

**ВОЗБУЖДЕНИЕ
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ СЛАБОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЖИДКИХ ВВ**

А. В. Дубовик, В. К. Боболев
(Москва)

Фотографирование перехода ускоряющегося горения (максимальные скорости до ~ 300 м/сек) в детонацию с малой скоростью (~ 1000 – 2000 м/сек) в тонких (менее ~ 1 мм толщиной) слоях жидкого взрывчатого вещества, помещенных между прочными поверхностями [1–3], позволило непосредственно наблюдать возникновение неоднородностей в жидкости впереди фронта пламени (кавитационных полостей и пузырьков), наличие которых облегчало возбуждение и последующее распространение детонации. Было выяснено, что их присутствие вызывается воздействием на жидкость волновых возмущений, опережающих фронт реакции в жидком ВВ [3–5].

Возбуждение детонации в жидкостях от готовой ударной волны рассматривалось в работе [6]. Было показано, что в зарядах нитроглицерина, помещенных в оболочки диаметром 5–30 мм и длиной 30–50 см, материал которых обладает достаточной динамической жесткостью, устойчивая малая скорость детонации возникает от ударных волн с амплитудой 5–20 кбар всегда со значительной задержкой (~ 10 мксек) на заметном расстоянии (около 10 мм) от инертной преграды, отделяющей жидкость от активного заряда ВВ. Сравнение указанных задержек инициирования с параметрами инициирующих ударных волн приводит к выводу о невозможности возбуждения реакции за счет ударного разогрева жидкости. В то же время известно, что возникновение взрывчатого превращения в жидком ВВ существенно облегчается (снижается критическая величина амплитуды инициирующей ударной волны), если в нем присутствуют неоднородности (пузырьки газа [7–9] или кавитационные полости, возникающие в жидкости во время инициирования [10]). Для выяснения природы возбуждения и распространения детонации в жидких ВВ с помощью сравнительно слабых (~ 10 кбар) ударных волн были поставлены описанные ниже опыты.

I. Жидкое ВВ (нитроглицерин) помещалось в сравнительно узкий (2–10 мм толщиной) зазор между двумя прозрачными плексигласовыми пластинами толщиной 50 мм, которые соединялись относительно тонкими плексигласовыми (или стеклянными) стенками толщиной 2–3 мм, образуя заряд длиной 150 мм. Заряд со стороны пластин, имевших ширину 50 мм, обращался к фотокамере ЖЛВ-1, работавшей в режиме покадровой съемки с частотой 350 тыс. кадров в секунду, а со стороны стенок — к камере ЖФР, снимавшей в режиме непрерывной развертки со скоростью записи 375 м/сек. Иницирующая ударная волна переходила в заряд из тонкой (1–2 мм толщиной) плексигласовой пластины, отделявшей жидкость от активного заряда ВВ.

Выбранная конструкция заряда позволяла эффективно уменьшить экранирование свечения реакции в НГЦ при разрушении оболочки заряда во время инициирования.

Фоторазвертка на фоне яркого экрана возникновения детонации с малой скоростью в заряде нитроглицерина при толщине зазора 5 мм представлена на рис. 1 (нижняя часть снимка), а соответствующая картина, полученная с помощью кадровой развертки — на рис. 2, а — е (цифрами под кадрами указано время в мксек, прошедшее с момента инициирования).

В эксперименте события в правой половине заряда, обращенной к камере, фотографировались на фоне яркого экрана, тогда как в левой половине регистрировалось собственное свечение развивающегося взрыва. Подобная постановка эксперимента позволяла четко определять в любой момент времени местоположение предварительной ударной волны и кавитационной зоны по отношению к фронту воспламенения и сопоставлять эти данные с результатом соответствующей фоторазвертки. Иницирование осуществлялось по оси заряда с его нижней части.

