

СНИЖЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДОБАВОК, ХИМИЧЕСКИ СВЯЗЫВАЮЩИХ ГАЗООБРАЗНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЕТОНАЦИИ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ДО КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

П. В. Комиссаров, А. А. Борисов, Г. Н. Соколов

ИХФ РАН  
г. Москва, Россия

Существующие в настоящее время методики локализации наземного взрыва связаны, в основном, с поглощением энергии уже сформировавшейся воздушной ударной волны. В этой работе рассматривается новый способ снижения параметров взрывной волны при наземном взрыве заряда, заключающийся в химическом связывании части продуктов детонации на начальной стадии их расширения, например путем добавления в них дисперсных порошков интерметаллидов (например порошка эвтектического сплава алюминия и циркония). Данные порошки активно взаимодействуют с азотом продуктов детонации, образуя нитриды металлов в конденсированной фазе, снижая, таким образом, количество толкающих ударную волну газов. При этом часть тепловой энергии продуктов будет также расходоваться на разогрев порошков. В соответствии с [1] основными продуктами взрыва ТНТ являются двуокись углерода, окись углерода, азот и водород (табл. 1).

Рассмотрим далее для каждого из основных продуктов возможность его связывания в ближней зоне. Связывание водорода трудноосуществимо, поскольку гидриды, как правило, неустойчивы при высоких температурах, характерных для расширяющихся продуктов взрыва, а гидрирование окислов металлов водородом скорее приведет к восстановлению металла, чем к образованию конденсированного гидроксида. Кроме того,

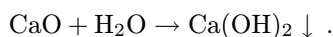
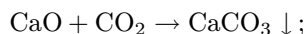
**Таблица 1** Состав продуктов взрыва ТНТ в соответствии с [1]

| Продукты взрыва ТНТ | Доля, %(об.) |
|---------------------|--------------|
| CO <sub>2</sub>     | 0,58         |
| CO                  | 54,36        |
| C                   | 9,32         |
| H <sub>2</sub> O    | 1,56         |
| H <sub>2</sub>      | 21,32        |
| N <sub>2</sub>      | 12,55        |
| CH <sub>4</sub>     | 0,092        |
| NH <sub>3</sub>     | 0,20         |

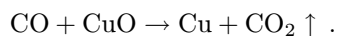
быстрая диффузия водорода в сторону окружающего ударно сжатого воздуха приведет к образованию водяного пара за счет реакции с кислородом воздуха, т. е. к некоторому повышению температуры продуктов на границе облака и, по-видимому, давления, несмотря на снижение числа молей газовой фазы. Для уменьшения вклада водорода в толкающую способность продуктов взрыва, возможно, следует применять поглотитель из пористого материала, окружающий заряд и разлетающийся в виде крупных кусков, поскольку вследствие высокой проникающей способности водорода он будет достаточно быстро накапливаться в порах и охлаждаться. Наличие пористой оболочки должно резко интенсифицировать переход газовых компонентов в конденсированную фазу по следующим причинам:

1. Для увеличения полноты реакции поглощающих дисперсных порошков с продуктами необходимо их интенсивное смешение в ближней зоне. Однако известно, что течение продуктов за ударным фронтом близко к ламинарному, и без внешнего воздействия, вызывающего неустойчивость контактной поверхности, только за счет молекулярной диффузии невозможно будет добиться достаточного смешения продуктов детонации со слоем дисперсного порошка. Поэтому наличие слоя пористого материала с открытой пористостью и достаточно крупными порами будет способствовать обеспечению смешения продуктов с поглощающими порошками.
2. Наличие пористой оболочки, замедляющей течение, будет являться сдерживающим фактором разгрузки и, соответственно, снижения температур ниже реакционных в слое порошок–продукты детонации. Тем самым будет обеспечена большая полнота реакции, чем в случае отсутствия такой оболочки.

