

11. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. Изд. АН СССР, 1963.
12. Е. С. Щетинков. Сб. «Теория и практика сжигания газа». т. IV. Л., «Недра», 1968, стр. 95.
13. Т. А. Бовина. Сб. «Горение при пониженных давлениях». Изд. АН СССР, 1960, № 58.
14. Э. И. Солохин. Сб. «Стабилизация пламени и развитие процесса горения в турбулентном потоке». М., Оборонгиз, 1961.
15. Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд и др. Газовая промышленность, 1970, 2, 27.
16. В. И. Фурлетов. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, 5, 166.
17. Е. В. Власов, А. С. Гиневский. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, 4, 133.

УДК 215.5+662.23

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЗАРЯДАХ НИТРОГЛИЦЕРИНА НА ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К УДАРУ

*А. В. Дубовик, В. К. Боболев, Н. С. Малега
(Москва)*

Поведение газонаполненной цилиндрической полости в слое нитроглицерина (НГЦ) при ударе явилось предметом исследования недавних работ авторов [1, 2] в целях детального изучения механизма возбуждения взрыва, поскольку хорошо известна [3] сенсibiliзирующая роль газовых включений при ударном инициировании жидких взрывчатых веществ (ЖВВ). Указанные исследования расширили имеющиеся представления о влиянии газовых полостей на чувствительность ЖВВ к удару, а их результаты легли в основу сформулированного механизма возбуждения взрыва, отдельные положения которого, как указывалось в [1, 2], в свое время рассматривались в работах [4, 5]. В свете предположенного механизма основную роль в инициировании взрыва при ударе играют эффекты, сопровождающие взаимодействие кумулятивной струи жидкости со стенкой схлопывающейся полости, которое происходит в атмосфере сжатого и разогретого газа. Было показано, что если параметры схлопывания и состояние газа в полости удовлетворяют ряду необходимых условий, то в рассмотренной постановке эксперимента достаточная для возбуждения взрыва скорость соударения струй с полостью составляет для НГЦ величину более 100 м/сек¹.

При некоторых видах практических испытаний чувствительности ЖВВ газовые включения, которые заранее вводятся в жидкость или возникают в ней в процессе механического воздействия, имеют сложную асимметричную форму. В связи со сказанным известный интерес представляет исследование схлопывания газонаполненных полостей наиболее простой в этом отношении эллиптической формы. Поскольку при схлопывании эллиптической полости вследствие наличия у нее участков границы с различной степенью кривизны условия для возникновения

¹ С учетом встречного движения границы полости абсолютная скорость соударения 150 м/сек, так что добавления, возникающие в жидкости при ударе струи, по оценкам достигают ~3 кбар.

струй более благоприятны по сравнению с цилиндрическим случаем, то результаты исследований можно использовать для проверки основных положений рассмотренного механизма возбуждения взрыва.

Кумулятивные эффекты, связанные с несимметричным схлопыванием пузырьков, удобно также наблюдать на примере полостей, располагаемых в слое жидкости вне центра ударника. В этом случае при ударе схлопывание полости происходит в радиально растекающемся потоке жидкости, наличие которого, очевидно, способствует процессу формирования струи. Результаты этих опытов также могут ответить на вопрос о характере распределения вероятности возбуждения взрыва в слое жидкости по радиусу ударника.

Экспериментальная техника, использовавшаяся в данной работе, подробно описана в [6]. Она включает вертикальный копер с грузом весом 5 кг, свободно падающим с высоты 5–80 см, стеклянную наковальню размером 35×35×25 мм и плексигласовый ролик (ударник) диаметром 20–40 мм. Между ударником и наковальней помещается слой исследуемой жидкости (в данном случае — НГЦ) толщиной 0,2–1,0 мм с полостью.

