

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 2

1965

УДК 532.593+534.222.2

*А. Н. Дремин,
С. Д. Савров, А. Н. Андриевский*
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В НИТРОМЕТАНЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

В работах [1—3] установлено наличие сверхскоростных явлений при инициировании детонации в однородных ВВ ударной волной.

Опыты Кука заключались в непосредственной регистрации с помощью высокоскоростной фотографии быстрого распространения свечения со скоростью 35 км/сек, возникающего на границе раздела ВВ — преграда при столкновении двух ударных волн в нитрометане и распространяющегося по ударно сжатому веществу. Кук трактовал эти опыты как подтверждение своей гипотезы о «тепловом импульсе» [4], возникающем вследствие резкого возрастания теплопроводности в среде после ударного нагружения определенной амплитуды.

В опытах Чайкена, Кэмпбелла и др. прямой регистрации сверхскорости с помощью высокоскоростной фотографии не получено, а получена только повышенная скорость детонации в момент перехода ударной волны в детонационную, а также обнаружено «предсвечение» при регистрации процесса с торца в прозрачном нитрометане. Чайкен предположил, что «предсвечение» соответствует свечению детонационной волны, распространяющейся по ударно сжатому веществу и возникающей в результате адиабатического теплового взрыва на границе раздела нитрометан — преграда через соответствующее время индукции.

В связи с этим предположением введен метод расчета скорости детонации по пространственно-временной схеме с использованием экспериментально измеренной волновой и массовой скорости инициирующей ударной волны, а также времени задержки взрыва на границе и времени последующего догона сверхскоростью фронта ударной волны, которое идентифицировалось со временем «предсвечения». Для измерения сверхскорости Кэмпбелл применил кроме высокоскоростной фотографии ионизационные датчики, однако, применение этой методики было затруднено увлечением датчиков впереди идущей ударной волной и потребовало косвенных расчетов. С помощью этой методики удалось подтвердить, что процесс возникает на границе раздела нитрометан — преграда.

В недавних экспериментах [5, 6] было обнаружено, что отражение света от поверхности преграды исчезает раньше возникновения «предсвечения». Это явление, которое, по-видимому, связано со временем формирования сверхскоростной волны на границе, затруднило идентификацию времени «предсвечения» со временем догона, необходимую для расчета сверхскорости.

Полученные Кэмпбеллом и Чайкеном величины сверхскорости сильно расходятся с результатом Кука и хорошо согласуются с зависимостью скорости детонации от начальной плотности, полученной при измерении скорости детонации при разных начальных температурах и плотностях [7]. Следует, однако, отметить, что прямое применение этой зависимости к детонации по ударно сжатому веществу незаконно, так как при этом не учитывается изменение начальной внутренней энергии при ударном сжатии.

В работе [5] был произведен также расчет давления в сверхскоростной волне на основании измерения скорости пересжатой детонации в момент перехода ударной волны в детонационную, которая возникает в результате догона фронта ударной волны сверхскоростью. Идея расчета заключается в рассмотрении распада разрыва, образующегося в момент догона, в координатах давление — массовая скорость. Точность этого расчета невысокая и требует предположения о крутом переднем фронте сверхскоростной волны.

Дальнейшее изучение инициирования детонации ударной волной может дать дополнительные сведения о механизме детонационного превращения гомогенных ВВ, а также позволит получить количественные данные для расчета критического диаметра, природа которого имеет тесную связь с многостадийным характером инициирования [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАПИСЬ ПРОФИЛЯ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ В НИТРОМЕТАНЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Поскольку в предыдущих исследованиях рассчитался только один параметр сверхскоростной детонации — волновая скорость, представляет интерес прямое измерение второго ее параметра — массовой скорости. Это позволит точнее рассчитать давление в сверхскоростной детонации.

В настоящей работе для измерения профиля массовой скорости была применена электромагнитная установка, регистрирующая изменения э. д. с., возникающей в металлическом датчике, увлекаемом ударной или детонационной волной с соответствующей массовой скоростью в постоянном магнитном поле. Более подробное описание установки содержится в работе [9].

Применение этой установки в условиях инициирования детонации встретило значительные трудности. Одной из них явилось возникновение детонации на датчике при действии на нее инициирующей ударной волны. Применение алюминиевой фольги толщиной 0,03 мм для изготовления датчиков позволило избавиться от преждевременной детонации на датчике, поскольку время его разгона ударной волной стало ничтожно малым. Контрольные опыты по наблюдению этого взаимодействия с торца заряда проводились на сверхскоростном фоторегистре (СФР).

