

04

Инициирование детонации высоковольтным разрядом в порошкообразных взрывчатых веществах с наноразмерными инертными добавками

© С.А. Рашковский,¹ Г.Г. Савенков²

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва, Россия

² ООО „Алроса-Эдан“, 195260 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 30 мая 2011 г.)

Показано, что добавки в высокодисперсное малочувствительное взрывчатое вещество типа FOX-7 нанопорошка меди резко повышают чувствительность смеси к воздействию высоковольтного электрического разряда и способствуют возбуждению детонации. Разработаны перколяционная модель распространения электрического пробоя по порошковой смеси с наноразмерными добавками и модель возбуждения детонации высоковольтным разрядом в смеси бризантного взрывчатого вещества с инертной добавкой. Разработанные модели качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными.

Введение

В подавляющем большинстве современных боеприпасов возбуждение детонации в бризантных взрывчатых веществах (БВВ) и составах осуществляется при помощи средств инициирования (СИ). Одними из основных компонентов СИ являются первичные (инициирующие) ВВ (ИВВ), которые опасны как в производстве и эксплуатации, так и с точки зрения экологии.

В настоящее время во многих странах ведутся работы, направленные на создание средств инициирования, не содержащих ни традиционных ИВВ, ни БВВ с повышенной (для этого класса ВВ) чувствительностью. Препятствием на пути решения этой проблемы является то, что собственно и относится к достоинствам малочувствительных ВВ — их низкая восприимчивость к иницирующим импульсам. Увеличение чувствительности БВВ к определенным видам импульсных воздействий за счет введения в них различных добавок может служить ключом к решению этой проблемы.

Одним из перспективных методов инициирования детонации является высоковольтный электрический (искровой) разряд, который в ряде случаев используется в средствах инициирования и взрывания в гражданских отраслях промышленности [1,2].

Однако даже для зарядов насыпной плотности (тем более прессованных) из БВВ (гексоген, октоген, не говоря про такие малочувствительные взрывчатые вещества, как гексонитростильбен, FOX-7, ТАТБ и некоторые другие) этот способ инициирования требует большой закачки энергии [3,4]. Поэтому для таких взрывчатых веществ (исключение составляет тетранитропентаэритрит (ТЭН) насыпной плотности) и составов этот способ инициирования практического применения не находит.

Увеличение чувствительности БВВ к электрическому импульсу при неизменной относительно низкой чувствительности к другим видам воздействия позволит решить

эту проблему. Одним из способов увеличения чувствительности БВВ к электрическому импульсу является введение в заряд небольшого количества нанопорошков [5].

В работе [5] было проведено экспериментальное исследование влияния добавок (нанопорошка меди с размерами 50–70 nm) на чувствительность к высоковольтному электрическому разряду малочувствительного ВВ FOX-7. Было установлено, что такие добавки резко повышают чувствительность ВВ и при 15% массовой доле нанопорошка меди удалось возбудить детонацию в заряде из указанного ВВ при напряжении разряда 7.5–9 kV. Заметим, что для возбуждения детонации в ТЭН (самом чувствительном из БВВ) без добавок (в гражданских электродетонаторах ЭДВ-1, ЭДВ-2) требуется (в зависимости от плотности заряда) электрический импульс с напряжением 15–25 kV [6].

Существующие представления об инициировании детонации во взрывчатых веществах электрическим разрядом сводятся к двум механизмам. Первый механизм связан с нагревом ВВ от плазменного канала разряда и воздействием расходящейся от канала ударной волны [1,7]. Согласно этому механизму, возбуждение детонации происходит только в том случае, когда в образующемся канале разряда выделяется некоторое минимальное количество энергии [8,9], достаточное для инициирования процесса. Второй механизм отводит основную роль быстрым реакциям между возбужденными частицами [10,11], хотя в этих работах не отрицается и тепловая природа возбуждения детонации при электрическом пробое.

В работе [5] была предпринята попытка объяснить результаты экспериментов на основе теории протекания (перколяции), в частности, предполагалось, что добавки нанопорошка меди позволяют получить слабопроводящий взрывчатый состав и тем самым за счет джоулева

нагрева возбудить в нем детонацию. Однако, вероятно, за счет образования окисной пленки на частицах нанопорошка электрической проводимости взрывчатого состава достичь не удалось, но, как было сказано выше, детонация в заряде все же возникала, если массовая доля нанопорошка превышала 15%.

То есть можно констатировать, что физика процесса [5] осталась невыясненной.

Цель настоящей работы — разработка модели, объясняющей суть явления: возбуждение детонации высоковольтным электрическим разрядом в малочувствительном ВВ с непроводящими нанопорошковыми добавками.

Эксперимент

Эксперименты проводились на смесях порошкообразного ВВ и инертной добавки [5]. В качестве ВВ использовались порошкообразные ТЭН и FOX-7 с размерами зерен 3–7 μm . В качестве инертной добавки использовался нанопорошок меди марки М1 с размерами частиц $d = 50\text{--}70\text{ nm}$ в двух состояниях: с небольшим сроком хранения после изготовления (будем называть его „свежий“) и с более длительным сроком хранения (в дальнейшем — „старый“), которые отличались по цвету.

Порошкообразное ВВ перемешивалось с инертной добавкой до однородного состояния по цвету. Содержание инертной добавки в смесях варьировалось в пределах 10–25% по массе. Взрывчатые смеси (ВС) засыпались в оболочку с внутренним диаметром 10 mm с накидной гайкой. Внутри оболочки на расстоянии 4 mm друг от друга находились два медных электрода диаметром 0.75 mm, на которые подавалось напряжение. В экспериментах использовались образцы как насыпной плотности, так и подпрессованные. В результате плотность образцов в экспериментах варьировала в пределах 0.6–1.6 g/cm^3 .

Инициирование зарядов осуществлялось при помощи разрядного устройства, состоящего из высоковольтного источника питания и конденсатора емкостью 1 μF , заряженного до напряжения 9 (или 7.5) kV. Длительность электрического импульса составляла $\sim 1\ \mu\text{s}$ [5].

Фиксация факта возбуждения детонации в смесовом заряде осуществлялась либо путем возбуждения детонации в прессованной шашке вторичного ВВ (с плотностью 1.6 g/cm^3), которая устанавливалась после исследуемого смесового заряда, либо по факту разрушения оболочки.

Для сравнения были проведены испытания зарядов, состоящих из смеси FOX-7 и нанопорошка алюминия с размерами частиц 50–70 nm, смеси FOX-7 и микронного порошка магния, смеси FOX-7 и порошка меди с размерами частиц $\sim 50\ \mu\text{m}$, смесей ТЭН с добавками нанопорошков алюминия и меди, а также зарядов из FOX-7 и ТЭН без примесей.

В проведенной серии экспериментов удалось возбудить детонацию только в зарядах из смеси FOX-7 с добавками „свежего“ и „старого“ нанопорошка меди,

а также в заряде из самого высокочувствительного бризантного ВВ — ТЭН с 15% добавками нанопорошков алюминия и меди, при этом импульс напряжения для ВС с ТЭН составлял 3 kV.

Добавки в FOX-7 нанопорошка алюминия, 50-микронного порошка меди и микронного порошка магния к инициированию детонации в зарядах не приводили. Детонация отсутствовала и в зарядах FOX-7 и ТЭН без примесей. Следует отметить, что во всех образцах, где детонация не наблюдалась, имело место быстрое горение, что фиксировалось регистрацией сильных звуковых эффектов, а также отсутствием в слабо деформированной оболочке взрывчатого вещества или взрывчатой смеси. Визуальный осмотр установки после инициирования показал, что в редких случаях, когда детонация не наблюдалась, в оболочке присутствовали остатки непрореагировавших зерен ВВ, при этом, однако, следов нанопорошков обнаружено не было. Это указывает на то, что электрический пробой всегда проходил по частицам порошка, что приводило к их испарению.

Результаты экспериментов для смесей FOX-7 с нанопорошком меди представлены на рис. 1. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Старый и новый нанопорошки меди могут быть включены в единую совокупность.