Как видно из приведенных фотографий, с момента инициирования в оболочке заряда возникает ударная волна, распространяющаяся со скоростью около 2750 м/сек, которая весьма незначительно превышает скорость звука в плексигласе. Пользуясь известной ударной адиабатой плексигласа [11], можно оценить амплитуду ударной волны в оболочке приблизительно 1,4 кбар. Поскольку сжимаемость нитроглицерина мало отличается от сжимаемости плексигласа [12], можно ожидать, что при переходе ударной волны из оболочки в нитроглицерин в последнем возникает боковая волна приблизительно с той же амплитудой. Предварительная волна такой интенсивности была зарегистрирована перед фронтом малой скорости детонации в нитроглицерине с помощью электромагнитного метода [1, 3], после прохождения которой в жидкости возникала разгрузка и появлялись нарушения сплошности. На рис. 1 нарушение прозрачности заряда за предварительной ударной волной связывается с появлением неоднородностей в нитроглицерине, характер которых понятен из рис. 2, б, в. Кавитационная зона спустя ~17 мксек после инициирования в виде изогнутого свода перекрывает заряд над границей, отделяющей нитроглицерин от детонатора, своей формой близко повторяя искривленный фронт предварительной ударной волны, которая к этому времени отходит уже на значительное расстояние (~45 мм) от границы (интервал между горизонтальными линиями, нанесенными на внешнюю поверхность оболочки заряда, составляет 20 мм). В то же время большой объем жидкости ниже свода, находящийся под влиянием высокого давления продуктов взрыва (ПВ) активного заряда, остается однородным.

В данном эксперименте очаг реакции впервые возник в левом углу вблизи стенки заряда. Однако яркая вспышка, приведшая к возбуждению малой скорости детонации, спустя ~2 мксек возникла в центральной части заряда на границе раздела однородного и кавитирующего НГЦ (см. рис. 2, г) на расстоянии ~10 мм от преграды между жидкостью и детонатором, которая, как можно заметить, незначительно смещается в глубь заряда. Далее детонация начинает быстро распространяться в глубь и к краям заряда, но не назад, в область однородного НГЦ. На начальном участке заряда скорость распространения взрывчатого превращения сравнительно велика и достигает 2500–3000 м/сек (см. рис. 1 и 2, г — е), при этом она, однако, не превышает скорости распространяющегося в глубь заряда фронта кавитации,



