

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ  
КАВИТАЦИЕЙ

В. Е. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин

(Москва)

Известно, что в некоторых ситуациях инициирование взрыва в жидких взрывчатых веществах (ВВ) осуществляется с неожиданной легкостью, в других же — с большим трудом.

Так, Виннинг [1] показал, что нитроглицерин (НГЦ), не содержащий газовых включений и налитый в сосуд таким образом, что стенки совершенно не имели поверхностей, свободных от жидкости, не взрывался при воздействии довольно сильной ударной волны от детонатора, погруженного в НГЦ.

С другой стороны, в практике обращения с жидкими ВВ известно немало случаев, когда сравнительно слабые сотрясения или удары приводят к неожиданным взрывам, иногда влекущим за собою тяжелые последствия. Например, в [2] сообщается о несчастном случае, который произошел, когда уронили полиэтиленовую бутылку с НГЦ. При ударе о пол НГЦ взорвался.

Инициирование взрыва «горячими точками», возникающими при адиабатическом сжатии газовых включений, содержащихся в жидком ВВ еще до момента прохождения по нему ударной волны, надежно доказано многочисленными опытами [1, 3]. Но некоторые случаи инициирования жидких ВВ совершенно невозможно объяснить разогревом таких газовых включений, поскольку в этих случаях температуры адиабатического сжатия газа так малы, что о возникновении «горячей точки» не может быть и речи. К числу такого рода загадочных случаев взрыва относится, например, уже упомянутый взрыв НГЦ в полиэтиленовой бутылке. Известны также опыты [4], в которых роль газовых включений полностью устранялась предварительным созданием в жидком ВВ постоянного высокого давления. Эта мера настолько уменьшала степень сжатия газовых включений под действием слабой ударной волны, что сильное нагревание газа в пузырьках, если они заранее присутствовали в жидком ВВ, было полностью исключено. Тем не менее, при этом чувствительность жидких ВВ к слабым ударным воздействиям несколько не уменьшалась.

При попытках объяснить подобные загадочные случаи обычно указывают на возможность возбуждения взрыва посредством кавитации [1, 5], которая может возникнуть в жидкости, по-видимому, даже при слабых толчках и сотрясениях. Но прямых экспериментальных доказательств возможности кавитационного возбуждения взрыва в жидких ВВ до настоящего времени не существовало.

Цель данной работы — восполнить этот пробел.

**1. Возникновение кавитации в жидких ВВ при слабом ударе по сосуду.** В большинстве реальных жидкостей кавитация возникает уже при отрицательных давлениях, равных нескольким десятым долям атмосферы. Этому способствуют микроскопические пузырьки газа, обычно присутствующие в жидкости, участки плохосмачиваемых твердых поверхностей, а также зародыши кавитации, создаваемые космическим излучением [6].

На фиг. 1 представлены кадры высокоскоростной киносъемки, изображающие поведение стехиометрического раствора бензола в тетранитрометане (ТНМ) в свободно подвешенной стеклянной пробирке, по дну которой наносится удар медной пластинкой, подлетающей к пробирке со скоростью около 5 м/сек.

На первом кадре жидкость еще неподвижна, на втором в ней уже появилось несколько пузырьков, на третьем их число увеличилось, и стали видны темные поперечные полосы — разрывы сплошности, не успев-

шие расширяться и принять сферическую форму. На четвертом кадре все полоски исчезли (захлопнулись), а на поверхности жидкости начал формироваться фонтан.

Последний кадр позволяет рассмотреть еще большее число каверн, причем некоторые из них возникли приблизительно на прежних местах. Фонтан еще продолжает формироваться.

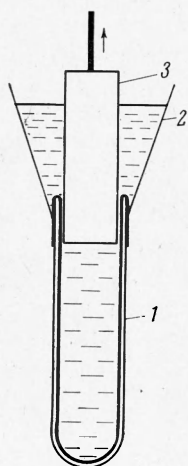
Каждый кадр экспонировался в течение 8 мксек. Цифры под кадрами обозначают в мксек время, отделяющее момент экспонирования от момента прикосновения пластинки к пробирке. Обычно внешний диаметр пробирки составлял 15 мм, а толщина стенок 1.5 мм (чаще всего пробирка разбивалась, но в этом опыте она уцелела, и на ней не оказалось ни одной трещины). Опыт, результаты которого приведены на фиг. 1, свидетельствует лишь о возникновении кавитации при относительно слабом ударе по сосуду с жидкостью. В этом случае захлопывание пузырьков не привело к иницированию взрыва весьма чувствительного ВВ — раствора бензола в ТНМ при стехиометрической концентрации.

Такие же мелкие кавитационные пузырьки возникали в растворе бензола в ТНМ и в том случае, когда в слое воды, налитой в пробирку над раствором, производился (на расстоянии 20 мм от поверхности раствора) электрический разряд, при котором в течение 10 мксек выделялась энергия около 70 дж.

Кавитация и в этом случае не вызывала взрыва.

**2. Кавитация, обладающая достаточно стабильной способностью иницирования взрыва.** Кавитационные пузырьки, при помощи которых удалось возбуждать взрывы в растворах бензола и гептана в ТНМ, создавались импульсом отрицательного давления, возникавшим в том или ином растворе при отрыве от него поверхности поршня, погруженного в раствор.

Устройство, которое использовалось при опытах, представляло собою стеклянную пробирку 1 длиной 8—9 см с внешним диаметром 15 мм и толщиной стенок 1.5 мм (фиг. 2). На нее снаружи надевалась и закреплялась при помощи изоляционной ленты небольшая коническая воронка 2, скрученная из фольги.

