

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАНАЛЬНОГО ЭФФЕКТА НА ПРОЦЕСС ЗАТУХАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВВ В ШПУРЕ

**С.А. Калякин, К.Н. Лабинский**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, 83001, г. Донецк, Украина.

E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)

В статье приведены результаты исследований зависимости скорости движения ударной волны в зазоре между стенкой шпура и боковой поверхностью шпурового заряда от скорости детонации ВВ и коэффициента заряжания шпура. Определены параметры отраженной от стенок шпура и от дна шпура ударной волны, воздействующей на заряд ВВ. Показано, что за фронтом отраженной ударной волны образуется газовая плазма, тепловой поток которой воздействует на заряд и вызывает спекание ВВ. Установлена величина шпурового заряда ВВ в донной части, в которой возможно затухание детонации в результате уплотнения и спекания ВВ в зависимости от скорости детонации ВВ и его коэффициента заряжания.

**Ключевые слова:** скорость детонации, отраженная ударная волна, коэффициент заряжания ВВ, плазма, каналный эффект, спекание ВВ, затухание детонации заряда.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Развитие и широкое внедрение при производстве взрывных работ шпуровым способом патронированных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) потребовало исследований каналного эффекта, который может быть одной из причин их неустойчивой детонации в шпурах. При зарядании шпуров между стенками шпура и патронами ЭВВ всегда имеется некоторый зазор, который, как известно, влияет на режим и устойчивость детонации ВВ в шпуре. У многих ЭВВ, как и у аммиачно-селитренных ВВ, отличающихся невысокой детонационной способностью по сравнению с бризантными ВВ, детонация при каналном эффекте может затухать при взрыве шпурового заряда. Поскольку подавляющее число шпуровых зарядов являются составными из отдельных патронов ВВ, необходимо уделить особое внимание вопросам исследования влияния каналного эффекта, то есть радиального зазора в шпуре, на устойчивость детонации заряда ВВ. Решение проблемы каналного эффекта при детонации патронов аммиачно-селитренных и ЭВВ обеспечит полноту детонации их шпуровых зарядов и повышение эффективности взрывных работ.

Анализ литературных источников показал, что при наличии зазора между стенкой шпура и зарядом ВВ возможно снижение его детонационной способности и полноты детонации заряда за счет так называемого каналного эффекта, впервые установленного в шахтных опытах, проведенных Т. Урбански в конце 20-х годов прошлого века. Канальный эффект изучался в работах Л.В. Дубнова, А.И. Гольбиндера, А.Н. Дремина и других ученых, которые установили сущность каналного эффекта и механизм его влияния на полноту

детонации ВВ шпурового заряда. Работами ученых МакНИИ установлено, что проявление канального эффекта на детонацию ВВ наблюдается в шпурах при зазоре от 0,1 до 3 диаметров заряда. Наиболее сильно канальный эффект проявляется при зазоре между стенкой шпура и зарядом, который составляет от 6 до 16 мм. Механизм канального эффекта объясняли тем, что продукты детонации ВВ, расширяясь в зазоре подобно косому поршню, продуцируют опережающую детонационный фронт ВВ ударную волну, которая, обгоняя детонационную волну, воздействует на еще не сдетонировавшую часть заряда. При этом происходит уплотнение ВВ в заряде впереди фронта детонации. Однако нельзя считать, что именно это уплотнение ВВ в заряде приводит к его неполной детонации. Ряд ученых считают, что затухание детонации происходит вследствие возникновения разряжения связанного с отрицательной фазой ударной волны, которая в зоне разрежения разбрасывает ВВ при расширении. Другая часть ученых считает, что опережающая фронт детонации ударная волна десенсибилизирует воздушные включения в заряде ВВ их сжатием. Это приводит к снижению скорости детонации ВВ и в конце концов к ее затуханию. При этом полнота детонации зарядов ВВ в шпурах у многих промышленных ВВ различная и определяется в основном их детонационной способностью, то есть скоростью детонации и критическим диаметром. Поэтому исследование влияния канального эффекта на процесс детонации ВВ в шпуре весьма актуально, так как позволит уточнить механизм канального эффекта и установить параметры ударной волны в зазоре, которые определяют полноту детонации заряда ВВ в шпурах при производстве взрывных работ.

**Целью работы** является исследование влияния канального эффекта и параметров ударной волны в зазоре с учетом отражения ее от стенок и дна шпура при детонации ВВ на устойчивость детонации заряда и уточнение причин затухания детонации ВВ при канальном эффекте.

**МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исследования канального эффекта в шпуре, скорости детонации заряда ВВ и скорости ударной волны в радиальном зазоре между стенками шпура и зарядом ВВ проводились на моделях шпуров, выполненных из различного материала. Для определения скоростей детонации ВВ и ударной волны в зазоре между стенкой шпура и зарядом использовали измеритель интервалов времени ИИВ-16/496 УХЛ 4.2 (ТУУ 33.5-3169501990-001:2011). Методика проведения опытов в данных исследованиях приведена в работе [1]. Результаты измерений скорости детонации заряда ВВ в шпуре приведены в табл.1, а в табл. 2 приведены результаты по измерению скорости ударной волны, распространяющейся в зазоре между стенкой модели шпура и зарядом ВВ.

Анализ результатов, полученных в исследованиях, позволил установить следующий факт, что скорость ударной волны, распространяющейся в зазоре между стенкой модели шпура и зарядом ВВ, зависит от его скорости детонации и коэффициента заряжания ВВ в шпуре –  $K_{зар}$  (он численно равен отношению квадратов диаметра заряда к диаметру шпура). Эта зависимость, полученная в опытах, приведена в табл. 3.