Рис. 1

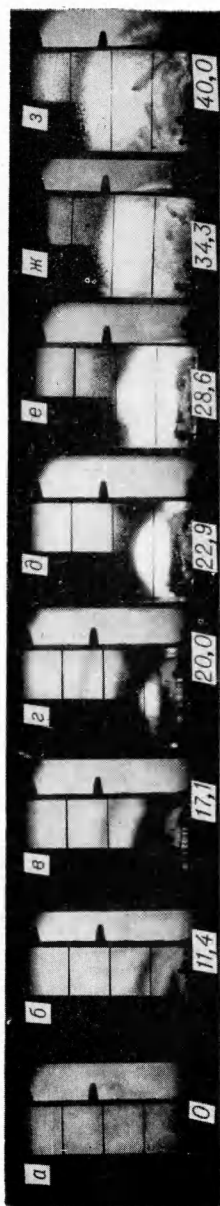


Рис. 2

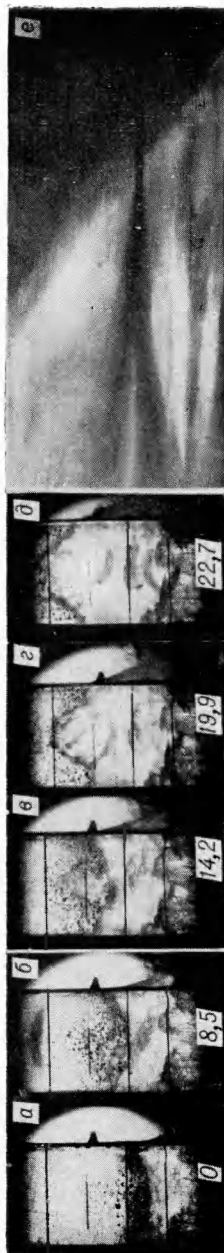


Рис. 3



Рис. 4

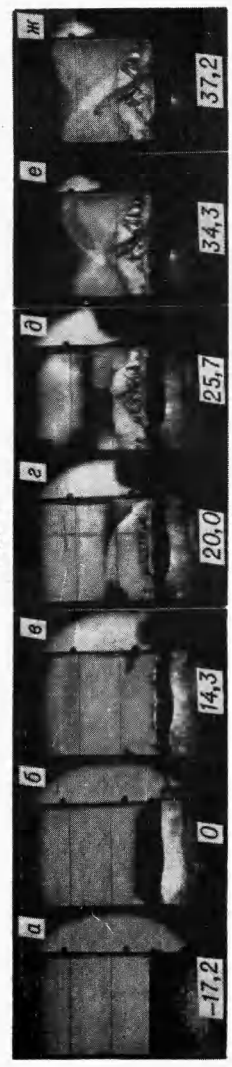


Рис. 5



Рис. 6



Рис. 7

составляя с ним величину примерно одного порядка. Наряду с этим оставшийся за фронтом детонации однородный НГЦ вблизи границы между зарядами также вступает в реакцию, однако в нем взрывчатое превращение распространяется со значительно меньшей скоростью (около 300 м/сек). Спустя ~ 30 мксек с момента инициирования, скорость детонации уменьшается до величины 1800 м/сек, с которой она далее устойчиво распространяется по заряду. Одновременно с затуханием относительно быстрого переходного режима детонации (~ 2500 м/сек) в оболочке возникает ударная волна, распространяющаяся вслед за возникшей в момент инициирования со скоростью 2750 м/сек (см. рис. 1). К моменту затухания переходного процесса фронт детонации выравнивается относительно направления распространения. На рис. 2, ж, з представлены фотографии фронта детонации в нитроглицерине при установившемся режиме распространения со скоростью ~ 1800 м/сек.

Обращает на себя внимание характер кавитационной зоны в жидкости на стадии возникновения реакции и распространения относительно быстрого переходного режима детонации (см. рис. 2, г — е) и во время распространения установившейся малой скорости детонации (см. рис. 2, ж — з). В первом случае неоднородности полностью устраняют прозрачность заряда, их плотность велика и размер каждой в отдельности так мал, что совершенно не удается отличить их друг от друга. На этой стадии распространения фронт детонации относительно гладкий и заметно искривлен к периферии заряда. Обратная картина наблюдается во втором случае. Рассмотренный характер распределения кавитаций определяет величину скорости распространения детонации в НГЦ. Действительно, с возрастанием плотности неоднородностей увеличивается количество очагов реакции во фронте малой скорости детонации, поэтому реакция протекает с большей полнотой и с более высоким тепловыделением, необходимым для поддержания режима распространения. Соответственно уменьшение плотности распределения кавитационных пузырьков, несмотря на возрастание их индивидуальных размеров, что облегчает при прохождении детонационного фронта возбуждение реакции в каждом из них [8, 13] и должно приводить к снижению величины малой скорости детонации. Анализируя распространение детонации в слое заданной толщины, можно предположить, что характер развития кавитаций определяется интенсивностью предварительного волнового возмущения, воздействующего на жидкость. На начальном этапе инициирования амплитуда предварительной волны, возникшей от детонатора, по-видимому, несколько выше амплитуды волновых возмущений, возникающих в заряде под действием фронта детонационной волны в нитроглицерине. С понижением амплитуды предварительных волновых возмущений уменьшается интенсивность волн разрежения, создающих в жидкости подобие отрицательных напряжений и вызывающих появление нарушений сплошности. В работах [3, 5] отмечалось влияние материала и геометрии оболочки заряда, а также наличия в жидкости различных волнопроводящих предметов на устойчивость и величину малой скорости детонации в нитроглицерине именно с точки зрения их способности проводить возмущения достаточной интенсивности в ранее однородную жидкость перед детонационным фронтом.

II. Проведенные опыты позволяют приближенно исследовать характер устойчивости распространения малой скорости детонации в нитроглицерине по отношению к изменению геометрии заряда и введению в жидкость волнопроводящих предметов.

1. Оказалось, что изменение толщины зазора от 2 до 10 мм, в который помещался нитроглицерин, при неизменной ширине заряда приводило к незначительному возрастанию величины скорости детонации (от ~ 1400 до ~ 1800 м/сек).

Столь слабую зависимость скорости детонации от толщины слоя ВВ можно объяснить влиянием нескольких факторов: наличием у зарядов сравнительно толстых оболочек, затрудняющих разлет реагирующего вещества; геометрией зарядов, позволяющей веществу разбрасываться преимущественно в одном направлении; некоторой зависимостью образования кавитаций от характера воздействия предварительного волнового возмущения на жидкость, в частности от значения градиента давления за фронтом волны разрежения, величина которого тем больше, чем меньше толщина слоя ВВ, и т. д. Действительно, сравнение фотографий распространения фронта детонации в относительно узких (рис. 3) и широких (рис. 4) слоях нитроглицерина показывает, что плотность распределения кавитаций в первом случае несколько выше, чем во втором.