Рассмотрим возможные реакции для остальных газов:



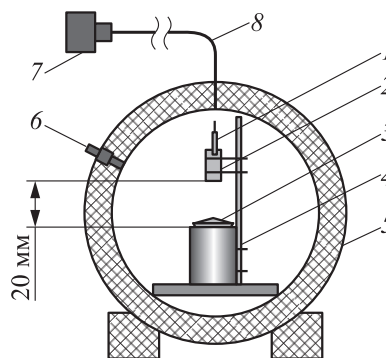
Снижение содержания высокотоксичной окиси углерода в продуктах можно добиться с использованием процесса, подобного используемому в пирометаллургии для восстановления меди из окиси:



Двуокись углерода также можно связать при помощи порошка оксида кальция. Следует отметить, что наибольший вклад в формирование и распространение ударной волны вносят наиболее легкие газы — водород, водяной пар и азот, поэтому в первую очередь следует попытаться связывать именно их. О трудности связывания водорода написано выше. Пары воды могут быть частично переведены в конденсированную фазу реакциями с металлом

или оксидом металла с образованием гидроксида металла (например, при подводных взрывах алюминийсодержащих взрывчатых композиций основным конденсированным продуктом оказался не оксид алюминия, а его гидроксид [2]). Наиболее оптимальным с точки зрения снижения параметров взрывной волны будет связывание азота, поскольку он содержится не только в продуктах взрыва, но и в сильно нагретом воздухе в ближней зоне от заряда. Для устранения из продуктов азота можно воспользоваться порошком интерметаллидом на основе циркония. Подобные порошки используются для создания глубокого вакуума при производстве электровакуумных изделий. В [3] показано, что при сгорании на воздухе смесей ультрадисперсного алюминия (УДП) и циаля (ПЦЮ) массовое содержание связанного в тугоплавких конечных продуктах азота составляет до 16,6%. Однако использование алюминия УДП для связывания продуктов взрыва нецелесообразно из-за его высокой цены, пирофорности и возможной реакции с водой с образованием свободного водорода. Высокое содержание циркония в порошке сплава ПЦЮ делает возможным связывание значительного количества азота, однако возможным побочным эффектом будет образование свободного водорода при реакции содержащегося в составе ПЦЮ алюминия с парами воды. Влияние этого эффекта было проверено экспериментально (см. ниже).

Для проверки возможности связывания азота в продуктах детонации путем введения порошка ПЦЮ с характерным размером частиц 30 мкм был проведен эксперимент (рис. 1). В 25-литровой манометрической бомбе взрывались 12 г навески ТНТ плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$ . Регистрировалось давление на стенке в момент прихода ударной волны и остаточное статическое давление после полного остывания бомбы до комнатной температуры. Отобранные при экспериментах продукты были исследованы методом газовой хрома-



**Рис. 1** Схема эксперимента: 1 — капсоль-детонатор ЭД8-Ж; 2 — заряд 12 г ТНТ; 3 — 6 г порошка ПЦЮ; 4 — металлическая подставка; 5 — манометрическая бомба; 6 — датчик давления; 7 — датчик статического давления; 8 — коммуникация диаметром 4 мм и длиной 2 м

**Таблица 2** Содержание газовых компонентов в продуктах взрыва, смешанных с воздухом, содержащимся в бомбе. Дробной чертой отделены доли компонента в %(об.) от значения изменения доли компонента относительно реперного опыта

| Тип заряда                                | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub>     | CH <sub>4</sub> | CO        | CO <sub>2</sub> |
|---|----------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------------|
| 12 г ТНТ                                  | 10,3           | 0,64           | 62                 | 0,3             | 17,9      | 8,8             |
| 12 г ТНТ + 6 г ПЦЮ                        | 13/2,7         | 0/-0,64        | 60,7/-1,3          | 0,3/0           | 18,7/0,8  | 7,2/-1,6        |
| 12 г ТНТ + 6 г ПЦЮ<br>в пористой оболочке | 24,8/14,5      | 0/-0,64        | 38,5/- <b>23,5</b> | 6,3/6           | 24,3/6,4  | 6,2/-2,6        |
| 12 г ТНТ + 6 г TiZr                       | 10/-0,3        | 0,5/-0,14      | 65,7/3,7           | 0,1/-0,2        | 15,4/-2,5 | 8,5/-0,3        |

тографии. Сравнивалось содержание в продуктах следующих газов: H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO и CO<sub>2</sub>. Реперным составом были продукты детонации ТНТ. Порошок ПЦЮ размещался под зарядом ТНТ на металлической подставке.

Для сравнения также были проведены опыты, в которых порошок ПЦЮ был засыпан в зазор между зарядом и пористой оболочкой, изготовленной из полиуретановой пены с открытой пористостью и характерным размером пор до 2 мм в виде цилиндра с внешним диаметром 120 мм и высотой 120 мм. Заряд при этом был помещен в центр оболочки, а оболочка установлена на деревянную подставку.