Таблица 1. Результаты измерений скорости детонации ВВ

№ опыта	ВВ	d <sub>ВВ</sub> , мм	d <sub>ш</sub> , мм	K <sub>зар</sub>	Боевик, м/с	Стык, м/с	Пассивный, м/с	Средн., м/с	Материал оболочки	Толщина оболочки, мм
1	№6ЖВ	20	34	0.346	3459	3404	3255	3338	ПВХ	1,5
2	-//-	20	34	0.346	Один патрон			3243	ПВХ	1,5
3	-//-	24	34	0.498	3178	4444	4194	4299	ПВХ	1,5
4	-//-	28	34	0.678	3926	3555	3975	3895	ПВХ	1,5
5	-//-	32	34	0.886	Один патрон			4383	ПВХ	1,5
6	-//-	28	45	0.387	3871	3077	3983	3685	Пластик	2,5
7	-//-	32	45	0.506	4000	3931	4124	4039	Пластик	2,5
8	6ЖВ пл.об.	37	58	0.407	Один патрон			4601	Бумага	5,0
9	-//-	37	58	0.407	4637	4604	4413	4551	Бумага	5,0
10	П-5	37	45	0.676	3938	3699	3948	3901 <sup>1</sup>	Пластик	2,5
11	Оп. Vкл.	37	50	0.548	1972	1521	1715	1719	Бумага	5,0
12	-//-	37	58	0.407	1596	1423	1743	1613	Бумага	5,0
13	-//-	37	41	0.814	1590	2051	1776	1837 <sup>2</sup>	Ст. труба	2,0
14	-//-	37	41	0.814	2102	1756	2073	2030 <sup>2</sup>	Ст. труба	2,0
15	Гремикс-М	31	45	0.475	Один патрон			4979	Пластик	2,5
16	--/--	41	45	0.830	Один патрон			5581	Пластик	2,5

<sup>1</sup> – заряд состоял из трех патронов, приведены результаты измерения скорости детонации в боевике, на первом стыке и в первом пассивном патроне, а также средняя скорость детонации по всему заряду;

<sup>2</sup> – заряд состоял из пяти патронов, приведены результаты измерения скорости детонации в боевике, на первом стыке и в первом пассивном патроне, а также средняя скорость детонации по всему заряду.

Таблица 2. Результаты измерений скорости ударной волны в зазоре

№ опыта	ВВ	d <sub>ВВ</sub> , мм	d <sub>ш</sub> , мм	K <sub>зар</sub>	Над боевиком, м/с	Над стыком, м/с	Над пассивным патроном, м/с	Средн., м/с	Материал оболочки	Толщина оболочки, мм
1	№6ЖВ	20	34	0.346	2831	4968	3902	4018	ПВХ	1,6
2	-//-	20	34	0.346	2857	3333	5161	3697	ПВХ	1,6
3	-//-	24	34	0.498	4247	4733	4559	4551	ПВХ	1,6
4	-//-	28	34	0.678	4848	3720	4259	4192	ПВХ	1,6
5	-//-	32	34	0.886	Одна база			5028	ПВХ	1,6
6	-//-	28	45	0.387	4247	4232	4571	4344	Пластик	2,5
7	-//-	32	45	0.506	4232	4166	4210	4205	Пластик	2,5
8	6ЖВ пл.об.	37	58	0.407	Одна база			5517	Бумага	5,0
9	-//-	37	58	0.407	Одна база			5245	Бумага	5,0
10	П-5	37	45	0.676	Одна база			4134	Пластик	2,5
11	Оп. Vкл.	37	50	0.548	1930	1446	2245	1813	Бумага	5,0
12	-//-	37	58	0.407	1810	1893	1628	1770	Бумага	5,0
13	-//-	37	41	0.814	Одна база			2011	Ст. труба	2,0
14	-//-	37	41	0.814	Одна база			2202	Ст. труба	2,0
15	Гремикс-М	31	45	0.475	Одна база			5530	Пластик	2,5
16	--/--	41	45	0.830	Одна база			5970	Пластик	2,5

Таблица 3. Результаты определения отношения скорости ударной волны в зазоре к скорости детонации ВВ в заряде в зависимости от  $K_{зар}$

№ опыта	ВВ	$K_{зар}$	V/D
1	№6ЖВ	0.346	1.200
2	-//-	0.346	1.140
3	-//-	0.498	1.058
4	-//-	0.678	1.076
5	-//-	0.886	1.147
6	-//-	0.387	1.132
7	-//-	0.506	1.041
8	6ЖВ пл.об.	0.407	1,199
9	-//-	0.407	1,152
10	П-5	0.676	1.060
11	Оп. Вкл.	0.548	1.054
12	-//-	0.407	1.097
13	-//-	0.814	1.095
14	-//-	0.814	1.085
15	Гремикс-М	0.475	1.111
16	Гремикс-М	0.830	1.069

Полученные в опытах результаты определения скорости детонации ВВ и ударной волны в зазоре шпура обработаны методами корреляционного анализа для того, чтобы установить эмпирическую зависимость между относительной скоростью УВ  $V_0$  (отношение скорости ударной волны в зазоре к скорости детонации ВВ,  $V_0=V/D$ ) и коэффициентом заряжания ВВ в шпуре –  $K_{зар}$ . Эта эмпирическая зависимость имеет следующий вид:

$$V_0 = 1.297 + 0.764 * K_{зар} - 5.619 * K_{зар}^2 + 8.137 * K_{зар}^3 - 3.398 * K_{зар}^4; \quad (1)$$

$r=0.841$ ;  $S=0.032$ .

График зависимости (1) относительной скорости УВ от коэффициента заряжания шпура и результаты измерений в опытах приведены на рис. 2. Точка на графике, которая соответствует  $K_{зар}=1$ , получена в работе [1] как отношение начальной скорости ударной волны на торце заряда к скорости детонации аммонита №6ЖВ, снаряженного на полное сечение трубы ПВХ диаметром 34 мм с толщиной стенок 1,6 мм.

