

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕНИЯ УДАРНО-ДИСПЕРГИРУЕМОГО ГОРЮЧЕГО В КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ СОСУДАХ РАЗЛИЧНОЙ ЕМКОСТИ

А. Л. Кул<sup>1</sup>, П. Нойвальд<sup>2</sup>, Н. Рейкенбах<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, Университет Калифорнии, 94551 Ливермор, Калифорния, США, kuhl2@llnl.gov

<sup>2</sup>Фраунгоферовский институт быстропротекающих процессов, Фрайбург, Германия

Исследовано горение заряда твердого горючего массой 1 г, состоящего из чешуек алюминия, диспергируемых ударной волной в калориметрах объемом 6.6, 21.5 и 40.5 л. Записи давления на стенке сосуда были использованы для того, чтобы определить влияние энерговыделения за счет горения турбулентно перемешанной смеси продуктов взрыва с воздухом. Зафиксировано увеличение в четыре раза пика квазистатического давления при тестировании в камере объемом 6.6 л. Спад давления, регистрируемый после взрыва, обусловлен потерями энергии за счет теплопередачи излучением к стенкам калориметра.

Ключевые слова: твердое горючее, алюминий, энерговыделение, горение, взрыв.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучены инициированные взрывом процессы смешения и горения зарядов ударно-диспергируемого горючего (УДГ) в цилиндрическом калориметре [1, 2] типа манометрической бомбы. В работе исследовались различные типы горючего; сравнительные значения их теплот сгорания приведены на рис. 1. Там же показано, какое количество воздуха требуется для полного окисления 1 г горючего по стехиометрическому соотношению. Отметим, что хотя полиэтилен (ПЭ) и имеет наибольшую теплоту горения (44.93 кДж/г), для его окисления требуется большое количество воздуха (12.8 л/г в нормальных условиях). Из-за конкуренции этих факторов выбор оптимального горючего не очевиден. Экспериментально обнаружено, что чешуйки алюминия представляют наиболее эффективный материал для зарядов УДГ, т. е. они дают максимальный прирост давления за счет собственного горения. Опыты с алюминием описаны наиболее подробно.

Заряд УДГ (рис. 2) включает подрывной заряд в виде сферической капсулы, заполненной пентаэритритолтетранитратом (ПЕТН) массой 0.5 г, который окружен со всех сторон слоем чешуйчатого алюминия массой 1 г. На фотографии (рис. 3), полученной на сканиру-

ющем электронном микроскопе, хорошо видна чешуйчатая структура частиц алюминия с характерным размером 100 мкм и толщиной 1 мкм. Порошок был поставлен фирмой Merck KGaA, результаты химического анализа приведены ниже:

- алюминий (комплексометрический метод): > 90 %,
- тяжелые металлы (например, свинец): < 0.03 %,
- мышьяк: < 0.0005 %,
- железо: < 0.5 %,
- жир: ≈ 1 %.

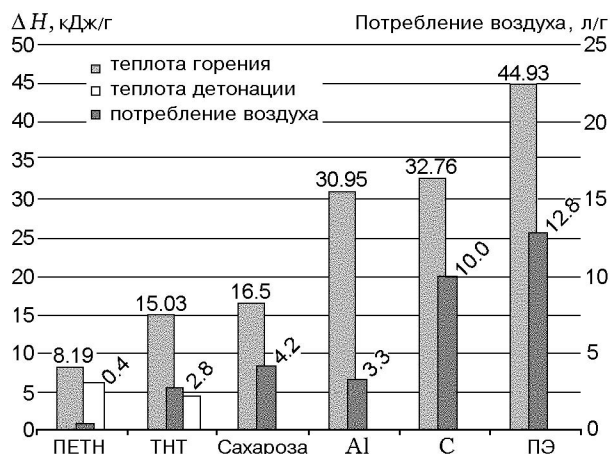


Рис. 1. Сравнительные данные по теплоте горения различных типов горючих и по количеству воздуха, требуемого согласно стехиометрическим соотношениям

A. L. Kuhl<sup>1</sup>, P. Neuwald<sup>2</sup>, H. Reichenbach<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Lawrence Livermore National Laboratory, 94551 Livermore, California, USA.

