

2. В.А. Канаков, С.В. Катин, Н.С. Корнев, А.Л. Михайлов, А.В. Назаров, Ю.И. Орехов, А.В. Родионов, В.Н. Хворостин. Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов // Антенны, 2016, № 1 (221), С. 49-54.
3. Е.Н. Богданов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков, А.В. Кашин, А.Л. Михайлов, К.В. Минеев, А.В. Назаров, Ю.И. Орехов, А.А. Седов, В.Н. Хворостин. Реализация радиометрического канала в КВЧ интерферометре для диагностики быстротекущих газодинамических процессов // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 2015, С. 442-446.
4. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М.: Наука, 1966, 686 с.
5. В.М. Бельский, А.Л. Михайлов, А.В. Родионов, А.А. Седов. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва, 2011, № 6, С. 29-41.
6. Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович, В.П. Челышев, Б.И. Шехтер. Физика взрыва // М.: Наука, 1975, 704 с.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА НА ОСНОВЕ ГОРЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Al+CuO

С.Ю. Ананьев, А.Ю. Долгобородов, Б.Д. Янковский

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Описаны результаты экспериментального исследования горения стехиометрической смеси микронных порошков алюминия и оксида меди при разных способах инициирования. Часть результатов исследования использована затем для создания модуля импульсного источника света с апертурой 400x400 мм.

По оценкам, химическое взаимодействие компонентов смеси порошков алюминия и оксида меди может происходить с выделением энергии ~4 кДж/г в случае полного реагирования компонентов. Скорость энерговыделения в порошковых смесях окислитель - горючее в значительной степени зависит от поверхности контакта между частицами. Смеси реальных порошков имеют конечное значение этой поверхности. Для увеличения площади контакта и снижения энергетического порога инициирования реакции использована предварительная механоактивация смеси в шаровой вибрационной мельнице. Время активации изменялось от 2 до 20 минут. В результате активации образуются активированные кластеры из исходных компонентов, и снижается температура вспышки смеси. Как показывает микроскопия смеси (рис. 1), контактная поверхность компонентов в кластерах носит характер локальных очагов. В конечном счете, это сказывается на скорости и времени сгорания контрольной навески смеси заданной геометрической формы.

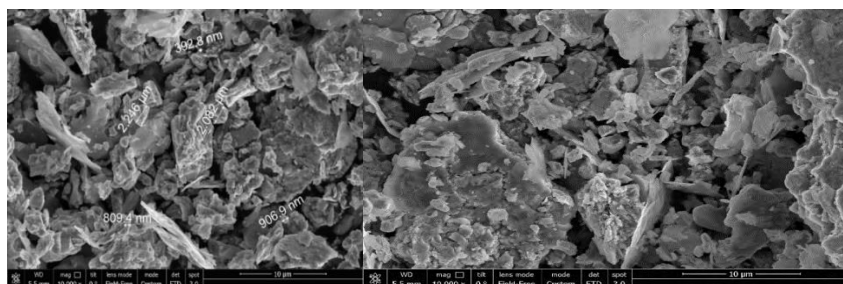
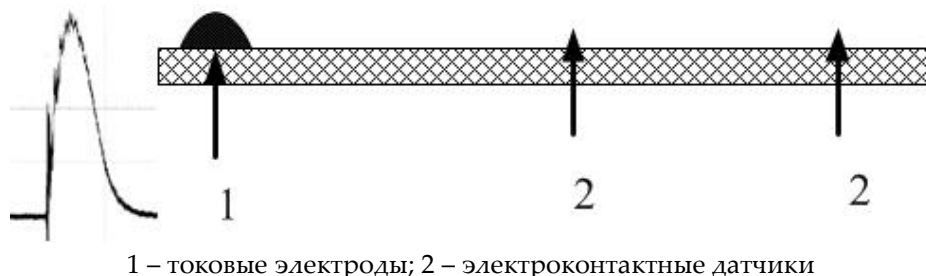


Рисунок 1. Микроскопические фотографии (40x25 мкм) смеси порошков Al и CuO



1 – токовые электроды; 2 – электроконтактные датчики

Рисунок 2. Осциллограмма тока искры и схема эксперимента с электроискровым инициированием

Горение смеси рассмотрено как переходной процесс некоторой массы смеси (~1 г) от исходных компонентов к конечным продуктам в результате первичного внешнего воздействия в виде импульсов тепла или давления. Внешнее воздействие играет роль спускового механизма для начала химической реакции. Тепловой импульс создавался искровым разрядом длительностью ~1 мкс при плотности энергии ~ 10^{13} Вт/м². При размещении контрольной навески смеси на плоском основании (рис. 2) сгорание происходит с естественным разбросом вещества.