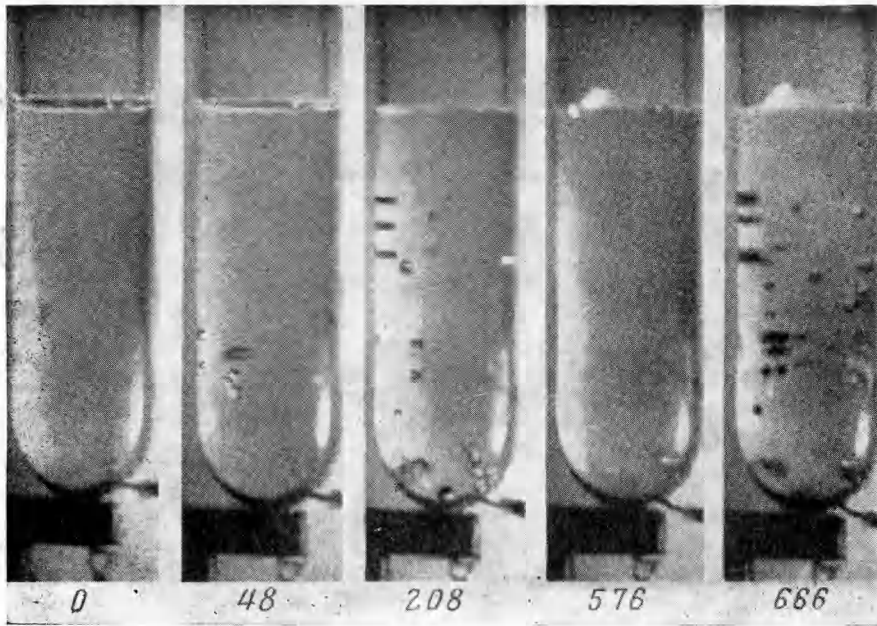


Фиг. 2

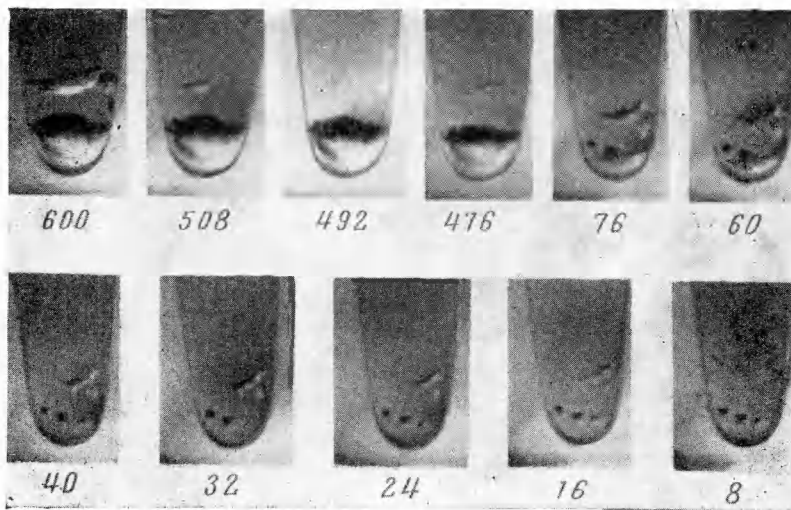
Исследуемая жидкость наливалась в пробирку немного выше ее краев, а затем в нее вставлялся на глубину 1—3 см поршень 3, вытеснявший при погружении еще некоторую часть жидкости в воронку. При резком выдергивании поршня из пробирки (при помощи сильно напряженного стального лука, сделанного из одной пластины авторессоры) в жидкости возникал отрицательный импульс давления, распространявшийся вниз, ко дну пробирки. При отражении импульса от дна растягивающее усилие несколько увеличивалось, жидкость отрывалась от дна, одновременно разрываясь в других местах и образуя кавитационные полости различной формы.

Пока поршень, оторвавшись от жидкости, двигался вверх, освобождая за собою пространство, заполняемое парами, давление под ним не могло стать выше упругости насыщенных паров жидкости, поскольку атмосферный воздух не мог проскочить под поршень. Этому мешала жидкость, находившаяся в воронке, а передачей атмосферного давления через жидкость, находившуюся в узком зазоре между поршнем и стенкой пробирки, можно пренебречь.

