

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫДАВЛИВАНИИ В ОТВЕРСТИЕ.
II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*М. В. Лисанов, А. В. Дубовик
(Москва)*

Продавливание жидких и пастообразных веществ через узкие зазоры в конструкциях технологических аппаратов — одна из наиболее взрывоопасных операций по переработке взрывчатых материалов. Знание физических механизмов разогревов ЖВВ до температур, при которых происходит их воспламенение и взрыв, позволяет обоснованно разработать систему технических мер по предотвращению аварийных ситуаций в условиях производства и эксплуатации указанных веществ.

В работе [1] (там же даны ссылки на предшествующие исследования в этой области) выполнен последовательный теоретический анализ разогрева и воспламенения ЖВВ при его вытекании из контейнера через круглое отверстие под действием поршня, который вдвигается в жидкость в результате внешнего воздействия (механического удара). Результаты расчетов температуры ЖВВ, выполненные на основе рассмотренной картины течений, позволяют установить наиболее вероятную причину взрыва.

К сожалению, сложность решения полученных уравнений, требующего использования мощной ЭВМ, а также отсутствие некоторых исходных данных по реофизическим и термокинетическим характеристикам жидких и пастообразных веществ создают серьезные препятствия для проведения разнообразных численных расчетов параметров потока ЖВВ. В этой связи роль эксперимента в решении поставленной задачи представляется решающей. Кроме того, измерение профиля давлений $p(t)$ при ударе по ЖВВ позволяет существенно упростить проведение указанных расчетов и облегчить процедуру анализа чувствительности ЖВВ к удару.

Эксперименты выполняли на копре К-44-2 с грузом массой $M = 5$ кг и прибором № 1 (по Холево), снабженным осевым отверстием в нижнем ролике радиусом $R = 9,5$ мм (прибор № 1Ф). Скорость удара варьировали от 1 до 4 м/с. Для исключения затекания вещества в зазор между муфтой и роликом (шириной около 30 мкм) последний заполняли вакуумной смазкой. На нижнем торце ролика имелась фаска, на которую надевали тонкое (толщиной 1 мм) резиновое кольцо шириной 2 мм. В опытах регистрировали среднее давление $p(t)$ при ударе проволочным тензодатчиком, установленным в ударнике груза. Момент возникновения взрыва фиксировали на втором луче осциллографа С8-11 с помощью быстродействующего фотодиода ФД-10Г. Частотные характеристики датчика, фотодиода и осциллографа подбирали адекватными для надежной регистрации рассматриваемых физических процессов.

Исследовали взрывчатые и инертные жидкости с различной вязкостью, а также модельные пастообразные взрывчатые составы на основе перхлората аммония малой дисперсности (~ 10 мкм). Вязкость жидких веществ не зависела от скорости сдвига ($n = 1$), а пастообразных уменьшалась с ней ($n < 1$).

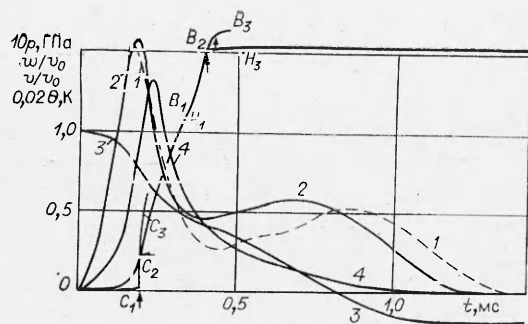


Рис. 1. Зависимость параметров удара по ЭД-5 от времени.

1 — экспериментальная запись $p(t)$; 2 — расчет $p(t)$; 3 — v/v_0 ; 4 — w/v_0 ; B, C, H — температурные кривые.

