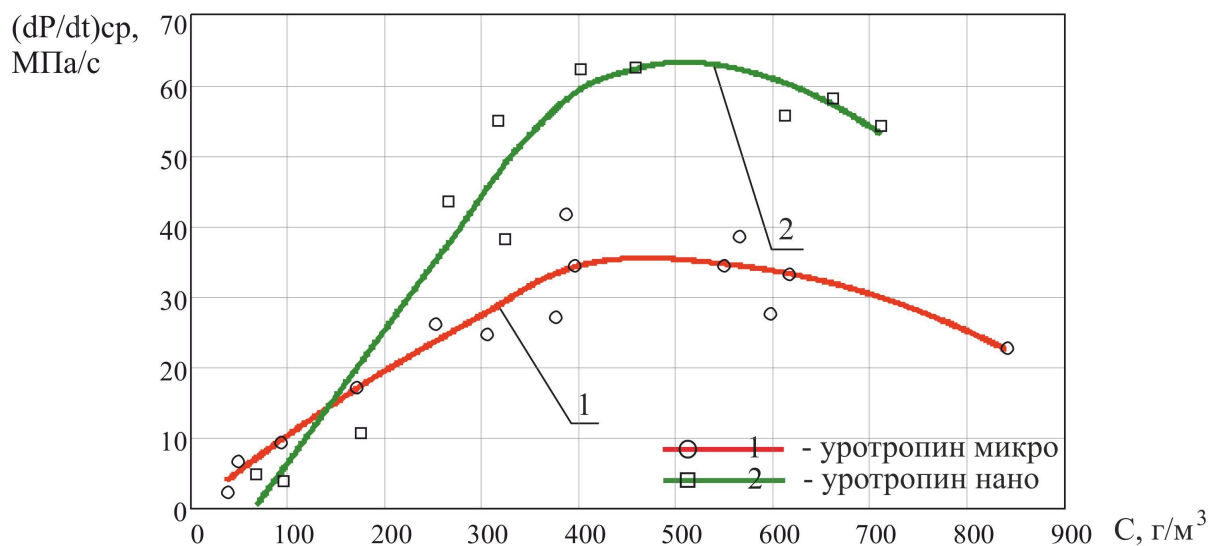


Рис. 5. Зависимость средней скорости нарастания давления взрыва от концентрации уротропина микро- и нанодисперсного состава

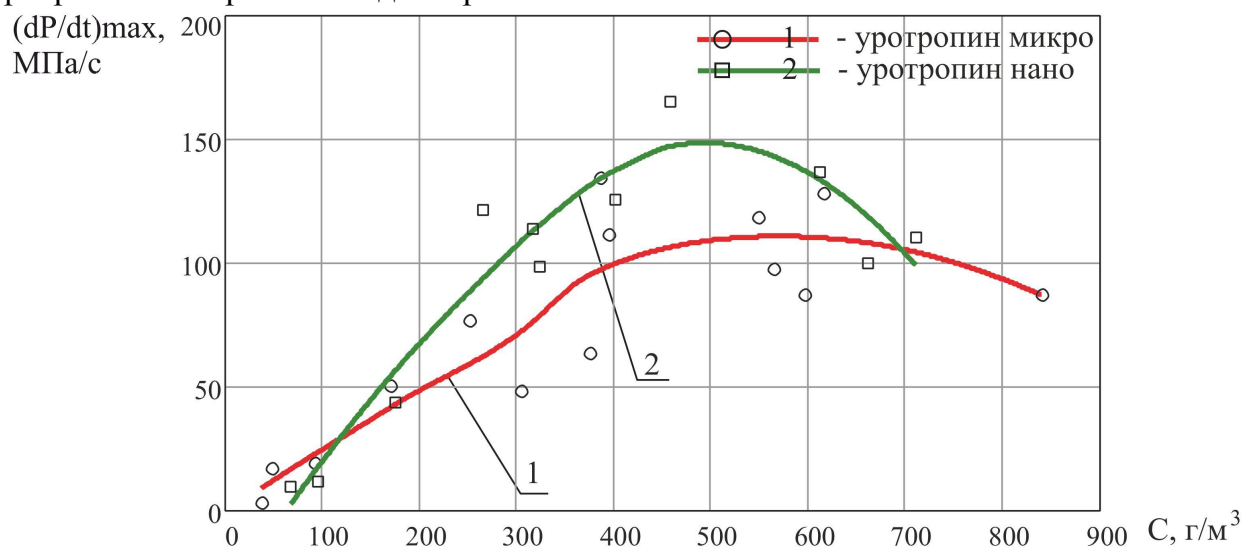


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости нарастания давления взрыва от концентрации уротропина микро- и нанодисперсного состава