2. Предел инициирования высоковольтным электрическим разрядом зависит от размеров инертных частиц: для частиц одной и той же природы детонация возбуждается при малых размерах частиц и не возбуждается при больших. Это означает, что при прочих равных условиях существует предельный размер инертных частиц, выше которого возбудить детонацию электрическим разрядом в данном ВВ невозможно.

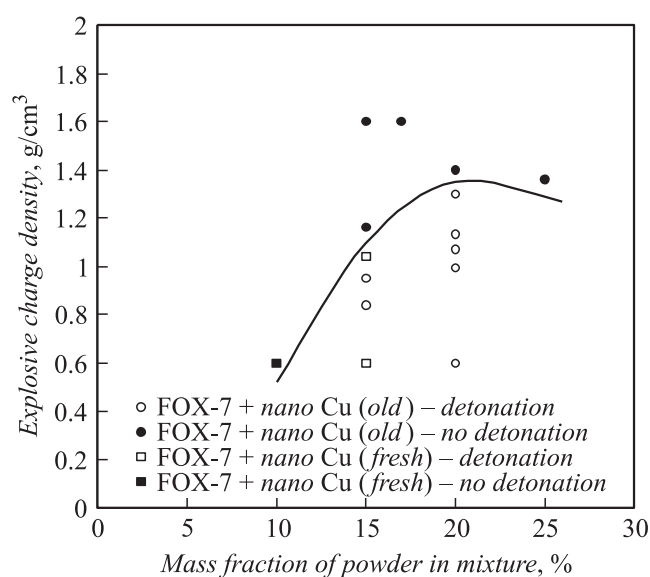


Рис. 1. Результаты экспериментов для смесей FOX-7 с нанопорошком меди. Значки — экспериментальные данные, линия — условная граница возбуждения детонации: ниже линии детонация возбуждается, выше линии — не возбуждается.

3. Предел инициирования зависит от природы инертных частиц: при одинаковом размере частиц одни порошки (например медь) способны вызвать инициирование, другие (например алюминий и углерод) — нет.

4. Предел инициирования зависит от природы ВВ: один и тот же нанопорошок алюминия способен вызвать инициирование детонации смеси на основе ТЭН, но не способствует возбуждению детонации в смеси на основе FOX-7.

5. Для взрывной смеси, состоящей из одних и тех же компонентов, предел инициирования зависит от плотности заряда и от содержания в нем инертного порошка.

6. Для одного и того же ВВ и одного и того же инертного нанопорошка при фиксированной плотности заряда существует предельная концентрация нанопорошка в смеси, ниже которой детонация при высоковольтном электрическом разряде не возбуждается.

7. Для одного и того же ВВ и одного и того же инертного нанопорошка при фиксированной концентрации нанопорошка в смеси существует предельная плотность заряда, выше которой детонация при высоковольтном электрическом разряде не возбуждается.

Все эти факты требуют объяснения.

Теория

А. Структура взрывчатой смеси

Как указывалось выше, для возбуждения детонации даже в самом чувствительном из БВВ—ТЭН без добавок требуется электрический импульс с напряжением 15–25 кВ [6]. Возбуждение детонации в ВВ с нанопорошками происходит при значительно меньших напряжениях [5]. Это указывает на то, что нанопорошки облегчают электрический пробой смеси. Как известно, пробой происходит по самым слабым местам в системе, имеющим повышенную электрическую проводимость. Таким образом, можно утверждать, что добавление в порошкообразное ВВ нанопорошков приводит к образованию каналов с повышенной электропроводностью, по которым проходит электрический разряд.

Такие каналы могут быть образованы только контактирующими частицами инертных добавок, и они должны быть достаточно протяженными, чтобы пронизывать по крайней мере межэлектродное пространство. Иными словами, в смеси ВВ с нанопорошком должны возникать перколяционные кластеры, состоящие из контактирующих наночастиц.

Рассмотрим необходимые условия для возникновения перколяционных кластеров. Сначала рассмотрим случай, когда наночастицы случайным образом равномерно заполняют поры между зёрнами ВВ. Так как размеры наночастиц ($d = 50\text{--}70\text{ nm}$) существенно меньше размеров зёрен ВВ ($D = 3\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$), т.е. $d/D \ll 1$, то размеры пор между зёрнами ВВ также будут существенно больше размеров наночастиц. В этом случае вместо размещения наночастиц в порах между зёрнами ВВ можно

рассматривать размещение одних только наночастиц в бесконечном объеме. Размещение частиц в бесконечном объеме характеризуется объемной долей частиц v , т.е. отношением объема всех частиц к объему той области пространства, в которой они размещены, в данном случае — к объему пор в заряде. Пусть V_0 — объем заряда, V_c — объем всех зёрен ВВ в заряде, V_n — объем всех наночастиц в заряде. Тогда

$$v = \frac{V_n}{V_0 - V_c}.$$

Так как $V_n = M_n/\rho_n$, $V_c = M_c/\rho_c$, получим

$$v = \frac{M_n/\rho_n}{V_0 - M_c/\rho_c},$$

где M_n, M_c — массы нанопорошка и ВВ соответственно в заряде, ρ_n, ρ_c — плотности частиц нанопорошка и ВВ соответственно. Массовая доля нанопорошка в заряде

$$m = \frac{M_n}{M_n + M_c}.$$

Вводя плотность заряда $\rho = \frac{M_n + M_c}{V_0}$, получим

$$v = \frac{m/\rho_n}{1/\rho - (1-m)/\rho_c}. \quad (1)$$

Так как $0 \leq m \leq 1$, плотность смеси удовлетворяет условию $v\rho_n < \rho < \rho_c$ при $v\rho_n < \rho_c$ и $\rho_c < \rho < v\rho_n$ при $v\rho_n > \rho_c$. Если объемная доля v наночастиц в порах между частицами ВВ превышает некоторое значение v_p (перколяционный предел), в системе образуются перколяционные кластеры — цепочки контактирующих частиц, пронизывающие весь объем системы. Массовая доля нанопорошка в смеси, соответствующая объемной доле $v = v_p$, равна

$$m_V = v_p \frac{1/\rho - 1/\rho_c}{1/\rho_n - v_p/\rho_c}. \quad (2)$$

Для монодисперсного нанопорошка $v_p = 0.15\text{--}0.17$ [12,13]. Перколяционные кластеры наночастиц возникают в такой смеси при $m \geq m_V$. Акцентируем внимание на том, что m_V является массовым перколяционным пределом для случая, когда частицы нанопорошка равномерно случайным образом заполняют пространство в порах между зёрнами ВВ. По этой причине такую перколяцию будем называть объемной перколяцией. Отметим, что во всех работах по теории перколяции для реальных трехмерных систем (см., например, [14,15]) рассматривается именно объемная перколяция. Перколяционный предел m_V для объемной перколяции существенно зависит от плотности смеси ρ : при уплотнении смеси перколяционный предел (2) заметно изменяется. В рассматриваемом пределе $d/D \ll 1$ перколяционный предел (2) не зависит от размеров наночастиц d . На рис. 2 приведены зависимости

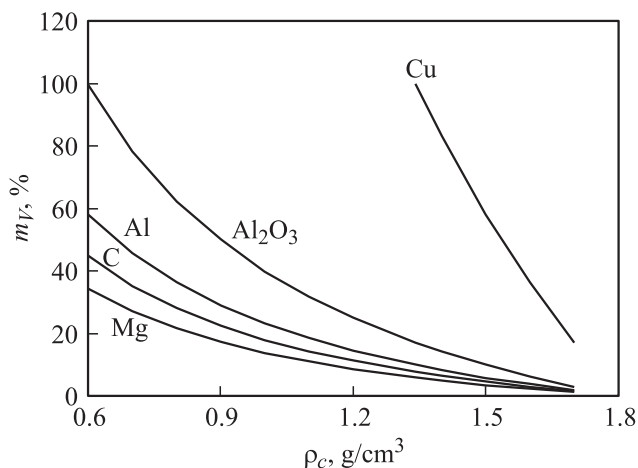


Рис. 2. Зависимость предела объемной перколяции (соотношение 2) от плотности смеси для смесей порошкообразного ВВ, имеющего плотность $\rho_c = 1.8 \text{ g/cm}^3$, с разными нанопорошками.