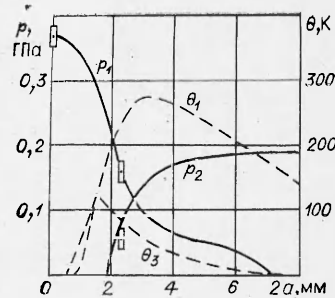


Рис. 2. Зависимость максимальных давлений удара и температур от диаметра отверстия в опытах с ЭД-5 ($\rho = 1$, $\eta = 0$, $v_0 = -3$ м/с, $\delta_0 = 1$ мм).

1. Рассмотрим результаты изучения процесса удара по вязкой жидкости — неотвержденной эпоксидной смоле ЭД-5. На рис. 1 экспериментальная запись $p(t)$ получена при $v_0 = -3$ м/с, $2a = 2,3$ мм, $\delta_0 = 1$ мм, $l = 8$ мм¹, а теоретическая построена на основе следующих данных: $\mu_0 = 40$ Па·с, $U/R = 7459$ К, $\rho^0 c_p = 1$ МДж/(м³·К), $\alpha = 10$ ГПа⁻¹. Реологические характеристики ЭД-5 определены с помощью вискозиметра Геплера.

Характерная особенность кривых $p(t)$ состоит в наличии двух максимумов p_1 и p_2 . В начале удара вязкое сопротивление велико и энергия удара запасается в системе нагружения. Однако по мере повышения давления жидкость начинает втекать в отверстие и разогреваться, в результате ее вязкость падает и сопротивление сжатию уменьшается. Процесс диссипации энергии протекает стремительно и продолжается до тех пор, пока жесткости слоя жидкого вещества и системы нагружения не станут соизмеримыми. В это время спад давления прекращается, энергия удара начинает вновь запасаться в системе нагружения, приводя к повторному росту давления. Когда она полностью израсходуется, наступают отскок груза и окончательный спад давления до нуля.

Снижение давления после достижения p_1 — следствие тепловой неустойчивости сжатия слоя ЭД-5 при ударе [1]. Значение p_1 близко к p_x , при этом надо иметь в виду, что p_1 ограничено сверху давлением p_x . В предельном случае больших μ_0 , v_0 и малых a , δ_0 наблюдается единственный максимум давления $p_1 \ll p_x$, упругая стадия удара отсутствует ($p_2 \rightarrow 0$), и после периода быстрого падения давление плавно снижается до нуля. Груз при этом не отскакивает ($H_{ik} = 0$).

Стадия понижения давления наиболее опасна для взрыва, поскольку в это время рост температуры ЖВВ наиболее высок. На рис. 1 буквами B, C и H обозначены кривые разогрева частиц ЭД-5 с координатами $\rho_0 = 4$ и $\eta_0 = 1,95$ («верхняя» частица), 1,0 («средняя») и 0,05 («нижняя») соответственно. Индексы 1, 2, 3 указывают номера областей потока, стрелками показаны их границы.

Результаты расчета зависимостей максимальных давлений удара и температур от диаметра отверстия $2a$ изображены на рис. 2. Точками показаны экспериментальные данные для ЭД-5, причем значению $a = 0$ соответствует давление холостого удара p_x . Для всех $a > 0,7$ мм разогрев в плоском зазоре выше, чем в отверстии, и только при малых a он определяется течением в фальере. Однако подъем температуры в этом случае невелик и обращается в нуль при $a \leq 0,4$ мм. Разогревы малы и в случае больших a . Поэтому кривая частостей взрывов для ЖВВ с теплофизическими свойствами, как у ЭД-5, должна иметь максимум при некоторых промежуточных значениях a_* . Для $a > 1,5$ мм $p_2 > p_1$, причем при боль-

¹ Обозначения см. [1].