Для проверки гипотезы о дополнительном выделении водорода при реакции входящего в состав ПЦЮ алюминия был также проведен опыт, в котором порошок ПЦЮ был заменен на порошок TiZr той же дисперсности.

В табл. 2 представлены результаты хроматографического анализа. Эти данные не отражают абсолютного количества газовых компонентов в бомбе и показывают лишь соотношение между ними, при этом вода полностью исключена из анализируемых продуктов. Также следует принимать во внимание, что до эксперимента в бомбе находился воздух (25 л) и реакции идут также с газами, входящими в состав воздуха (в основном, с азотом и кислородом). Отличить точные количества связанных до конденсированных продуктов газов, содержащихся в продуктах детонации, от газов, составляющих наполняющий бомбу воздух, при такой постановке эксперимента не представляется возможным. Таким образом, проведенные исследования демонстрируют саму возможность влияния добавок, размещенных в ближней зоне от заряда.

Рассмотрим результаты подробнее. Снижение количества азота в продуктах зафиксировано в случае использования порошка ПЦЮ. При этом эффективность такой добавки существенно выше в случае размещения порошка в зазоре между зарядом и оболочкой. В то же время при использовании пористой оболочки также заметно увеличилось поступление водорода в продукты. Это связано с двумя причинами: большей полнотой реакции алюминия, входящего в состав ПЦЮ, и, вероятно, термическим разложением

**Таблица 3** Результаты измерения давления

| Тип заряда                             | Давление на фронте УВ, атм | Статическое давление, атм |
|--|----------------------------|---------------------------|
| ТНТ, 12 г                              | 55                         | 5,0                       |
| 12 г ТНТ + 6 г ПЦЮ                     | 35                         | 5,3                       |
| 12 г ТНТ + 6 г ПЦЮ в пористой оболочке | 34                         | 5,8                       |
| 12 г ТНТ + 6 г TiZr                    | 39                         | 4,3                       |

полиуретановой пены. Последнее также подтверждается значительным количеством метана в продуктах в опыте с пористой оболочкой. Следует отметить, что заметное разложение пены, хотя и поставляет дополнительно газ в продукты, нельзя рассматривать как полностью отрицательный фактор, поскольку оно снижает температуру продуктов (разложение — эндотермический процесс) и, следовательно, их способность поддерживать ударную волну. Контрольный опыт с порошком TiZr показал снижение поступления водорода в продукты, однако произошло увеличение объемного содержания азота в продуктах азота.

Это увеличение не означает увеличения количества молей азота, входящего в состав продуктов, так как в соответствии с данными табл. 3 статическое давление продуктов в бомбе снизилось в сравнении с остальными опытами. В опытах с ПЦЮ статическое давление несколько выросло в сравнении с реперным опытом. Это объясняется как поступлением водорода в опыте с ПЦЮ, так и поступлением метана и водорода в опыте с пористой оболочкой.

В табл. 3 представлены также данные датчика давления, установленного на стенке манометрической бомбы. Видно, что введение в ближнюю зону порошков во всех случаях снижает амплитуду ведущей ударной волны на несколько десятков процентов. Это означает, что можно ожидать снижения тротилового эквивалента взрыва в несколько раз при взрыве крупного заряда на открытом воздухе.

Проведенные эксперименты демонстрируют возможность поглощения азота из продуктов детонации на начальной стадии формирования взрывной волны. Даже при неоптимизированном расположении относительно заряда порошка-поглотителя такой подход демонстрирует значительное снижение динамического давления. Что касается поглощения остальных упомянутых газов, входящих в состав продуктов детонации, то нет сомнения, что в случае использования дисперсных порошков реакции связывания продуктов будут идти с необходимой скоростью. Демонстрация связывания остальных продуктов и оптимизация состава поглощающих порошков будут проведены в дальнейшем.

## Литература

1. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. — 3-е изд. — М.: Физматлит, 2002. Т. 1. С. 133.
2. Борисов А. А., Комиссаров П. В., Маилков А. Е., Ельшин Р. Н., Силакова М. А. Взрывное взаимодействие струй богатой алюминием реагирующей гетерогенной смеси с водой // Хим. физика, 2002. № 10. С. 92.
3. Ильин А. П., Ан В. В., Верещагин В. И., Яблунский Г. В. Конечные продукты горения в воздухе смесей ультрадисперсного алюминия с циалем // ФГВ, 2000. Т. 36. № 2. С. 56–59.