перколяционного предела (2) от плотности смеси ρ для смесей порошкообразного ВВ, имеющего плотность $\rho_c = 1.8 \text{ g/cm}^3$, с разными нанопорошками.

Из рис. 2 следует, что зависимость (2) противоречит экспериментальным данным, приведенным на рис. 1. Так, для смеси ВВ типа FOX-7 с нанопорошком меди ($d/D \approx 0.012$) в экспериментах пробой возникал уже при $m = 15\%$ и плотности взрывчатой смеси $\rho \approx 0.6 \text{ g/cm}^3$ и при уплотнении смеси выше $\rho \approx 1.2 \text{ g/cm}^3$ исчезал, в то время как, согласно (2), объемная перколяция в этой системе не может наступить раньше $\rho \approx 1.7 \text{ g/cm}^3$. Таким образом, традиционный механизм объемной перколяции не способен объяснить закономерности, наблюдаемые в экспериментах.

Для понимания механизма исследуемого процесса представляет интерес проанализировать структуру взрывчатой смеси. Экспериментальные исследования такого рода затруднены, поэтому было проведено компьютерное моделирование структуры смеси ВВ типа FOX-7 с нанопорошком меди. Расчет структуры смеси проводился методом „вязкой суспензии“ [12,13].

В расчетах для простоты все частицы считались сферическими, кроме того, предполагалось, что все частицы одного типа имеют одинаковые размеры (монодисперсные порошки).

Некоторые варианты структур порошковых смесей, полученные компьютерным моделированием, приведены на рис. 3. Расчет проводился при периодических граничных условиях. На рис. 3 показаны только те частицы, центры которых попали в объем $9 \times 6 \times 6 \mu\text{m}$. В расчетах предполагалось идеальное перемешивание порошков. Для сравнения на рис. 3, б показано распределение нанопорошка в смеси при плохом перемешивании.

Результаты моделирования показывают, что при хорошем перемешивании смеси во всем исследованном диапазоне концентраций частицы нанопорошка распре-

делены преимущественно по поверхности крупных частиц ВВ. Наибольшее скопление частиц нанопорошка наблюдается в местах контакта зерен ВВ. Схематически это показано на рис. 4 (слева). Такое распределение наночастиц во взрывчатой смеси имеет принципиальное значение для рассматриваемого процесса. Рассмотрим это более подробно.

Результаты моделирования позволяют рассматривать вместо трехмерного распределения наночастиц в объеме смеси двумерное распределение наночастиц на поверхности относительно крупных частиц ВВ (рис. 3, 4). При этом на поверхности крупных частиц нужно исключить область (круг) вокруг точек контакта с другими крупными частицами, в которой не могут поместиться наночастицы (см. рис. 3, 4). Лишь в непосредственной близости от точки контакта частицы нанопорошка образуют трехмерную структуру (см. рис. 4, слева). Из геометрических построений легко получить (см. рис. 4)

$$r_0^2 = \frac{1}{2} Dd + \frac{1}{4} d^2.$$

В пределе $D/d \ll 1$ можно ограничиться приближенным соотношением

$$r_0^2 = \frac{1}{2} Dd.$$

Соответственно площадь области поверхности частицы ВВ в окрестности точки контакта с другой крупной частицей, в которой не могут находиться наночастицы, равна

$$S_0 = \pi r_0^2 = \frac{1}{2} \pi Dd.$$

Если k — координационное число для крупных частиц (среднее число контактов с другими крупными частицами, приходящееся на одну крупную частицу), то средняя площадь свободной поверхности одной крупной частицы (поверхность частицы ВВ, на которой могут размещаться наночастицы) равна

$$S_f = S_c - kS_0,$$

где $S_c = \pi D^2$ — площадь всей поверхности одной крупной частицы.

Координационное число зависит от плотности смеси: уплотнение смеси приводит к увеличению среднего числа контактов между крупными частицами в системе. При изменении объемной доли крупных частиц в смеси от 0.2 до 0.6 координационное число k изменяется от 1 до 5 [13].

Относительная средняя площадь свободной поверхности одной крупной частицы равна

$$\frac{S_f}{S_c} = 1 - \frac{1}{2} \frac{kd}{D}. \quad (3)$$

Введем плотность заполнения свободной поверхности частиц ВВ наночастицами как отношение площади поперечного сечения всех наночастиц, находящихся на свободной поверхности частицы ВВ, к площади свободной

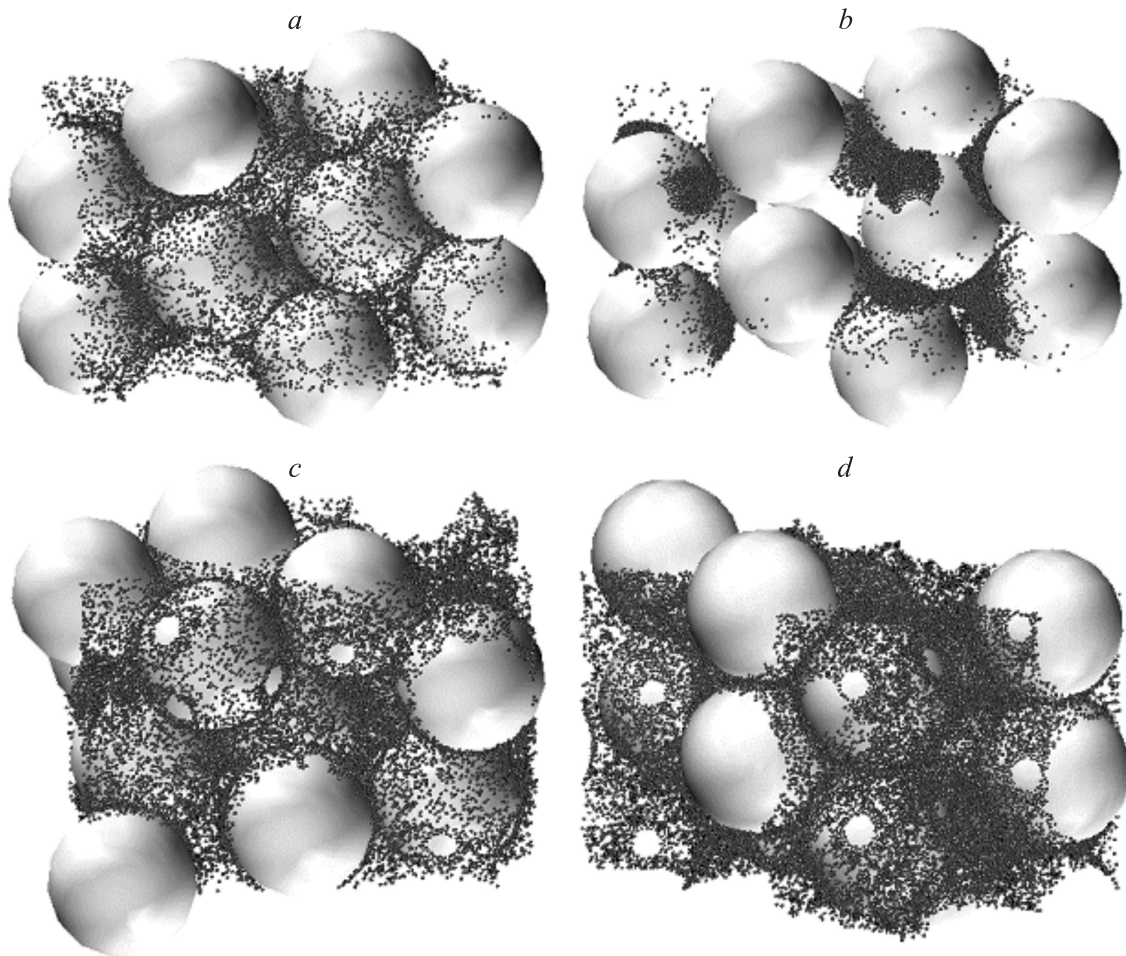


Рис. 3. Структура смеси ВВ с нанопорошком меди. Крупные частицы — ВВ, мелкие — медь. Размеры частиц $D = 3 \mu\text{m}$, $d = 70 \text{ nm}$. Объемное содержание компонентов в смеси: *a, b* — $V_{\text{ВВ}} = 0.59$, $V_{\text{Cu}} = 0.01$ (массовое содержание меди в смеси $m = 7\%$); *c* — $V_{\text{ВВ}} = 0.58$, $V_{\text{Cu}} = 0.02$ ($m = 14\%$); *d* — $V_{\text{ВВ}} = 0.57$, $V_{\text{Cu}} = 0.03$ ($m = 19\%$); *a, c, d* — хорошее перемешивание смеси, *b* — плохое перемешивание смеси.