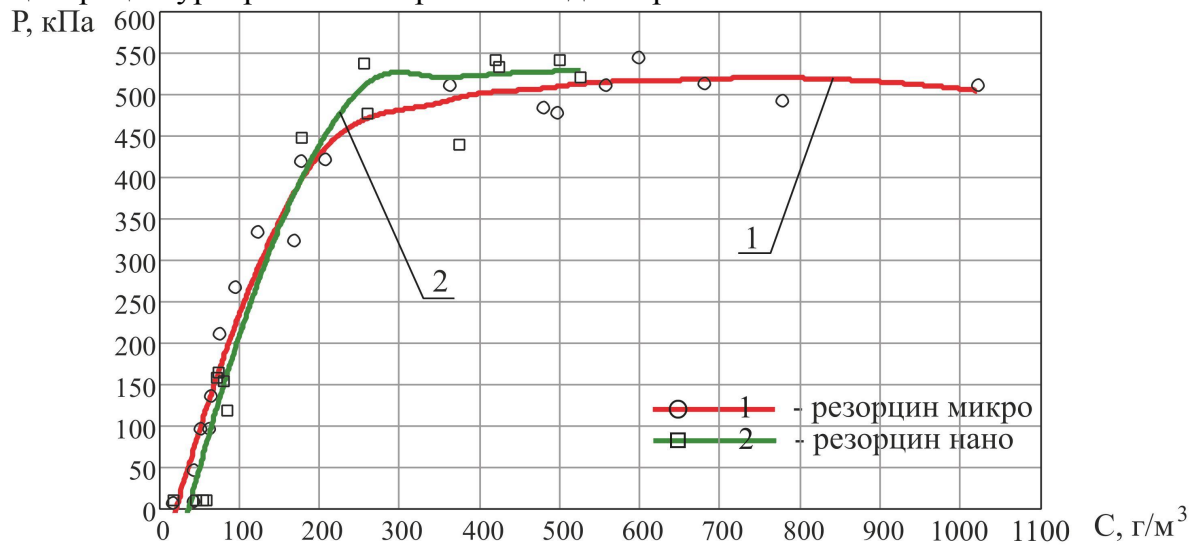


Рис. 7. Зависимость давления взрыва от концентрации резорцина микро- и нанодисперсного состава

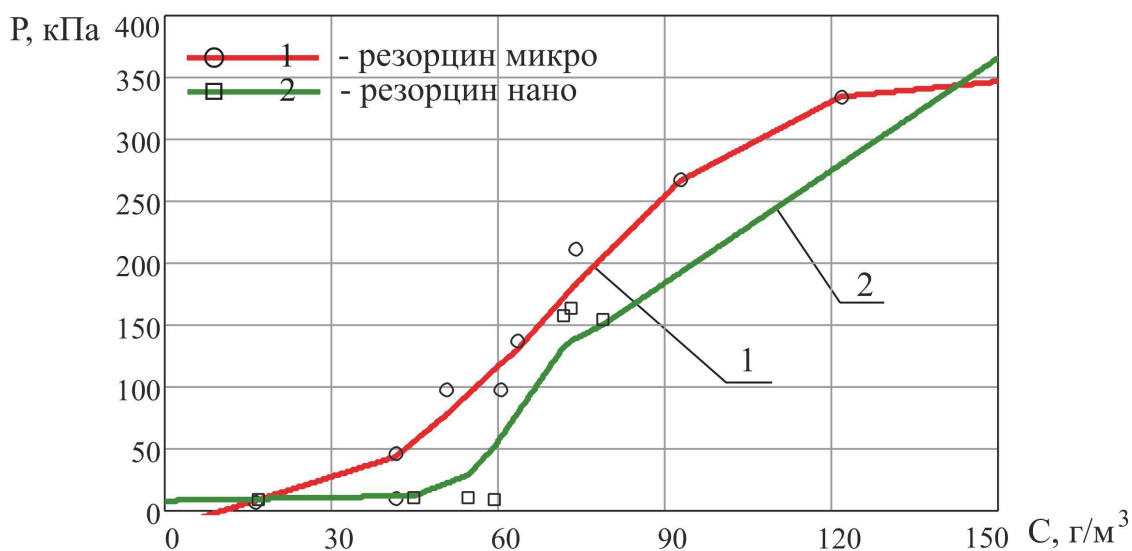


Рис. 8. Нижний концентрационный предел распространения пламени резорцина микро- и нанодисперсного состава

