

14. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1939, 24, 922.
15. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1945, 50, 285.
16. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик. Сб. «Физика взрыва», № 3, Изд-во АН СССР, 1955.
17. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.

УДК 534.222.22\*

## ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЖИДКИЕ ВВ СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

*А. В. Дубовик, В. К. Боболев*

*(Москва)*

В настоящее время вопрос об инициировании детонации в однородных ВВ, жидких и монокристаллических, с помощью сравнительно мощных (60–120 кбар) ударных волн достаточно подробно исследован экспериментально и теоретически. Установлено, что возбуждение быстрой реакции в ударно сжатом и нагретом веществе, имеющем место через время периода индукции, определяется возникновением теплового взрыва на границе раздела жидкости и инертного барьера, отделяющего заряд ВВ от генератора ударной волны (обычно — заряд мощного ВВ).

Менее подробно исследован значительно более важный для практики обращения с ВВ вопрос об условиях возбуждения взрыва в жидкостях под воздействием сравнительно слабых ударных волн (~1–10 кбар). Поскольку ударный разогрев ВВ в этом случае весьма невелик (не выше 100°), было предположено [1], что возбуждение быстрой реакции может происходить в локальных высокотемпературных участках («горячих точках»), являющихся местами концентрации энергии при прохождении ударной волны. В случае жидких ВВ такими участками могут быть различные посторонние включения — пузырьки газа, частицы примесей и т. д. Действительно, чувствительность жидкостей заметно возрастает, если в них содержатся указанные включения. Следует заметить, что характер включений (размер, в частности) влияет, в свою очередь, на картину инициирования [2–4].

Однако на практике используются сравнительно очищенные однородные жидкие ВВ, опасность обращения с которыми тем не менее общеизвестна. Правда, в относительно вязких жидкостях типа нитроглицерина (НГЦ) постоянно может содержаться некоторое небольшое количество воздушных пузырьков, но, как правило, их размеры сравнительно невелики, в силу чего их присутствие не оказывает влияния на такую характеристику чувствительности ВВ, как величину порога инициирования [5].

С другой стороны, большое количество пузырьков может быть введено в жидкое ВВ во время самого процесса инициирования, при этом важную, если не решающую, роль в инициировании начинают играть такие факторы, как характер воздействующей нагрузки на жидкость, а также наличие оболочки заряда ВВ [6, 7]. Известно, что жидкости плохо сопротивляются воздействию отрицательных напряжений, вследствие чего при сжатии и последующей разгрузке в них возникают нарушения сплошности (кавитация). Кавитационные пузырьки в жидкости через некоторое время в зависимости от характера воздействия

исчезают, не вызывая, вообще говоря, инициирования взрыва. Если, однако, в кавитирующей жидкости резко поднимается давление, величина которого выше некоторой критической, то возбуждается взрыв. При этом предварительные разрежения, имеющие порядок величины динамической прочности жидкостей, весьма незначительны и для большинства жидкостей в зависимости от условий эксперимента составляют  $\sim 0,1 \cdot 1,0$  кбар, тогда как повторные повышения давления, оказывающие влияние на инициирование взрыва, различны для разных ВВ и в зависимости от вида жидкого ВВ могут изменяться от нескольких десятых до нескольких десятков килобар. В то же время приведенные величины давлений для сравниваемых жидкостей гораздо меньше соответствующих порогов инициирования, устанавливаемых при экспериментах, допускающих однократное гомогенное сжатие ( $60 \cdot 120$  кбар).

В значительной мере с исследованием инициирования быстрой реакции в жидкостях с помощью сравнительно слабых ударных волн сопрягается изучение природы малых скоростей детонации в жидких ВВ, скорости распространения которых в несколько раз меньше скоростей нормальных детонаций и близки к скоростям звука для данных ВВ. Поскольку ударный разогрев жидкости во фронте малой скорости детонации незначителен [1], было предположено, что реакция возбуждается в локальных участках, в которых по тем или иным причинам возникают разогревы с достаточно высокой температурой.