поверхности последней

$$\varphi = \frac{n\pi d^2/4}{S_f},$$

где n — среднее число наночастиц, находящихся на свободной поверхности одной частицы ВВ. Учитывая (3),

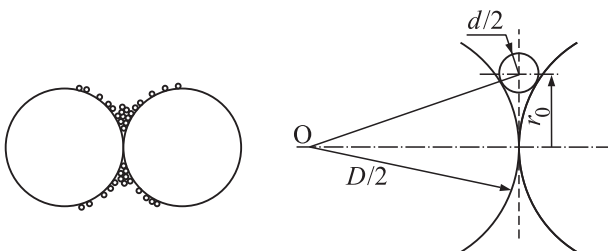


Рис. 4. Слева: схема размещения наночастиц в окрестности точки контакта частиц ВВ; справа: расчетная схема поверхности частиц ВВ в окрестности точки их контакта.

получим

$$\varphi = \frac{n}{4(1 - \frac{1}{2}kd/D)} \left(\frac{d}{D}\right)^2. \quad (4)$$

Концентрация φ не может быть больше некоторого предельного значения φ_m , соответствующего плотной упаковке наночастиц на свободной поверхности частиц ВВ. В случае $d/D \ll 1$ можно пренебречь кривизной поверхности частиц ВВ. Тогда задача размещения наночастиц на поверхности частиц ВВ будет эквивалентна задаче размещения дисков диаметра d на плоскости, а параметр φ будет играть роль относительной площади, занимаемой дисками на плоскости. Величина φ_m , соответствующая плотной упаковке дисков на плоскости, легко вычисляется:

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0.907.$$

Учитывая (4), можно найти максимальное число наночастиц, которые могут разместиться на свободной

поверхности одной частицы ВВ:

$$n_m = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{kd}{D}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^2. \quad (5)$$

Пусть N_n и N_c — число наночастиц и частиц ВВ соответственно в заряде. Тогда, очевидно,

$$n = \xi \frac{N_n}{N_c}, \quad (6)$$

где $\xi \leq 1$ — относительное число наночастиц в смеси, которые размещаются непосредственно на поверхности частиц ВВ. Коэффициент ξ учитывает, что не все наночастицы в смеси располагаются на поверхности частиц ВВ: как было показано выше, часть наночастиц концентрируется в окрестности точек контакта частиц ВВ. Более того, в реальной смеси часть частиц будет образовывать второй, третий и т.д. слои над поверхностью частиц ВВ, т.е. будут образовывать кластеры, простирающиеся в поры между частицами ВВ. Таким образом, реально на поверхности частиц ВВ размещается только часть наночастиц. Именно эти частицы, согласно предлагаемой модели, будут определять электрический пробой образца и, следовательно, инициирование детонации при электрическом пробое. Очевидно, величина ξ зависит от многих факторов, в первую очередь от технологии и условий перемешивания и приготовления смеси. Теоретический расчет параметра ξ представляется затруднительным. Массовая доля нанопорошка в заряде по определению

$$m = \frac{N_n \rho_n \frac{\pi}{6} d^3}{N_n \rho_n \frac{\pi}{6} d^3 + N_c \rho_c \frac{\pi}{6} D^3}.$$

Или с учетом (6)

$$m = \frac{n(\rho_n/\rho_c)(d/D)^3}{n(\rho_n/\rho_c)(d/D)^3 + \xi}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) можно найти

$$n = \xi \frac{m}{1-m} \left(\frac{\rho_c}{\rho_n}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^3. \quad (8)$$

Полученная зависимость (8) позволяет оценить среднее число наночастиц, расположенных на свободной поверхности одной частицы ВВ, по заданной массовой доле m нанопорошка в заряде. Необходимо иметь в виду, что соотношение (8) может использоваться только до тех пор, пока $n < n_m$, т.е. при массовой доле нанопорошка в заряде $m < m_m$, где

$$m_m = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{2} kd/D\right) (\rho_n/\rho_c)(d/D)}{\frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{2} kd/D\right) (\rho_n/\rho_c)(d/D) + \xi}. \quad (9)$$

При $m > m_m$ свободные поверхности частиц ВВ оказываются плотно заполненными наночастицами, и наночастицы, которым не хватило места на поверхности частиц ВВ, размещаются в объеме (в порах) между

частицами ВВ. Иными словами, при $m > m_m$ с поверхности частиц ВВ начинают „расти“ ветви кластеров наночастиц, которые заполняют пространство между частицами ВВ. Например, для смеси нанопорошка меди и ВВ типа FOX-7 при $d/D \approx 0.02$, $\rho_n/\rho_c \approx 4.7$, принимая в среднем $k = 3$, $\xi = 0.7$, получим $m_m = 0.32$. Это означает, что в рассматриваемых взрывчатых смесях частицы нанопорошка будут располагаться преимущественно на поверхности частиц ВВ до тех пор, пока массовая доля нанопорошка в заряде не достигнет $\sim 32\%$. Все смеси, исследованные экспериментально, имели $m < 32\%$. Более того, из соображений эффективности очевидно, что все реальные смеси также должны иметь $m < 30\%$. Таким образом, можно считать, что во всех случаях, представляющих практический интерес, частицы нанопорошка меди будут размещаться преимущественно на поверхности частиц взрывчатого вещества.

Найдем условия, при которых наночастицы, расположенные на поверхности частиц ВВ, будут образовывать перколяционный кластер. Пусть φ_p — двумерный перколяционный предел, т.е. относительная площадь поверхности, занятая частицами, при которой в системе возникают перколяционные кластеры. Согласно теории [15], для двумерной монодисперсной системы (размещение одинаковых дисков на плоскости) $\varphi_p = 0.5-0.55$.

Перколяционному пределу φ_p соответствует среднее число наночастиц, находящихся на свободной поверхности одной частицы ВВ,

$$n_p = 4\varphi_p \left(1 - \frac{1}{2} \frac{kd}{D}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^2. \quad (10)$$

Используя (7) и (10), найдем массовый перколяционный предел m_p — массовую долю нанопорошка во взрывчатой смеси, при которой наночастицы образуют на поверхности крупных частиц ВВ перколяционные кластеры, охватывающие всю поверхность частицы взрывчатого вещества:

$$m_p = \frac{4\varphi_p \left(1 - \frac{1}{2} kd/D\right) (\rho_n/\rho_c)(d/D)}{4\varphi_p \left(1 - \frac{1}{2} kd/D\right) (\rho_n/\rho_c)(d/D) + \xi}. \quad (11)$$

Концентрация n_p , а вместе с ней и массовый предел перколяции m_p слабо зависят от плотности смеси через координационное число k и коэффициент ξ . В пределе $d/D \ll 1$ можно пренебречь этой зависимостью и считать, что перколяционный предел m_p приближенно не зависит от плотности смеси и, следовательно, не изменяется при ее уплотнении.