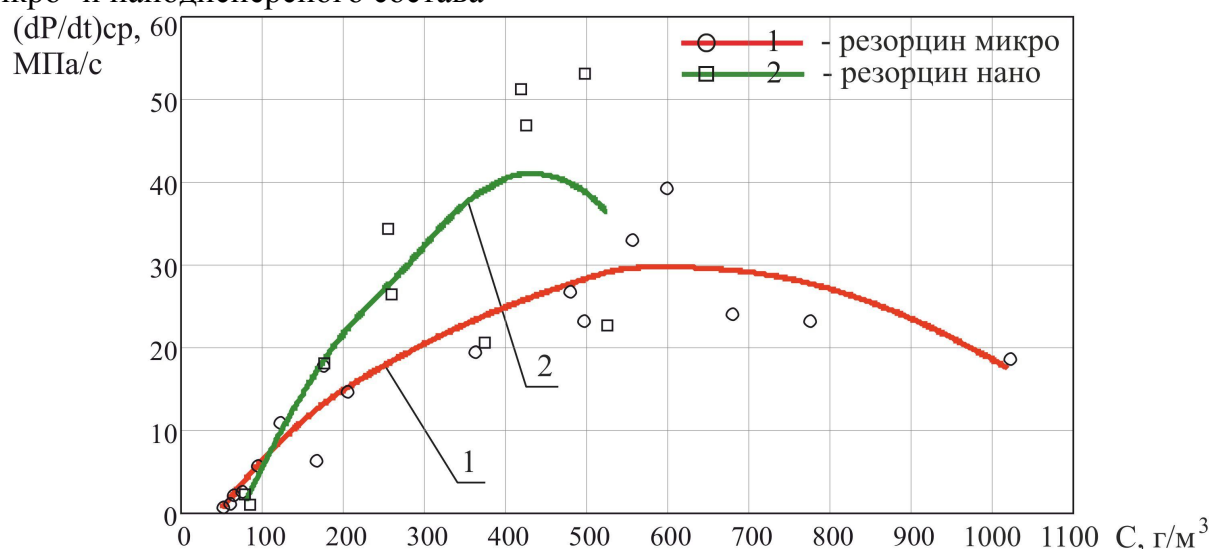


Рис. 9. Зависимость средней скорости нарастания давления взрыва от концентрации резорцина микро- и нанодисперсного состава