Т а б л и ц а 1

Расчет параметров удара по жидкости ЭД-5 при $v_0 = -3$ м/с,
 $M = 5$ кг, $\delta_0 = 1$ мм

Вариант	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_K , мс	H_K , см	Θ_{1K} , К	f_K
1	169 (150)	69,1 (60)	1,30 (1,41)	2,8 (1,3)	2,71 —	1,07 —
2	173	52	1,36	1,6	228	0,17
3	182	42,2	1,41	1,1	323	17,8
4	48,2	198	1,01	16,5	242	0,15
5	242	16,1	1,86	0,2	181	$9,4 \cdot 10^{-3}$
6	116	133	1,10	8,8	284	1,9

Примечание. Вариант 1 — исходный (см. рис. 1). Изменяемые параметры в других вариантах: 2 — $\rho^0 = 1,8 \cdot 10^3$ кг/м³; 3 — $U = 10$ ккал/моль; 4 — $\mu_0 = 0,4$ Па·с; 5 — $\mu_0 = 100$ Па·с; 6 — $\mu_0 = 10$ Па·с; $a = 2$ мм.

ших a стадия спада давления отсутствует, и на профиле $p(t)$ наблюдается стадия сжатия слоя при постоянном p_1 .

Чтобы составить представление об изменении характеристик удара и вероятности воспламенения ЖВВ, у которого теплофизические свойства аналогичны ЭД-5, а термохимические параметры — НГЦ ($Q = 4,5$ МДж/кг, $E = 146,5$ кДж/моль, $z = 4 \cdot 10^{14}$ с⁻¹), в табл. 1 приведены значения максимумов p_1 , p_2 , времени удара t_K , высоты отскока груза после удара $H_K = v_K^2/2g$, максимального разогрева Θ_{1K} и вероятности воспламенения f_{1K} . В скобках приведены экспериментальные данные по ЭД-5. Для рассматриваемого гипотетического ЖВВ диссипативный механизм инициирования в данных условиях удара весьма эффективен. Причем вероятность воспламенения ЖВВ возрастает с увеличением Q и z и уменьшением ρ^0 и U . В последнем случае рост f связан с уменьшением затрат энергии на ускорение потока ЖВВ.

Увеличение и уменьшение вязкости вещества снижает вероятность взрыва. Очевидно, заданный размер отверстия близок к оптимальному для получения максимального разогрева. Если при повышенной вязкости ($\mu_0 = 100$ Па·с) вдвое увеличить диаметр отверстия, то f вновь возрастает. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими выводами [1].

Внешняя картина удара в опытах с модельным пастообразным составом (МПС) такая же, как и с вязкой жидкостью ЭД-5, несмотря на то, что реологические свойства указанных веществ различны. Это связано с тем, что диссипативные эффекты при ударе в обоих случаях играют главную роль, причем зависимость вязкости от скорости сдвига слабее, чем от температуры (для рассматриваемых веществ она имеет одинаковый вид). Так же как и в опытах с ЭД-5, при ударе по МПС наблюдаются два характерных максимума давления, происхождение которых объясняется наличием вязкой и упругой стадий удара.

На рис. 3 показаны осциллограммы удара по МПС при различных диаметрах отверстия. На рис. 3, а на верхнем луче осциллографа наблюдается отрицательный сигнал с фотодиода, зафиксировавшего вспышку МПС в момент завершения спада давления. В случае большого отверстия (рис. 3, б) давление не снижается, и малочисленные взрывы отмечаются только на второй стадии удара.

Численным интегрированием зависимостей $p(t)$ получены функции $v(t)$ и $\delta(t)$, подстановкой которых в соотношения (14), (16) — (19) из [1] найдены значения температуры частиц в различных участках потока МПС. В табл. 2 приведены результаты измерений и расчетов критических параметров инициирования МПС; $\Theta_b = \max(\Theta_{1b}, \Theta_{3b})$ — максимально воз-