Динамика схлопывания газонаполненной полости эллиптической формы в слое жидкости при ударе

Характер схлопывания эллиптической полости, наполненной воздухом при атмосферном давлении и имевшей размеры осей $2a_0 \approx 10$ мм и $2b_0 \approx 5,3$ мм, в слое НГЦ диаметром $2R = 19$ мм и толщиной $h_0 = 0,5$ мм при воздействии падающего груза со скоростью $\omega_0 = 2,5$ м/сек (характерное время удара $\tau = h_0/\omega_0 = 200$ мксек) наглядно поясняется графиком, приведенным на рис. 1. По оси абсцисс отложено безразмерное время t/τ , отсчитываемое с момента начала схлопывания полости, а по оси ординат — соответствующие положения границы полости большой (верхняя кривая) и малой осей эллипса (безразмерные a/R и b/R). Хорошо заметно стремление полости к фокусировке (пунктирные кривые), которая не осуществляется, так как возникают кумулятивные струи жидкости, движущиеся навстречу одна другой вдоль направления большой оси эллипса.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики параметров схлопывания эллиптических и цилиндрических полостей приблизительно равного объема, которые создавались в слое НГЦ толщиной 0,5 мм и радиусом 9,5 мм. В табл. 1 в сериях опытов¹ 24–29 представлены результаты для эллиптических полостей с размерами осей $\sim 5 \times 10$ мм и цилиндрических диаметром ~ 7 мм; полости заполнялись воздухом ($\gamma = 1,4$), фреоном-12 ($\gamma = 1,1$), аргоном ($\gamma = 1,65$) при нормальном давлении. В сериях опытов 30–32 указаны параметры схлопывания эллиптических полостей размером 4×7 мм и цилиндрических диаметром 5 мм. Анализируя изменение основных параметров схлопывания эллиптических положений, можно

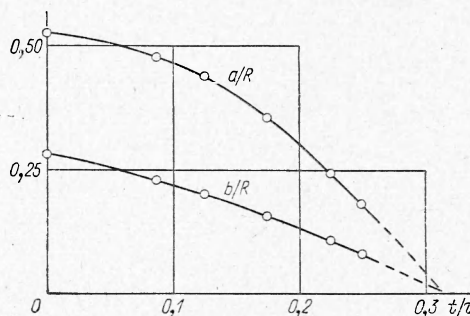


Рис. 1.

¹ Нумерация серий опытов в табл. 1 продолжает нумерацию опытов из работ [1, 2].

убедиться, что его характер аналогичен тому, который был установлен ранее для цилиндрических полостей [1]. Так, например, время схлопывания полостей t_+ возрастает с увеличением характерного времени удара τ и относительных размеров полости.

Обратная зависимость, как и в случае цилиндрических полостей, выполняется для скоростей движения границы полости и струй жидкости. Для демонстрации установленной закономерности на рис. 2 в логарифмическом масштабе приведена зависимость t_+ от параметра зарядов $\tau \sqrt{\beta}$, где $\sqrt{\beta} = r_0/R$ для цилиндрических и $\sqrt{a_0 b_0}/R$ для эллиптических полостей. Пунктирная кривая на данном рисунке указывает ход зависимости t_+ ($\tau \sqrt{\beta}$), установленной для большого числа опытов с цилиндрическими полостями [1]. Как видно, результаты настоящих экспериментов довольно близко группируются вблизи указанной кривой. По аналогии с цилиндрическим случаем также найдено влияние размера ударника R на величину t_+ . Учет этого эффекта необходим при анализе чувствительности (знаком Δ на рис. 2 отмечен результат эксперимента с эллиптической полостью $\sim 5 \times 10$ мм в слое НГЦ $h_c = 0,5$ мм и $2R = 19$ мм при $\omega_0 = 2$ м/сек).