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Kurzzzeitdynamik: Ernst-Mach-Institut, Freiburg im Breisgau, Germany.

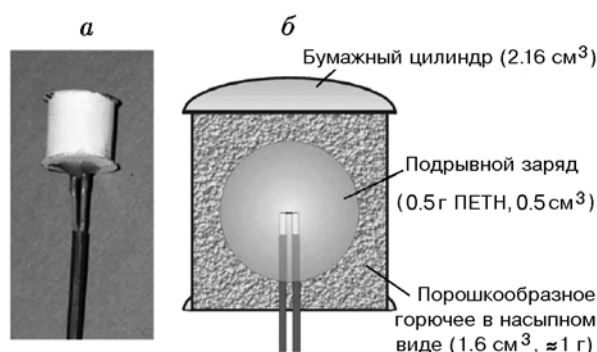


Рис. 2. Конструкция заряда УДГ:  
а — общий вид, б — сечение заряда

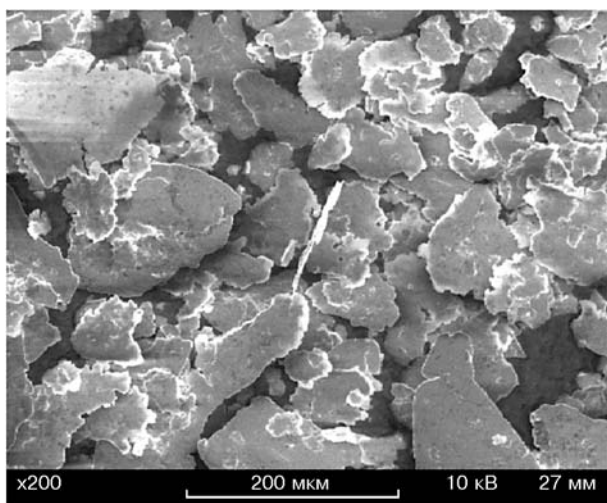


Рис. 3. Фотография чешуек алюминия (Merck KGaA), полученная на сканирующем микроскопе

Заряд УДГ размещался в центре калориметра, выполненного в виде цилиндра, высота которого равна диаметру. Использовались калориметры объемом 6.6, 21.5 и 40.5 л. Детонация заряда УДГ приводила к образованию расширяющегося облака газообразных продуктов взрыва и горячих алюминиевых частиц (горючего). При последующем смешении частиц горючего с воздухом возникало турбулентное пламя, в котором происходило реагирование алюминия и выделялась дополнительная энергия (31 кДж/г) сверх того количества, которое соответствовало взрыву подрывного заряда. Взрывы зарядов УДГ в среде азота позволяют определить номинальную энергию детонации, а взрывы в воздушной среде — исследовать динамику горения УДГ в замкнутом сосуде.

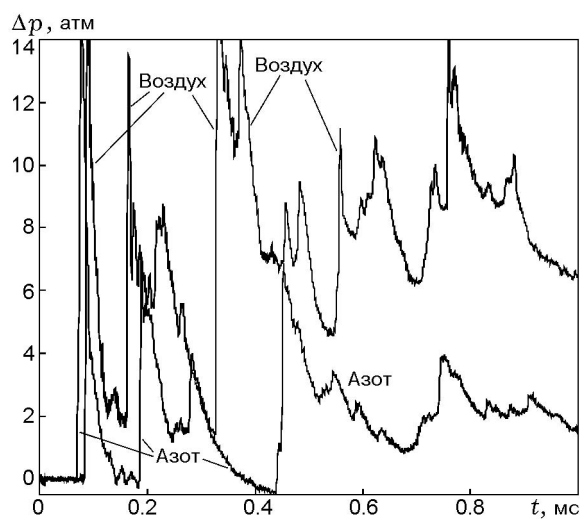


Рис. 4. Сравнение записей давления при взрыве заряда УДГ (1 г алюминия) на воздухе и в азоте (калориметр объемом 6.6 л)