Последующими исследованиями [7—11] было установлено, что распространение малой скорости детонации в жидких ВВ существенно облегчается за счет образования впереди детонационного фронта многочисленных кавитационных полостей. Их появление в ранее однородной жидкости связывается с распространением в оболочке заряда предварительных волновых возмущений, опережающих фронт малой скорости детонации. Это может происходить при условии, когда скорость распространения возмущений в оболочке выше величины малой скорости детонации [12]. Иными словами, ситуация напоминает рассмотренную выше картину инициирования жидкостей: сжатие жидкости предварительной волной, последующая разгрузка, возникающая при движении волны разрежения от боковой поверхности заряда, и, наконец, возбуждение реакции в зоне высокого давления во фронте малой скорости детонации. Кавитационные пузырьки облегчают не только инициирование реакции, но и ее последующее развитие во фронте малой скорости детонации, представляя большую поверхность для горения, которое вследствие этого быстро охватывает неоднородные участки заряда.

В настоящей работе приводятся некоторые наиболее существенные экспериментальные факты в пользу изложенных выше рассуждений.

#### ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВА СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Как указывалось выше, инициирование взрыва в жидкостях при слабых воздействиях можно без особых трудностей осуществить при постановке эксперимента, позволяющего создавать в жидкости чередующиеся нагружение, последующую разгрузку, в результате которой жидкость теряет свою сплошность, и, наконец, повторное нагружение, способствующее резкому захлопыванию кавитационных полостей, в которых инициируется реакция. Для этого имеется несколько возможностей [7], например использование зарядов с оболочками, изготовленными из материала с высокой скоростью звука, превышающей скорость распространения слабых ударных волн в жидком ВВ; аналогично этому

влияние присутствия в жидкости волнопроводящих предметов, по которым возмущения могут обгонять ударную волну в ВВ. Если подобные заряды подвергнуть воздействию инициирующей ударной волны, осуществив подрыв заряда какого-либо маломощного ВВ, то впереди ударной волны в жидкости возникают кавитации, взаимодействие которых с фронтом волны приводит к возникновению взрыва.

Если в жидком ВВ не имеется проводников предварительных волновых возмущений, то вызвать кавитацию в ней удастся подрывом дополнительного, также весьма маломощного заряда ВВ (или ударом разогнанного тела), слабое воздействие которого, опережая взрыв инициирующего заряда, не в состоянии привести к взрыву жидкости. При некоторых условиях эксперимента (толстый ослабитель между активным зарядом и жидкостью) расширяющиеся продукты взрыва заряда активного ВВ (или созданная ими воздушная ударная волна) могут при обтекании исследуемого заряда жидкого ВВ оказывать на него повторное ударное воздействие. При этом кавитация в жидкости возникает под влиянием опережающей ударной волны, переходящей из ослабителя [13]. Инициировать взрыв можно также при горении жидкости в замкнутом объеме, например в тонком слое между прочными поверхностями [14, 15]. Ускоряющееся пламя (скорость распространения  $\sim 100$  м/сек) генерирует волны сжатия в ограничивающих поверхностях. Последующее распространение волн вдоль заряда приводит к появлению кавитаций впереди фронта пламени. Взаимодействие пламени с кавитирующей жидкостью вызывает его резкое ускорение, что приводит к переходу в детонацию с малой скоростью.

На рис. 1, *a—e* представлены кинокадры возбуждения взрыва в нитроглицерине, который в виде тонкого слоя (5 мм толщиной) заключен между толстыми плексигалсовыми блоками (не разрушающимися

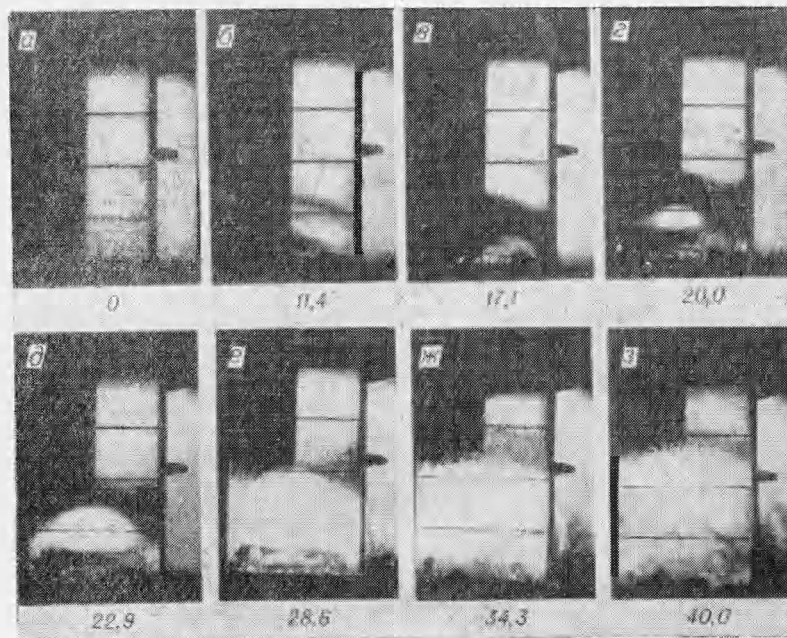


Рис. 1.