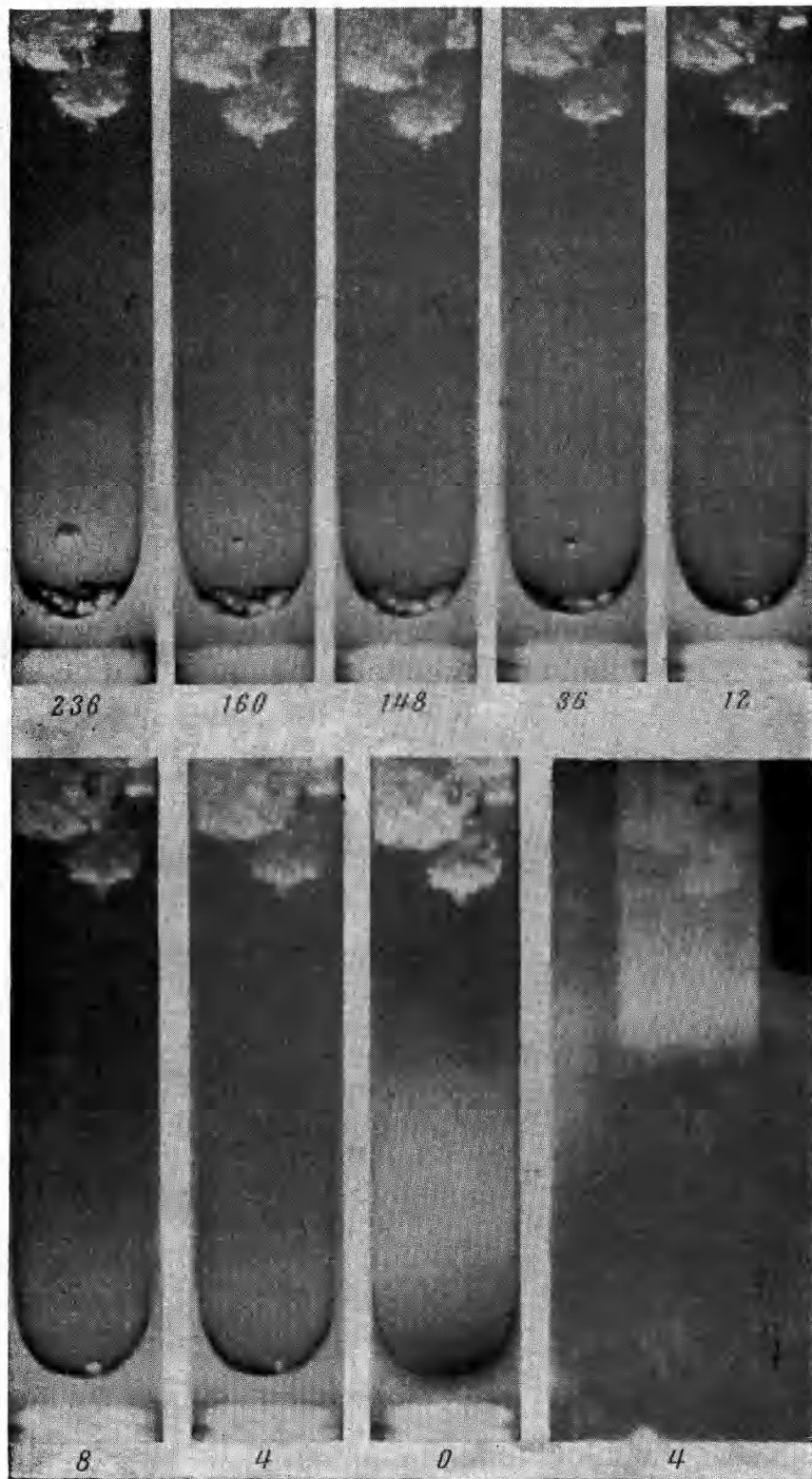
Кавитационные полости возникали в пробирке уже в тот момент, когда поршень только начинал двигаться вверх. Его скорость в пробирке достигала 10 м/сек к концу первой мсек. В течение нескольких мсек, необходимых для того, чтобы поршень вышел из пробирки, а жидкость, находившаяся в воронке, под действием атмосферного давления почти полностью успела заполнить освободившееся после него пространство, эти каверны непрерывно увеличивались в размерах, так что некоторые из них иногда приобретали диаметр, близкий к диаметру пробирки. Затем, когда жидкость из воронки сталкивалась с жидкостью в пробирке, давление в ней резко поднималось, происходил



Фиг. 1



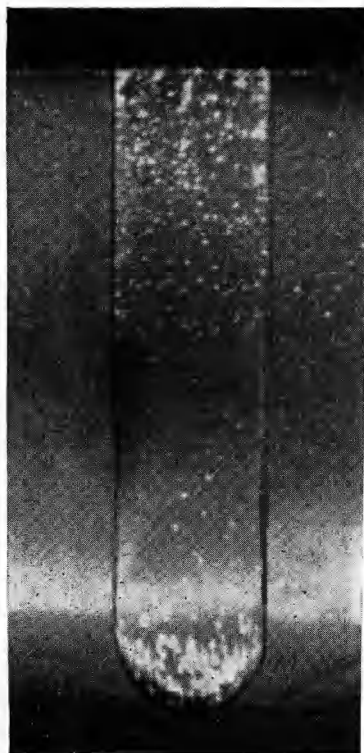
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 6.



Фиг. 5



Фиг. 7



гидравлический удар, и медленный рост кавитационных пузырьков сменялся их быстрым захлопыванием. Продолжительность процесса захлопывания составляла около 100 мксек.

Давление в жидкости  $p_a$ , измеренное при помощи миниатюрного гидрофона из титаната бария, в момент гидравлического удара около дна пробирки изменялось от опыта к опыту от нескольких ат до нескольких десятков ат. Оно было тем выше, чем глубже в пробирку погружался поршень. При глубине его погружения больше 3 см стеклянные пробирки, которые использовались в опытах, обычно разрушались гидравлическим ударом. О прочности их стенок можно судить по тому, что запаянные с небольшим количеством воды пробирки разрушались при нагревании до 280°C, т. е. при давлении водяного пара около 70 атм.