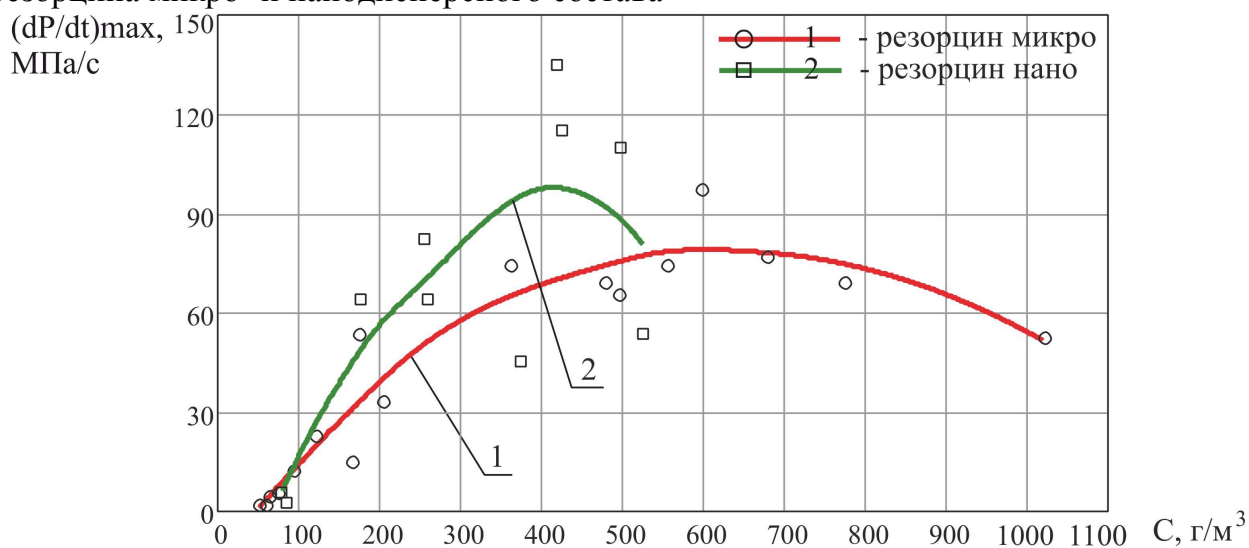


Рис. 10 – Зависимость максимальной скорости нарастания давления взрыва от концентрации резорцина микро- и нанодисперсного состава

Таблица 2. Экспериментальные значения показателей пожарной опасности аэрозолей микро- и наноразмерных частиц гидрохинона, резорцина, уротропина и лактозы

Наименование показателя	Гидрохинон		Отн-е измен., %	Резорцин		Отн-е измен., %	Уротропин		Отн-е измен., %	Лактоза		Отн-е измен., %
	микро	нано		микро	нано		микро	нано		микро	нано	
$P_{\max}$, кПа	592,2	(529,9)	–	546,2	542,7	0	638,9	616,77	–3	389,2	–	–
$(dP/dt)_{\text{ср}}$, МПа/с	61,36	(34,93)	–	39,40	51,18	+30	41,78	62,54	+50	(4,70)**	–	–
$(dP/dt)_{\max}$, МПа/с	155,00	(101,28)	–	97,44	135,00	+39	135,00	165,00	+22	(10,78)	–	–
НКПР, г/м ³	47	71	+51	43	59	+37	31	52	+68	375	–	>+21
$K_{\text{ст}}$, МПа·м/с	25,1	–	–	15,8	21,9	+39	21,9	26,7	+22	(1,75)	–	–

* – данные, полученные в диапазоне концентраций до 455 г/м³;

** – в скобках указаны данные, полученные на восходящей кривой

*** – данные показателей пожарной опасности трех микродисперсных фракций ликоподия (20÷40 мкм, 50÷63 мкм, до 90 мкм) также показали увеличение средней и максимальной скорости нарастания давления и нижнего концентрационного предела распространения пламени при уменьшении среднего размера частиц исследуемой фракции, однако, не приведены в таблице, т.к. не содержат нанодисперсной фракции).

В 4 главе научно обосновано изменение показателей пожаровзрывоопасности, проведена оценка опасности аэрозолей наноразмерных частиц и даны рекомендации к повышению уровня безопасности на производствах, связанных с применением наноразмерных веществ и материалов. Сравнение экспериментально полученных данных для микродисперсных фракций с опубликованными в справочной и нормативной документации для эталонного вещества показало хорошую сходимость (таблица 3).

Сравнение показателей для остальных веществ дает расхождения по трем основным причинам: 1) в справочной и нормативной документации установлены значения, принятые «с запасом» и необходимые для обеспечения пожаровзрывобезопасности на производстве; 2) данные других исследователей получены в других условиях и на установках с другой формой и объемом реакционного сосуда; 3) в исследованиях принимали участие вещества различных поставщиков, а как показывает практика, это может существенно повлиять на итоговые значения показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей.

Таблица 3. Показатели пожаровзрывоопасности ликоподия эталонной фракции («до 90 мкм»)

Источник информации	$P_{\max}$, кПа	$(dP/dt)_{\max}$, МПа/с	НКПР, г/м ³	$W_{\min}$, мДж*	МВСК, % об.**
ГОСТ 12.1.044-89 (цилиндрический сосуд 4,25 л)	620±85	—	34,0±8,0	—	10,2±1,0
Результаты эксперимента, полученные на модернизированной установке «Универсал» (цилиндрический сосуд 4,25 л)	621	75	29,0	—	—
Справочник «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» под ред. Корольченко (сферический сосуд 4 л)	780	31	25,0	40	13,0
Результаты эксперимента в сосуде Хартмана (цилиндрический сосуд 1,2 л)	550	40	—	—	—
База данных исследований показателей взрыва (BIA-Report), Германия (сферический сосуд 20 л)	830	—	30,0	—	7,5
Расчетные значения	348±80	13±10	25,9±4,9	—	—
* — минимальная энергия зажигания;					
** — минимальное взрывоопасное содержание кислорода.					