Исследование функции (1) позволило определить ее минимум, который соответствует значению коэффициента заряжания шпура  $K_{зар}=0,638$ , при этом его значении относительная скорость УВ имеет минимальное значение  $V_0=1,047$ . Очевидно, что чем ближе значение скорости распространения ударной волны в зазоре к скорости детонации заряда ВВ, тем меньше будет время воздействия опережающей ударной волны на ту часть заряда ВВ, которая еще не детонировала. В этом случае до минимума снижается влияние опережающей ударной волны на детонацию ВВ в шпуровом заряде при наличии зазора. Также установлено, что материал оболочки макета шпура при взрыве заряда ВВ существенного влияния на проявление канального эффекта не оказывает. Это может быть объяснено тем, что разрушение материала оболочки происходит за время большее, чем время действия на заряд ВВ избыточного давления во фронте опережающей детонацию ВВ ударной волны, движущейся в зазоре. График зависимости (1) позволяет сделать вывод о том, что отклонение

коэффициента заряжения ВВ в шпуре от оптимального значения 0,638 на определенную величину в меньшую или большую сторону создает более жесткие условия для проявления канального эффекта во время детонации шпурового заряда ВВ.

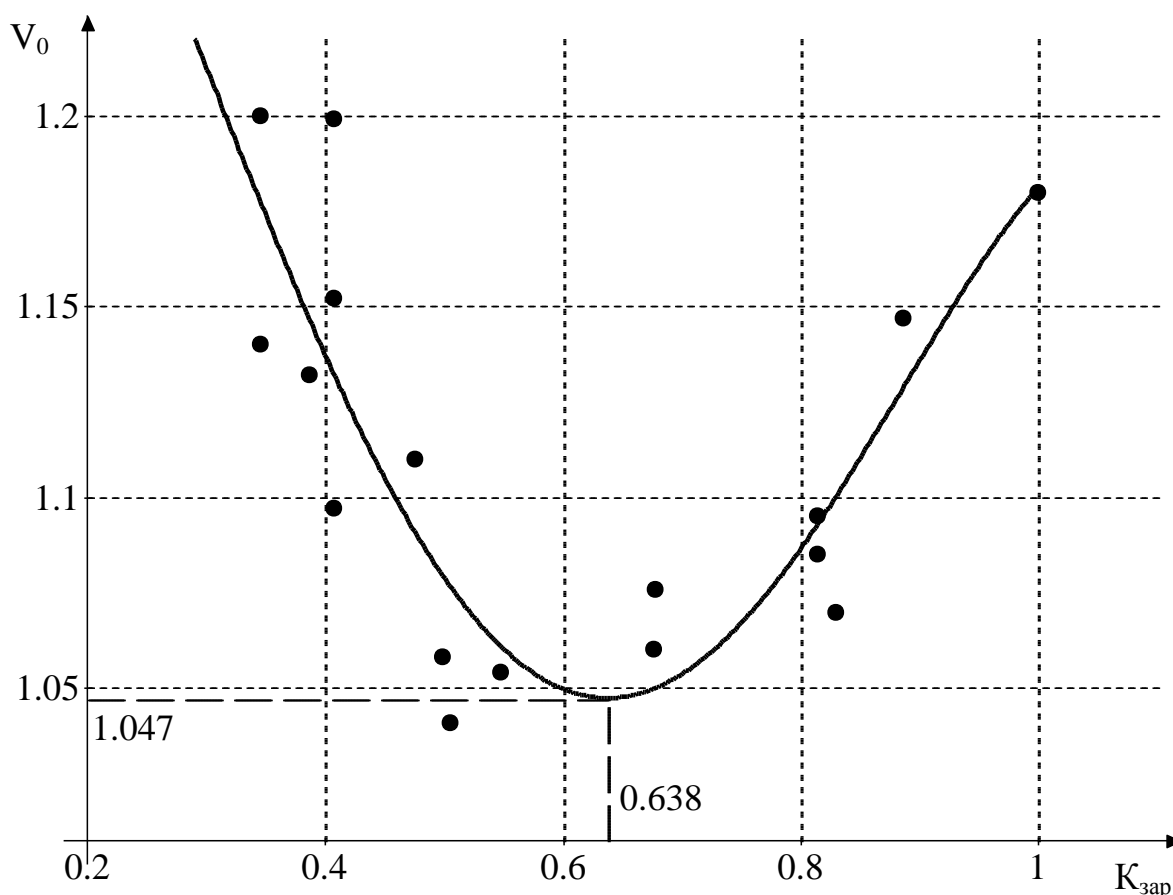


Рис. 2. График зависимости отношения  $V/D$  от коэффициента заряжения шпура.

Таким образом, если обеспечить коэффициент заряжения ВВ в шпуре, близкий к оптимальному значению, то можно получить условия наиболее стабильной детонации заряда ВВ и обеспечить его полноту взрыва. И напротив, отклонение коэффициента заряжения ВВ в шпурах от оптимального значения приводит к ухудшению условий детонации шпурового заряда ВВ вплоть до его отказа. Это подтверждается результатами исследований, полученными ранее другими учеными.

Так, в работе [2] проводились исследования скорости детонации аммонита АП-1 диаметром 31 мм в металлических трубах с внутренним диаметром 37 и 50 мм. Коэффициент заряжения ВВ при этом составлял 0,70 и 0,38. При этом отношение скорости ударной волны в зазоре к скорости детонации ВВ в заряде, рассчитанное по формуле (1), составило 1,068 и 1,125, что отличается от оптимального значения 1,047 на 2,0% и 5,1% соответственно. Данные исследования показали падение скорости детонации ВВ при диаметре трубы 37 мм с 4520 м/с до 4500 м/с, а при диаметре трубы 50 мм – с 4480 м/с до 3330 м/с. Это подтверждает возрастание действия канального эффекта на детонацию заряда ВВ по мере удаления величины коэффициента заряжения ВВ в шпуре от оптимального значения, равного 0,638. В работе [3] проводились исследования

устойчивости детонации Донарита 1 в зависимости от отношения диаметра заряда к диаметру шпура. При неизменном диаметре макета шпура – стальной трубы с внутренним диаметром 40 мм – изменялся диаметр патронов ВВ от 25 до 28 мм, что обеспечивало коэффициент заряжания ВВ в шпуре соответственно от 0,39 до 0,49. При этом скорость детонации ВВ снижалась и составила 3030 м/с и 3400 м/с, а также наблюдались случаи затухания детонации ВВ при диаметре патронов 25 мм. При взрывании ВВ в шпурах различного диаметра автором этой работы было получено наиболее эффективное соотношение между диаметром шпура и диаметром патрона. Так, для диаметра патрона 25 мм автор рекомендует диаметр шпура равный 32 мм, а при диаметре патронов 28 мм рекомендует диаметр шпура 36 мм. Для этих соотношений коэффициенты заряжания ВВ в шпуре составляют соответственно 0,61 и 0,60, что близко к оптимальному значению, полученному согласно уравнения (1).