Кавитационные пузырьки не возникали, если на торцевой поверхности поршня, находившейся в жидкости, перед опытом помещались пузырьки воздуха. В этом случае быстрое расширение пузырька при рывке вызывало преждевременный отрыв поверхности поршня от жидкости, ослаблявший растягивающее усилие. Наиболее крупные каверны получались, если зазор между поршнем и стенками пробирки был около 0.05 мм (для жидкостей, вязкость которых близка к вязкости воды), а поверхность поршня смачивалась жидкостью лучше, чем поверхность пробирки. При этом был возможен даже полный отрыв жидкости от дна пробирки.

Если поршень был сделан из плексигласа или из бука, то это условие смачиваемости хорошо выполнялось для раствора бензола и гептана в ТНМ, для НГЦ, но не выполнялось, если в качестве исследуемой жидкости использовался метанол или его раствор в ТНМ. Метанол на стекле не образует угла смачивания, непрерывно расплазаясь по стеклу, и адгезия между стеклом и метанолом прочнее когезии метанола. Другими словами, легче разорвать метанол, чем оторвать его от поверхности стекла. В пробирке с метанолом кавитация не возникала вблизи дна пробирки даже в том случае, когда поршень был сделан тоже из стекла. При этом обычно в средней части столба жидкости образовывался один большой пузырь.

Захлопывание кавитационных полостей в растворе бензола в ТНМ показано на фиг. 3. Время экспозиции каждого кадра составляло около 8 мксек. Диаметр пробирки в верхней части и в этом случае был равен 15 мм. Цифры на кадрах обозначают в мксек время, отделяющее момент экспонирования кадра от момента взрыва, возникшего в результате захлопывания кавитационных пузырьков возле дна пробирки. К этому моменту поршень находился на высоте 3—4 см от верхнего края пробирки, т. е. вне жидкости. На фотографиях хорошо видны все превращения полостей, возникших в жидкости при рывке поршня. Некоторые из них то исчезают, то появляются снова, и в конце концов в пробирке образуются четыре пузырька небольшого размера, но довольно правильной сферической формы. Последний кадр этой серии непосредственно предшествует взрыву, возникшему в растворе возле дна пробирки.

Возбуждение и распространение детонации в растворе бензола в ТНМ показано на фиг. 4. Здесь время экспозиции каждого кадра не превышало 4 мксек. Момент взрыва зафиксирован на предпоследнем кадре. Место возникновения взрыва на позитиве выглядит особенно черным из-за переэкспонирования негатива вплоть до соляризации фотоземлюли от совмещения яркой вспышки взрыва со столь же ярким светом импульсной лампы ИФК-20, использовавшейся для освещения нижней части пробирки. Так как детонация распространялась с большой скоростью (около 7.5 км/сек), то при указанной экспозиции на снимке не могло получиться достаточно резкого изображения ее фронта. На последнем кадре уже виден разлет продуктов детонации. Фотографирование осуществлялось при помощи ждущей луны времени ЖЛВ-2 конструкции ИФЗ АН СССР и Красногорского механического завода [7]. Как указывалось, пробирка с жидкостью на белом фоне освещалась импульсной лампой ИФК-20, а свет, отраженный от кавитационных полостей, фиксировался на фотопленке и воспроизводил картину кавитирующей жидкости.

В опытах с растворами бензола или гептана в ТНМ кавитация возникала всегда. Пузырьки (в особенности возле дна пробирки) начинали образовываться и расти немедленно после того, как волна растяжения до-

стигала дна и отражалась от него. В случае раствора бензола в ТНМ, когда концентрация соответствовала стехиометрии, взрывы (преимущественно возникавшие у самого дна) происходили наиболее часто, но в среднем не чаще, чем в одном опыте из каждых трех. Отклонение концентрации от стехиометрической приводило к сокращению числа опытов, заканчивавшихся взрывом. Область объемных отношений ТНМ к бензолу  $\beta$ , в которой кавитация еще могла вызвать взрыв, не широка (от  $\beta = 3 : 1$  до  $\beta = 4.5 : 1$ ). Стехиометрическая концентрация соответствует отношению  $\beta = 3.4 : 1$ . Следовательно, область концентраций бедных растворов, чувствительных к кавитации, несколько шире соответствующей области богатых.

В весьма редких случаях, когда особенно крупные пузыри образовывались далеко от дна пробирки, взрыв возникал при их захлопывании, распространяясь по пробирке вверх и вниз, так что пузыри, находившиеся в нижней части, не успевали захлопнуться раньше, чем до них доходила детонационная волна.

На снимках удается различить лишь те объекты, действительные размеры которых превышали 0,1 мм. Поэтому оценка степени сжатия пузырьков по их изображениям оказалась невозможной.

Обычно в опытах использовались поршни, сделанные из плексигласа или бука, трение которых о стекло не могло привести к возникновению достаточно высоких температур [8]. Во всех опытах очаг взрыва возникал ниже уровня начального положения торцевой поверхности поршня в пробирке. Это тоже указывает, что трение не могло быть причиной взрыва. Кавитационное возбуждение взрыва вблизи дна пробирки происходило даже в тех случаях, когда длина пробирки достигала 25 см, а глубина погружения поршня составляла всего лишь 1 см.

Раствор гептана в ТНМ оказался значительно менее чувствительным к кавитации, чем раствор бензола. Из 50 опытов, совершенно аналогичных опытам с растворами бензола, лишь два закончились взрывом, причем в одном из них детонация в стехиометрическом растворе гептана в ТНМ возникла лишь после стадии перехода горения в детонацию, длившейся около 10 мксек. В многочисленных опытах с растворами бензола в ТНМ это явление никогда не наблюдалось.