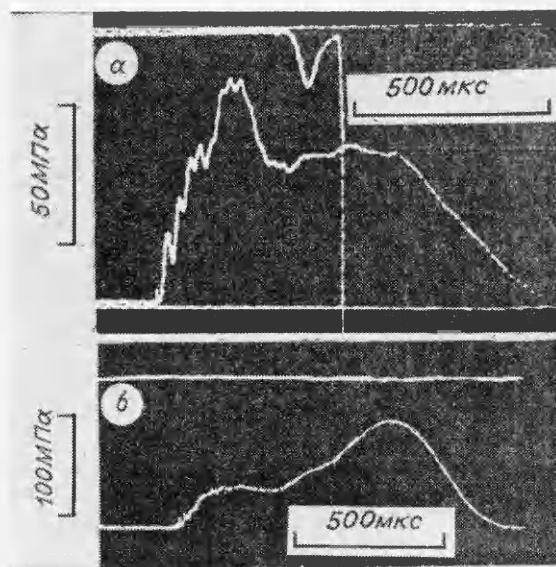


Рис. 3. Осциллограммы записей давления удара по МПС ($v_0 = -3$ м/с, $\delta_0 = 1$ мм, $l = 8$ мм).
а) $2a = 2,3$ мм; б) $2a = 7$ мм.

возможный разогрев частицы МПС на входе в отверстие. Его величина убывает с ростом a , но в случае взрывов МПС не опускается ниже 210 К. Это критическое значение разогрева совпадает с экспериментальной величиной 220 ± 10 К, полученной в аналогичных опытах по измерению температуры МПС во время удара тонкопленочными платиновыми термосопротивлениями, помещенными на входе в отверстие

прибора, т. е. в область максимальных температур (методика исследований изложена в [2]). Наименьшее из полученных значений $T_b = \Theta_b + T_0 = 230 \pm 10^\circ\text{C}$ заметно превышает температуру начала интенсивного разложения МПС $T_p = 190 \pm 5^\circ\text{C}$, найденную методом дериватографического анализа.

Экспериментальные зависимости p_1 и p_2 от a для исследуемого состава представлены на рис. 4. Темными точками нанесены значения давлений p_b в момент возникновения взрыва. Видно, что зависимость $p_b(a)$ имеет минимум $p_{b\min} = 65$ МПа, величину которого в принципе можно было бы принять за меру чувствительности МПС к удару, если бы его положение совпадало с координатой максимума кривой частотей взрывов, показанной рис. 4. К сожалению, это не так, поэтому вопрос о выборе критерия механической чувствительности МПС требует специального обсуждения.

Дело в том, что значение p_b зависит от толщины слоя δ_0 . Как и в случае опытов с ударом по пастообразному топливу в приборчике со свободным истечением вещества [3], p_b уменьшается с ростом δ_0 , но при $\delta_0 > 1$ мм становится постоянной: $p_{b\min} = 60 \pm 10$ МПа (рис. 5). Однако f монотонно возрастает с δ_0 , что связано с увеличением времени течения и разогрева МПС при практически постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma} = (3n+1)v_0R^2/(n+1)a^3$.

Отсюда следует, что величиной $p_{b\min}$ можно было бы охарактеризовать чувствительность МПС при максимальной (100%) частоте взрывов (т. е. при достаточно больших δ_0), если бы зависимость $f(a)$ была одинаковой для всех исследуемых веществ. В общем случае это не так, и в связи с этим представляется предпочтительным для испытаний МПС на чувствительность к удару использовать прибор со свободным истечением вещества (№ 2 по Холево). При работе с ним обнаружено, что

Т а б л и ц а 2

Параметры инициирования МПС при ударе ($v_0 = -2,5$ м/с, $M = 5$ кг, $\delta_0 = 1$ мм)

$2a$, мм	f , %	p_b , МПа	t_b , мс	δ_b , мм	Θ_{1b} , К	Θ_{3b} , К
1,2	71	120	0,44	0,70	207	297
2,3	50	70	0,40	0,52	219	140
7,0	20	100	0,72	0,24	211	22