в течение времени инициирования). Для четкой фиксации положения фронта воспламенения левая половина заряда со стороны источника подсветки закрашена. Горизонтальные линии на заряде нанесены через интервал 20 мм. Нагружение осуществлялось ударной волной с амплитудой 10 кбар, хотя ударные волны с меньшей амплитудой (2 : 5 кбар) также вызывают взрывную реакцию и детонацию ВВ. Цифры под кадрами означают время (в мксек) с момента воздействия ударной волны на заряд.

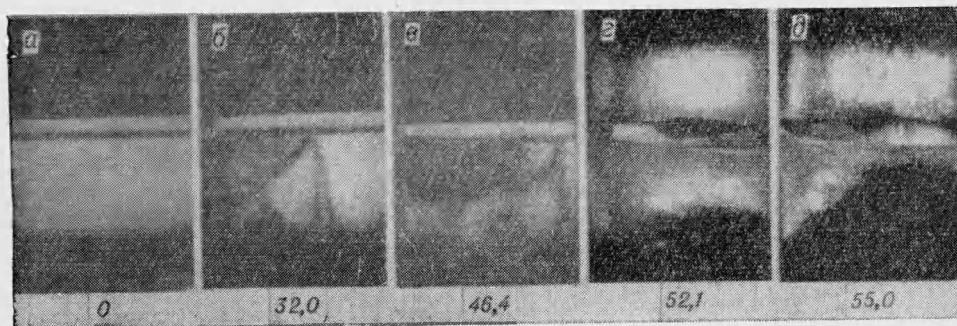


Рис. 2.

Спустя  $\sim 10$  мксек после ударного воздействия в жидкости на глубине  $\sim 15$  мм от преграды появляются разрывы сплошности, устраняющие ее прозрачность, тогда как вблизи преграды (между НГЦ и детонатором) жидкость, сжатая ударной волной, прозрачна. Взрыв возникает через  $\sim 20$  мксек на границе раздела однородного и кавитирующего НГЦ, быстро распространяясь в глубь заряда (на начальном участке длиной  $\sim 30$  мм скорость взрывчатого превращения составляет 2,5 : 3,0 км/сек). При этом, как можно заметить, однородный НГЦ внизу заряда длительное время не вступает в реакцию.

В подобной постановке эксперимента и с использованием в качестве инициатора заряда маломощного ВВ взрыв менее чувствительной жидкости нитрометана (НМ) не возникает. Если несколько видоизменить опыт и воздействовать на НМ сначала слабой ( $\sim 1$  кбар), а затем более сильной ( $\sim 50$  кбар) ударными волнами, то НМ взрывается. На рис. 2 приведены кинокадры взрыва НМ, помещенного в контейнер размером  $3,5 \times 5$  и высотой 5 см и имевшего толстые боковые плексигласовые стенки. Предварительно было проверено, что однородный НМ в подобном устройстве не инициируется ударной волной с амплитудой 50 кбар. Предварительная ударная волна входила в НМ от левой стенки контейнера, а подрыв инициирующего заряда (с задержкой, задаваемой длиной детонационного шнура) происходил у нижней металлической стенки. Сверху над свободной поверхностью жидкости под углом  $45^\circ$  к ней было помещено зеркало, обращенное к кинокамере, что позволяло фиксировать наличие взрыва с двух поверхностей заряда. Момент входа инициирующей ударной волны в НМ показан на рис. 2, в. Реакция возникает спустя  $\sim 3$  мксек.

При воздействии на кавитирующий НМ менее интенсивными ударными волнами (30—40 кбар) химическая реакция возникает лишь в немногочисленных отдельных очагах, не распространяясь на остальную часть заряда, причем при выходе ударной волны на свободную

поверхность заряда наблюдается в отличие от рис. 2 выброс несветящегося и, по-видимому, нереагирующего вещества. Если, однако, в этом случае на небольшой высоте над поверхностью заряда НМ расположить металлическую (или стеклянную) пластину, то удар выбрасываемого вещества об эту поверхность приводит к взрыву (на рис. 3 струи выбрасываемого вещества сталкиваются с зеркалом, расположенным под углом  $45^\circ$  к свободной поверхности заряда).