Растворы метанола в ТНМ не взрывались даже при захлопывании весьма крупных кавитационных полостей, диаметр которых приближался к диаметру пробирки. Столь же безуспешными оказались попытки возбудить при помощи кавитации взрывы в растворе метана в жидком кислороде, охлажденном до температуры кипения жидкого азота, а также при намораживании ацетилен в пробирке с жидким кислородом при той же температуре.

Измеренные упругости паров над стехиометрическими растворами гептана, бензола и метанола в ТНМ составляли приблизительно 15, 30 и 60 мм рт. ст., соответственно. Упругость паров над НГЦ  $2.5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст., а над раствором метана в жидком кислороде — около 70 мм рт. ст.

В НГЦ кавитационные пузырьки возникали в большом количестве, но их размеры были несколько меньшими, чем, например, в растворе бензола в ТНМ.

Ни в одном из опытов, в которых использовался поршень (из плексигласа) с плоским торцевым срезом, НГЦ не взорвался. Но стоило придать коническую форму погружаемому в пробирку концу того же самого поршня, как при его выдергивании (почти всегда уже при первой или второй попытке), возникал взрыв НГЦ.

Угол при вершине конуса обычно не превосходил  $60^\circ$ , и такой поршень имел вид заточенного карандаша. Очаг взрыва создавался всегда в верхней части пробирки, в той области, где перед рывком находилась коническая часть поршня.

Когда вместо НГЦ в пробирку наливались растворы бензола или гептана или метанола в ТНМ, попытки вызвать взрыв в верхней части пробирки при помощи поршня, имеющего конический конец, оказались безуспешными.

**3. Состояние пара (газа) в захлопывающемся кавитационном пузырьке.** Поведение ничем не заполненной сферической полости, находящейся

в идеальной несжимаемой жидкости, под действием постоянного давления на бесконечном удалении от полости исследовалось еще Релеем [9].

Время захлопывания такой полости равно:

$$\tau = 0.915 R_0 (\rho/p_a)^{1/2} \quad (3.1)$$

Здесь  $R_0$  — начальный радиус полости;  $p_a$  — давление в жидкости, под действием которого полость захлопывается;  $\rho$  — плотность жидкости, окружающей полость.

Пузырьки, возникающие в реальных жидкостях, обладающих вязкостью, теплопроводностью, сжимаемостью и поверхностным натяжением, обычно наполнены некоторым количеством пара или газа. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (см., например, [10, 11]) показали, что наибольшее тормозящее влияние на процесс захлопывания такой полости оказывает содержащийся в ней пар (иногда с небольшой примесью газа, растворенного в жидкости), а роль вязкости (если она не более, чем в 100 раз превосходит вязкость воды), сжимаемости и поверхностного натяжения жидкости не особенно велика и проявляется лишь в заключительной стадии захлопывания, когда размеры пузырька становятся столь малыми, а скорость движения его стенок столь большой, что экспериментальная проверка теоретических данных становится почти невозможной.

Кавитационные пузырьки, возникающие в жидкости вблизи стенок сосуда (или непосредственно на стенках), должны захлопываться медленнее тех, которые образовались на значительном удалении от стенок. Процесс захлопывания замедляется также под влиянием соседних пузырьков.

Теоретические исследования влияния теплопроводности газа на его температуру в захлопывающемся пузырьке показывают, что пузырек, имеющий достаточно большие размеры и низкое давление содержащихся в нем газов (паров), под действием достаточно большого давления захлопывается адиабатически. Например, если начальный радиус пузырька  $R_0$  больше 1 мм, и начальное давление газа в нем составляет 50 мм рт. ст., а захлопывание происходит под действием давления  $p_a = 3$  ат, то влияние теплопроводности становится несущественным [12].

Гют [13] решил задачу о захлопывании одиночного газосодержащего сферического пузырька в безграничной идеальной несжимаемой жидкости, находящейся под постоянным давлением  $p_a$ . Это решение приводит к следующим экстремальным значениям давления  $p^*$ , температуры газа  $T^*$ , размеров пузырька  $R^*$  в момент захлопывания:

$$p^* = p_0 \left[ 1 + (k-1) \frac{p_a}{p_0} \right]^{k-1}, \quad T^* = T_0 \left[ 1 + (k-1) \frac{p_a}{p_0} \right]^{1/3}, \\ R^* = R_0 \left[ 1 + (k-1) \frac{p_a}{p_0} \right]^{1/3(1-k)} \quad (3.2)$$

Здесь  $k$  — отношение теплоемкостей газа, индекс 0 относится к начальным значениям величин.

Влияние отношения  $p_a/p_0$  на разогрев газа в пузырьке, таким образом, оказывается решающим. Например, при  $R_0 = 1$  мм,  $p_a/p_0 = 10^2$ ,  $k = 1,3$ ,  $p_a = 4$  ат минимальный радиус  $R^*$  пузырька при захлопывании составит около 24 мк, температура паров  $T^*$  достигнет 9000 °К, а давление  $p^* = 100\,000$  ат.

В реальных условиях размеры пузырька в последней стадии захлопывания будут несколько крупнее, а температура и давление — ниже вычисленных, поскольку часть энергии при захлопывании уйдет на сжатие жидкости и преодоление сил вязкости. Тем не менее, параметры пара (газа) в захлопнувшемся пузырьке должны быть очень высокими, поскольку в большинстве жидкостей упругость насыщенных паров при комнатной температуре в десятки и сотни раз ниже атмосферного давления, и отношение  $p_a/p_0$ , таким образом, достаточно велико, чтобы могла возникнуть высокая температура.