Давление измерялось восьмью пьезоэлектрическими датчиками (марки Кистлер 603 В), расположенными на крышке сосуда по окружностям радиусом 5 и 7.5 см. Для защиты от нагрева горячими продуктами горения датчики были теплоизолированы слоем силиконовой резины толщиной 0.1 мм. Для оценки влияния нагрева горячими газами дополнительно использовался пьезорезистивный датчик давления, который менее чувствителен к нагреву. Кроме того, применялись фотодиоды для регистрации свечения облака продуктов горения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Записи кривых давления при взрыве заряда УДГ с 1 г алюминия в калориметре объемом 6.6 л приведены на рис. 4. Показаны результаты взрыва в азоте (соответствующие волне давления, генерируемой подрывным зарядом) и взрыва в воздушной среде. Различие регистрируемых кривых иллюстрирует факт очень сильного влияния горения алюминия на поведение волны давления. В основном это влияние реализуется после прохождения первичной взрывной волны. Тепловыделение контролируется турбулентным перемешиванием, скорость которого превосходит таковую для процессов молекулярной диффузии, но оказывается медленнее по сравнению со скоростью в отраженных ударных волнах.

При обработке сигналов датчиков давления применялись фильтры с обрезанием верх-

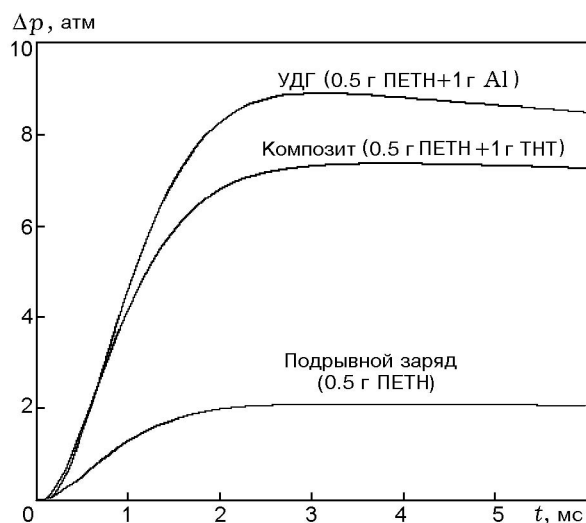


Рис. 5. Сравнение сглаженных записей давления при взрыве на воздухе различных зарядов в калориметре объемом 6.6 л

них частот на уровне 0.5 кГц, чтобы определить динамику среднего давления в камере. Результаты представлены на рис. 5. Видно, что срабатывание только подрывного заряда приводит к установлению квазистатического давления 2 атм, тогда как совместное действие подрывного заряда и горения заряда УДГ с чешуйчатым алюминием обеспечивает пик квазистатического давления на уровне около 9 атм. Для завершения процесса горения требуется приблизительно 3 мс, или 30 периодов (длительностью по  $\approx 0.1$  мс) прохождения ударной волны.

Значения максимального квазистатического давления  $p_{qs}$  при взрыве тринитротолуола (ТНТ) в камерах различного объема приведены на рис. 6. Давления, измеренные при взрыве ТНТ в воздухе, очень близки к предсказанным на основе термодинамических расчетов, если предполагать 100%-е реагирование горючего (верхняя кривая). Эти давления много выше измеренных при взрыве ТНТ в азоте, когда происходит взрыв с тепловым эффектом  $\approx 1000$  кал/г и образованием детонационной волны без последующего догорания в окружающей среде.

Максимальные квазистатические давления, измеренные при взрыве алюминизированных зарядов УДГ в камерах различного объема, показаны на рис. 7. Данные для калориметра объемом 6.6 л оказались в хорошем согласии с термодинамическим расчетом, но производи-

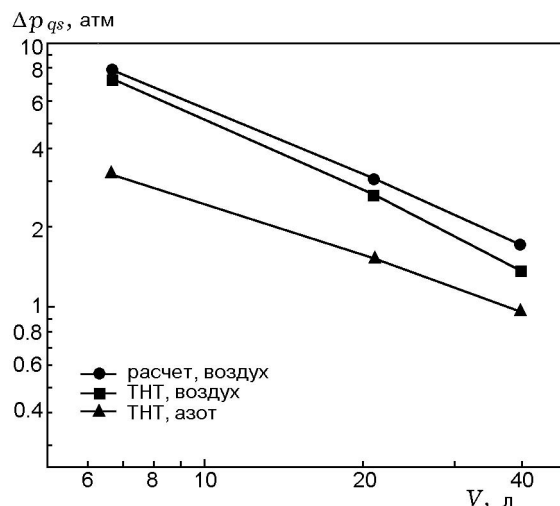


Рис. 6. Зависимость максимального прироста квазистатического давления от объема сосуда: экспериментальные данные по детонации зарядов ТНТ на воздухе и в азоте в сравнении с термодинамическим расчетом (в предположении 100%-го реагирования ТНТ)