## От редакционной комиссии

Редакционная комиссия сборника «Горение и взрыв» посчитала целесообразным представить на суд читателя некоторые материалы, относящиеся к публикуемому сообщению. Ниже публикуются выдержки из замечаний рецензентов на указанную статью и ответы авторов на эти замечания, которые, к сожалению, не нашли отражения в окончательном варианте сообщения.

### Из отзывов рецензентов

В предлагаемой работе анализируются возможности снижения давления воздушной ударной волны (УВ) на начальной стадии ее формирования за счет взаимодействия части газообразных продуктов детонации с дисперсными порошками интерметаллидов (в частности, с порошком сплава алюминия и циркония). Авторам удалось добиться существенного снижения давления во фронте УВ при детонации заряда ТНТ. Этот результат следует рассматривать как несомненный успех. К сожалению, понять причину полученного эффекта на основе представленной статьи сложно. В связи с этим хотелось бы сделать ряд замечаний.

1. Авторы отмечают, что в табл. 1 приведены лишь относительные значения концентраций газов, находящихся в бомбе после подрыва заряда. Однако эти данные сложно анализировать, так как изменение относительных значений еще не означает, что абсолютные величины меняются в ту же сторону (об этом пишут сами авторы). Соотношение абсолютных значений концентраций зависит от общего количества газа, т. е. от статического давления. При этом, используя полученные хроматографические данные (см. табл. 2) и величину статического давления, можно определить абсолютные значения мольных концентраций газов, например, рассчитав объем и общее количество молей газа при стандартных условиях. Эти значения и следовало бы анализировать.

2. С какой целью в статье приведены три химические реакции, не меняющие количества молей газа?

3. В чем заключается роль пористой оболочки кроме интенсификации смешения газов с порошками? Поглощает она хотя бы часть водорода или просто разлагается? Или все дело в том, что эти процессы протекают последовательно?

Авторы отмечают, что «Наличие пористой оболочки, замедляющей течение, будет являться сдерживающим фактором разгрузки и, соответственно, снижения

температур ниже реакционных в слое порошок – продукты детонации». А в другом месте указано, что «...разложение пены, хотя и поставяет дополнительно газ в продукты, нельзя рассматривать как полностью отрицательный фактор, поскольку оно снижает температуру продуктов (разложение — эндотермический процесс) и, следовательно, их способность поддерживать ударную волну». Во-первых, замедлять течение может и непористая оболочка. Во-вторых, получается, что оболочка, с одной стороны, сдерживает снижение температуры, а с другой — снижает температуру. Или, может быть, эти процессы разнесены во времени и в различной степени влияют на давление УВ? Поэтому роль пористой оболочки необходимо более четко разъяснить.

4. В работе со ссылкой на литературный источник отмечается, что «при сгорании на воздухе смесей ультрадисперсного алюминия (УДП) и циала (ПЦЮ) массовое содержание связанного в тугоплавких конечных продуктах азота составляет до 16,6%». Здесь было бы уместным пояснить, какие же еще вещества имеются в продуктах.

5. Циаль может реагировать с азотом. Однако эту реакцию не следует считать доминирующей. Так, алюминий, прежде всего, будет взаимодействовать с кислородсодержащими газами. В противном случае, не существовало бы такого класса энергетических материалов, как алюминийсодержащие составы, высокая эффективность которых основана на значительном выделении энергии при образовании оксида алюминия. Образование нитрида становится заметным лишь при высокой концентрации алюминия в смеси, когда кислородный ресурс взрывчатых веществ при взрыве почти полностью расходуется на окисление алюминия. Этот факт подтвержден экспериментально. Взаимодействие алюминия с азотом также протекает с выделением энергии, однако тепловой эффект этой реакции существенно ниже тепловыделения, соответствующего образованию оксида алюминия.