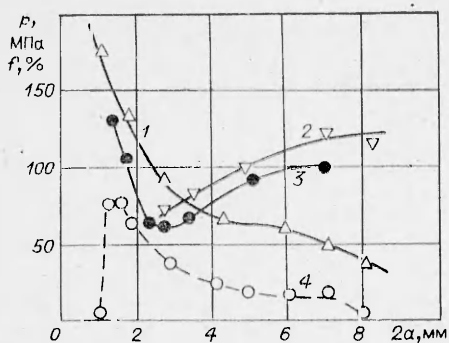


Рис. 4. Зависимость p_1 (1) и p_2 (2) от $2a$ в опытах с МПС. 3 — давление взрыва p_B ; 4 — частота взрывов f ($v_0 = -2,5$ м/с, $\delta_0 = 1$ мм).

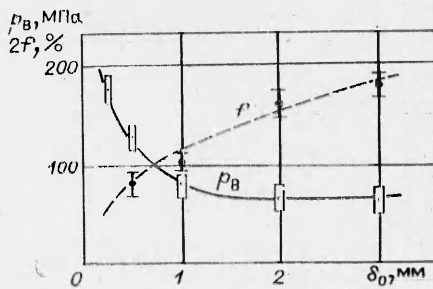


Рис. 5. Давления p_B и частоты взрыва f в зависимости от δ_0 ($v_0 = -2,5$ м/с, $2a = 2,3$ мм).

зависимость $f(\delta_0)$ имеет максимум при δ_0^* , близкой к значению координаты выхода зависимости $p_B(\delta_0)$ на постоянную величину $p_{B \min}$. Давление $p_{B \min}$, полученное в приборе № 2, можно принять за меру чувствительности МПС, если характеристика максимума частоты взрывов для всех веществ одинаковы. Достигнуть этого можно варьированием высоты сбрасывания груза H_0 , поскольку зависимость $f(H_0)$ — монотонно возрастающая функция. Полученную таким образом величину H_0^* , определяемую, допустим, в точках 50- или 100%-ной частоты взрывов, можно использовать в качестве дополнительного показателя чувствительности МПС (масса груза выбирается постоянной).

Говоря о критических условиях инициирования МПС, следует отметить, что наряду с вязким трением в потоке вещества другим механизмом возбуждения взрыва может быть дробление твердых компонентов МПС при ударе, особенно если толщина сжатого слоя становится меньше характерного размера твердых частиц.

Для проверки этой возможности проводились эксперименты с пастообразной смесью крупнодисперсного (до 0,3 мм) ПХА и жидкой органической добавки, способной вступать в химическое взаимодействие с ПХА при ударе. Причем значение H_0 подбиралось таким, чтобы максимальное давление при ударе не превышало 0,1 ГПа, характерного для инициирования МПС. Взрывы бинарной смеси в этом случае отсутствовали, хотя дробление частиц ПХА имело место, так как кошечная толщина слоя была меньше 0,1 мм. Если же H_0 увеличивалась настолько, что максимальное давление при ударе $p_{2 \max}$ достигало 0,3—0,4 ГПа, то фиксировались отдельные взрывы. Однако осциллограммы давления качественно отличались от случаев удара с иницированием взрыва МПС по диссипативному механизму: на них появлялись резкие спады давления (сколы), характерные для возбуждения взрыва в твердых ВВ [4]. Очевидно, при данных условиях имело место разрушение заряда смеси как целого с тепловыделением от трения на поверхностях сдвига, которое наблюдается при иницировании большинства твердых ВВ. Поэтому разрушение отдельных твердых частиц в потоке вещества, происходящее при $p = 0,1$ ГПа, не является эффективным механизмом инициирования МПС.