При проведении опытов было установлено, что, находясь на минимальном расстоянии

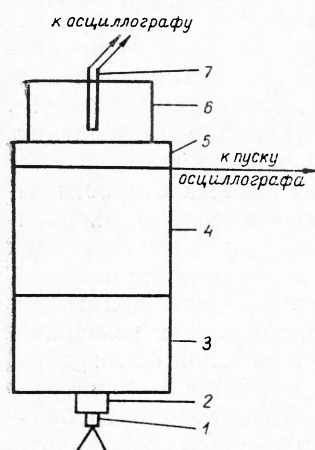


Рис. 1. Схема опытов на электромагнитной установке (диаметр заряда 100 мм; ширина датчика 5 мм).

1 — капсуль; 2 — усилительная таблетка; 3 — взрывная линза; 4 — таблетка из смеси тротила с тальком; 5 — инертная преграда из парафина; 6 — сосуд с нитрометаном; 7 — датчик.

от поверхности преграды (до 1 мм), датчик задерживал во времени возникновение «предсвечения» в этом месте. Отсюда следует, что сверхскоростная волна формируется в области непосредственно у границы раздела.

Для применения электромагнитной установки необходимы также задержки инициирования порядка нескольких микросекунд, получить которые трудно вследствие исключительной чувствительности времени задержки к амплитуде входящей в нитрометан ударной волны и к степени тщательности обработки поверхности преграды. Схема заряда, используемого в этих опытах, изображена на рис. 1. Предварительный подбор параметров активной системы заряда для получения таких задержек также производился на СФР. В результате проведения нескольких серий опытов удалось записать профиль массовой скорости, возникающей при инициировании (рис. 2).

В этих опытах очень важно обеспечить параллельность перекладки датчика поверхности преграды, чтобы избежать занижения амплитуды. Для уменьшения возможности занижения амплитуды целесообразно также ставить датчик дальше от границы, чтобы увеличить длину сверхскоростной детонационной волны.

Как видно из осциллограмм, передний фронт сверхскоростной волны крутой, что свидетельствует в пользу предположения о детонационном характере этой волны и указывает на возможность применения условий на скачке для расчета ее параметров.

Качественная осциллограмма (рис. 2, в) показывает, что на границе после задержки развивается тепловой взрыв, который и толкает датчик в обратном направлении. Слегка спадающий профиль массовой скорости инициирующей ударной волны свидетельствует также о том, что возмущения из области развивающегося теплового взрыва на границе раздела не успевают поступать на фронт ударной волны. Поэтому инициирующая ударная волна в течение всего времени задержки ведет себя как в инертном веществе и немного затухает по мере распространения.

Все опыты на электромагнитной установке проводились при одинаковых параметрах активного заряда, обеспечивающего задержку инициирования 2–3 мксек (разброс задержек в этих пределах зависит от тщательности обработки поверхности преграды). При этом массовая скорость в инициирующей ударной волне составляла 1,6 км/сек на расстоянии 5 мм от преграды и 1,55 км/сек на расстоянии 10 мм. Дополнительная массовая скорость за сверхскоростной детонационной волной составляла 1,2 км/сек. Зона реакции за фронтом этой волны, по-видимому, настолько узкая, что она не отмечается на осциллограммах.

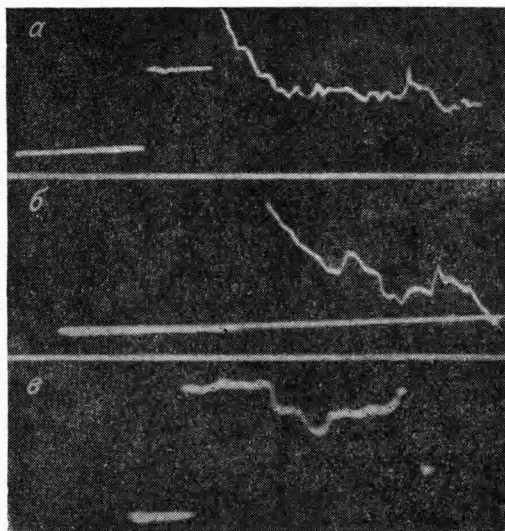


Рис. 2. Осциллограммы профиля массовой скорости.