Таблица 1

| Номер серии опытов | Газ | ω_0 , м/сек | a_0/R | b_0/R | $\sqrt{a_0 b_0}/R$ или r_0/R | t_+ , мксек | u_0/u_b , м/сек | u , м/сек | v , м/сек | f , % |
|--------------------|--------|--------------------|---------|---------|--------------------------------|---------------|-------------------|-------------|-------------|---------|
| 24 | Воздух | 2 | — | — | 0,37 | 75 | — | 60 | 130 | 50 |
| 25 | | 2 | 0,46 | 0,28 | 0,36 | 85 | 65/35 | — | 90 | 30 |
| 26 | | 2,5 | — | — | 0,38 | 60 | — | 80 | 160 | 85 |
| 27 | | 2,5 | 0,52 | 0,28 | 0,38 | 65 | 110/50 | — | 150 | 100 |
| 28 | Фреон | 2,5 | 0,48 | 0,27 | 0,36 | 60 | 110/60 | — | 150 | 0 |
| 29 | Аргон | 2,5 | 0,51 | 0,29 | 0,38 | 60 | 105/60 | — | 130 | 100 |
| 30 | Воздух | 2 | 0,37 | 0,23 | 0,29 | 60 | 85/40 | — | 140 | 90 |
| (12) | | 2 | — | — | 0,27 | 50 | — | 85 | 150 | 0 |
| 31 | | 3 | 0,37 | 0,24 | 0,30 | 50 | 110/60 | — | 170 | 100 |
| 32 | | 3 | — | — | 0,30 | 40 | — | 110 | 250 | 0 |

Природа газа, заполняющего полость, практически не влияет на параметры схлопывания, по крайней мере до момента взаимодействия струй, но в то же время, как показали фотографические наблюдения,

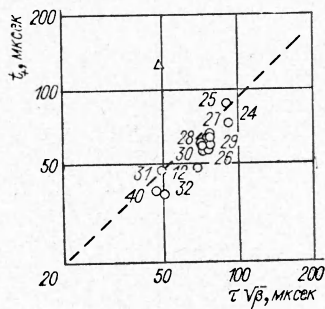


Рис. 2.

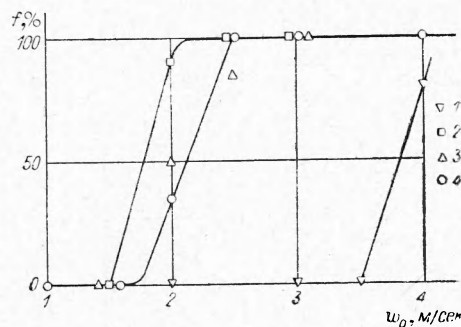


Рис. 3.

накладывает отпечаток на характер последующего расширения (рикошета) полости. При заполнении полости фреоном скорость рикошета заметно меньше скорости движения границы полости при схлопывании. В случае заполнения полости воздухом или аргоном скорость рикошета примерно одного порядка величины со скоростью схлопывания [7]. Очевидно, указанное расхождение в поведении полостей является следствием заметного различия в степени разогревов газов и, следовательно, величинах давлений, вызывающих рикошет.

Следующим результатом, установленным в настоящих экспериментах, является сравнительно слабая зависимость t_+ от геометрии полости при прочих фиксированных условиях эксперимента. Было обнаружено, что t_+ для эллиптических полостей не более чем на 10—15% превышает время схлопывания цилиндрических полостей того же объема.

Влияние формы полости на чувствительность НГЦ к удару

Для сравнительной характеристики влияния формы воздушной полости на чувствительность НГЦ к удару были проведены 2 группы опытов с полостями круглой и равными им по объему полостями эллиптической формы. Полости располагались в центре слоя жидкости толщиной $h_0 = 0,5$ мм и диаметром $2R = 19$ мм. В первой группе опытов параметр полостей $1/\sqrt{\beta}$ составлял $\sim 0,37$, а во второй $\sim 0,29$. Испытания проводились с грузом 5 кг, наносившим удар по жидкости со скоростью $\omega_0 = 4$ м/сек. Зависимость частоты взрывов НГЦ от скорости удара груза приведена на рис. 3, откуда видно, что влияние формы полости отчетливо проявилось в экспериментах 2-й группы, т. е. с полостями относительно малого размера: круглых диаметром ~ 5 мм и эллиптических $\sim 7 \times 4$ мм. Для инициирования взрыва НГЦ с использованием полостей круглой формы (рис. 3, 1) требовалась в среднем вчетверо большая энергия удара, чем с эллиптическими полостями (рис. 3, 2).