То, что циаль взаимодействует с кислородсодержащими газами в случае, когда порошок расположен между пористой оболочкой и зарядом, следует из данных табл. 2. Во-первых, в конечных продуктах отсутствует кислород, что свидетельствует об интенсивном протекании реакций с участием кислорода воздуха (в реперном эксперименте небольшое количество кислорода все же остается в продуктах). Во-вторых, несмотря на возможное окисление водорода кислородом воздуха, его относительная концентрация растет, что может быть вызвано, наряду с разложением оболочки из полиуретана, реакцией циала с парами воды. Содержание  $\text{CO}_2$  снижается. Известно, что, алюминий реагирует с  $\text{CO}$  не столь активно, как с  $\text{CO}_2$ . Поэтому в рассматриваемом случае за счет «раскисления»  $\text{CO}_2$  концентрация  $\text{CO}$  повышается. В целом, реакция циала с продуктами детонации и воздухом в бомбе (включая взаимодействие с азотом) должна приводить к снижению количества молей газа. Тем не менее, из эксперимента следует, что в случае использования циала даже при отсутствии полиуретановой оболочки статическое давление, хотя и незначительно, но возрастает по сравнению с репером. Это может быть связано с тем, что реакция циала с водой, образующейся при взрыве ТНТ, приводит к выделению водорода, а в реперном эксперименте, когда такая реакция отсутствует, вся вода в остывшей бомбе находится в конденсированном состоянии. Однако в связи с невысокой концентрацией воды в продуктах взрыва ТНТ (см. табл. 1) отмеченный эффект не должен быть значительным (хотя не

следует забывать о возможном повышении концентрации воды за счет окисления водорода кислородом воздуха). Так или иначе, но из табл. 2 следует, что общее количество молей газа (статическое давление) в экспериментах с циялем возрастает по сравнению с репером. Однако, несмотря на это, давление УВ снижается на десятки процентов.

Более того, тепловыделение, сопровождающее взаимодействие цияля с кислородсодержащими газами, могло бы, наоборот, усилить УВ (образование нитрида могло бы создавать тот же, но менее выраженный, эффект). Однако этого не происходит. Что же так сильно снижает давление УВ? До конца понять причину этого на основании представленного материала сложно.

6. За счет чего снизилось статическое давление и, опять же, сильно упало давление на фронте УВ в случае с TiZr? Тот факт, что относительные значения концентраций газов изменились незначительно по сравнению с репером, свидетельствует об отсутствии активной реакции с участием TiZr. С учетом того, что статическое давление в этом случае упало, можно заключить, что в наибольшей степени снизилась абсолютная концентрация CO. Почему именно CO?

7. Известно, что, когда заряд окружен инертной оболочкой, определенная доля энергии при взрыве переходит в кинетическую энергию оболочки. Это должно ослаблять УВ. В случае с реагирующей оболочкой процесс более сложный. Однако он принципиально отличается от взрыва свободного заряда. Тем не менее, при помещении порошка цияля в промежуток между зарядом и пористой оболочкой и при расположении цияля вне заряда получены близкие значения давления во фронте УВ. Это странно при столь сильном различии в постановке эксперимента. Или это совпадение?

8. В работе рассматривается давление во фронте УВ. Однако это не единственный поражающий фактор. Для инерционных преград важен импульс УВ. Как изменяется этот параметр? В связи с протеканием экзотермических реакций, в частности с участием цияля, импульс может не так сильно снижаться, как давление во фронте УВ.

*Авторами получен яркий эффект по снижению давления в УВ. Тем не менее, считаю, что текст статьи следует доработать с целью более ясной трактовки полученных результатов (выделено рецензентом).*

### Из ответов авторов рецензентам

Комментарии рецензента, безусловно, полезны для понимания природы исследованных процессов. Некоторые замечания рецензента нами ранее не были приняты во внимание и будут обязательно подробно исследованы. Вместе с тем мы хотели бы отметить, что в настоящей публикации в связи с ограничением объема мы опустили подробное рассмотрение некоторых вопросов, в том числе тех, на которые обращает внимание рецензент, и ограничились только констатацией результатов. Мы планируем направить в печать более подробную статью, в которой комментарии рецензента будут обязательно учтены. Ниже мы попытались дать ответы на вопросы рецензента.

1. Получение абсолютных значений требует знания точного значения температуры в бомбе, причем в нескольких точках, так как известно, что после подобных экспериментов градиенты температуры сохраняются в бомбе довольно длительное



время — до нескольких десятков минут. В связи с этим определение абсолютных мольных концентраций газов — трудновыполнимая задача. Именно с этим и связано выбранное нами сравнение относительных концентраций.