Рассмотренные особенности образования кавитаций позволяют объяснить характер некоторых аномалий при распространении малой скорости детонации в сравнительно узких слоях нитроглицерина. На рис. 3, а—д представлены отдельные кадры из серии съемки фронта детонации в слое НГЦ толщиной 2 мм. Цифрами под кадрами указаны моменты времени, за начало отсчета которых принят момент на рис. 3, а, когда фронт детонации вогнут в сторону распространения (интервалы между горизонтальными линиями на заряде следуют через 20 мм). На этом же снимке заметно, что по сравнению с периферией в центральной части заряда возникает более развитая кавитационная зона, в которой впереди фронта детонации появляются очаги реакции, развитие которых в конечном итоге (см. рис. 3, в—д) приводит к обращению поверхности детонационного фронта выпуклостью в сторону распространения. В дальнейшем периферийные участки фронта детонации подтягиваются к центральным, и если достаточно развитая кавитационная зона возникает вблизи стенок заряда, то возможно восстановление первоначальной формы фронта детонации (см. рис. 3, а). Фоторазвертка этого явления представлена на рис. 3, е.

При распространении детонации в относительно толстых слоях НГЦ поверхность фронта на протяжении всей длины заряда в основном сохраняет свою форму, которая, однако, сильно искривляется под влиянием волнопроводящих предметов, помещаемых внутрь заряда (см. рис. 4, а—ж, толщина слоя ВВ около 10 мм, диаметр алюминиевого стержня 4 мм, горизонтальные метки на заряде следуют через 10 мм). Наличие стержня создает благоприятные условия для распространения предварительных волновых возмущений в окружающей жидкости, благодаря чему ближайшие к нему участки детонационного фронта некоторое время опережают периферийные (см. рис. 4, б—г). Это, в свою очередь, вызывает появление дополнительных волновых возмущений в оболочке заряда, создающих в итоге на его краях развитые кавитационные зоны (см. рис. 4, д), в которых спустя некоторое время инициируется реакция, так что фронт детонации стремится выравняться относительно направления распространения. В то же время можно заметить, что за фронтом малой скорости детонации остается значительное количество непрореагировавшего НГЦ, хотя скорость распространения в среднем остается практически неизменной ~ 1800 м/сек (см. рис. 4, з, линией АВ помечено положение нижнего конца стержня).

2. Если оболочка заряда не в состоянии выполнять роль проводника предварительного волнового возмущения, то распространение малой скорости детонации прерывается. Ограничивающие пластины и стенки заряда были разрезаны на две части и затем вновь соединены друг с другом через резиновую прокладку толщиной 4 мм, которая, однако, не разделяла жидкость внутри оболочки. В нижней части заряда была инициирована малая скорость детонации (см. рис. 1, толщина зазора 6 мм, АВ — положение прокладки). Хорошо заметно, что в месте разреза оболочка лишилась способности проводить ударную волну (упругое возмущение). Возмущение в оболочке появляется лишь в момент подхода детонационного фронта к месту разреза. Оно распространяется вдоль оболочки со скоростью 2750 м/сек, тогда как распространение фронта детонации, перед которым в жидкости за местом разреза оболочки отсутствуют кавитации, прекращается. Как видно из рис. 1, нарушения сплошности возникают в нитроглицерине спустя ~ 14 мксек после прекращения детонации на глубине около 20 мм от места разреза оболочки, в которых спустя некоторое время возбуждается детонация, распространяющаяся в глубь заряда со скоростью около 2000 м/сек. Покадровая съемка прекращения детонации на уровне прокладки и последующего возобновления в кавитационной зоне, в виде изогнутого свода охватывающей заряд вблизи места разреза оболочки, представлена на рис. 5, а — ж. Картина напоминает возникновение детонации в заряде нитроглицерина при взрыве детонатора (см. рис. 2) с тем отличием, что инициирование происходит вблизи стенок заряда и фронты детонационных волн распространяются навстречу друг другу. В месте их столкновения наблюдается повышение свечения (см. рис. 5, е). В дальнейшем происходит постепенное выравнивание фронта детонации, при этом излом детонационного фронта продолжает ярко светиться и имеет скорость распространения около 2800 м/сек, а однородный нитроглицерин вблизи места разреза оболочки еще длительное время не вступает в реакцию. Эксперименты показали, что рассмотренная картина совершенно не изменяется, если наряду с разделением оболочки резиновой прокладкой в этом же месте разделить и жидкость в заряде с помощью латунной пластинки не слишком большой толщины (~ 2 мм).