В опытах с полостями большого размера наблюдалось заметное снижение эффекта формы полости на чувствительность НГЦ к удару (рис. 3, 3 — полости круглой формы диаметром ~ 7 мм, 4 — эллиптические с размерами осей $\sim 5 \times 10$ мм). Для объяснения этого результата необходимо принять во внимание, что жидкая струя в процессе движения не обладает устойчивостью [1, 2, 6], вследствие чего наблюдается ее искривление и нередко нарушение монолитности до момента взаимодействия с другой струей или со стенкой полости. Указанные эффекты возрастают с увеличением времени свободного движения струи, которое, очевидно, зависит как от параметра удара груза, так и от размеров слоя жидкости и полости. Поэтому несмотря на то, что столкновение струй в опытах первой группы с эллиптическими полостями происходило на несколько более ранней стадии схлопывания, чем для цилиндрических полостей, влияние этого взаимодействия на процесс возбуждения взрыва НГЦ оказывалось приблизительно одинаковым в обоих случаях.

Для выяснения влияния относительных размеров эллиптических полостей на чувствительность НГЦ к удару были проведены эксперименты с ударниками радиусом 14 и 19 мм. В этих опытах воздушные полости размером 5×10 мм располагались в центре слоя НГЦ толщиной 0,5 мм. Скорость удара груза составляла 2 м/сек ($\tau = 250$ мсек). Полученная кривая частоты взрывов в зависимости от параметра заряда $1/\sqrt{\beta} = R/\sqrt{a_0 b_0}$ представлена на рис. 4.

Как и в аналогичных опытах с цилиндрическими полостями [1, 2], при увеличении размера ударника наблюдается возрастание и затем

снижение числа взрывов НГЦ при схлопывании полостей (Δ —100%-ная частота при $R=19$ мм приведена с учетом взрывов, возникших в результате повторного схлопывания полостей). Выше было отмечено (см. рис. 2) влияние R на величину времени схлопывания полостей. Поскольку возрастание t_+ в данных опытах означает снижение величин кинематических параметров схлопывания (например, скорость струй в опытах с $R=19$ мм составляла ~ 70 м/сек, т. е. была заметно ниже, чем в аналогичных опытах с $R=9,5$ мм), то становится понятным рассмотренный ход кривой частоты взрывов НГЦ.

Влияние места расположения полости под ударником на чувствительность НГЦ

В случае несимметричного расположения полости под ударником ее схлопывание в результате удара по жидкости происходит при более низком давлении, чем то, которое существует в жидкости на оси ударника. Кроме того, распределение давления оказывается неодинаковым по разным сторонам от полости. Поэтому полость, схлопывающаяся вне центра ударника, будет заполняться жидкостью дольше, чем расположенная в центре.

Существенно заметить, что наличие радиального потока неизбежно приведет к дальнейшему перемещению схлопывающейся полости к периферии ударника в область жидкости, давление в которой заметно ниже, чем вблизи центра ударника.

Эксперименты проводились с цилиндрическими полостями диаметром ~ 5 мм, которые располагались в слое НГЦ $R=9,5$ мм и $h_0=0,5$ мм последовательно на расстояниях $l=0; 2,5$ и $4,5$ мм от центра ударника.

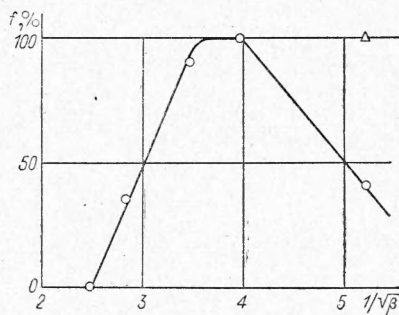


Рис. 4.

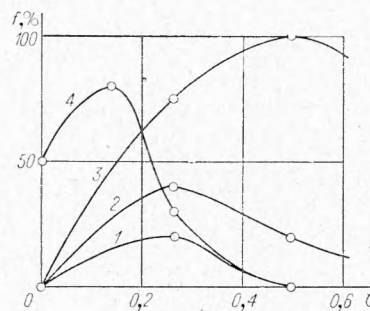


Рис. 5.