а — датчик на расстоянии 5 мм от преграды;
б — датчик на расстоянии 10 мм от преграды;
в — датчик на границе преграды.

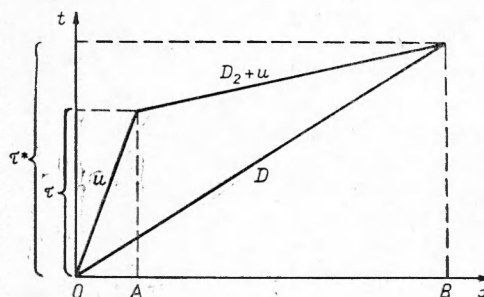
В заключение этого раздела приведем некоторые соображения относительно выполнения правила отбора Чепмена — Жуге при детонации ударно сжатого нитрометана. Известно, что режим пережатой детонации не может существовать без внешней поддержки [10], и поэтому в данном случае такая детонация не осуществляется. Недосжатая детонация в принципе может осуществляться, например, за счет диффузии активных центров, излучения, теплопроводности. Однако, поскольку в этом случае скорость волны больше скорости распространения возмущений в продуктах детонации, непосредственно за плоскостью окончания реакции в волне должна существовать область постоянных параметров. Это происходит потому, что волна разрежения отстает от фронта волны. Области постоянных параметров на осциллограммах массовой скорости не обнаружено. Поэтому можно утверждать, что правило отбора Чепмена — Жуге для детонации ударно сжатого нитрометана выполняется со значительной точностью.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВОЙ СКОРОСТИ СВЕРХСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ

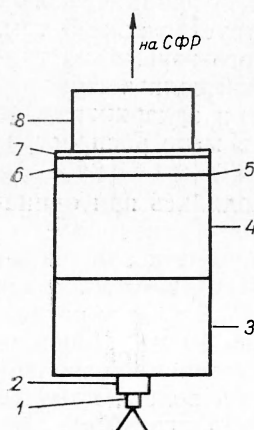
Для расчета давлений по измеренному профилю массовой скорости необходимо измерение волновых скоростей инициирующей ударной волны и сверхскоростной детонации. Как уже отмечалось, не удастся непосредственно наблюдать распространение сверхскорости с помощью

Рис. 3. Пространственно-временная диаграмма для расчета сверхскорости.

O — момент входа ударной волны в нитрометан из преграды; D , u — волновая и массовая скорости инициирующей ударной волны; τ — время задержки взрыва на границе; τ^* — полное время задержки детонации в несжатом нитрометане; D_2 — волновая скорость детонации по сжатому веществу.



высокоскоростной фотографии, поэтому обычно используется расчет этой сверхскорости по пространственно-временной схеме (рис. 3). Точность измерения сверхскорости по этой методике, в частности, сильно



зависит от точности измерения параметров инициирующей ударной волны (рис. 4). Поскольку ударные адиабаты плекса и нитрометана известны, измерения скорости ударной волны в плексе по известной его толщине и времени между вспышками зазоров оказывается достаточным для расчета параметров ударной волны в нитрометане методом отражения. Из фотограммы (рис. 5) получаем необходимые для расчета сверхскорости τ и τ^* .

Рис. 4. Схема опытов на фоторегистре.

1, 2, 3, 4 — узлы активной системы заряда; 5 — воздушный зазор; 6 — прозрачный плекс; 7 — зазор между плексом и дном сосуда; 8 — сосуд с нитрометаном.

В расчетной схеме (рис. 3) предполагается прямоугольный профиль ударной волны, поэтому специально исследовалось затухание ударной волны, которое оказалось незначительным в течение нескольких микросекунд. Измерения производились при давлениях 72—77 тыс. атм и дали для сверхскорости значение $9,0 \pm 0,5$ км/сек, согласующееся с из-

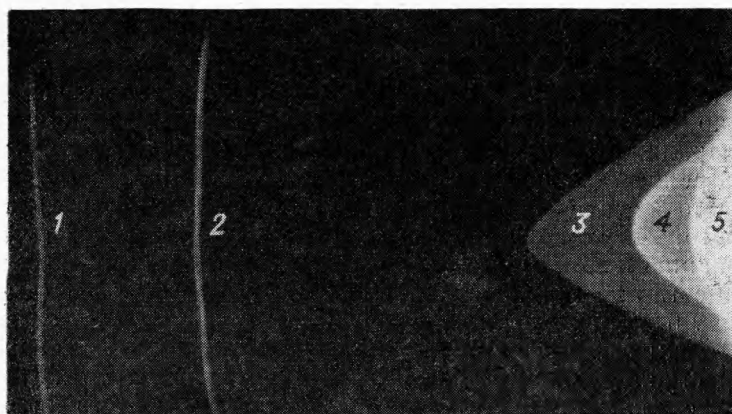


Рис. 5. Фотограмма процесса с торца заряда.