Это и подтверждается, например, работой Джермена и Тейлора [14], в которой исследовался спектр оптического излучения воды, кавитирующей при протекании через трубку Вентури. По характеру спектра температуры паров в этом случае можно оценить в 5000—6000 °К.

Самовоспламенение гремучего газа в резиновом пузырьке, захлопывающемся в воде под действием волны сжатия, отмечалось в работе [15].

**4. Чувствительность жидких ВВ по отношению к кавитационному возбуждению взрыва.** Время пребывания кавитационного пузырька в сжатом состоянии  $\tau^*$  составляет незначительную долю полного времени его захлопывания  $\tau$ . С точностью до некоторого безразмерного постоянного множителя  $A$  (порядка единицы) эта доля, согласно [13], определяется выражением

$$\frac{\tau^*}{\tau} = A \frac{p_a}{p_0} \left( \frac{R^*}{R_0} \right)^{3k+1} \approx \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{\frac{4}{3(k-1)}} \quad (4.1)$$

Из формул (3.2) и (4.1) видно, что хотя рост  $p_a/p_0$  при некотором заданном значении  $R_0$  и приводит к повышению  $T^*$ , он одновременно вызывает еще более сильное уменьшение  $\tau^*$ . Величина  $R^*$  при этом также уменьшается. Разумеется, в реальных условиях  $T^*$  не может подняться выше некоторого предельного значения вследствие повышения теплоемкости, теплоотвода и высвечивания энергии, сопутствующих повышению температуры в пузырьке и препятствующих этому повышению.

Что же касается очень сильного сокращения (с ростом  $p_a/p_0$ ) длительности  $\tau^*$  той стадии захлопывания, на которую приходится наиболее высокое значение температуры  $T^*$  в пузырьке, то это обстоятельство весьма важно для понимания некоторых особенностей кавитационного инициирования взрыва. Возможно, что пузырьки, для которых  $p_a/p_0$  не слишком велики, но обеспечивают достаточно высокие значения  $T^*$  и  $\tau^*$ , могут оказаться наиболее взрывоопасными. Большие значения  $\tau^*$  благоприятны для возникновения самоподдерживающейся химической реакции внутри самого пузырька и для зажигания жидкого ВВ на поверхности пузырька раскаленными газами.

Очевидно, что при кавитационном возбуждении взрыва жидкого ВВ время задержки его зажигания  $t_i$  раскаленными газами, содержащимися в пузырьке, не должно превосходить  $\tau^*$ , т. е.

$$t_i \leq \tau^* \quad (4.2)$$

Вообще моменту зажигания жидкого ВВ может предшествовать самовоспламенение паров внутри кавитационного пузырька (как например, в НГЦ), но в некоторых случаях (например, в растворе бензола в ТНМ) самовоспламенение невозможно. Данные таблицы показывают, что смеси паров бензола с парами ТНМ над соответствующими растворами находятся вне пределов самовоспламенения (коэффициент избытка окислителя  $\alpha < 0.15$ ). Таблица составлена в предположении, что растворы подчиняются закону Рауля.

Напрашивается вывод, что зажигание жидкого ВВ на поверхности пузырька раскаленными газами представляет собою процесс, определяющий кавитационное инициирование взрыва, а самовоспламенение паров внутри этого пузырька имеет лишь второстепенное значение.

$\beta$	$\alpha$		$p$ , мм Hg	
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$C_6H_6$	$C(NO_2)_4$
3.4 : 1	1	0.11	21.5	6
3 : 1	0.9	0.096	23	5.5
4.5 : 1	1.35	0.146	17	6.5

( $\alpha_1$  — в растворе,  $\alpha_2$  — в смеси паров внутри каверны,  $p$  — парциальное давление компоненты пара в каверне)

К сожалению, теоретический анализ зажигания жидкого ВВ накаленной сферической поверхностью большой кривизны не производился, и оценка критических условий зажигания пока невозможна.

Вероятно, условие (4.2) кавитационного инициирования взрыва может быть выполнено, если начальный радиус пузырька будет больше некоторого критического значения

$$R_0 \geq R_* \quad (4.3)$$

Исходя из этого, можно предположить, что причина более благоприятных условий кавитационного возбуждения взрыва в НГЦ при использовании поршня с коническим концом, по-видимому, заключается в том, что в этом случае захлопывалась довольно крупная полость, освободившаяся после удаления поршня, и условие (4.3) оказывалось выполненным.

Жидкость, скользя по конической поверхности поршня (при его выбрасывании из воронки), успевала за ним смыкаться, так что атмосферный воздух не мог попасть в освободившуюся полость и уменьшить в ней отношение  $p_a / p_0$ . Плоский срез поршня приводил к тому, что жидкость не успевала сомкнуться за ним, и воздух, ворвавшийся в полость, резко снижал  $p_a / p_0$  и, следовательно,  $T^*$ . Размеры кавитационных пузырьков, возникавших в средней и нижней частях пробирки, вероятно, были меньше критического.

Возможно, что «эффект конического поршня» обусловлен повышенной вязкостью НГЦ (36 снз), поэтому в опытах с другими взрывчатыми жидкостями он не проявлялся.