Вместе с тем, проведенные исследования влияния канального эффекта на процесс детонации заряда ВВ нельзя ограничить только рассмотрением действия ударной волны в зазоре на заряд ВВ. На самом деле действие ударной волны на заряд ВВ и его процесс детонации не ограничивается условиями взаимодействия ударной волны и заряда ВВ и направлением распространения детонации ВВ. Процесс детонации заряда ВВ, происходящий в зарядной камере шпура, гораздо более сложен, так как происходит отражение опережающей фронт детонации ВВ ударной волны от дна и стенок шпура, а также встреча отраженной ударной волны в зазоре с детонационной волной ВВ. Уточненный механизм канального эффекта в шпуре при детонации заряда ВВ в общем виде можно представить следующим образом на рис. 3.

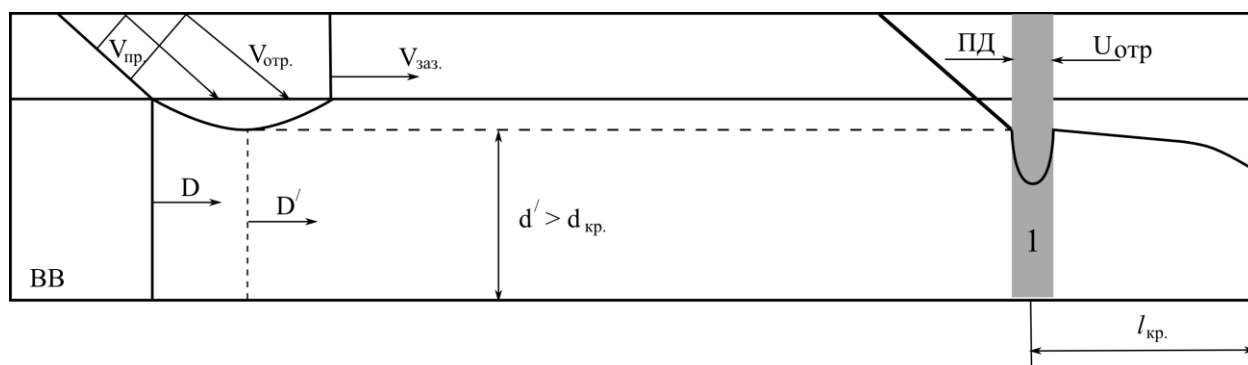


Рис. 3. Механизм взаимодействия ударных волн при детонации шпутового заряда

*1 – зона встречи детонационной волны ВВ и отраженной УВ от дна шпура*

Ударная волна, которая, обгоняет детонационную волну, движется со скоростью  $V_{зав.}$  и воздействует на еще не детонировавшую часть заряда, уплотняя ВВ впереди фронта детонации, что приводит к уменьшению диаметра заряда до  $d'$ . При этом в зазоре шпура ударная волна создает высокое давление, которое подпрессовывает ВВ до критической плотности, при которой процесс детонации ВВ может становиться неустойчивым – пульсирующим. Далее ударная волна в зазоре отражается от дна шпура, и в направлении фронта детонации ВВ движется новая более мощная отраженная ударная волна, которая

встречается в зоне 1 с детонационной волной. В зоне их встречи возникает еще более высокий скачок давления  $P_{\text{встр.}}$  в газе из продуктов взрыва ВВ и отраженной волны, который при определенном значении давления может нарушить устойчивую детонацию в заряде ВВ. Далее рассмотрим, как изменяется давление во фронте ударной волны в зазоре в зависимости от скорости падающей на стенку шпура волны и расширяющихся продуктов взрыва ВВ и коэффициента заряжания ВВ в шпуре. Согласно работы [4], давление во фронте отраженной от стенок шпура ударной волны можно определить по формуле через скорость прямой волны и угол ее встречи со стенкой шпура:

$$P_{\Phi УВ} = P_{УВпр} * k_{отр}, \quad (2)$$

где  $P_{УВпр}$  – давление во фронте прямой ударной волны, определяется по формуле [4]:

$$P_{УВпр} = \frac{\rho}{\gamma_{\text{в}} + 1} V_{\text{зав.}}^2,$$

$\rho$  – плотность воздуха, 1,22 кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{в}}$  – показатель адиабаты с учетом ионизации воздуха [4],  $\gamma_{\text{в}}=1,2$ ;

$V_{\text{зав.}}$  – скорость распространения ударной волны в зазоре, м/с;

$k_{отр}$  – коэффициент отражения косой ударной волны от стенки шпура, определяется по формуле [4]:

$$k_{отр} = 1 + \cos(\varphi) + \frac{\gamma_{\text{в}} + 1}{4\gamma_{\text{в}}} \cos^2(\varphi) + \frac{1}{2} \cos^3(\varphi) \left( \frac{\gamma_{\text{в}} + 1}{4\gamma_{\text{в}}} \right)^2 \quad (3)$$

$\varphi$  – угол расширения продуктов детонации ВВ в зазоре, создающих УВ.

Плотность воздуха во фронте отраженной от стенок шпура УВ можно определить по формуле:

$$\rho_{\Phi УВ} = \rho_0 * \frac{6 * P_{\Phi УВ} + P_{УВпр}}{P_{\Phi УВ} + 6 * P_{УВпр}}, \text{ кг/м}^3.$$

Угол расширения продуктов детонации ВВ в зазоре, как известно из работы [5], не зависит от параметров детонации ВВ, а определяется показателем адиабаты воздуха с учетом его ионизации в зазоре. Предположительно его величина составляет порядка  $\varphi \approx 42^\circ$ , что подтверждается исследованиями, проведенными в работе [6], в которой получены фото разлета продуктов детонации при взрыве заряда ВВ в стеклянной трубе с радиальным зазором.