Основываясь на данном эксперименте, в порядке предположения можно считать, что одной из причин затухания малой скорости детонации в жидких ВВ является разрушение впереди фронта детонации оболочки детонирующего заряда, происходящее под действием предварительных волновых возмущений, обгоняющих детонационный фронт. Следствием этого является неспособность оболочки, как и при наличии демпфирующей резиновой прокладки, проводить волновые возмущения, нарушающие сплошность жидкости, а также достаточно активно противодействовать разлету продуктов взрыва. Явление затухания детонации с малой скоростью в нитроглицерине, помещенном в стеклянную оболочку, наблюдалось на достаточно далеком (~ 100 диаметров заряда) расстоянии от места инициирования [14, 15].

III. Результаты настоящих исследований позволяют заключить, что малая скорость детонации в НГЦ сравнительно устойчива по отношению к переходу в нормальную при воздействии таких довольно слабых возмущающих факторов, как изменение геометрии заряда, введение в жидкость волнопроводящих стержней и т. д., влияющих на деформацию поверхности ее фронта. Переход малой скорости детонации в нормальную возникает в НГЦ под действием относительно сильного возмущения, например, при взрыве в веществе сравнительно глубоко

за фронтом детонации (на расстоянии около трех диаметров заряда) шашки из тексогена; в результате которого вслед за волной малой скорости детонации распространяется мощная ударная волна [1]. В литературе [6, 16] имеются сведения о существовании произвольных переходов малой скорости детонации в нормальную в жидких растворах тетранитрометана с различными горючими добавками, причем в [6] давалось приближенное объяснение характеру этого явления, основанное на представлении о возбуждении интенсивного взрывчатого превращения в участках непрореагировавшей жидкости за фронтом малой скорости детонации.

В настоящих экспериментах в качестве объекта исследования была выбрана смесь тетранитрометана с метиловым спиртом 71,0/28,5 (по весу), которая слегка загущалась добавкой 0,5% плексигласа. Постановка опытов была такой же, как и при исследовании детонации в нитроглицерине. Результаты показали, что принципиальные черты возникновения и развития низкоскоростной детонации в указанной жидкости идентичны тем, которые характерны для нитроглицерина. В опытах были зарегистрированы переходы малой скорости детонации в нормальную, подчиняющиеся рассмотренному выше механизму, при этом детонация с высокой скоростью возникала, как правило, глубоко за фронтом малой скорости детонации вблизи границы между ВВ и детонатором в объеме однородной жидкости, окруженной горячими продуктами реакции.

В то же время в экспериментах фиксировались переходы, связанные с возникновением нормальной детонации непосредственно на фронте малой скорости детонации. На рис. 6, а — ж представлены кинокадры распространения малой скорости детонации в смеси тетранитрометана с метиловым спиртом. Чаще всего переходы регистрировались при инициировании детонации с угла заряда по причине, которая понятна из последующих фотографий той же серии (см. рис. 6, ж — и). Нормальная детонация возникает при взаимодействии фронта малой скорости детонации с развитой кавитационной зоной, возникающей в жидкости вблизи противоположной от места инициирования стенки заряда. Заметим, что при анализе соответствующей картины, полученной с помощью фоторазвертки, может сложиться впечатление, что нормальная детонация возникает на некоторой глубине за фронтом малой скорости детонации (см. рис. 6, к).

Обработка результатов эксперимента дает величину нормальной скорости детонации 6700 м/сек и скорость участков фронта малой скорости детонации, распространяющихся вдоль заряда — 1300 м/сек, в то время как скорость участков фронта детонации,двигающихся к противоположной от места инициирования стенке заряда, несколько выше и составляет 2100 м/сек.