Заметно более высокой взрывной чувствительностью к ударным воздействиям обладают растворы тетранитрометана (ТНМ) с различ-

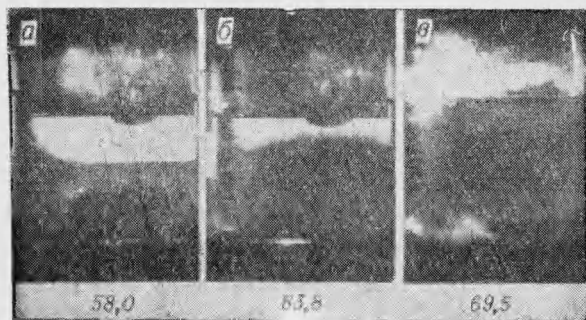


Рис. 3.

ными горючими жидкостями. На рис. 4 приведены кинокадры возбуждения взрыва в заряде с близким к стехиометрии раствором ТНМ в метиловом спирте. Жидкость помещалась в заряд прямоугольного сечения размером  $18 \times 10$  и высотой 50 мм. Обращенные к камере стенки заряда изготовлялись из плексигласа толщиной 18 мм, а боковые стенки имели толщину 1 мм. Заряд устанавливался на ослабитель ударной волны, представлявший собой дюралюминиевый стержень диаметром 30 и длиной 300 мм. Генератор ударной волны (шашка прессованного до плотности  $1,45 \text{ г/см}^3$  тротила весом 80 г) находился на противоположном конце стержня.

ными горючими жидкостями. На рис. 4 приведены кинокадры возбуждения взрыва в заряде с близким к стехиометрии раствором ТНМ в метиловом спирте. Жидкость помещалась в заряд прямоугольного сечения размером  $18 \times 10$  и высотой 50 мм. Обращенные к камере стенки заряда изготовлялись из плексигласа толщиной 18 мм, а боковые стенки имели толщину 1 мм. Заряд устанавливался на ослабитель ударной волны, представлявший собой дюралюминиевый стержень диаметром 30 и длиной 300 мм. Генератор ударной волны (шашка прессованного до плотности  $1,45 \text{ г/см}^3$  тротила весом 80 г) находился на противоположном конце стержня.

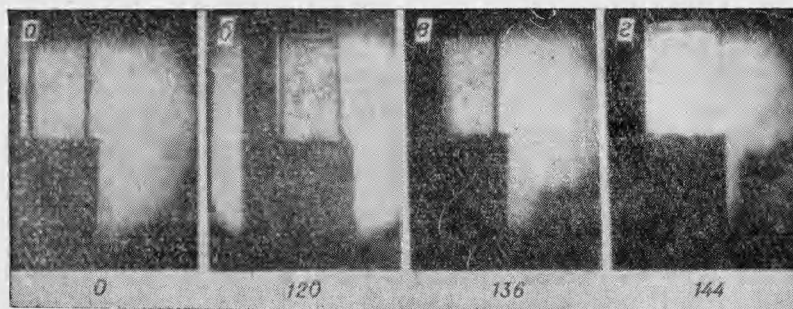


Рис. 4.

Спустя  $\sim 100$  мксек с момента инициирования в жидком ВВ появляются разрывы сплошности, вызванные воздействием ударной волны, перешедшей в ВВ из ослабителя (см. рис. 4, б). В правом нижнем углу рис. 4, в видны расширяющиеся продукты взрыва заряда активного ВВ, которые создают впереди себя воздушную ударную волну. Оценка скорости набегающей на заряд волны дает величину  $1500 : 2000 \text{ м/сек}$ . Поскольку давление при отражении волны от стенки заряда возрастает в несколько раз, приблизительно можно заключить, что импульс ударного воздействия за заряд жидкого ВВ, вызвавшего его взрыв (см. рис. 4, г), составлял величину порядка 0,1 кбар.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В ЖИДКИХ ВВ

Заслуживающим внимания обстоятельством при анализе низкоскоростных детонационных процессов в жидких ВВ является распространение впереди фронта детонации ударной волны вдоль стенок оболочки заряда, так как в волне разряжения за ней может происходить нарушение сплошности в ранее однородной жидкости.