При ударе медной пластинки по дну пробирки с раствором бензола в ТНМ возникали кавитационные полости, размеры которых, по-видимому, оказались меньшими критических ( $R_0 < R_*$ ), поэтому при их захлопывании взрыва никогда не было. Но при выдергивании поршня из пробирки образовывались пузырьки достаточно больших размеров ( $R_0 > R_*$ ), и взрывы происходили.

Несмотря на то, что в каждом из этих опытов возникали довольно крупные пузырьки, взрыв возбуждался не всегда. Возможно, что этот факт связан как с неустойчивостью процесса захлопывания (дробление пузырьков на более мелкие), так и с неодинаковыми значениями  $p_a$ , изменявшимися от опыта к опыту из-за различной силы гидравлического удара.

Причины того, что в условиях наших опытов раствор гептана в ТНМ оказался менее чувствительным, а растворы метанола в ТНМ, метана в жидком кислороде и гетерогенная система твердый ацетилен — жидкий кислород вовсе не чувствительными к кавитационному возбуждению взрыва, пока не выяснены.

Тем не менее, проведенные исследования позволяют предположить, что кавитация в жидких ВВ безусловно является более вероятной причиной возникновения взрывов при сравнительно слабых ударах, толчках и сотрясениях, чем захлопывание пузырьков постороннего газа, обычно всегда содержащихся в жидкостях.

По-видимому, любое жидкое ВВ способно взорваться при захлопывании кавитационной полости, размеры которой не будут меньше критических. Но для малочувствительных жидких ВВ критические размеры пузырьков должны быть очень большими, а вероятность образования очень крупной кавитационной полости очень мала, и она тем меньше, чем слабее удары и сотрясения, которым подвергается жидкость.

С увеличением количества жидкого ВВ в емкости должна возрастать и вероятность кавитационного инициирования взрыва, поскольку при этом основные частоты собственных колебаний жидкости будут уменьшаться, и станут возможными более длительные растягивающие усилия, способствующие появлению более крупных каверн.

**5. Распространение взрыва в кавитирующем НГЦ.** Представляло интерес выяснить, влияют ли на скорость распространения взрыва в жидком нитроглицерине (НГЦ) кавитационные пузырьки не слишком больших размеров.

На моментальных фотографиях (фиг. 5 и 6) видны кавитационные пузырьки, возникшие в НГЦ впереди фронта взрыва, распространяющегося с так называемой малой скоростью (1000 м/сек). В одном из опытов (см. фиг. 5) стеклянная пробирка (длина 130 мм, наружный диаметр 15 мм, толщина стенок 1.5 мм) была до краев наполнена

НГЦ, взрыв которого инициировался импульсным электрическим разрядом (энергия около 70 Дж выделялась в течение 10 мксек) через проволочку, погруженную в НГЦ на глубину 10 мм. На фотографии, снятой через 40 мксек после завершения электрического разряда, фронт взрыва не виден, он находится выше — вне поля зрения объектива.

В НГЦ скорость звука, по-видимому, не превышает 2 км/сек, и за 40 мксек звуковые колебания, распространяющиеся в нем, не могли достичь дна пробирки. Следовательно, кавитационные пузырьки, хорошо различимые на снимке у самого дна пробирки, возникли из-за возмущений ее стенок, возбужденных электрическим разрядом. Появлению каверн не могла помешать даже вода, окружавшая пробирку с НГЦ (при опыте пробирка с НГЦ на 80 мм погружалась в прозрачный стакан с водой. Диаметр стакана составлял 80 мм).

Такое же происхождение имеют пузырьки, показанные на первых двух кадрах высокоскоростной теневой киносъемки (фиг. 6). Здесь НГЦ наливался в пробирку прямоугольного сечения ( $10 \times 15$  мм<sup>2</sup>), имевшую плоскопараллельные стенки из плексигласа толщиной 2 мм. Каждый кадр экспонировался в течение 2.6 мксек, длительность интервала между кадрами составляет 20 мксек. Взрыв возбуждался таким же электрическим разрядом, как и в предыдущем опыте (см. фиг. 5) и распространялся сверху вниз с той же скоростью около 1000 м/сек. Пробирка просвечивалась импульсным прожектором, белое изображение которого перекрывается на снимках косо расположенной темной полосой непрозрачных продуктов реакции НГЦ и силуэтами кавитационных пузырьков, возникших в пространстве между двумя широкими вертикальными полосами — толстыми боковыми стенками пробирки, также сделанными из прозрачного плексигласа.

На первом кадре очаг взрыва расположен в верхней левой части пробирки, где видны осколки ее разрушающихся стенок. Темная косая тень с неровными краями, примыкающая снизу к изображению обломков и обращенная своей выпуклостью вправо и вниз, соответствует зоне воспламенения. Кавитационные пузырьки перед фронтом реакции имеют размеры около 1 мм. На втором кадре хорошо видно, что фронт воспламенения явно не плоский, и его нижний край сдвинулся книзу примерно на 2 см. Фронт стал уже вогнутым, причем его правый участок несколько отстает от левого. На третьем кадре правый участок фронта отстал от левого еще сильнее, несмотря на то, что на его пути было значительно больше пузырьков, чем перед левым, далеко выдвинувшимся вперед, и фронт стал снова выпуклым.

Из этого следует, что большее количество кавитационных пузырьков перед фронтом воспламенения не увеличивает интенсивность процесса горения и не оказывает влияния на скорость распространения взрыва. В противном случае отстающая часть фронта воспламенения вырвалась бы вперед, пройдя по участку в НГЦ, содержащему большее количество кавитационных пузырьков.