1, 2 — вспышки света в воздушных зазорах при прохождении ударной волны, 3 — свечение сверхскоростной волны, 4 — свечение детонации в несжатом веществе после догона, 5 — свечение воздушной ударной волны при разлете продуктов детонации со свободной поверхности.

мерениями Кэмпбелла [3]. Так как разброс этих значений в каждом режиме активной системы заряда оказался значительным, проследить зависимость τ от давления в инициирующей ударной волне не удастся.

Как отмечалось выше, идентификация времени «предсвечения» со временем догона затруднена, что увеличивает недостатки расчетной методики. Поэтому возникает необходимость найти способ прямой регистрации сверхскорости, который кроме значительного повышения точности измерения позволил бы изучить и ее стационарность. Из рис. 5 видно, что тепловой взрыв на границе раздела возникает по оси заряда и затем «предсвечение» распространяется в радиальном направлении. Это не может соответствовать самостоятельному тепловому взрыву в неосевых участках, поскольку в этом случае длительность «предсвечения» должна быть больше там, где больше его задержка. Это объясняется, по-видимому, тем, что вследствие боковой разгрузки в активном заряде ударная волна в нитрометане является наиболее близкой к прямоугольной по оси заряда. Поскольку в нитрометане наблюдается исключительно крутая

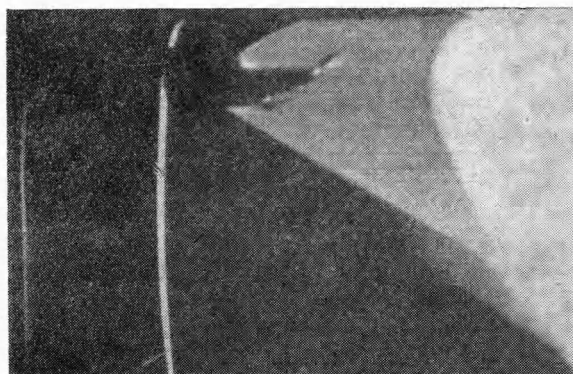


Рис. 6. Фотограмма по непосредственному наблюдению сверхскорости.

зависимость времени задержки взрыва от давления и соответственно температуры, неосевые участки должны иметь значительно большую задержку, чем в центре заряда. Самостоятельно взорваться эти участки не успевают и взрываются под действием распространяющейся из центра сверхскоростной детонации.

Ранее также отмечалось, что инициирующая ударная волна в нитрометане ведет себя как инертная, что связано с очень коротким временем формирования сверхскоростной детонации из теплового взрыва на границе относительно его времени задержки. Все это позволило поставить опыты по непосредственному наблюдению распространения сверхскорости по ударно сжатому нитрометану путем наблюдения ее на СФР с торца заряда, изготовленного по обычной схеме. Достаточно только подобрать режим активного заряда, соответствующий времени задержки теплового взрыва на границе порядка нескольких микросекунд, в течение которого ударная волна близка к прямоугольной, и инициировать детонацию в ударной волне непосредственно при ее входе в нитрометан, поместив на границе раздела таблетку из гексогена (рис. 6).

На рис. 6 видно, что наряду с искусственным созданием сверхскорости на границе по оси заряда происходит самостоятельный взрыв, причем распространяющаяся из него сверхскорость имеет то же значение. Измерения сверхскорости этим методом дали для чистого нитрометана значения $8,1 \pm 0,1$ км/сек при давлении в интервале 72—78 тыс. атм.

Произведенные измерения сверхскорости для нитрометана и его смесей с ацетоном показали, что расчетная методика дает некоторое завышение ее значений. Полученные фотограммы свидетельствуют также о том, что распространение сверхскоростной детонации является стационарным.