Перколяцию, при которой перколяционные кластеры наночастиц располагаются на поверхности крупных частиц ВВ, будем называть поверхностной перколяцией.

Зависимость массового предела (11) поверхностной перколяции от диаметра наночастиц для разных нанопорошков показана на рис. 5. Из графиков рис. 5 следует, что перколяционный предел достигается позже всего для нанопорошка меди и легче всего для нанопорошка углерода.

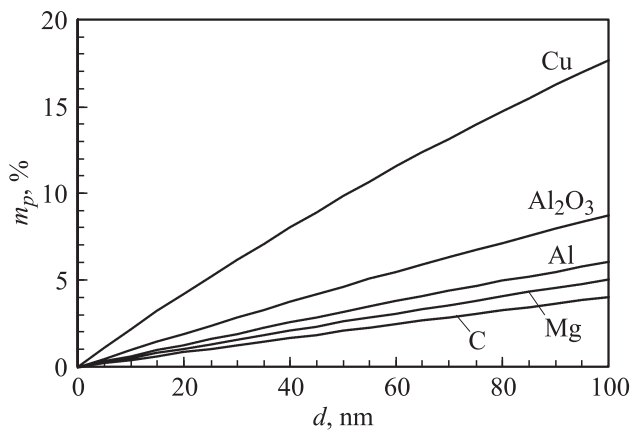


Рис. 5. Зависимость предела (11) поверхностной перколяции от диаметра наночастиц для разных нанопорошков. В расчетах использовались: $k = 3$, $\xi = 0.9$, $\varphi_p = 0.5$, диаметр частиц ВВ $D = 5 \mu\text{m}$, плотность частиц ВВ $\rho_c = 1.8 \text{ g/cm}^3$.

Рис. 2 и 5 позволяют сравнить условия возникновения объемной и поверхностной перколяций. Видно, что эти пределы совершенно разные, более того, они по-разному зависят от параметров системы. Так, например, предел объемной перколяции (2) существенно зависит от плотности смеси, но практически не зависит от размеров частиц, в то время как предел поверхностной перколяции, напротив, сильно зависит от размеров частиц и очень слабо от плотности смеси.

При изменении содержания нанопорошка в смеси гораздо легче достигнуть предела поверхностной перколяции, чем объемной. Например, при $d = 60 \text{ nm}$ и $D = 5 \mu\text{m}$ поверхностная перколяция возникает уже при $m = 12\%$ для меди и при $m = 4\%$ для алюминия, в то время как объемная перколяция возникает только при $m = 60\%$ для алюминия, если плотность смеси $\rho_c = 0.6 \text{ g/cm}^3$, а для меди она вообще возможна только начиная с $\rho_c = 1.3 \text{ g/cm}^3$.

Из рис. 5 видно, что для наночастиц меди ($d = 50\text{--}70 \text{ nm}$) перколяционный предел находится вблизи концентраций нанопорошка, для которых в экспериментах наблюдалось возбуждение детонации ($\sim 15\text{--}20\%$, см. рис. 1). Вместе с тем эти же концентрации для остальных нанопорошков, использованных в экспериментах, находятся далеко за пределами перколяции, т. е. для них заведомо достигнут и перекрыт перколяционный предел m_p . При условии инициирования детонации только за счет достижения предела поверхностной перколяции наночастицы алюминия, магния и углерода должны были бы способствовать инициированию детонации уже при значительно меньших массовых содержаниях в смеси (например, при $d = 60 \text{ nm}$ это должно было происходить уже при $m > 4\%$). Однако в экспериментах для смесей ВВ типа FOX-7 с нанопорошками алюминия, магния и углерода детонация не возбуждалась. Это означает, что достижение перколяционного предела m_p является лишь необходимым, но не достаточным условием возбуждения детонации.

В. Модель электрического пробоя

Для рассматриваемых систем электрический пробой может быть описан тепловой моделью Вагнера [16]. Эта модель основана на предположении, что всякий реальный диэлектрик содержит слабые места, имеющие повышенную проводимость. В рассматриваемых взрывчатых смесях такими слабыми местами являются цепочки наночастиц, проводимость которых выше проводимости базового диэлектрика ВВ. Эти цепочки образуют каналы повышенной проводимости между двумя электродами. При обычных условиях проводимость этих каналов мала по сравнению с проводимостью чистого материала, из которого сделаны наночастицы. Это связано с наличием окисной пленки, которая всегда присутствует на поверхности наночастиц и является диэлектриком.

При подаче на электроды электрического напряжения U в этих каналах начинает течь ток и выделяется джоулево тепло. Количество джоулевого тепла, выделяемого в одной наночастице, можно оценить по формуле

$$Q_1 = \gamma U^2 \left(\frac{\pi}{4}\right) d \left(\frac{d}{L}\right)^2, \quad (12)$$

где U — напряжение между электродами, L — расстояние между электродами, γ — проводимость наночастицы, учитывающая проводимость всех контактов данной наночастицы с другими наночастицами. Выделение джоулевого тепла приводит к разогреву наночастицы. Проводимость наночастицы γ существенно зависит от ее температуры: с ростом температуры проводимость γ увеличивается практически по закону Аррениуса. Выделяемое в наночастице джоулево тепло отводится за счет теплообмена с окружающей средой (воздухом и частицами ВВ). Приблизженно скорость теплоотвода описывается соотношением

$$Q_2 = \alpha(T - T_0), \quad (13)$$

где α — коэффициент теплоотдачи наночастицы, T — ее температура, T_0 — температура окружающей среды.

Если количество выделяемого джоулевого тепла превышает количество тепла, теряемое наночастицей за счет теплообмена с окружающей средой, происходит ускоряющийся разогрев наночастицы: рост температуры наночастицы приводит к повышению проводимости γ за счет ее аррениусовой зависимости от температуры и, как следствие, к росту скорости выделения джоулевого тепла (12). При определенных условиях температура частицы нарастает экспоненциально, и одновременно экспоненциально нарастает ток, протекающий через цепочку наночастиц, происходит пробой. Предельные условия возникновения пробоя между парой контактирующих наночастиц имеют вид [16]

$$Q_1 = Q_2, \quad \frac{dQ_1}{dT} = \frac{dQ_2}{dT} \quad (14)$$

или

$$\gamma U^2 \left(\frac{d}{L}\right)^2 = \alpha(T - T_0), \quad U^2 \left(\frac{\pi}{4}\right) d \left(\frac{d}{L}\right)^2 \frac{d\gamma}{dT} = \alpha. \quad (15)$$

Отметим аналогию между рассматриваемым процессом и тепловым взрывом в теории химических реакций [17]. В рассматриваемой системе джоулево тепло эквивалентно теплу, выделяемому при химических реакциях, при этом аррениусовская зависимость проводимости γ от температуры эквивалентна аррениусовской зависимости скорости химической реакции от температуры. Условие возникновения электрического пробоя (14) эквивалентно условию возникновения теплового взрыва в химически активной системе [17]. Таким образом, можно сказать, что электрический пробой контакта двух наночастиц происходит в результате теплового взрыва.

Аналогия электрического пробоя и теплового взрыва окажется еще более тесной, если учесть, что проводимость контакта резко возрастает после разрушения окисной пленки, разделяющей контактирующие наночастицы. В этом случае частицы начинают контактировать по высокопроводящему материалу ядра частиц (металлу), что на несколько порядков увеличивает проводимость контакта, а значит, и скорость выделения джоулевого тепла. Разрушение окисных пленок происходит либо в результате их плавления (если температура плавления окиси ниже температуры плавления материала частицы), либо в результате плавления ядра частицы (если температура плавления материала частицы ниже температуры плавления его окиси). В последнем случае разрушение пленки происходит за счет расширения материала частицы при его плавлении, что приводит к вытеканию расплавленного ядра и образованию жидкого высокопроводящего контакта между частицами. Аналогичное явление происходит при протекании химических реакций в порошковых системах: контактирующие частицы остаются практически инертными до тех пор, пока не происходит разрушение окисной пленки; после ее разрушения скорость химической реакции между частицами резко возрастает, что приводит к практически мгновенному выделению тепла [18]. Это означает, что в рассматриваемых системах (и при электрическом пробое и при горении порошковых смесей) имеется некоторая пороговая температура T_b , ниже которой скорость выделения тепла (джоулевого или за счет химической реакции) мала, а выше ее скорость выделения тепла резко возрастает, что приводит практически к мгновенному разогреву наночастицы. В дальнейшем мы будем широко пользоваться этой аналогией между электрическим пробоем и тепловым взрывом.