Данные, полученные для нанодисперсных фракций, сравнению со сторонними источниками не подвергались из-за отсутствия экспериментальных исследований в этой области. Проведенный аналитический расчет НКПР, $P_{\max}$ и $(dP/dt)_{\max}$ с применением существующего математического аппарата (таблица 4), показал, что, несмотря на явное преимущество данного метода в условиях отсутствия экспериментально установленных значений показателей взрыва нанодисперсных аэрозолей, в пределах 30 % может быть недооценено максимальное давление взрыва, примерно на 300 % и более может быть недооценена максимальная скорость нарастания давления взрыва.

Основной причиной сохранения максимального давления взрыва для нанодисперсной фракции органических веществ, по-видимому, является сгорание таких веществ в полном объеме и с максимальной температурой при размерах значительно превышающих нанодиапазон. Достигая максимального проявления энергетического потенциала частиц горючей фазы при размерах порядка 50 мкм, органические вещества вплоть до размеров порядка 100 нм и менее сохраняют значение максимального давления взрыва.

Скорость нарастания давления увеличивается, так как наноразмерные частицы аэрозоли имеют большую удельную площадь поверхности, что делает их химически активнее. Наряду с этим, меньший объем каждой отдельной частицы, способствует сокращению времени на прогрев и пиролиз твердой фазы смеси, а сам процесс сгорания становится все более подобным объемному сгоранию газов. Полученные экспериментальные данные по увеличению скорости нарастания давления взрыва с уменьшением частиц до размеров «нано» согласуются с известной обратно пропорциональной зависимостью скорости нарастания давления взрыва от диаметра, полученной при исследованиях пожаровзрывоопасных свойств аэрозолей на основе микроразмерных частиц.

Экспериментально обнаруженное увеличение НКПР для аэрозолей наноразмерных частиц согласуется с закономерностью изменения НКПР с уменьшением размера частиц в области микроразмеров, обозначенную в российских источниках, в то время как зарубежными источниками отмечено сохранение НКПР в диапазоне размеров от 50÷100 мкм и ниже вплоть до наноразмеров. Увеличение

НКПР происходит, скорее всего, вследствие смены режима горения с фазодинамического, свойственного для аэрозвесей твердых частиц, на гомогенный, свойственный для газов. Данный переход наблюдается при среднем размере частиц 50÷100 мкм. При этих размерах НКПР смеси минимален, т.к. сгорание частиц происходит в полном объеме, конвективный режим горения способствует турбулизации смеси, увеличению удельной площади поверхности фронта пламени за счет его искривления, локальным повышением концентрации горючего при общей минимальной концентрации в смеси, обусловленным различием в скоростях движения твердой и газовой фазы, и появлению языкообразных искривлений неустойчивого фронта пламени аэрозоли, искусственно занижающих концентрацию, при которой возможно распространение пламени. Размер твердых частиц аэрозоли при уменьшении в пределе стремится к размеру молекул газа. Для частиц размером до 50 мкм (включая область наноразмеров), вероятно, интенсифицируется процесс пиролиза за счет увеличения удельной площади поверхности с уменьшением эквивалентного диаметра частиц, увеличения времени осаждения частиц под действием силы тяжести, уменьшения объема частиц. В итоге, вероятнее всего, твердые частицы успевают газифицироваться до того, как температура в зоне свежей смеси станет равной температуре самовоспламенения вещества, и сгорают как газы. Таким образом, влияние фазодинамического режима горения ослабевает и НКПР растет.

Таблица 4. Показатели пожаровзрывоопасности, полученные расчетным путем*

Наименование вещества	Определяемый показатель и его значение		
	$P_{\max}$, кПа	$(dP/dt)_{\max}$, МПа/с	НКПР, г/м ³
Ликоподий	348±80	13,1±10,5	25,9±4,9
Лактоза	611±140	45,8±36,6	48,4±9,2
Гидрохинон	552±127	41,4±33,1	31,1±5,9
Резорцин	548±126	41,1±32,9	31,3±6,0
Уротропин	624±144	46,8±37,5	26,6±5,1
* Методика расчета согласована МЧС России и утверждена ВНИИПО (2002 г.).			