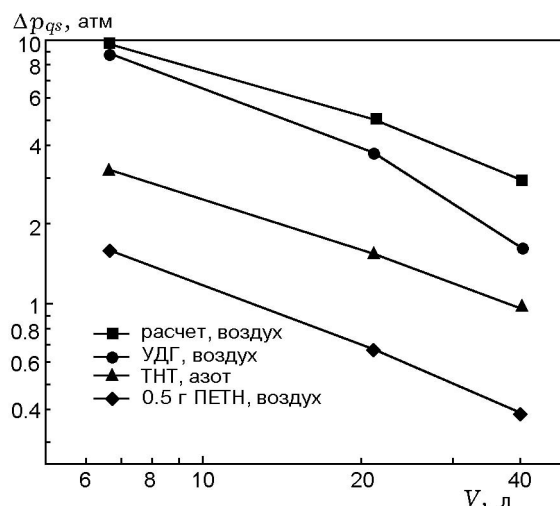


Рис. 7. Зависимость максимального прироста квазистатического давления от объема сосуда: экспериментальные данные по горению алюминизированных зарядов УДГ на воздухе и в азоте в сравнении с термодинамическим расчетом (в предположении 100%-го реагирования горючего), а также данные для взрыва заряда ТНТ в азоте и подрывного заряда ПЕТН

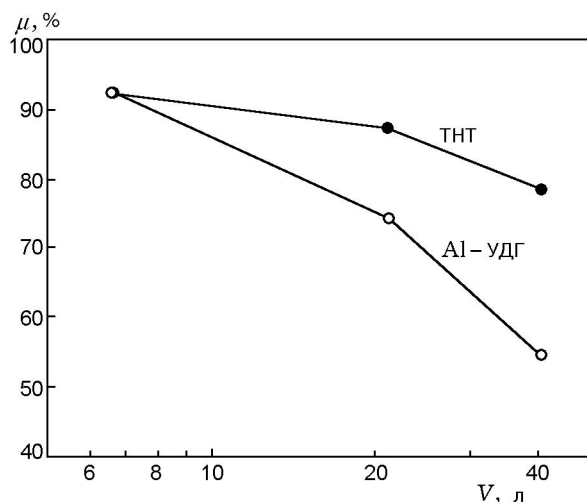


Рис. 8. Зависимость массовой доли прореагировавшего горючего от объема сосуда

тельность взрыва падает с увеличением объема. Тем не менее видно, что максимальное давление при взрыве алюминизированных зарядов УДГ на воздухе значительно выше, чем в случае взрыва только подрывного заряда. Это указывает на значительный энергетический вклад реакции окисления алюминия кислородом воздуха.

На рис. 8 представлена зависимость параметра  $\mu = p_{qs}/p_{theory}$ , пропорционального массовой доле прореагировавшего горючего, от объема камеры. Для TNT степень реагирования горючего составляет  $80 \div 90\%$ , а для алюминия она снижается до  $55\%$  при объеме камеры 40 л.

Были проведены также эксперименты с различными типами горючих из представленных на рис. 1 (порошки сахарозы и углерода, частицы ПЭ), а также их смесей с алюминием. Максимальные значения квазистатических давлений, измеренных для зарядов УДГ с перечисленными компонентами, показаны на рис. 9. Экспериментальные данные можно представить в виде обратно пропорциональной зависимости давления в сосуде от удельной загрузки горючего  $v_f$  [л/г]:

$$\Delta p_{удг} [\text{атм}] = 119/v_f^{1.2}. \quad (1)$$

Эта зависимость дает верхнюю границу для значений измеренных максимальных квазистатических давлений. Ее следует сопоставить с зависимостью, полученной в экспериментах по детонации TNT в среде азота (в отсутствие го-