Отметим, что соотношения (15) определяют лишь необходимые условия электрического пробоя в системе контактирующих частиц и позволяют (по крайней мере, формально) вычислить минимальное напряжение U , при котором произойдет пробой. Однако нас будет интересовать не минимальное напряжение пробоя (так как во всех проведенных экспериментах пробой происходил), а условия, при которых электрический пробой приводит к инициированию детонации.

Рассмотрим более подробно, как происходит электрический пробой в цепочке контактирующих наночастиц. В такой цепочке всегда имеются более „слабые“

контакты между частицами, т.е. контакты, имеющие более высокую проводимость по сравнению с другими. Через эти контакты будет протекать больший ток и, следовательно, в этих частицах будет выделяться больше тепла. Это приведет к тому, что эти частицы раньше других достигнут предельной температуры пробоя T_b . В результате в этих частицах выделится большое количество джоулевого тепла, что приведет к их практически мгновенному нагреву. При этом соседние наночастицы будут иметь существенно меньшую температуру. За счет теплообмена через контакт разогретая наночастица начнет прогревать соседние. Таким образом, соседние наночастицы будут нагреваться быстрее за счет выделяющегося в них джоулевого тепла и за счет тепла, полученного от соседней нагретой наночастицы. После достижения этими частицами температуры пробоя T_b в них также произойдет резкое повышение температуры. То есть в системе контактирующих частиц пробой будет распространяться в виде волны в эстафетном режиме, аналогично распространению химической реакции в порошковых смесях [18–22].

Воспользуемся снова аналогией между электрическим пробоем в цепочке контактирующих наночастиц и распространением химической реакции по цепочке химически активных частиц. В порошковых смесях распространение химической реакции описывается моделями тепловой перколяции [20–22]. Разница между распространением волны электрического пробоя по цепочке контактирующих частиц и волны химической реакции в цепочке химически активных частиц заключается только в природе выделяемого тепла: в первом случае это джоулево тепло, во втором — тепловой эффект химических реакций. Можно сказать, что ядро наночастицы играет роль теплового мостика между контактами наночастиц, которые играют роль „точечных источников энергии“. Это позволяет воспользоваться моделью тепловой перколяции [20–22] для описания распространения электрического пробоя в системе контактирующих наночастиц. Согласно этой модели, скорость распространения реакции по системе одинаковых контактирующих частиц определяется соотношением

$$u = \frac{a}{d} \omega(\varepsilon), \quad (16)$$

где a — температуропроводность частицы, $\omega(\varepsilon)$ — безразмерная скорость распространения реакции [20], $\varepsilon = (T_b - T_0)/(T_{ad} - T_0)$ — безразмерная температура пробоя контакта частиц, $T_{ad} = T_b + Q_0/(m_0 c_p)$ — адиабатическая температура частицы в результате пробоя, m_0, c_p — масса и удельная теплоемкость частицы, Q_0 — количество джоулевого тепла, выделившегося в частице в результате пробоя.

Отметим, что соотношение (16) получено в пределе, когда время выделения тепла Q_0 много меньше периода тепловой индукции, т.е. времени нагрева частиц от начальной температуры T_0 до температуры пробоя T_b . То есть считается, что после пробоя (после достижения

температуры T_b) количество тепла Q_0 выделяется мгновенно. Это условие хорошо выполняется для химических реакций [17], а значит, можно ожидать и для электрического пробоя.

В работах [20,21] подробно исследована тепловая перколяция как в периодической системе, так и в разупорядоченной системе, которая более соответствует реальным смесям. В частности, было установлено, что характер распространения волны тепловой перколяции зависит от безразмерной температуры ε [21,22]. Например, в периодической системе [21] распространение волны тепловой перколяции возможно только при $\varepsilon \lesssim 0.535$, при $\varepsilon > 0.535$ распространение волны тепловой перколяции становится невозможным. При $\varepsilon < 0.511$ волна распространяется в стационарном режиме в том смысле, что интервалы между воспламенением соседних частиц оказываются одинаковыми для всех пар частиц. При $\varepsilon \approx 0.511$ происходит потеря устойчивости стационарного режима, и он сменяется нестационарным (пульсирующим) режимом распространения. В диапазоне $0.511 < \varepsilon < 0.535$ волна распространяется в нестационарных режимах, при которых интервалы между воспламенением соседних частиц оказываются разными для разных пар частиц. При изменении параметра ε от 0.511 до 0.535 происходит потеря устойчивости очередного нестационарного режима, который сменяется более сложным нестационарным режимом. Потеря устойчивости происходит в форме бифуркаций удвоения периода. При $\varepsilon \approx 0.535$ процесс распространения волны тепловой перколяции становится полностью случайным.

Процесс распространения волны тепловой перколяции в разупорядоченной системе количественно отличается от процесса в периодической системе [21]. Оказывается, что при одних и тех же средних параметрах системы скорость распространения волны тепловой перколяции в разупорядоченной системе как минимум в 2 раза меньше скорости распространения волны в периодической системе. Более того, в разупорядоченной системе распространение волны возможно только при $\varepsilon < 0.45$, а заметная нестационарность (нестабильность) проявляется уже при $\varepsilon = 0.4$. Все это связано с тем, что процесс распространения волны тепловой перколяции в целом является нелинейным, хотя теплообмен в системе описывается линейным уравнением теплопроводности.

Численное моделирование [21] показывает, что в разупорядоченных системах в диапазоне $0.2 < \varepsilon < 0.4$, представляющем практический интерес, безразмерная скорость тепловой перколяции ω лежит в диапазоне 0.5–2.

В силу указанной аналогии все свойства волны тепловой перколяции [20–22] могут быть перенесены на распространение электрического пробоя по цепочке контактирующих наночастиц.

С. Условия возбуждения детонации

Таким образом, если во взрывчатой системе имеется перколяционный кластер, состоящий из контактирую-

щих наночастиц, то при подаче на электроды напряжения U по кластеру начнет распространяться волна пробоя со скоростью (16) при $\omega = 0.5–2$.

Рассмотрим, что будет происходить при распространении волны пробоя по перколяционному кластеру во взрывчатой смеси, который лежит на поверхности зерен ВВ (см. выше). При распространении волны пробоя по перколяционному кластеру происходит последовательное импульсное выделение джоулевого тепла в наночастицах в эстафетном режиме. При пробое и резком нагреве наночастицы она инициирует химическую реакцию в зерне ВВ в месте своего контакта. То есть при распространении волны пробоя по цепочке наночастиц по поверхности зерна ВВ движется источник тепловой энергии, который вызывает в зерне химическую реакцию.

Можно утверждать, что источник тепла, движущийся по поверхности зерна ВВ, может инициировать детонацию только в том случае, если скорость его движения больше скорости распространения акустической волны Рэлея C_R на поверхности зерна:

$$u > C_R. \quad (17)$$

Это условие имеет простое объяснение: пробой частицы приводит к резкому выделению джоулевого тепла и инициированию химической реакции в зерне ВВ, что вызывает слабую волну сжатия, которая распространяется вдоль поверхности зерна со скоростью C_R . Если условие (17) не выполняется, поверхностная волна обгоняет волну инициирования (волну пробоя), что приводит к разгрузке напряжений в зерне. Такой процесс может вызвать только зажигание зерна, но не его детонацию. Если же условие (17) выполняется (волна пробоя движется со сверхзвуковой скоростью), волна пробоя обгоняет поверхностную волну. В результате волны, возникшие от последовательного пробоя разных наночастиц, накладываются и формируют ударную волну, что совместно с инициируемыми в результате последовательных пробоев химическими реакциями в поверхностном слое зерна ВВ в конечном счете может привести к детонации.