По совокупности данных скоростного фотографирования, осциллограмм срабатывания электроконтактных датчиков и трековым отметкам на тонких фольгах область свечения (пламя) следует характеризовать как расширяющийся поток реагирующих кластеров и холодных компонентов смеси в облаке излучающей плазмы продуктов горения (рис. 3а). Разлет реагирующих кластеров средней кинетической энергии образует линию фронта области свечения. Например, сгорание навесок смеси массой 0,3 г на горизонтальной поверхности приводит к образованию области свечения до 2000 мм² в сечении за время ~ 1000 мкс.

Моменты замыкания контактов датчиков продуктами горения навески достаточно точно соответствуют скорости расширения области свечения. Характерные скорости разлета продуктов горения локальных навесок смеси (от 0,03 г и выше), а также скорость горения линейных дорожек из смеси (с линейной плотностью около 0,2 г/см) составляют десятки метров в секунду (рис. 3б). При этом наблюдается разброс значений скорости расширения, как за счет разброса по плотности при укладке насыпной смеси, так и естественным распределением кластеров по массе и скорости. Скорость расширения области свечения увеличивается, в некоторых пределах, с увеличением массы локальной навески смеси (рис. 3в). Ограничение разлета продуктов горения боковыми стенками в пределах высоты дорожки смеси также приводит к увеличению скорости горения.

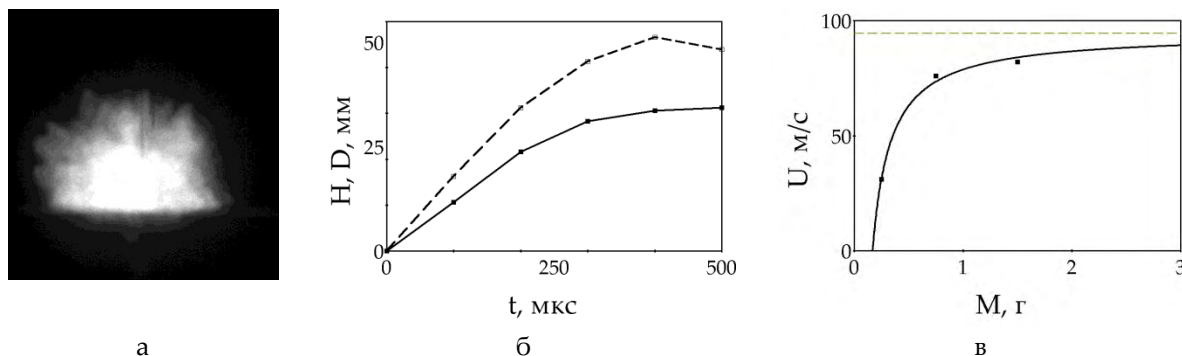


Рисунок 3. а - фотография области свечения при естественном разлете холодных и реагирующих компонентов навески смеси (0,3 г) вдоль и поперек плоского основания; б – временные диаграммы диаметрального (пунктир) и вертикального (сплошная линия) расширения области свечения; в – зависимость вертикальной скорости расширения области свечения от массы навески

Наличие воздушных промежутков при укладке смеси не препятствует распространению горения. Зафиксировано инициирующее воздействие наиболее энергетичных (быстрых) кластеров через воздушные промежутки до 170 мм.

Выгорание кластеров низкой кинетической энергии в тылу области свечения обеспечивает продолжительность времени высвечивания до 5 мс. Т.е. расширение области свечения обусловлено разлетающимися кластерами смеси и продолжением выделения химической энергии во всем ее объеме. С использованием четырехканального пирометра определена яркостная температуры области свечения. Максимальная яркостная температура продуктов реакции 3600 К зафиксирована для смеси с дозой механоактивации 8 минут.