Измеренные волновые и массовые скорости детонации по ударно сжатому нитрометану позволяют рассчитать ее давление, которое оказалось равным 250 тыс. атм. Соответствующее давление в инициирующей ударной волне составляло 77 тыс. атм.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В НИТРОМЕТАНЕ, СЖАТОМ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Определенный интерес вызывает изучение инициирования детонации в нитрометане, сжатом ударной волной с амплитудой, меньшей порогового значения, около 70 тыс. атм, когда детонация в сжатом нитрометане возникала в результате теплового взрыва на границе преграды. Первоначально такие опыты проводились с целью

измерения сверхскорости в слабых ударных волнах путем искусственного иниции-

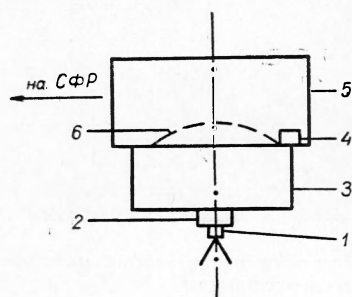


Рис. 7. Схема опыта со слабой ударной волной. 1, 2 — узлы системы; 3 — активный заряд (диаметр 3—100 мм); 4 — таблетка из гексогена; 5 — стеклянный сосуд (диаметр 150 мм, высота 60 мм) с нитрометаном; 6 — фронт входящей ударной волны.

ирования детонации в них с помощью гексогеновой таблетки на границе (рис. 7). Наблюдение с торца заряда показало отсутствие сверхскорости, сбоку — что гексогеновая таблетка при ударе о нее ударной волны детонирует и вызывает в несжатом нитрометане детонацию, которая рас-

пространяется вдоль поверхности фронта ударной волны и при этом не вызывает детонацию этого ударно сжатого нитрометана (рис. 8).

Кроме этого, обнаружено, что фронт ударной волны в этом случае ведет себя как стенка из инертного материала и вызывает волны отсутствия реакции (рис. 8) в распространяющейся детонации, описанные в работе [8] и свидетельствующие о неоднотонной структуре зоны нормальной детонации.



Рис. 8. Фотограмма опыта по измерению сверхскорости в слабых ударных волнах.

1 — детонация нитрометана от гексогеновой таблетки; 2 — движение фронта ударной волны; 3, 4, 5 — волны отсутствия реакции.

Другая серия экспериментов состояла в инициировании детонации в ударно сжатом веществе путем столкновения ударной волны с детонационной (рис. 9). При столкновении обнаружена задержка возникновения «предсвечения», которое распространялось в ударно сжатом нитрометане с очень высокой скоростью (до 40 км/сек) (рис. 10). Поскольку в этих опытах ударная волна в нитрометане использовалась не плоская, оценить давление в них по волновой скорости можно только очень приблизительно. Эти скорости составляли 3,5—4 км/сек.

Задержка возникновения «предсвечения» указывает на то, что зона нормальной детонации при столкновении разрушается, после чего происходит распад гидродинамического разрыва: продукты детонации — однократно ударно сжатый нитрометан, что приводит к двукратному ударному сжатию последнего и распространению «предсвечения» по нему с большой скоростью.

Эта скорость имеет, по-видимому, фазовую природу и соответствует распределению во времени теплового взрыва разных участков нитрометана последовательно нагружаемого двумя ударными волнами. В пользу этого предположения свидетельствует непостоянство этой скорости, а также то, что при относительно небольшом ее

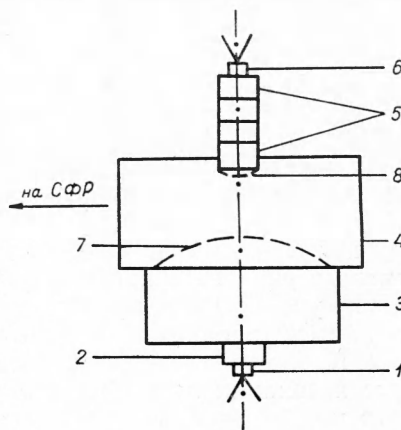


Рис. 9. Схема опыта по столкновению ударной волны с детонационной.

1, 2, 3 — узлы активной системы заряда; 4 — стеклянный сосуд с нитрометаном; 5 — набор гексогеновых таблеток; 6 — капсуля; 7 — фронт ударной волны; 8 — фронт детонационной волны.

изменении в ударной волне до столкновения величина скорости меняется в несколько раз (15—40 км/сек). По-видимому, при определенных условиях можно получить бесконечное значение сверхскорости, а также наблюдать изменение ее направления. Возможно, что эти опыты имеют аналогию с опытами Кука, о которых указывалось во введении.