Кроме того, отметим, что, если условие (17) не выполняется и поверхностные волны опережают волну пробоя, колебания поверхности зерна, вызванные поверхностной волной, могут нарушить контакт наночастиц с зерном, что затруднит инициирование химической реакции в зерне ВВ при пробое следующих частиц и также не будет способствовать инициированию детонации. Таким образом, приходим к выводу, что необходимым условием возбуждения детонации в рассматриваемых системах является условие (17), которое с учетом (16) принимает вид

$$\frac{a}{d} > C_{R\text{eff}}, \quad (18)$$

где

$$C_{R\text{eff}} = \frac{C_R}{\omega}. \quad (19)$$

Из соотношения (18) следует, что детонация при электрическом пробое может быть возбуждена только в том

Свойства порошков и их цепочек

Вещество	$a, 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$d_{\text{cr}}, \text{ nm}$ (при $C_{R \text{ eff}} = 1300 \text{ m/s}$)	$d_{\text{cr}}, \text{ nm}$ (при $C_{R \text{ eff}} = 1600 \text{ m/s}$)	$d_{\text{cr}}, \text{ nm}$ (при $C_{R \text{ eff}} = 2000 \text{ m/s}$)	Скорость тепловой перколяции a/d для разных размеров частиц, m/s			
					1 μm	100 nm	50 nm	10 nm
Cu	1.12	86	70	56	112	1120	2240	11200
Al	0.84	65	53	42	84	840	1680	8400
Mg	0.68	52	43	34	68	680	1360	6800
Al ₂ O ₃	0.12	9.2	7.5	6	12	120	240	1200
C	0.036	2.7	2.3	1.8	4	36	72	360

случае, если размер наночастиц меньше критического

$$d < d_{\text{cr}}, \quad (20)$$

где

$$d_{\text{cr}} = \frac{a}{C_{R \text{ eff}}}. \quad (21)$$

Критический размер наночастиц (21) зависит как от свойств ВВ (C_R), так и от свойств наночастиц и их цепочек (a, ω). Как известно, скорость поверхностной волны C_R мало отличается от скорости распространения поперечных волн C_t . Для изотропного материала

$$C_R = \xi C_t.$$

где ξ — коэффициент, зависящий только от коэффициента Пуассона и теоретически изменяющийся в пределах от 0.87 до 0.955 [23] (фактически с учетом реального изменения коэффициента Пуассона $\xi = 0.9-0.95$). Для ТЭН в литературе приводятся значения $C_t = 1573-1684 \text{ m/s}$ [24], что соответствует $C_R = 1415-1600 \text{ m/s}$. Для FOX-7 такие данные отсутствуют, однако косвенные данные указывают на то, что скорость звука для этого взрывчатого вещества несколько выше, чем для ТЭН. Учитывая диапазон изменения параметра ω , в настоящей работе принято $C_{R \text{ eff}} = 1300 \text{ m/s}$ для ТЭН и $C_{R \text{ eff}} = 1600 \text{ m/s}$ для FOX-7.

В таблице приведены значения d_{cr} для разных веществ и разных значений $C_{R \text{ eff}}$, а также скорости распространения тепловой перколяции a/d для частиц разных размеров. Из таблицы следует, что при одинаковом размере наночастиц тепловая перколяция имеет наибольшую скорость для нанопорошка меди, а наименьшую — для нанопорошка углерода.

При прочих равных параметрах критические условия инициирования детонации в смеси с нанопорошком меди достигаются уже для относительно крупных частиц (50–90 nm), в то время как для инициирования детонации в смеси с порошком углерода требуются частицы с размерами 2–3 nm. Этим объясняются результаты экспериментов (рис. 1), в которых детонацию удалось инициировать только в смесях ВВ типа FOX-7 с нанопорошком меди и в смесях ТЭН с нанопорошками меди и алюминия. Таким образом, для инициирования детонации высоковольтным разрядом в смесях порошкообразного ВВ и инертного нанопорошка необходимо выполнение следующих условий.

1. Должен быть достигнут предел поверхностной перколяции (11).

2. Скорость распространения пробоя по цепочке наночастиц (16) должна быть выше скорости поверхностных звуковых волн в зернах взрывчатого вещества, т. е. должно выполняться условие (18).

Эти условия удобно представить графически в координатах ($m, d/d_{\text{cr}}$). На рис. 6 приведено „фазовое пространство“ взрывчатой смеси в координатах ($m, d/d_{\text{cr}}$). Наклонными линиями показаны зависимости $m_p(d/d_{\text{cr}})$ для разных нанопорошков, при этом сплошные линии соответствуют смесям на основе ВВ типа FOX-7, а штриховые линии — смесям на основе ТЭН. Вертикальная штриховая линия соответствует $d = d_{\text{cr}}$. При построении графика использовались значения: $k = 3$, $\xi = 0.9$, $\varphi_p = 0.5$, диаметр частиц ВВ принимался одинаковым для ТЭН и ВВ типа FOX-7, равным $D = 5 \mu\text{m}$, плотность зерен ВВ принималась одинаковой для ТЭН и ВВ типа FOX-7, равной $\rho_c = 1.8 \text{ g/cm}^3$. Эффективная скорость поверхностных звуковых волн в зернах ВВ принята: $C_{R \text{ eff}} = 1600 \text{ m/s}$ для FOX-7 и $C_{R \text{ eff}} = 1300 \text{ m/s}$ для ТЭН. Иницирование детонации возможно только в области левее вертикальной линии $d = d_{\text{cr}}$ и выше соответствующей линии $m_p(d/d_{\text{cr}})$. Значками на рис. 6 показаны экспериментальные данные. Диаметры наночастиц, использованных в экспериментах (Cu и Al), приняты равными $d = 60 \text{ nm}$. Светлыми значками отмечены эксперименты, в которых произошло инициирование, темными — не произошло. Отметим, что на рис. 6 светлыми значками отмечались те эксперименты, в которых при данном содержании нанопорошка произошло инициирование хотя бы при одной плотности заряда.

Из рис. 6 следует, что предложенная модель правильно описывает имеющиеся экспериментальные данные по инициированию детонации высоковольтным разрядом в смесях ВВ с инертными нанопорошками. Так, например, в смеси ВВ типа FOX-7 с 10% по массе нанопорошка меди детонацию не удалось инициировать, так как массовое содержание нанопорошка было меньше предела поверхностной перколяции (11), хотя размеры наночастиц были меньше критических и второе необходимое условие (20), (21) выполнялось. Для смеси ТЭН с нанопорошком алюминия, напротив, выполнялось первое необходимое условие: содержание нанопорошка в смеси было значительно больше предела поверхностной

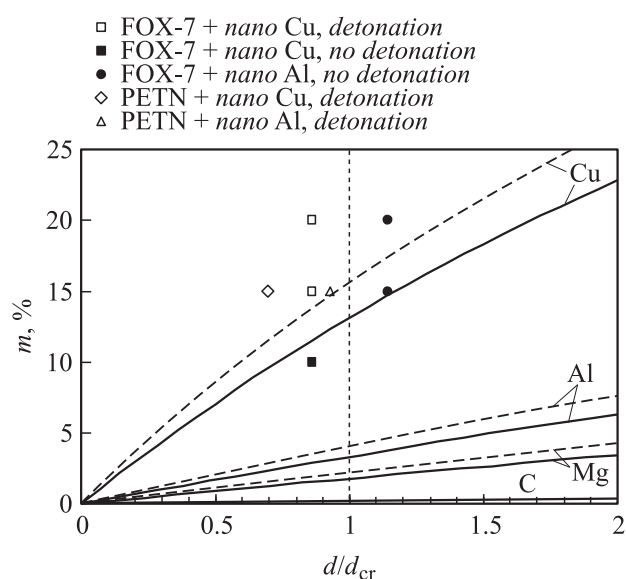


Рис. 6. Области инициирования детонации для смесей ТЭН или ВВ типа FOX-7 с различными нанопорошками. Наклонные линии — зависимости $m_p(d/d_{cr})$ для разных нанопорошков: сплошные линии соответствуют смесям на основе ВВ типа FOX-7, штриховые линии — смесям на основе ТЭН. Вертикальная штриховая линия — $d = d_{cr}$.