Удар наносился грузом весом 5 кг по жидкости со скоростью 2; 2,5 и 3 м/сек. В табл. 2 приведены измеренные значения параметров схлопывания полостей, где $\zeta = l/R$ — относительное удаление полости от центра ударника и $k = (\beta/\xi_*) (h_0/h_*)$ — степень сжатия полости в момент возникновения струи жидкости.

Результаты опытов подтверждают сделанный вывод относительно возрастания времени схлопывания полостей и убывания скоростей движения границ полостей по мере увеличения параметра заряда ζ . Промежуток времени, отсчитываемого с начала схлопывания до момента возникновения струи, оказывается тем меньше, чем выше скорость удара и чем дальше расположена полость от оси ударника. В таком же направлении изменяется величина k , которой в данном случае можно характеризовать меру устойчивости границы схлопывающейся полости. По данным серий опытов 12, 33 и 34 также видно, что скорость струй при

увеличении ζ возрастает и затем уменьшается. Этот результат также непосредственно следует из приведенных выше рассуждений о схлопывании полостей вне центра ударника.

Воспользуемся найденными закономерностями для анализа чувствительности ЖВВ к удару.

Из сказанного следует, что при данных параметрах удара и размерах слоя жидкости и полости существует некоторое оптимальное удаление полости от центра ударника, где реализуются наиболее благоприятные условия для возникновения взрыва ЖВВ. Естественно, оно будет

Таблица 2

| № серии опытов | ω_0 , м/сек | ζ | V_{β} | t_+ , мксек | k | u , м/сек | v , м/сек | f , % |
|----------------|--------------------|---------|-------------|---------------|-----|-------------|-------------|---------|
| 12 | 2 | 0 | 0,27 | 50 | 30 | 85 | 150 | 0 |
| 33 | 2 | 0,25 | 0,28 | 50 | 11 | 75 | 200 | 20 |
| 34 | 2 | 0,5 | 0,28 | 60 | 4,5 | 50 | 160 | 0 |
| 35 | 2,5 | 0 | 0,29 | 40 | 24 | 105 | 200 | 0 |
| 36 | 2,5 | 0,25 | 0,28 | 50 | 9 | 80 | 230 | 40 |
| 37 | 2,5 | 0,5 | 0,28 | 50 | 6 | 70 | 250 | 20 |
| 32 | 3 | 0 | 0,30 | 40 | 16 | 110 | 250 | 0 |
| 38 | 3 | 0,25 | 0,29 | 40 | 10 | 90 | 280 | 75 |
| 39 | 3 | 0,5 | 0,27 | 40 | 6 | 90 | 340 | 100 |

различным для различных условий испытания ЖВВ. На рис. 5 приведены кривые чувствительности НГЦ в зависимости от ζ , полученные для зарядов $R=9,5$ мм и $h_0=0,5$ мм, содержащих воздушные полости диаметром ~ 5 мм, при трех различных скоростях удара груза — 2; 2,5 и 3 м/сек. В случае расположения полостей в центре ударника во всех группах опытов фиксировались отказы¹. Чувствительность НГЦ к удару достигает максимальных значений при $\zeta \approx 0,2-0,5$ и с дальнейшим возрастанием этого параметра снижается до нуля.

На рис. 5 дана кривая 4 для НГЦ, содержавшего воздушную полость диаметром ~ 7 мм, при $\omega_0=2$ м/сек. По сравнению с испытанием соответствующих зарядов с полостями диаметром ~ 5 мм, чувствительность НГЦ в данном случае возросла, однако осталась в тех же пределах изменения параметров ζ . Анализ фотографий схлопывания полостей диаметром ~ 7 мм, полученных в опытах с $\zeta \geq 0,25$, показал, что взаимодействие струи с полостью и рикошет полости происходили в момент, когда полость, перемещаемая радиальным потоком к периферии ударника, слишком приближалась к его границе ($\zeta_* \approx 0,8-0,9$). Это обстоятельство, очевидно, затрудняло развитие очагов реакции.