Использование электромагнитного метода при исследовании детонации в НГЦ со скоростью  $D=2000$  м/сек позволило оценить давление в предварительном волновом возмущении (1,5—2,0 кбар), а также установить наличие разгрузки в жидкости впереди фронта малой скорости детонации (давление на фронте  $\sim 8 \cdot 10$  кбар). На кинокадрах распространения детонации с малой скоростью в установившемся режиме с  $D=1800$  м/сек (рис. 1, ж, з) впереди детонационного фронта в НГЦ наблюдается наличие многочисленных кавитационных пузырьков. Фронт воспламенения шероховатый с яркими вспышками в отдельных очагах, причем НГЦ настолько реакционно способен, что реагирует на значительной глубине от фронта воспламенения и даже при разлете, вызываемом разгрузкой. Аналогично поведение других жидкостей, также обладающих высокой реакционной способностью, например близких к стехиометрии растворов ТНМ с горючим. Более того, в указанных растворах малая скорость детонации проявляет большую склонность к произвольному переходу к нормальной детонации. Как показано в [7, 11], это может наблюдаться, в частности, при взаимодействии низкоскоростного детонационного фронта с участком заряда жидкого ВВ, в котором по тем или иным причинам возникла сильно развитая кавитация (например, на краях или в углах прямоугольных зарядов).

С другой стороны, переход может быть результатом интенсивного локального взрыва в однородных непрореагировавших (или охваченных сравнительно медленной реакцией взрывчатого превращения) участках заряда жидкого ВВ глубоко за фронтом малой скорости детонации (участок однородного нереагирующего НГЦ вблизи нижней границы заряда отчетливо заметен на рис. 1, в — д).

В зарядах нитрометана (НМ) вызвать малую скорость детонации в указанной выше постановке эксперимента не удается, хотя при некоторых условиях можно наблюдать на небольших длинах зарядов распространение ударных волн с химической реакцией на фронте (рис. 5). Слой НМ толщиной 25 мм помещался между толстыми плексигласовыми пластинами, образуя заряд шириной 50 и длиной 150 мм. Кавитация в жидкости создавалась подрывом заряда маломощного ВВ, расположенного у верхнего торца заряда НМ. Детонация заряда генератора инициирующей ударной волны, установленного у нижнего торца заряда НМ, осуществлялась с задержкой, длительность которой задавалась временем развития кавитации в НМ. Амплитуда инициирующей ударной волны составляла 50 кбар.

На последовательных кадрах рис. 5 видно развитие кавитации и момент входа инициирующей ударной волны в НМ (см. рис. 5, в). Заметное свечение во фронте волны появляется спустя  $\sim 10$  мксек, когда она находится на расстоянии  $\sim 30$  мм от границы заряда. Далее ударная волна с реакцией на фронте распространяется в глубь заряда со средней скоростью  $\sim 2450$  м/сек. В отличие от фотографий, приведенных на рис. 1, на рассматриваемых снимках в глубине за фронтом ударной волны с реакцией в НМ не наблюдается свечения вещества (и, по-видимому, отсутствует реакция). Оно происходит лишь из срав-

нительно узкой зоны (шириной  $7\text{--}8\text{ мм}$ ) за фронтом волны. После распространения в течение  $\sim 20\text{ мксек}$  скорость волны стала несколько уменьшаться, причем свечение центральной части фронта заметно стало слабеть, оставаясь еще сравнительно ярким по краям. К концу заряда скорость волны составила  $1700\text{ м/сек}$ . Затухание ударной волны с реак-

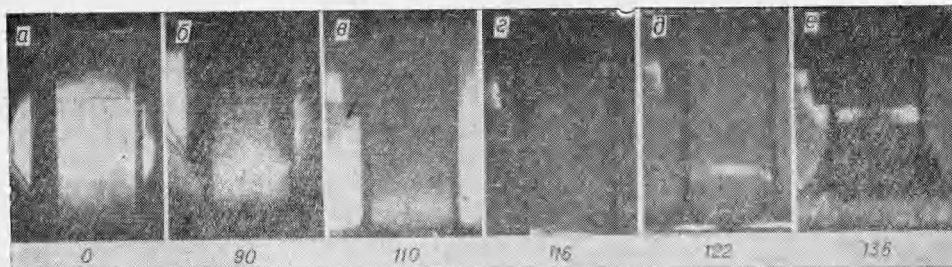


Рис. 5.