Действительно, в однократно сжатом нитрометане Кук наблюдал сверхскорость около 10 км/сек. С учетом массовой скорости за фронтом инициирующей ударной волны эта величина согласуется с результатами работы и с данными Кэмпбелла и Чайкена [2, 3]. Феноменально большие скорости (порядка 35 км/сек в нитрометане и до 100 км/сек в расплавленном тротиле) Кук получал только в экспериментах при столкновении двух ударных волн. Как показано выше, природа этих сверхскоростей может быть существенно различной.

Важным явлением в этих опытах является также наличие волн отсутствия реакции (см. рис. 10) в образовавшейся сверхскоростной де-

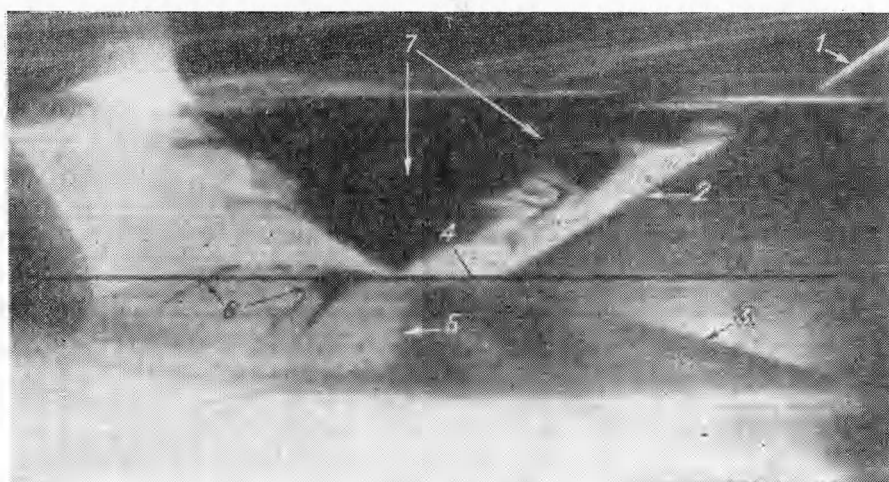


Рис. 10. Фотограмма опыта по схеме, приведенной на рис. 9.

1 — детонация гексагеновых таблеток; 2 — детонация нитрометана; 3 — ударная волна в нитрометане; 4 — место столкновения волн и задержка; 5 — распространение «предсвечения»; 6 — волны отсутствия реакции в детонации по ударно сжатому нитрометану; 7 — волны отсутствия реакции в нормальной детонации.

тонационной волне по ударно сжатому веществу, распространяющихся вдоль поверхности столкновения ударной волны с детонационной. При этом роль инертной оболочки при образовании этих волн выполняют продукты нормальной детонации. Наличие волн отсутствия реакции позволяет высказать предположение о том, что фронт детонационной волны по ударно сжатому нитрометану, так же как и в нормальной детонации, имеет неоднородную структуру.

Кроме того, из этих и предыдущих опытов следует, что инициирование детонации в сжатом большим давлением нитрометане затруднено. Это может быть связано с относительно небольшой температурой в нитрометане, возникающей при двукратном ударном сжатии. Допустимо также предположение об отрицательном влиянии давления на скорость реакций, приводящем к тепловому взрыву ударно сжатого нитрометана.

В настоящее время нет количественных данных, позволяющих дать окончательный ответ на этот вопрос.

Поступила в редакцию
9/1 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Cook, D. H. Pack, W. A. Gey. Seventh Symposium on Combustion. London, 1959, 820.
 2. R. F. Chaiken. J. Chem. Phys., 1960, **33**, 3, 760.
 3. A. W. Campbell, W. L. Davis and I. R. Travis. Phys., Fluids, 1961, **4**.
 4. M. A. Cook, R. T. Keves, A. S. Filler. Trans. Faraday Soc., 1956, **52**, 369.
 5. I. R. Travis, A. W. Campbell, W. L. Davis and I. B. Ramsay. Les Ondes de Détonation, 1962, 45.
 6. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, **4**.
 7. A. W. Campbell, M. E. Malin and T. E. Holland. J. Appl. Phys., 1956, **27**, 8, 963.
 8. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, **1**.
 9. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Веретенников. Сб. «Взрывное дело», Госгортехиздат, 1963, № 52/9.
 10. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации, ГИТТЛ, 1955.
-