2. В случае удара по маловязким веществам, таким как нитроглицерин (НГЦ), большая часть энергии удара расходуется на увеличение кинетической энергии жидкости, а не на повышение ее температуры. Это подтверждается расчетами механических характеристик удара и основных параметров жидкого потока, приведенных в табл. 3, при следующих исходных данных о теплофизических свойствах:

	ν_0 , Па·с	$\rho^0 c_p$, МДж/(м ³ ·К)	U/R , К	α , ГПа ⁻¹
Вола	10^{-3}	4,18	2077	0
НГЦ	$3,6 \cdot 10^{-2}$	2,34	4026	1

Таблица 3

Расчет параметров удара по воде и НГЦ при $v_0 = -3$ м/с, $M = 5$ кг, $\delta_0 = 1$ мм

Вещество	Вариант	p_m , МПа	δ_R , мкм	t^R , мс	θ_1 , К	f_1	H_K , см
Вода	1	236 (240)	5,13 —	0,974 (0,99)	117 —	— —	22,9 (18)
	2	238	11,0	0,970	384	—	23
	3	202	6,48	0,992	92	—	17,3
НГЦ	1	192 (210)	9,89 —	1,01 (0,95)	216 —	$2,16 \cdot 10^{-3}$ —	15,6 (14)
	4	201	16,0	0,994	164	10^{-5}	15,1

Примечание. Изменяемые параметры по сравнению с вариантом 1 (см. рис. 1): 2 — $\mu_0 = 5$ мПа·с; 3 — $\rho^0 = 1600$ кг/м³; 4 — $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$ Па⁻¹.

Там же в скобках представлены экспериментальные значения параметров удара. Как видно из табл. 3, при достаточно высоком разогреве НГЦ при ударе (>200 К) вероятность его воспламенения крайне мала. Данное обстоятельство указывает на неэффективность вязкой диссипации энергии удара для инициирования легколетучих ЖВВ. Анализ осциллограмм удара по маловязким жидкостям показал отсутствие характерного (однократного) спада давления в начале удара вследствие потери несущей способности слоя из-за уменьшения вязкости ЖВВ при нагревании, что согласуется с выводами [1, формула (31)]. Однако в ряде опытов зафиксированы взрывы НГЦ, особенно если начальная толщина слоя или радиус отверстия выбирались достаточно большими. Причем установлено, что момент их возникновения приходился на начало удара, когда никакого разогрева еще нет.

На рис. 6, а приведена осциллограмма $p(t)$ в опыте без взрыва НГЦ, в начале которой видны сильные пульсации с периодом ~ 100 мкс. Вспышка взрыва, как правило, регистрировалась в момент появления этих пульсаций. На рис. 6, б показан начальный участок записей $p(t)$ и наличия электроконтакта между грузом и роликом. Периодическое нарушение контакта свидетельствует об отскоках ролика от груза и объясняет причину возникновения пульсаций $p(t)$ в начале удара.

Вследствие того что масса ролика $m_p < M$ и толстый слой жидкости обладает малым сопротивлением сжатию ($p \sim \mu \delta^{-3}$), ролик при ударе груза отскакивает от него со скоростью $\sim 2v_0$ и внедряется в жидкость — давление возрастает. Обладая сравнительно малой кинетической энергией,

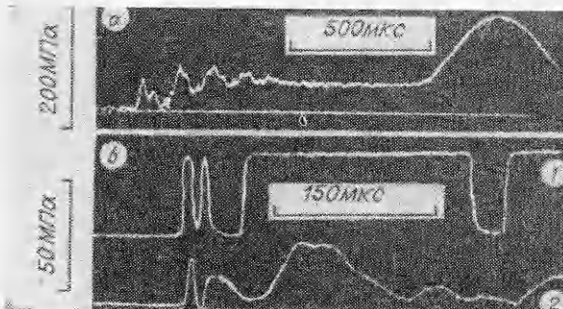


Рис. 6. Опыты с НГЦ ($v_0 = -3$ м/с, $\delta_0 = 2$ мм). а) осциллограмма записи давления удара ($2a = 2,3$ мм); б) давление удара (2) и наличие электроконтакта между грузом и роликом (1) в начале удара ($2a = 2,3$ мм).