Зная угол встречи продуктов детонации ВВ и ударной волны со стенкой шпура, можно определить давление воздуха в зазоре за фронтом вновь образованной отраженной от стенок шпура ударной волны по формуле (2). Рассчитанный по формуле (3) коэффициент отражения при угле  $42^\circ$  составил  $k_{отр}=2,039$ .

Давление в отраженной от дна шпура ударной волне можно рассчитать по формуле [7]:

$$P_{отр} = 2 * P_{\Phi УВ} + \frac{6 * P_{\Phi УВ}^2}{P_{\Phi УВ} + 7}, \text{ Па.}$$

При этом параметры отраженной ударной волны определяем по следующим зависимостям:

плотность воздуха во фронте отраженной от дна шпура УВ -

$$\rho_{omp} = \rho_{\Phi UB} * \frac{6 * P_{omp} + P_{\Phi UB}}{P_{omp} + 6 * P_{\Phi UB}}, \text{ кг/м}^3;$$

скорость отраженной УВ -

$$U^2_{omp} = \frac{2(P_{omp} + P_{\Phi UBnp})}{\rho_{omp}(\gamma_{\epsilon} + 1)}, \text{ м/с};$$

температура в УВ -

$$T_{yB} = T_0 + \frac{2U^2_{yB}}{\sum C_p(T)} * \frac{\gamma_{\epsilon}}{(\gamma_{\epsilon} + 1)^2}, \text{ }^0\text{К}, \quad (4)$$

где  $C_p(T)$  – теплоемкость газов, находящихся в зазоре в шпуре, Дж/К\*моль;

Температура в отраженной УВ -

$$T_{omp} = T_{yB} \left( \frac{3\gamma_{\epsilon} - 1}{\gamma_{\epsilon}} \right), \text{ }^0\text{К}. \quad (5)$$

Произведем расчеты параметров ударной волны для условий, максимально приближенных к производственным: диаметр шпура  $d_{ш}=43$  мм, ВВ – аммонит №6 ЖВ. Диаметры патрона выберем стандартные ( $d_{п}=28, 32, 36$  мм),  $d_{п}=34$  мм, при котором коэффициент заряжения  $K_{зар}=0.63$  наиболее близок к оптимальному значению, и  $d_{п}=40$  мм – справа от экстремума в неоптимальных условиях.

Скорость детонации аммонита №6 ЖВ для выбранных диаметров зарядов рассчитаем по формуле [8] при плотности  $1.08 \text{ г/см}^3$ :

$$D = 5865,63 \left( \frac{\rho_{BB}}{\rho_{кр}} \right)^{0,513} \left\{ 1 - \exp \left[ -0,64345 \left( \frac{d_{BB}}{d_{кр}} \right) \right] \right\},$$

кристаллическая плотность аммонита №6 ЖВ составляет  $1.712 \text{ г/см}^3$ , а его критический диаметр детонации является функцией от плотности заряда и кристаллической плотности ВВ и определяется по формуле [8]:

$$d_{кр.} = 23,183 \left( \frac{\rho_{BB}}{\rho_{кр.}} \right)^{2,1947}, \text{ мм}$$

Скорость движения ударной волны в зазоре определяем с помощью зависимости (1). Результаты расчетов сведем в таблицу 4 и таблицу 5.

Таблица 4. Результаты расчета скорости детонации заряда ВВ и скорости движения ударной волны в зазоре в зависимости от диаметра заряда ВВ

Диаметр патрона ВВ, мм	28	32	34	36	40
Диаметр шпура, мм	43				
Коэффициент заряжения $K_{зар}$	0.42	0.55	0.63	0.70	0.87
Относительная скорость УВ $V_0$	1.121	1.059	1.048	1.054	1.118
Скорость детонации ВВ, м/с	4084	4227	4284	4334	4412
Скорость ударной волны в зазоре, м/с	4579	4478	4489	4567	4931



Таблица 5. Параметры отраженной от стенок и от дна шпура УВ

$d_n$ , мм	28	32	34	36	40
$P_{УВпр}$ , Па	11627145	11121107	11175196	11566821	13487874
$P_{ФУВ}$ , Па	23712090	22680090	22790398	23589068	27506812
$\rho_{ФУВ}$ , г/см <sup>3</sup>	2.01				
$P_{отр}$ , Па	189696681	181440679	182323146	188712508	220054457
$\rho_{отр}$ , г/см <sup>3</sup>	7.03				
$U_{отр}$ , м/с	4633	4531	4542	4620	4990

Учитывая, что воздух состоит в основном из 79% азота и 21% кислорода, суммарную теплоемкость воздуха будем рассчитывать как суммарную теплоемкость долей этих газов по следующим зависимостям:

для азота -

$$C_p(N_2)=29.443+0.0046*T-8.633*10^{-7}*T^2+5.7857*10^{-11}*T^3, \text{ Дж/К*моль};$$

для кислорода -

$$C_p(O_2)=31.904+0.00336*T-2.22759*10^{-7}*T^2, \text{ Дж/К*моль};$$

Суммарную теплоемкость 1 кг воздуха определим по формуле:

$$\sum C_p(T) = \frac{1000}{29} * (0.79 * C_p(N_2) + 0.21 * C_p(O_2)), \text{ Дж/К*кг},$$

Расчет температуры во фронте ударной волны будем производить методом итераций, подставляя рассчитанную по формуле (4) температуру в формулу расчета теплоемкости воздуха и повторяя расчет температуры с новым значением теплоемкости, пока разница между рассчитанной и скорректированной температурой не будет меньше заданной погрешности. Зададимся погрешностью 1<sup>0</sup>К, для рассчитанной температуры во фронте УВ определим температуру во фронте отраженной от дна шпура УВ по формуле (5), и расчеты сведем в таблицу 6.