Анализ полученных данных с учетом сведений о значительном уменьшении энергии зажигания нанодисперсных аэрозолей, полученных зарубежными исследователями, позволяет судить о том, что аэрозоли наночастиц представляют

более высокую пожаровзрывоопасность по сравнению с аэрозолями микродисперсных частиц. Классификация нанодисперсных веществ как пожароопасных с НКПР выше 65 г/м^3 может оказаться поспешной и неверной по причинам их более высокой химической активности, способности с легкостью образовывать аэрозвеси и низкой энергией зажигания. Кроме того, как показал расчет, увеличение скорости нарастания давления взрыва аэрозолей наноразмерных частиц требует увеличения площади разгерметизирующих отверстий до 70 % по сравнению с достаточной площадью для безопасной разгерметизации после взрыва аэрозолей микродисперсных частиц.

Экспериментально полученные значения показателей пожаровзрывоопасности аэрозолей наноразмерных частиц согласуются с предположением, основанным на закономерностях изменения показателей в области размеров микрочастиц, и содержат важные сведения количественной характеристики пожаровзрывоопасности ряда органических веществ. Обнаруженное изменение показателей веществ и увеличение их пожаровзрывоопасности делает актуальным проведение дальнейших исследований не только органических веществ, но и металлов, полимеров, а также высокоэнергетических конденсированных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые экспериментально определены показатели пожаровзрывоопасности аэрозолей ряда органических веществ на основе наноразмерных частиц. Полученные данные свидетельствуют, что с уменьшением среднего размера с микро- до наноуровня у аэрозолей гидрохинона ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$), лактозы ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), резорцина ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$) и уротропина ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) нижний концентрационный предел распространения пламени увеличивается примерно на 70 %, давление взрыва остается прежним, а средняя и максимальная скорости нарастания давления увеличиваются приблизительно на 50 %.

2. Научно обоснованы результаты полученных экспериментальных данных об изменении показателей взрыва, предложен режим распространения пламени по аэрозвесям наноразмерных частиц. Показано, что основными причинами изменений показателей взрыва аэрозолей на основе наноразмерных веществ являются, с одной

стороны, увеличение удельной площади поверхности, а с другой – смена режима горения с фазодинамического на гомогенный.

3. Усовершенствована представленная в ГОСТ 12.1.044-89 «ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» существующая методика экспериментального определения показателей взрыва аэрозолей: нижнего концентрационного предела распространения пламени, максимального давления взрыва и максимальной скорости нарастания давления взрыва аэрозолей микро- и наноразмерных твердых частиц, добавлен порядок определения средней скорости нарастания давления взрыва и требование к оценке индекса пожаровзрывоопасности (K_{st} , МПа·м/с).

4. Проведена оценка опасностей аэрозолей веществ в нанодисперсном состоянии и даны рекомендации по повышению промышленной и пожарной безопасности технологических процессов, связанных с обращением аэрозолей наноразмерных частиц. Предложено исключить источники зажигания любой мощности, а при разработке и выборе средств взрывозащиты увеличивать площадь разгерметизирующих устройств технологических аппаратов и производственных помещений до 70 % в зависимости от обрабатываемого вещества.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих изданиях (рецензируемый журнал, материалы международной научной конференции):

1. Клевлеев В.М., Минаев Д.С., Алифференкова М.А. Пожаровзрывоопасность взвешенной ультрадисперсной пыли // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 12. С. 11-13.

2. Минаев Д.С., Клевлеев В.М. Проблемы оценки пожаровзрывоопасности взвешенной пыли, состоящей из наночастиц // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 4. С. 28-29.

3. Клевлеев В.М., Минаев Д.С., Алифференкова М.А. Модернизация установки определения показателей взрыва // Сборник трудов XXIV Международной научной конференции. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24, т. 8. Секция 12. Пенза: ПГТА, 2011. С. 41-42.

В прочих изданиях:

1. Минаев Д.С. Необходимость и проблемы оценки пожаровзрывоопасности взвешенной пыли, состоящей из наночастиц // Научная конференция студентов и молодых ученых МГУИЭ: Тезисы докладов. М.: МГУИЭ, 2009. С. 107-108.

2. Минаев Д.С. Испытательная установка для определения показателей взрыва // Научная конференция студентов и молодых ученых МГУИЭ: Тезисы докладов. М.: МГУИЭ, 2011. С. 43-44.

Подписано в печать 14.11.2011. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе МГУИЭ.
105066 Москва, ул. Старая Басманная, д. 21/4.