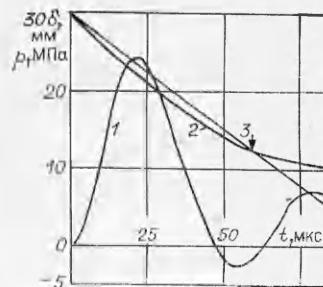


Рис. 7. Расчет начальной стадии удара по НГЦ ($2a = 2,3$ мм). 1 — $p(t)$; 2 — $\delta(t)$; 3 — траектория ударника груза ($\delta_R = \delta_0 + v_0 t$).

он быстро тормозится слоем вытекающей жидкости, и давление в ней падает, причем из-за инерционности потока в такой степени, что возможно образование кавитации в потоке ЖВВ. Когда ролик тормозится, его догоняет падающий груз. Далее следует повторный удар груза по ролику, и описанная выше последовательность явлений протекает до тех пор, пока слой ЖВВ не уменьшится настолько, что ролик уже не будет способен совершать самостоятельное движение и станет перемещаться совместно с грузом. Причем, если груз ударяет по ролику повторно в тот момент, когда ЖВВ находится в состоянии кавитации, то может возникнуть взрыв. Отметим, что появлению кавитации и возбуждению взрыва способствует наличие мельчайших ($\sim 0,1$ мм) пузырьков воздуха, которые трудно удалить из ЖВВ при подготовке испытательного прибора. В этом случае взрыв может возникнуть при первом подъеме давления ($t_b \approx 10$ мкс, $p_b \approx 10$ МПа).

Качественной иллюстрацией рассмотренных гидродинамических эффектов при истечении ЖВВ в отверстие служат результаты расчета зависимости $p(t)$ (рис. 7, 1) для случая внедрения в НГЦ ролика с $m_p = 50$ г при $v_{op} = -5$ м/с ($v_0 = -3$ м/с), $M = 5$ кг, $\delta_0 = 2$ мм. Видны колебательный характер функции $p(t)$, связанный с инерционными свойствами потока, и наличие отрицательных давлений, достигающих величины $-2,7$ МПа, очевидно достаточных для возникновения кавитации в НГЦ. Точка пересечения кривых 2 и 3 (отмечена стрелкой) дает момент догона грузом останавливающегося ролика и начало взрыва НГЦ.

В связи со сказанным представляется нецелесообразным использовать, как предлагалось в работе [5], прибор с фильтром для оценки чувствительности маловязких ЖВВ к удару вследствие ненадежности определения критических условий инициирования взрыва, поскольку из-за конструктивных особенностей прибора структура кавитационного потока в нем плохо воспроизводима. Кроме того, попадание неконтролируемых по размеру пузырьков воздуха в снаряженный прибор отрицательно влияет на воспроизводимость результатов испытаний ЖВВ на чувствительность к удару.

Итак, в работе создана математическая модель течения, разогрева и воспламенения тонкого слоя неьютоновской жидкости, втекающей в узкое отверстие под действием удара умеренной силы. Показано, что главная причина инициирования маловязких ЖВВ — схлопывание имеющихся в жидкости воздушных пузырьков или кавитационных полостей, появляющихся в ЖВВ в начале удара из-за многократного воздействия на жидкость системой нагружения. В случае высококонсистентных жидких или пастообразных взрывчатых систем решающим механизмом возбуждения взрыва является вязкое трение в потоке втекающего в отверстие вещества.

*Поступила в редакцию 5/XI 1984,
после доработки — 21/II 1985*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Дубовик, М. В. Лисанов. ФГВ, 1985, 21, 6.
2. А. А. Денисаев, А. В. Дубовик, В. К. Боболев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1980.
3. А. В. Дубовик, А. А. Денисаев, В. К. Боболев. ФГВ, 1979, 15, 4, 95.
4. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
5. С. М. Муратов, А. П. Амосов, С. П. Бажанов и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1980.