Зависимость чувствительности НГЦ от природы газа, наполняющего полость

Для получения дополнительных результатов, подтверждающих разработанный в [1, 2] механизм возбуждения взрыва, были проведены проверочные эксперименты по схлопыванию полостей в слое НГЦ, которые заполнялись различными газами. Опыты проводились с аргоном, воздухом и фреоном-12, которые обладают различными значениями отношений удельных теплоемкостей ($\gamma = c_p/c_v$). Поскольку степень разогрева микрокапель жидкости, образующихся при взаимодействии струй, зави-

¹ Редко наблюдавшиеся взрывы являлись следствием повторного (после рикошета) схлопывания полостей.

сит от температуры газа в полости, то можно ожидать различные результаты при экспериментах с разными газами. Действительно, частота взрывов в опытах с фреоном была заметно ниже, чем с воздухом и аргоном, данные по которым мало отличались, возможно, из-за более низкой теплопроводности последнего.

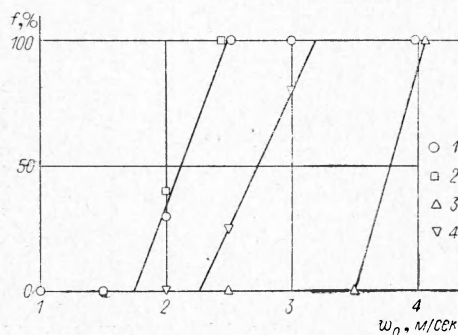


Рис. 6.

На рис. 6 приведены зависимости частот взрывов зарядов НГЦ, содержащих полости эллиптической формы размером $5 \times 10 \text{ мм}$ ($\sqrt{\beta} \approx 0,37$), от скорости удара груза ω_0 . Полости заполнялись воздухом (1) аргоном (2) и фреоном-12 (3). Толщина слоя жидкости 0,5 мм, диаметр ударника 19 мм, вес груза 5 кг.

В опытах с фреоном для возбуждения взрыва НГЦ требовалась почти втрое большая энергия удара, чем в опытах с аргоном или воздухом. Для сравнения на рис. 6, 4 приведена кривая чувствительности желатинизированного (1% коллоксилина) НГЦ, эллиптические полости в котором заполнялись воздухом. Причина снижения чувствительности НГЦ при желатинизировании обсуждалась в [1, 2, 8]. Настоящие эксперименты

В опытах с фреоном для возбуждения взрыва НГЦ требовалась почти втрое большая энергия удара, чем в опытах с аргоном или воздухом. Для сравнения на рис. 6, 4 приведена кривая чувствительности желатинизированного (1% коллоксилина) НГЦ, эллиптические полости в котором заполнялись воздухом. Причина снижения чувствительности НГЦ при желатинизировании обсуждалась в [1, 2, 8]. Настоящие эксперименты



Рис. 7.

показывают, что флегматизирующий эффект при заполнении полостей фреоном в некоторых случаях может оказаться более сильным, чем при желатинизировании НГЦ. На рис. 7 приведена фотография схлопывания эллиптической полости (серия опытов 40), заполненной фреоном, при ударе груза со скоростью 4 м/сек. Взрыв НГЦ (рис. 7, д, стрелка А) возник спустя ~15 мксек после соударения струй ($v \sim 250 \text{ м/сек}$) на расстоянии ~5 мм от фокуса схлопывания (стрелка Б). Причина взрыва связана с рикошетом (расширением) полости. Пример подобной картины взрыва рассматривался в [1, 2].

Поступила в редакцию
10/XI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1971, 7, 2.
2. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1971, 7, 2.
3. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
4. С. Н. Johansson a. o. Proc. Roy. Soc., Ser. A, 1958, 246, 160.
5. F. P. Bowden, M. P. McOnie. Nature, 1965, 206, 380; Proc. Roy. Soc., Ser. A, 1967, 298, 38.
6. В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1970, 2.
7. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1970, 6.
8. C. Voyars. Combustion and Flame, 1969, 13, 4.