Импульс давления продолжительностью ~ 1 мкс с плотностью энергии $\sim 10^{12}$ Вт/м² осуществлен при последовательном прохождении по таблетке из прессованной смеси ударной волны и волны разгрузки (рис. 4а).

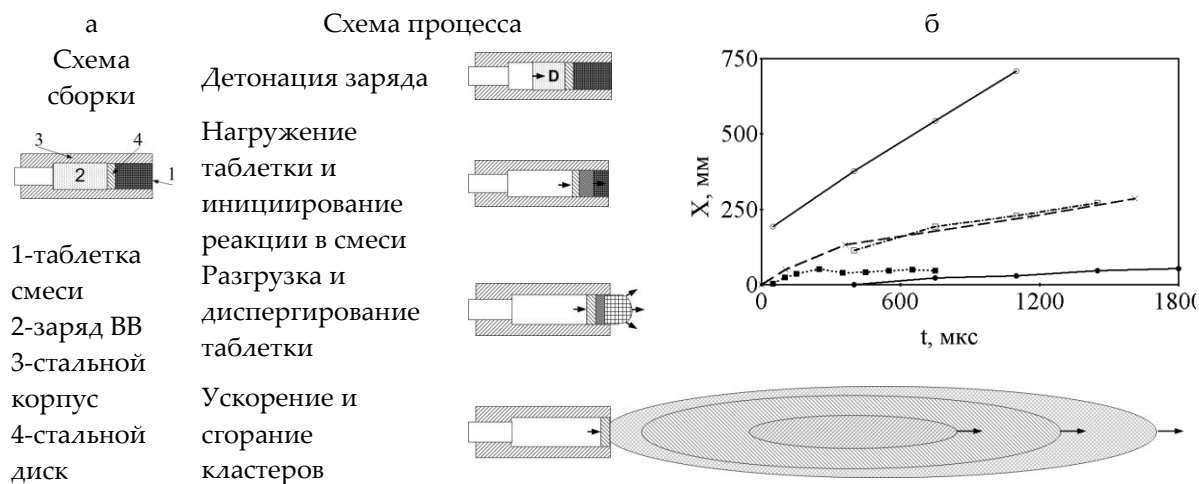


Рисунок 4. а - схема экспериментальной сборки и процесс ударного нагружения смеси:

1 – прессованная таблетка смеси. 2 – заряд гексогена ($1,15$ г/см³), 3 – промежуточный стальной диск; б - временные диаграммы различных участков области свечения:

1 - фронт потока; 2 - центр потока; 3 - фронт плазмы; 4 - радиус потока; 5 - тыл потока

Нагружение таблетки 1 (масса 1 г) проводили при детонации заряда ВВ 2 (гексоген 1 г при плотности $\sim 1,15$ г/см³) в стальной трубке 3 с внутренним и внешним диаметрами 8 и 14 мм, соответственно. Для тепловой защиты таблетки от влияния продуктов детонации использован промежуточный стальной диск 4 толщиной 2,5 мм. Стальную трубку закрепляли соосно с сопловым отверстием на стальной пластине толщиной 2,5 мм. Интенсивность нагружения регулировали размером воздушного зазора между зарядом ВВ и стальным диском (0-3 длины заряда). Интенсивность разгрузки таблеток и степень диспергирования регулировали изменением площади соплового отверстия. При площади менее 0,5 от площади таблетки стальной диск застревал в сопле и предотвращал влияние продуктов детонации на процесс формирования потока частиц диспергируемой таблетки.

Химическое взаимодействие компонентов наблюдали в виде свечения за сопловым отверстием при стимулированном разбросе вещества в струйном потоке. Фотографии потока с экспозицией 50 нс свидетельствуют о гомогенности излучения потока в видимой области. Характер импульсов тока проводимости между потенциальными электродами позволяет предполагать большое значение электрического сопротивления в области свечения, что может свидетельствовать о достаточно низкой плотности плазмы. Динамика потока (рис. 4а) реагирующего материала определена при скоростном фотографировании в течение до 5 мс и по хронограммам замыкания плазмой потенциальных электродов. Так скорость центра области свечения потока увеличивается

с ~240 до ~650 м/с с увеличением диаметра соплового отверстия, а скорость увеличения площади продольного сечения области свечения достигает 35 мм²/мкс к моменту времени 200 мкс.