2. Количество молей газа не изменяется, однако изменяется плотность газа и, соответственно, скорость звука. Следовательно, изменяется возможность подпитывать давлением отошедшую УВ. Это относится к первым двум реакциям. Третья реакция демонстрирует возможность снижения токсичности продуктов взрыва.

3. Насколько мы можем предположить, процессы протекают последовательно. Мы считаем, что ввиду открытой пористости оболочки часть водорода проникает внутрь и оказывается там «запертой» до времени, когда водород уже не может повлиять на ведущую УВ или создать очаги горения за счет реакции с кислородом воздуха.

Пористая оболочка, на наш взгляд, должна иметь распределенную структуру. В ближней зоне крупные жесткие перегородки в каркасе пены работают на поддержание реакции с поглощающим порошком. «Наличие пористой оболочки, замедляющей течение, будет являться сдерживающим фактором разгрузки и, соответственно, снижения температур ниже реакционных в слое порошок – продукты детонации». Более мелкопористая пена на некотором удалении (по нашей оценке, 5–6 калибров от заряда) будет, наоборот, снижать температуру за счет развитой поверхности и частичного разложения. Таким образом, как правильно предположил рецензент, процессы будут разнесены во времени.

4. В цитированной работе указано, что в продуктах также содержатся  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{AlON}$  и  $\text{Al}$ .

5, 6. Мы полностью согласны с рецензентом, что представленных данных недостаточно для объяснения всех наблюдаемых эффектов. Некоторые странности в результатах, справедливо замеченные рецензентом, вероятно, связаны с недостаточной тонкой постановкой проведенного нами эксперимента. У нас не было возможности проведения достаточно большой выборки экспериментов для накопления статистики результатов. Эксперименты проводились по принципу получения идентичного повторного результата. Поэтому, безусловно, падение давления при незначительном относительном изменении количества газов в опытах с  $\text{TiZr}$  требует объяснения и исследования. Представленные же нами данные демонстрируют эффект снижения параметров взрыва в присутствии порошков, содержащих цирконий, хотя и не объясняют полностью все эффекты. Требуется проведение дополнительных исследований, и представленная статья является лишь основой для привлечения внимания к данному вопросу.

7. Падающая на стенку бомбы (в месте закрепления датчика давления) УВ совсем не является «невозмущенной», так как при движении она обходит несколько препятствий внутри бомбы. Поэтому на датчике мы видим результат довольно сложного газодинамического сценария движения волны (частичное отражение, преломление волны и т. д.). Тем не менее, амплитуда дошедшей до стенки волны, по нашему мнению, отражает «интегральную мощность» процессов, сопровождающих рождение УВ. Для получения достоверно пропорциональных результатов необходимо проведение испытаний в сферической бомбе.

8. То же самое относится и к измерениям импульса УВ в бомбе. Во второй статье, направленной нами в этот же сборник (см. с. 165–169), мы представили результаты натурального испытания заряда массой 500 г. Хотя напрямую данных об импульсе мы не приводим (по причине малого количества экспериментов), представленные нами записи давления на различных расстояниях от заряда показывают, что можно ожидать снижения импульса в несколько раз. Однако, если данные по давлению легко проверить по скорости ударной волны (что мы и сделали при определении тротилового эквивалента взрыва по давлению), то для получения достоверных значений импульса УВ требуются специальные эксперименты.

#### **Из повторных отзывов рецензентов**

Вопрос о том, какие продукты кроме нитридов образуются при горении УДА и циала в воздухе, нами задан отнюдь не из любопытства. Естественно, в осадке присутствует оксид  $Al_2O_3$ , образование которого сопровождается значительным тепловыделением. Поэтому основной вопрос, который возникнет у читателя: почему при повышении статического давления (количества молей газа) и экзотермической реакции с участием циала давление на фронте УВ резко снижается?

*Тем не менее, учитывая тот факт, что эффект, все-таки получен и авторы намерены продолжить это интересное исследование, данное сообщение следует опубликовать (выделено рецензентом).*

#### **Из повторных ответов авторов рецензентам**

Кажущийся противоречивым полученный результат, при котором снижение давления в УВ сопровождается ростом статического давления, объясняется тем, что время формирования УВ гораздо меньше интегрального времени протекания реакций в манометрической бомбе. Поэтому статическое давление возрастает за счет реакций, имевших место после того как ударная волна сформировалась.