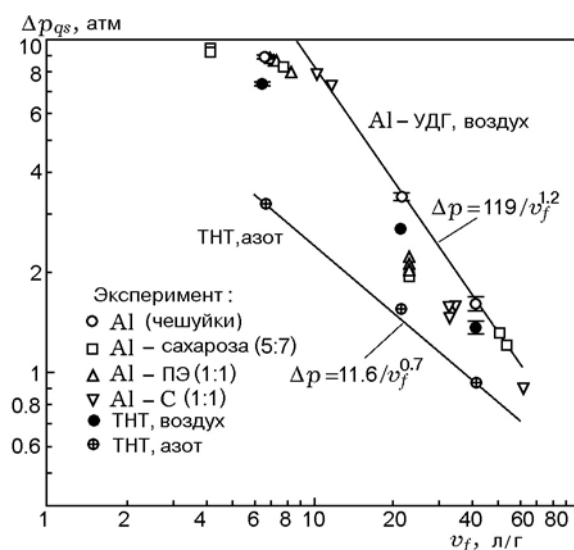


Рис. 9. Максимальный прирост квазистатического давления в барометрических калориметрах в зависимости от удельной загрузки горючего при взрыве различных алюминизированных зарядов УДГ

рения после взрыва), которая может быть представлена в виде

$$\Delta p_{TNT} [\text{атм}] = 11.6/v_f^{0.7}. \quad (2)$$

Эффективность горения УДГ, характеризующую увеличением конечного квазистатического давления, можно выразить в форме соотношения

$$E_{удг} = 10.3/\sqrt{v_f}, \quad (3)$$

представляющего собой частное от деления уравнения (1) на уравнение (2). При удельной загрузке горючего 10 л/г расчет по соотношению (3) дает значение  $E_{удг} = 3.3$ . Другими словами, горение заряда УДГ будет обеспечивать уровень давления в камере, который в 3.3 раза превышает уровень давления, создаваемого детонацией заряда TNT при той же удельной загрузке горючего ( $v_f = 10$  л/г).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены параметрические измерения взрыва содержащих алюминий зарядов УДГ в калориметре объемом 6.6 л. Измерения давления дают хорошо воспроизводимые результаты (среднеквадратичные отклонения  $0.05 \div 0.10$  атм). Из сравнения экспериментального максимального квазистатического давления с расчетным значением давления взрыва в

постоянном объеме (программа СНЕЕТАН [3]) следует, что более 90 % алюминия прореагировало при горении на воздухе (см. рис. 8). Были также проведены эксперименты в калориметрах объемом 6.6, 20 и 40.5 л с другими типами зарядов УДГ. Результаты этих экспериментов подтвердили, что существует возможность сжигания большой порции горючего, что повышает среднее давление в камере в три и более раза. Этот эффект повышения давления, или «эффективность горения», зависит от удельной загрузки горючего и записывается в форме  $E_{\text{УДГ}} = 10.3/\sqrt{v_f}$ . Можно сделать вывод, что в противоположность детонации процесс горения (в случае ТНТ) обеспечивает более эффективный механизм для увеличения квазистатического давления и температуры газа в закрытых сосудах.

Работа выполнена под эгидой Департамента энергии США в Ливерморской национальной лаборатории, Университет Калифорнии (контракт № W-7405-Eng-48), при спон-

сорской поддержке Агентства снижения угрозы обороне (контракт IACRO № 05-4071).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Neuwald P., Reichenbach H., Kuhl A. L.** Shock-dispersed-fuel charges — combustion in chambers and tunnels // *Energetic Materials: Proc. 34th Intern. Annu. Conf. of ICT.* Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Pfinztal, 2003. ISSN 0722-4087.
2. **Neuwald P., Reichenbach H., Kuhl A. L.** After-burning of nitropenta products in a calorimeter // *17th Intern. Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems.* Heidelberg, 1999. ISBN 3-932217-01-2.
3. **Fried L. E.** СНЕЕТАН 1.22 User's Manual UCRL-MA-117541 (rev. 2). Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1995. P. 187.

*Поступила в редакцию 22/V 2006 г.*