Таблица 6. Результаты расчета температуры воздуха во фронте отраженной от стенок шпура и от дна шпура ударной волны в зазоре

	Диаметр патрона, мм				
	28	32	34	36	40
$D$ , м/с	4084	4228	4285	4334	4412
$U_{ФУВ}$ , м/с	4579	4478	4489	4567	4931
$T$ , <sup>0</sup> К	7657	7390	7419	7626	8556
$C_p(T)$ , Дж/К*кг	1413.1	1402.6	1403.7	1411.8	1460.9
$T_{ФУВ}$ , <sup>0</sup> К	7658	7390	7419	7626	8556
$T_{отр}$ , <sup>0</sup> К	16592	16012	16075	16523	18537

Расчет температур воздуха в отраженной от стенки шпура ударной волне показывает, что температура в зависимости от величины зазора находится в пределах от 7390 <sup>0</sup>К до 8556 <sup>0</sup>К. В случае еще одного отражения УВ от дна шпура температура в ней возрастает еще более и находится в пределах от

16012 °K до 18537 °K. При таких температурах воздух достаточно сильно ионизирован и представляет собой плазму.

До настоящего времени механизм действия канального эффекта на процесс детонации ВВ не рассматривался с позиций образования плазмы в радиальном зазоре между стенкой шпура и зарядом ВВ. Вполне очевидно, что он имеет ряд особенностей, на которые необходимо обратить внимание. Первая: в угольных шахтах шпуры после запираания забойкой заполняются метаном, который имеет гораздо большую теплоемкость, чем воздух. Вторая: метан при высоких температурах (более 1500...2000 °K) начинает заметно диссоциировать на углерод и водород. Третье: инертные пересыпки между патронами и в зазоре сильно увеличивают действие канальной ударной волны на процесс детонации ВВ, снижая устойчивость детонации заряда.

Развивая особенность действия канального эффекта по механизму образования плазмы в зазоре, уточним параметры ударных волн в зазоре для метана и параметры метановой плазмы.

При заполнении зазора между зарядом и стенками шпура метаном необходимо учитывать, что плотность метана равна  $\rho_0=0,676 \text{ кг/м}^3$ , а  $\gamma=1.08$ .

Тогда коэффициент отражения равен  $k_{отр}=2,057$ , остальные результаты расчетов сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Параметры отраженной от стенок и от дна шпура УВ при взрыве ВВ в метане

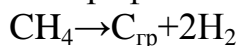
$d_n$ , мм	28	32	34	36	40
$P_{УВнр}$ , Па	6813060	6516541	6548235	6777712	7903375
$P_{ФУВ}$ , Па	14011886	13402059	13467242	13939190	16254253
$\rho_{ФУВ}$ , г/см <sup>3</sup>	1.12				
$P_{отр}$ , Па	112095043	107216428	107737893	111513478	130033979
$\rho_{отр}$ , г/см <sup>3</sup>	3.92				
$U_{отр}$ , м/с	4907	4799	4811	4894	5285

Далее рассчитаем температуру во фронте ударной волны для условий взрывания заряда ВВ в метане (табл. 8). При этом принимаем удельную теплоемкость метана:

$$C_p(\text{CH}_4)=34.789+0.0499*T-1.0128*10^{-5}*T^2+7.7962*10^{-10}*T^3, \text{ Дж/К*моль};$$

$$\sum C_p(T) = \frac{1000}{16} * C_p(\text{CH}_4), \text{ Дж/К*кг},$$

Расчет температуры метана во фронте УВ показывает, что за счет его более высокой теплоемкости температура во фронте ударной волны в 4 раза меньше, чем в воздухе, тем не менее, она достаточно высокая, чтобы вызвать диссоциацию метана с образованием графита и водорода:



и оказывать сильное тепловое и силовое воздействие на заряд ВВ.

Таблица 8. Результаты расчета температуры метана во фронте отраженной от стенок шпура и от дна шпура ударной волны в зазоре

	Диаметр патрона, мм				
	28	32	34	36	40
$D$ , м/с	4084	4228	4285	4334	4412
$U_{\phi UB}$ , м/с	4579	4478	4489	4567	4931
$T$ , °К	1977	1921	1927	1970	2178
$C_p(T)$ , Дж/К*кг	6242.5	6174.9	6182.3	6234.2	6467.6
$T_{\phi UB}$ , °К	1977	1921	1927	1970	2178
$T_{отр}$ , °К	4100	3985	3998	4087	4516

Результаты расчетов показали, что для шпуровых зарядов с патронами, обеспечивающими более оптимальный коэффициент заряжения ВВ в шпуре, получаются минимальные давления во фронте прямой, отраженной УВ и температуры в отраженной от стенок шпура и от дна шпура УВ. Это обеспечивает минимальное действие канального эффекта на детонирующий заряд ВВ, что минимизирует воздействие опережающей УВ на процесс детонации. Однако давление и температура во фронте как отраженной от стенок шпура, так особенно отраженной от дна шпура УВ, настолько велики, что это в определенных условиях может приводить к отказу детонации части шпурового заряда.

Фотографирование взрыва зарядов ВВ в макетах шпуров, заполненных метаном, проводил доктор Эрнст Эйцц. Фото эксперимента при детонации заряда ВВ в стеклянной трубе, заполненной метаном, представлено на рис. 4. Из результатов опытов четко видно «засветку» метана ударной волной, отраженной от стенок шпура и от дна шпура (рис. 4), что подтверждает рост давления и температуры в этих зонах и более сильное воздействие УВ на заряд ВВ. Это может негативно сказаться на устойчивости детонации шпурового заряда ВВ и привести к его неполной детонации.

Исследования А.Н. Дремина и Р. Ванден Берга [6] показали, что тепловое воздействие газовой плазмы за фронтом опережающей детонацию ВВ УВ достаточно высоко для того, чтобы приводить к спеканию части заряда (рис. 5, поз. 9).