Динамика сгорания материала диспергированных таблеток из смеси с различной дозой механоактивации (2-20 мин) до 500 мкс практически не различается, затем площадь продольного сечения области свечения идет на убыль и особенно быстро для таблеток с дозой активации 6 и 8 минут. Скорость фронта области свечения в пределах ±10% не зависит от изменения интенсивности ударного нагружения. Скорость потока также не меняется при нагружении таблеток с разной (15-35%) исходной пористостью. По-видимому, ударное нагружение приводит к эффекту активации химической реакции на поверхностях контакта частиц металла и окислителя, превышающий эффект предварительной механоактивации.

Изложенные представления и экспериментальные данные использованы для изготовления простого источника света на основе сгорания смеси порошков Al и CuO.

В основу конструкции источника положен модуль с апертурой 400x400 мм (рис. 5а). В качестве источника излучения использованы точечные (0,3 г) навески смеси либо ленточная (1x10 мм) дорожка смеси длиной 380 мм с двумя точками инициирования. Глубина размещения дорожки смеси от апертуры – 200 мм. Масса смеси в дорожке модуля 9 г. Среднее значение линейной скорости сгорания смеси составляет 35 м/с.

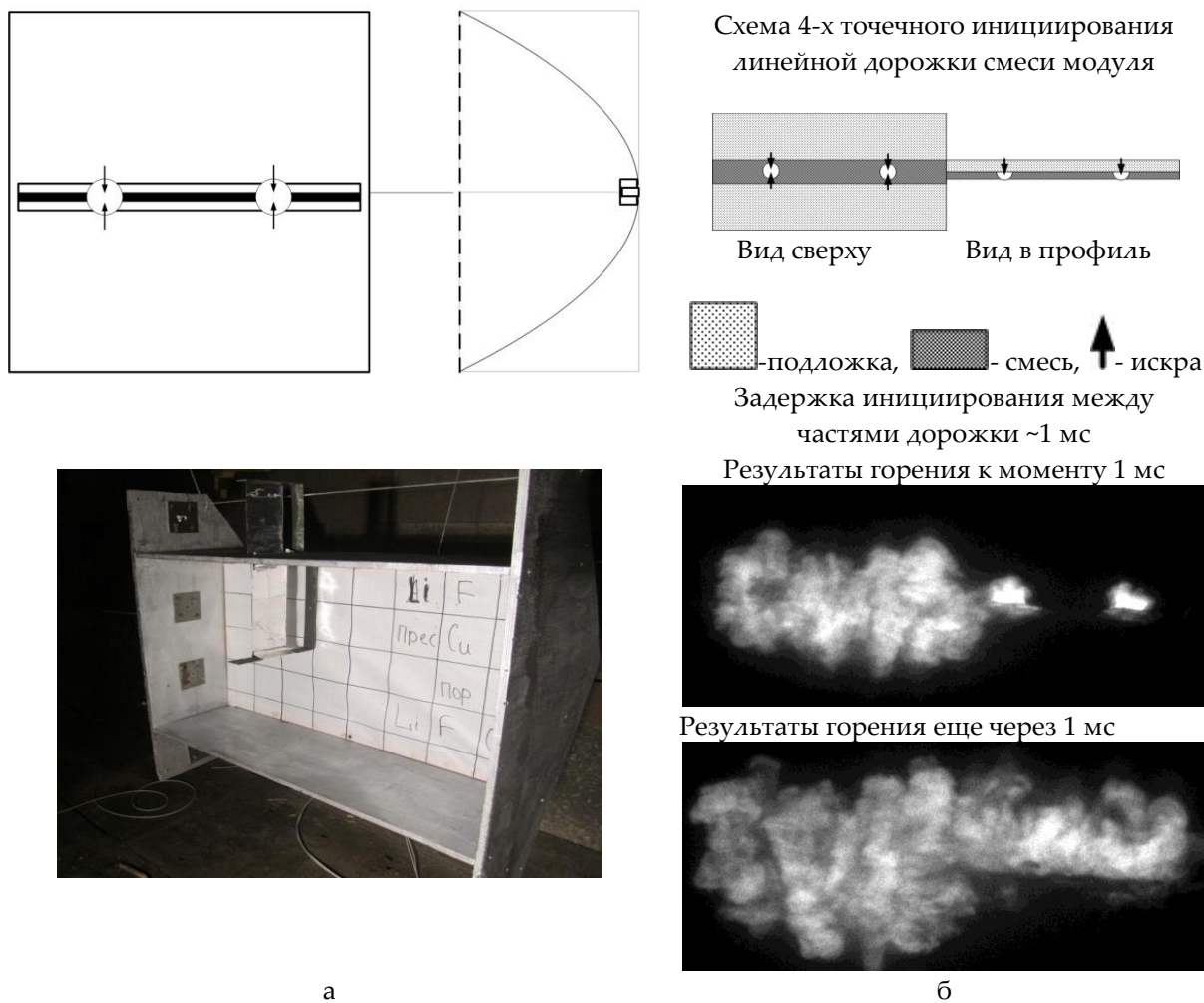
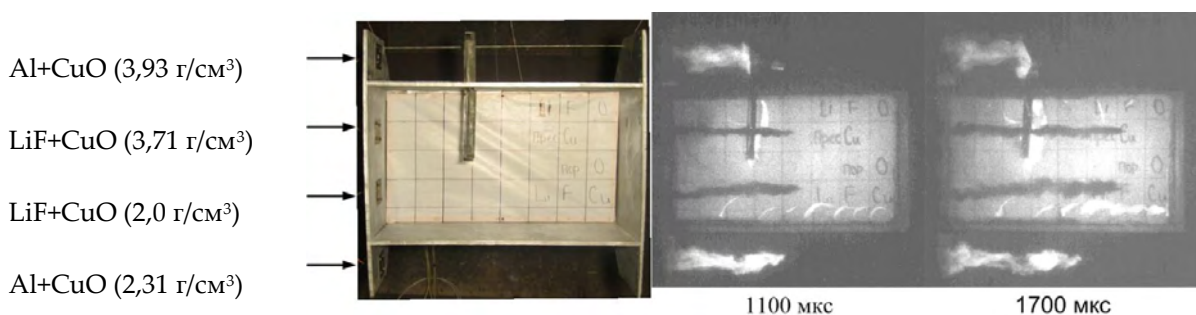


Рисунок 5. а – схема модуля и фотография сборки из двух модулей с пергаментным экраном на фронтальной плоскости; б – схема 4-х точечного инициирования линейной дорожки смеси и фотографии области горения

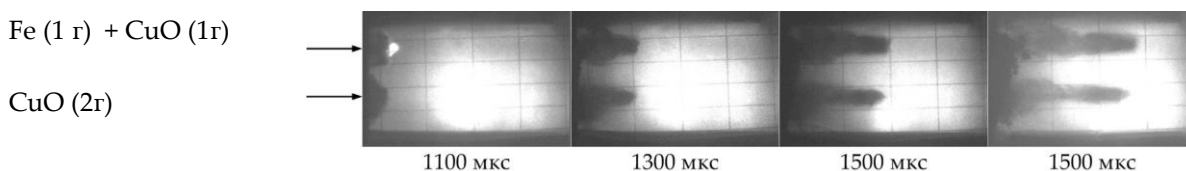
Инициирование реакции в смеси осуществляется в 4 точках электроискровым способом с использованием генератора ГЗИ-6. Для повышения эффективности использования излучения на начальном этапе загорания смеси в источнике установлен параболический рефлектор. Время расширения области свечения (рис. 5б) в данной конструкции до момента полного освещения экрана приближается к 1 мс при полной длительности свечения не менее 5 мс. Это делает некритичным выбор момента синхронизации с другими процессами.