Однако взаимодействие фронта малой скорости детонации с интенсивно кавитирующей жидкостью не всегда приводит к возбуждению нормальной детонации (рис. 7, а — е). В данном эксперименте, постановка которого аналогична предыдущему, участки фронта низкоскоростной детонации вблизи противоположной от места инициирования стенки заряда, у которой образовалась развитая кавитация, быстро подтягиваются до уровня ушедших вперед головных участков, так что поверхность фронта выравнивается относительно направления распространения. Скорость распространения участков фронта детонации вдоль стенки, вблизи которой происходило инициирование, составляет 2100 м/сек, а вдоль противоположной — около 2600 м/сек, повышенное значение которой находится в согласии с изложенными выше предпо-

ложениями о влиянии характера кавитаций на величину малой скорости детонации. Фоторазвертка приведена на рис. 7, ж.

Специальными опытами, проведенными в указанной постановке с нитроглицерином, не удалось обнаружить переходов малой скорости детонации в нормальную, что связано со многими причинами, одной из которых, по нашему мнению, является величина и скорость тепловыделения при протекании реакций во фронте детонационной волны.

IV. Изложенные результаты показывают, насколько важно влияние характера развития кавитаций в жидкости для распространения малой скорости детонации с теми или иными параметрами, а также для перехода малой скорости детонации в нормальную. В связи с этим следует заметить, что если искусственно вызывать кавитацию в жидкости, например механическим встряхиванием сосуда, которое можно осуществить относительно слабым и длительным (время воздействия несколько миллисекунд) ударом, то в результате в жидкости будут образованы сравнительно крупные (размером несколько миллиметров) пузыри, плотность распределения которых окажется крайне невелика (несколько пузырей на 1 см^3 жидкости). При возбуждении реакции в заряде с такой неоднородной жидкостью будет распространяться низкоскоростная детонация, причем к кавитациям, создаваемым в жидкости движением детонационного фронта, будут добавлены немногочисленные, но сравнительно крупные пузыри. Их присутствие, по-видимому, не должно оказывать существенного воздействия на распространение низкоскоростной детонации, поскольку создаваемые фронтом неоднородности, значительно превышая по количеству число искусственно введенных в жидкость пузырей, вносят основной вклад в развитие поверхности воспламенения при прохождении по ВВ фронта детонационной волны. По-видимому, именно с этих позиций следует рассматривать обнаруженный в работе [17] эффект некоторого ослабления фронта детонации вблизи стенки заряда НГЦ, у которой число искусственно введенных пузырей оказалось немного больше количества пузырей вблизи противоположной стенки.

* * *

Представленные результаты показывают, что при воздействии на жидкость сравнительно слабым иницирующим импульсом возбуждение и развитие реакции, а также ее последующее распространение в форме низкоскоростной детонации происходит только в условиях наличия кавитаций в жидкости, характер которых зависит от способности оболочки заряда проводить волновые возмущения достаточной интенсивности в ранее однородную жидкость. В этой связи выяснена роль факторов, облегчающих и затрудняющих распространение малой скорости детонации в жидких ВВ. Обнаружено влияние характера развития кавитаций на величину скорости распространения слабых детонационных волн, приводящего в некоторых условиях к возникновению переходов от низкой скорости распространения к нормальной.

Авторы приносят глубокую благодарность К. И. Щелкину и И. М. Воскобойникову за обсуждение и ценные дискуссии по вопросам, затронутым в статье.

Поступила в редакцию
18/IV 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Сб. «Взрывное дело», № 63/20. «Недра», 1967.
2. F. P. Bowden, M. P. McOnie. Nature, 1965, 206, 380.
3. А. В. Дубовик, В. К. Боболев, И. М. Воскобойников. ФГВ, 1966, 4.
4. И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.
5. Г. С. Соснова, И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик. Докл. АН СССР, 1963, 149, 3.
6. А. В. Дубовик. Канд. дисс. ИХФ АН СССР, 1966.
7. С. Н. Winning. Nature, 1956, 177, 33.
8. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 498, 511.
9. R. W. Watson, F. C. Gibson. Nature, 1964, 204, 1296.
10. С. Н. Winning. Explosivstoffe, 1963, 11, 2.
11. G. E. Hauver. J. Appl. Phys., 1965, 36, 2113.
12. А. Н. Дремин, О. К. Розанов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
13. J. W. Enig, F. J. Petrone. Phys. Fluids, 1966, 9, 398.
14. С. Б. Ратнер, Ю. Б. Харитон. Докл. АН СССР, 1943, 41, 307.
15. Р. Х. Курбангалина. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1947.
16. В. А. Одинцов. ЖПХ, 1961, XXXIV, 5, 1092.
17. В. Е. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1967, 1.