Попытаемся определить зону возможной неполной детонации ВВ шпурового заряда. Для этого определим часть заряда ВВ между фронтом детонации и УВ при ее отражении от дна шпура, то есть место наиболее вероятной зоны прекращения детонации ВВ (рис. 6).

Ударная волна пройдет вдоль заряда до дна шпура расстояние  $l_3 = l'_3 + \Delta l$  со скоростью  $V$  за время  $t$ . За это же время детонационная волна пройдет расстояние  $l'_3 = D \cdot t$ . Тогда:

$$\begin{aligned} l_3 &= V \cdot t; \\ l'_3 &= D \cdot t; \\ \frac{l_3}{l'_3} &= \frac{V}{D} = V_0; \end{aligned}$$

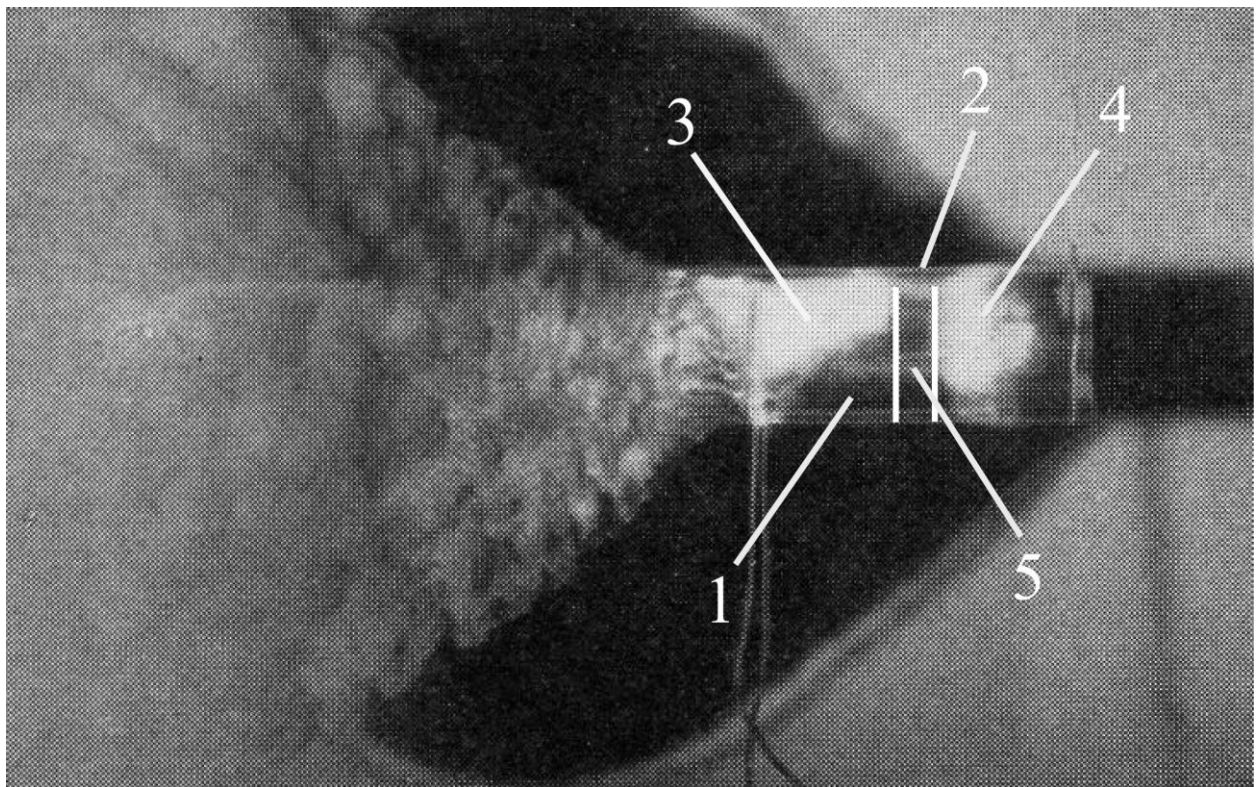


Рис. 4. Взрыв заряда ВВ в макете шпура, заполненном метаном  
 1 – ВВ; 2 – стеклянная труба; 3 – свечение метана от УВ, отраженной от стенок шпура; 4 – свечение метана от УВ, отраженной от дна шпура; 5 – предполагаемое место встречи детонационного фронта и отраженной от дна шпура УВ