перколяции (11), однако второе условие (20), (21) не выполнялось: размер наночастиц алюминия был больше критического. Из рис. 6 следует, что инициировать детонацию в смесях ВВ с нанопорошком алюминия легче, чем в смесях с нанопорошком меди: критические размеры наночастиц для этих металлов практически одинаковые, однако достигнуть предела поверхностной перколяции для алюминия значительно легче, чем для меди. Так, например, в смеси ТЭН с тем же нанопорошком алюминия можно инициировать детонацию уже при малом содержании нанопорошка алюминия $m > 4\%$. Для инициирования детонации в смеси ВВ типа FOX-7 с нанопорошком алюминия достаточно снизить размеры наночастиц до 35–45 nm, в этом случае детонацию можно будет инициировать уже при малом содержании нанопорошка алюминия $m > 4\%$.

В заключение обсудим влияние плотности взрывчатой смеси на условия возбуждения детонации при электрическом пробое.

Очевидно, для инициирования детонации во взрывчатых смесях перколяционные кластеры, по которым распространяется проба, должны плотно прилегать к поверхности зерен ВВ, т. е. должны образовывать на них перколяционную сетку. При отслоении этой сетки от поверхности зерен ВВ даже при выполнении первых двух необходимых условий детонация возбуждаться не будет. При уплотнении смеси происходит взаимное перемещение зерен ВВ, при котором зерна могут разрушать перколяционную сетку на поверхности соседних зерен. В результате этого может как нарушаться контакт перколяционных кластеров с поверхностью зерен ВВ, так

и разрушаться сами перколяционные кластеры. Кроме того, может нарушаться связность кластеров наночастиц в окрестности точек контакта зерен ВВ, в результате пробой может не передаваться от одного зерна ВВ к другому, что не обеспечит непрерывный процесс развития детонации.

Как указывалось выше, при уплотнении смеси практически не изменяется распределение наночастиц на поверхности зерен ВВ (если не учитывать указанного выше механического воздействия зерен друг на друга), однако перколяционные сетки на поверхности разных зерен при уплотнении могут перекрываться за счет ответвлений, уходящих от поверхности зерна в объем пор между зернами. Это приведет к тому, что при уплотнении смеси перколяционные кластеры на соседних неконтактирующих зернах ВВ могут оказаться связанными, что увеличит тепловые потери при прохождении волны пробоя и может снизить вероятность инициирования детонации.

В теории тепловой перколяции [20–22] также имеются условия, которые в принципе позволяют объяснить верхний предел инициирования детонации при уплотнении заряда. Например, если предположить, что при уплотнении смеси параметр изменяется, то возможны следующие ситуации.

1. Если при уплотнении смеси параметр ε превысит значение 0.45, то тепловая перколяция становится невозможной, а следовательно, будет отсутствовать и инициирование детонации.

2. С изменением ε изменяется безразмерная скорость тепловой перколяции ω . Поэтому если при одном (при одной плотности смеси) детонация возбуждалась, т. е. выполнялось условие (18), то при другом ω (после уплотнения смеси) это условие может перестать выполняться (для тех же наночастиц) и детонация возбуждаться не будет.

Здесь перечислены несколько возможных механизмов влияния плотности смеси на инициирование детонации в смесях ВВ с нанопорошками. Какой из них на самом деле имеет место в настоящее время, сказать трудно. Для этого требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Заключение

1. Показано, что добавки в высокодисперсное малочувствительное взрывчатое вещество типа FOX-7 нанопорошка меди с размерами частиц 50–70 nm в количестве (15–20)% от массы заряда резко повышают чувствительность смеси к воздействию высоковольтного электрического разряда и способствуют возбуждению в нем детонации при следующих параметрах разряда: емкость $C = 1 \mu\text{F}$, напряжение $U = 9 \text{ kV}$, длительность импульса $\sim 1 \mu\text{s}$.

2. Проведен анализ структуры взрывчатой смеси с инертным нанопорошком. Показано, что частицы нанопорошка распределяются, главным образом, по поверхности микронных зерен взрывчатого вещества.

3. Показано, что существует два вида перколяции: поверхностная (при которой перколяционный кластер располагается на поверхности зерен ВВ) и объемная (при которой перколяционный кластер равномерно случайным образом заполняет поры между зёрнами ВВ). Найден предел перколяции по поверхности. Показано, что поверхностная перколяция возникает значительно раньше объемной и слабо зависит от плотности смеси, но существенно зависит от размеров наночастиц.

4. Предложена перколяционная модель распространения электрического пробоя в порошковых смесях с нанодисперсными инертными добавками.

5. Разработана модель возбуждения детонации в смеси БВВ с инертной добавкой. Установлены необходимые условия инициирования детонации высоковольтным разрядом в смеси ВВ и инертного нанопорошка. Результаты модели качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными.

[22] *Rashkovskiy S.A.* // Adv. Sci. Technol. 2010. Vol. 63. P. 213–221.

[23] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.

[24] *Leiber Carl-Otto.* Assessment of safety and risk with a microscopic model of detonation. Elsevier Science B.V. Amsterdam: The Netherland, 2003. 594 p.

Список литературы

- [1] Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 702 с.
- [2] *Даниленко В.В.* Взрыв: физика, техника, технология. М.: Энергоатомиздат, 2010. 782 с.
- [3] *Андреев В.В.* // ФГВ. 1993. № 2. С. 87–90.
- [4] *Roux M., Auzanneau, Brassy C.* // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. Vol. 18. N 6. P. 317–324.
- [5] *Брагин В.А., Душенок С.А., Куликов В.Г., Савенков Г.Г.* и др. // Хим. физ. 2012. Т. 31. № 5. С. 57–64.
- [6] *Граевский М.М.* Справочник по электрическому взрыванию зарядов ВВ. М.: Рандеву–АМ, 2000. 234 с.
- [7] *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Уро РАН, 2000. 256 с.
- [8] *Стеньгач В.В.* // ФГВ. 1970. № 1. С. 113–119.
- [9] *Мельников М.А., Гаврилин А.И., Димова Н.И., Калашиников А.Л.* // ЖФХ. 1970. Т. 49. № 9. С. 2321–2325.
- [10] *Захаров Ю.А., Сухушин Ю.Н.* // Изв. Том. политех. ин-та. 1970. Т. 251. С. 213–218.
- [11] *Сухушин Ю.Н., Захаров Ю.А., Раннопорт Г.А.* // Изв. Том. политех. ин-та. 1970. Т. 251. С. 219–229.
- [12] *Рашковский С.А.* // ФГВ. 1999. Т. 35. № 5. С. 65–74.
- [13] *Рашковский С.А.* // ФГВ. 2002. Т. 38. № 4. С. 65–76.
- [14] *Clerc J.P., Giraud G., Laugier J.M., Luck J.M.* // Adv. Phys. 1990. Vol. 39. P. 191–198.
- [15] *Bollobás B., Riordan O.* Percolation. NY: Cambridge University Press, 2006.
- [16] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: ГИФМЛ, 1958. 907 с.
- [17] *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 480 с.
- [18] *Mikasyan A.S., Rogachev A.S.* // Prog. Ener. Combust. Sci. 2008. V. 34. N 3. P. 377–416.
- [19] *Рогачев А.С.* // ФГВ. 2003. Т. 39. № 2. С. 38–47.
- [20] *Рашковский С.А.* // ФГВ. 2005. Т. 41. № 1. С. 41–54.
- [21] *Rashkovskiy S.A., Kumar G.M., Tewari S.P.* // Combust. Sci. Technol. 2010. V. 182. P. 1009–1028.