цией в НМ объясняется слабой поддержкой из глубины волны, где медленно протекающая реакция прекращается, по-видимому, сразу после проникновения волны разрежения в зону химического превращения.

В отличие от НМ малая скорость детонации в НГЦ (и в некоторых других ВВ) проявляет большую устойчивость к распространению, которая может нарушиться лишь в случае, если оболочка заряда по тем или иным причинам теряет способность проводить волновые возмущения в ранее однородную жидкость или она вообще не может быть проводником предварительных возмущений [7, 10, 11]. В этом случае перед фронтом малой скорости детонации оказывается сплошной НГЦ, что приводит к постепенному затуханию детонации, причем не исключено, что в режиме затухания взрывчатое превращение в НГЦ иногда способно распространяться на значительные длины заряда. Если затухание не слишком велико (скорость снижается не менее, чем до  $500\text{--}700\text{ м/сек}$ ), то при наличии в оставшейся части заряда проводника волновых возмущений (им может быть, в частности, волноводный стержень с соответствующими упругоакустическими характеристиками) скорость распространения немедленно возрастает до  $2000\text{ м/сек}$ . С другой стороны, в НГЦ крайне редко наблюдаются производительные переходы от малой скорости детонации к нормальной. Для их осуществления необходимо воздействие на детонирующей с малой скоростью заряд ВВ сравнительно сильного возмущающего фактора, например при подрыве дополнительного заряда мощного ВВ [14]. Легкость, с которой осуществляются переходы в зарядах с растворами ТНМ в горючем, указывает, что склонность к переходу от малой скорости детонации к нормальной возрастает с уменьшением порога ударного инициирования данного ВВ, величина которого определенным образом зависит от реакционной способности и фиксированных параметров состояния вещества (плотности, температуры и т. д.).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный материал показывает, насколько важно при анализе опасности в обращении с жидкими ВВ учитывать наряду с другими факторами их временное физическое состояние. Если при однократном гомогенном сжатии давления инициирования для большинства жидких

ВВ составляют большую величину — 60–120 кбар, то при кавитации те же жидкости взрываются от приложения сравнительно небольших давлений ( $\sim 0,1$ – $10$  кбар) и по своей чувствительности к воздействию ударных волн приближаются (если не превосходят) к порошкообразным штатным ВВ (согласно [16], давление инициирования тэна при плотности  $1,0 \text{ г/см}^3$  составляет 2,5 кбар). При благоприятных условиях, в частности при наличии у заряда соответствующей оболочки — проводника упругих возмущений, развитие взрыва в жидкостях приводит к возникновению детонации с малой скоростью, которая в дальнейшем может перейти в нормальную детонацию. При этом распространение низкоскоростных режимов в жидкостях стало очень похожим на распространение детонаций с малой скоростью в твердых порошкообразных ВВ. Отсутствие в настоящее время четких представлений о конкретном механизме инициирования реакции при захлопывании полостей в жидкостях создает заметные трудности для проведения какой-либо количественной обработки экспериментальных данных по возбуждению и распространению взрыва.

Поступила в редакцию  
14/III 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Ратнер. ЖФХ, 1946, 20, 11.
2. Ю. Б. Харитон. Сб. статей по теории ВВ. М., Оборонгиз, 1940.
3. Ф. Боуден, А. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых веществах. ИЛ, 1962.
4. A. W. Campbell, W. C. Davis, I. R. Travis. Phys. fluids, 1961, 4, 4.
5. А. Н. Дремин, О. К. Розанов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
6. C. H. Winning. Explosivstoffe, 1963, 11, 2.
7. А. В. Дубовик. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1966.
8. И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.
9. R. W. Watson, F. C. Gibson. Nature, 1964, 204, 4965.
10. А. В. Дубовик, И. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4.
11. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 4.
12. Г. С. Соснова, И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик. Докл. АН СССР, 1963, 149, 3.
13. A. V. Amster, R. W. Woolfolk. Nature, 1967, 215, 5108.
14. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
15. F. P. Bowden, M. P. McOnie. Nature, 1965, 206, 4982; Proc. Roy. Soc., 1967, A298, 1452.
16. G. E. Seay, L. B. Seely. J. Appl. Phys., 1961, 32, 6.