Интересны опыты, в которых в НГЦ заранее, перед инициированием взрыва, создавались кавитационные пузырьки (посредством выдергивания поршня из пробирки, наполненной НГЦ). При этом кавитационные полости, сравнительно равномерно распределявшиеся ниже первоначального положения поршня по всему объему НГЦ в пробирке, обычно имели максимальные размеры не более 3 мм (фиг. 7). Взрыв в таком кавитирующем НГЦ возбуждался в верхней части пробирки либо слабым электрическим разрядом, возникавшим ниже первоначального положения поршня, либо при захлопывании большой полости, образующейся в пробирке на месте выброшенного из нее поршня с коническим концом. В обоих случаях к заранее созданным в НГЦ кавитационным пузырькам добавлялись пузырьки, возникавшие при инициировании взрыва из-за колебаний стенок пробирки, подобно тому как это происходило в опытах, к которым относится фиг. 5.

Измерения убеждают, что и при такой искусственно созданной кавитации распространение взрыва в НГЦ происходило все с той же малой скоростью, равной приблизительно 1000 м/сек.

Специально поставленные опыты показали, что на фоторазвертках движения фронта детонации и в растворе бензола в тетранитрометане не обнаруживается ни малейшего изменения наклона изображения следа фронта, когда происходит его переход из жидкости, не содержащей кавитационных полостей, в область, где мелкие пузырьки присутствуют в большом количестве.

Таким образом, опыты подтверждают выводы [16] о возникновении кавитации в НГЦ при малой скорости распространения взрыва вследствие возмущений, распространяющихся по стенкам сосуда (по оболочке). Вместе с тем, результаты опытов, описанные выше, свидетельствуют о том, что процесс захлопывания кавитационных полостей, возникающих в НГЦ перед фронтом взрыва, распространяющегося со скоростью около 1000 м/сек, не оказывает положительного влияния на возбуждение реакции во фронте.

В других условиях захлопывание кавитационных полостей, вероятно, может способствовать распространению взрыва. Например, в [17] было установлено, что твер-

дые частицы из вольфрама или пластмассы, погруженные в нитрометан, под действием ударной волны в 86 *кбар* инициируют взрыв так же хорошо, как и пузырьки газа. В этом случае ударная волна сама сильно нагревала нитрометан, и для возникновения взрыва было достаточно небольшого дополнительного нагревания жидкости, которое происходило как вследствие отражения ударной волны от твердых частиц, так и при захлопывании пузырьков.

В последнем случае дополнительное повышение температуры жидкого нитрометана около пузырька обусловлено уже не только нагреванием газа в пузырьке, но и ударным сжатием жидкости в ударной волне, всегда возникающей при быстром захлопывании пузырька.

Интересно, что и в этих опытах пузырьки, имевшие недостаточно большой начальный диаметр (0,5 *мм* и меньше), не могли инициировать взрыв нитрометана.

Поступила 29 X 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кук М. А. Взрывоопасность двухкомпонентных ракетных топлив. Сб. Новые направления криогенной техники. Изд. «Мир», 1966.
2. Н. М. Inspectors of Explosives Annual Report. Chem. Trade J. and Chem. Engr. 1964, vol. 154, No. 3998.
3. Б о у д е н, И о ф ф е. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. Изд. иностр. лит., 1955.
4. Д и м з а Г. В. Влияние давления на возбуждение детонации в жидких взрывчатых веществах, ПМТФ, 1962, № 6.
5. J o h a n s s o n C. H. and oth. The initiation of liquid explosives by shock and the importance of liquid break up. Proc. Roy. Soc., A, 1958, vol. 246, No. 1245.
6. S e t t e D., W a n d e r l i n g F. Nucleation by cosmic rays in ultrasonic cavitation. Phys. Rev., 1962, vol. 125, No. 2.
7. Д у б о в и к А. С. Фотографическая регистрация быстротекающих процессов. Изд-во «Наука», 1964.
8. B o w d e n F. P., T a b o r D. The Friction and Lubrication of Solids. Oxford, 1950.
9. Lord R a y l e i g h. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Philos Mag., 1917, vol. 34, No. 200.
10. I v a n y R. D., H a m m i t F. W. Cavitation Bubble Collapse in Viscous Compressible Liquids — Numerical Analysis. Amer. Soc. Mech. Engrs, D, 1965, vol. 87, No. 4.
11. G a l l a n t H. Untersuchung über Kavitationsblasen. Öster. Ing. Z. 1962, B. 5 No. 3.
12. H i c k l i n g R. Effects of thermal conduction in sonoluminescence. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, vol. 35, No. 7.
13. G ü t h W. Zur Entstehung der Stosswellen bei der Kavitation. Acustica, 1956, B. 6, No. 6.
14. J a r m a n P. D., T a y l o r K. J. Light flashes and shocks from a cavitating flow. Brit. J. Appl. Phys., 1965, vol. 16, No. 15.
15. С о л о у х и н Р. И. О пузырьковом механизме ударного воспламенения в жидкости, Докл. АН СССР, 1961, т. 136, № 2.
16. В о с к о б о й н и к о в И. М., Д у б о в и к А. В., Б о б о л е в В. К. Детонация нитроглицерина с малыми скоростями, Докл. АН СССР, 1965, т. 161, № 5.
17. С a m p b e l l A. W., D a v i s W. C., T r a v i s J. R., R a m s a y J. B. Shock Initiation of Detonation in Liquid Explosives. Phys. Fluids, 1961, vol. 4, No. 4.