Модуль прост в изготовлении и может применяться при фотографировании объектов в относительно медленном движении в проходящем или отраженном свете. В отличие от источников [1, 2] с использованием взрывчатых веществ, сгорание термитной смеси Al+CuO не сопровождается разрушением конструкции. Очистка рефлектора от продуктов реакции и монтаж новой ленты смеси позволяет использовать конструкцию вторично. Аналогичным образом можно использовать и сгорание смеси при ударном инициировании.

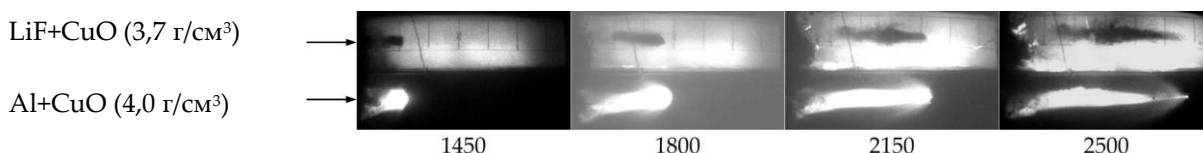
Источник света из двух модулей использован нами для фотографирования процесса формирования и перемещения плотного потока микрочастиц со скоростью ~500 м/с (рис. 6). Фотографирование осуществлено камерой Cordin 222-16 с экспозицией 0,1-1,0 мкс.



а - Сопоставление динамики потоков из инертных и реагирующих материалов при разной исходной плотности смеси



б - Сопоставление динамики потоков из инертных материалов



в - Сопоставление динамики потоков из инертных и реагирующих материалов

Рисунок 6. Примеры фотографий потоков различных порошковых материалов

Аппроксимация X-t диаграмм фронтальной части потока частиц таблеток не реагирующей смеси LiF+CuO и реагирующей смеси Al+CuO (рис. 6а, в), из инертного порошка CuO (рис. 6б), дали значения скорости: 498 м/с и 491 м/с, 437 м/с, соответственно. Близость значений скорости сравниваемых смесей указывает, что выделение химической энергии в потоке частиц практически не сказывается на его скорости, а определяется, в значительной мере, совокупной массой таблетки и промежуточного стального диска.

- получены экспериментальные данные о динамике горения стехиометрической смеси порошков алюминия и оксида меди при разных способах инициирования;
- полученные данные использованы при изготовлении модульного источника света для фотографирования относительно медленных объектов в проходящем или отраженном свете. Модуль прост в изготовлении, а сгорание энергетической смеси Al+CuO не сопровождается разрушением конструкции;
- по совокупности данных определена наиболее оптимальная доза механоактивации смеси микронных порошков Al+CuO. Эта доза составила 8 минут.

Список литературы

1. С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холин Кумулятивные источники света. Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011. С. 327.
2. С.С. Буланов, Р.У. Есиев, А.С. Камруков, Н.П. Козлов, М.И. Морозов, И.А. Росляков. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения. ЖТФ, т. 80, вып. 11, с. 87-95, 2010.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № I.13П «Теплофизика высоких плотностей энергии» и проекта РФФИ № 16-29-01030.

A PULSE LIGHT SOURCE BASED ON THE COMBUSTION OF POWDER MIXTURE Al+CuO

S. Yu. Ananev, A. Yu. Dolgoborodov, B. D. Yankovskiy

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The results of experimental studies of combustion under different ways of initiation of aluminum and copper oxide powders stoichiometric mixture are given. Some results was used to generate a pulse light source with an aperture 400x400 mm.

By estimations, chemical interaction of the mixture components can occur with the energy release of 4 kJ/g in the case of complete reaction of the components. The rate of energy deposition in the oxidizer - fuel powder mixtures depends on the contact surface between the particles. The mixture of real powders have a finite value of this surface. To increase contact area and reduce energy threshold of the initiation of reaction we carried out the preliminary mechanical activation in a ball vibratory mill. The activation time was 2-20 minutes. Because of activation the activated clusters of source components was formed. As microscopy of the mixture shown (fig. 1), the contact surface of the components in the clusters is in the nature of local spots. Ultimately, this affects the combustion speed and time for test specimen with specified geometric shape.