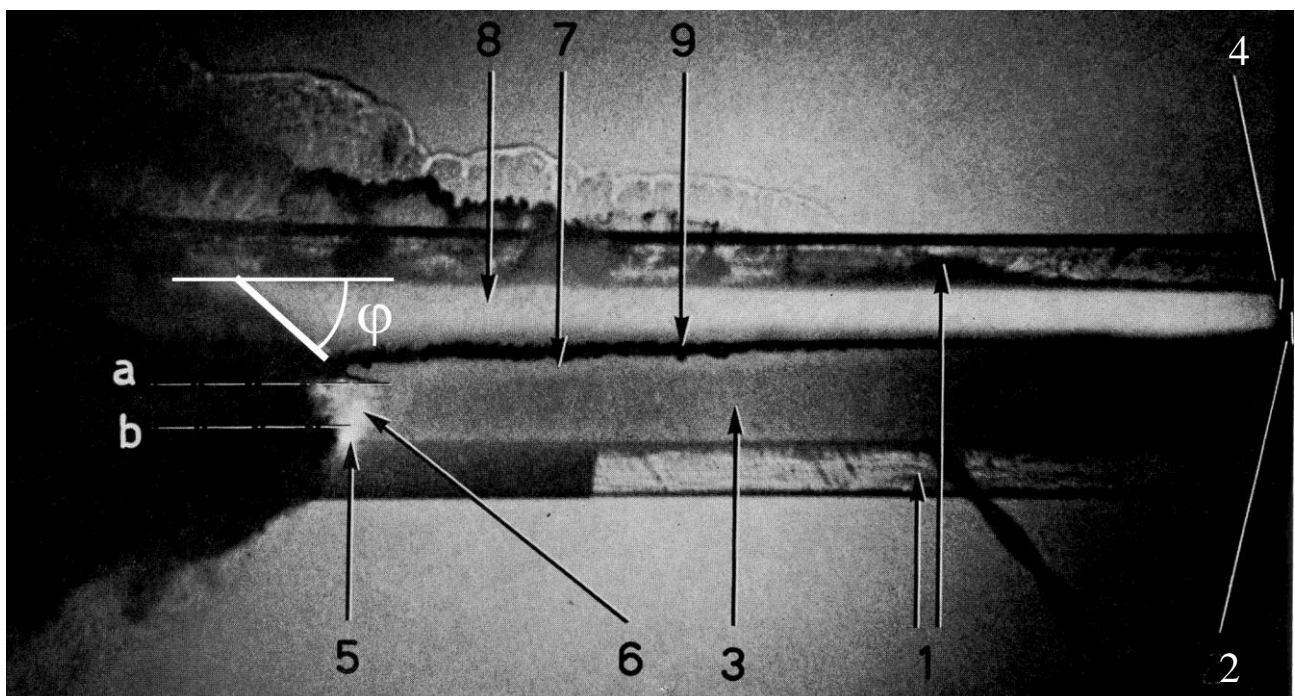


Рис. 5. Детонация заряда ВВ в шпуре с радиальным зазором  
 1 – стенки шпура; 2 – радиальный зазор; 3 – переуплотненное ударной волной ВВ; 4 – фронт ударной волны; 5 – ненарушенный фронт детонации; 6 – нарушенный переуплотнением ВВ фронт детонации; 7 – уплотненное ВВ; 8 – зона повышенного давления; 9 – зона спекания ВВ

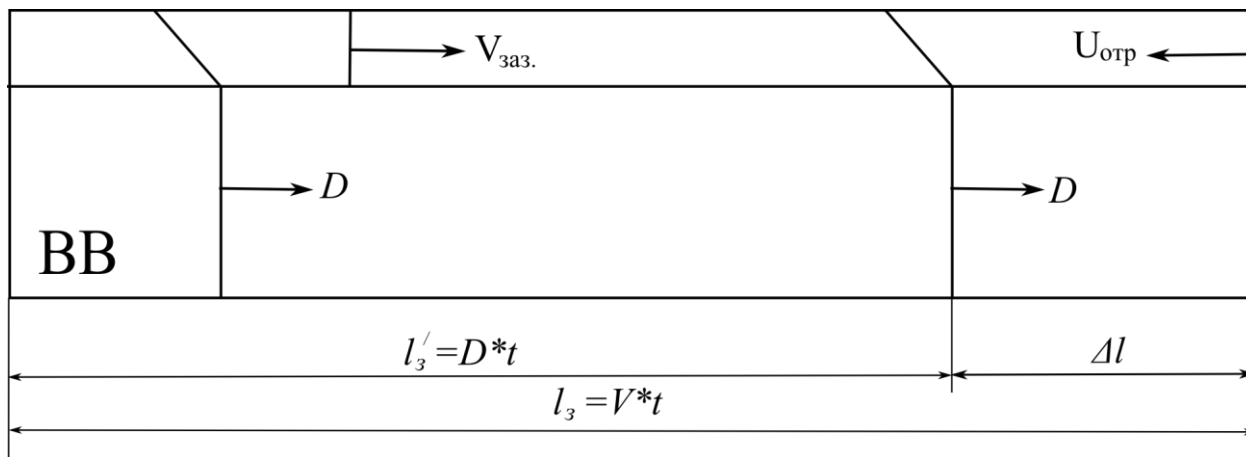


Рис. 6. Схема к определению зоны возможной неполной детонации

$$\begin{aligned}
 l_3 &= l'_3 + \Delta l; \\
 \Delta l &= l_3 - l'_3; \\
 l'_3 &= \frac{l_3}{V_0}; \\
 \Delta l &= l_3 \left( 1 - \frac{1}{V_0} \right); \\
 \frac{\Delta l}{l_3} &= 1 - \frac{1}{V_0}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Подставив уравнение (1) в уравнение (6), получим зависимость части длины шпурового заряда  $\frac{\Delta l}{l_3}$ , детонирующей после встречи УВ в зазоре с дном шпура, от коэффициента заряжения ВВ в шпуре. График этой зависимости показан на рис. 7:

$$\frac{\Delta l}{l_3} = \frac{0.297 + 0.764 * K_{зар} - 5.619 * K_{зар}^2 + 8.137 * K_{зар}^3 - 3.398 * K_{зар}^4}{1.297 + 0.764 * K_{зар} - 5.619 * K_{зар}^2 + 8.137 * K_{зар}^3 - 3.398 * K_{зар}^4}.$$

Как видно из графика, при оптимальном значении коэффициента заряжения шпура возможно затухание детонации ВВ примерно на 4,5% от общей длины шпурового заряда, а при неоптимальных значениях эта величина может возрасти до 15..20% от общей длины заряда.

Учитывая важность поднятого вопроса, возникла необходимость экспериментальной проверки влияния отраженной от дна шпура УВ на устойчивость детонации шпурового заряда ВВ. Была проведена серия экспериментов, схема которых представлена на рис. 8. Диаметр макета шпура составлял 45 мм, диаметр заряда – 32 мм. Коэффициент заряжения составил  $K_{зар}=0.51$ . Детонация инициировалась в двух патронах аммонита №6ЖВ разной длины, разделенных инертным промежутком из песка, причем инертный промежуток препятствовал передаче детонации от одного патрона другому. В одной серии экспериментов обеспечивалась встреча ударных волн над длинным патроном ВВ, во второй серии – над инертным промежутком. В каждом опыте измерялись скорости детонации зарядов ВВ и скорости движения УВ в зазоре

над зарядами. В предполагаемом месте встречи ударных волн над детонирующим патроном измерялась скорость детонации ВВ в длинном заряде. Были получены экспериментальные результаты, которые представлены на рис. 9 и 10.

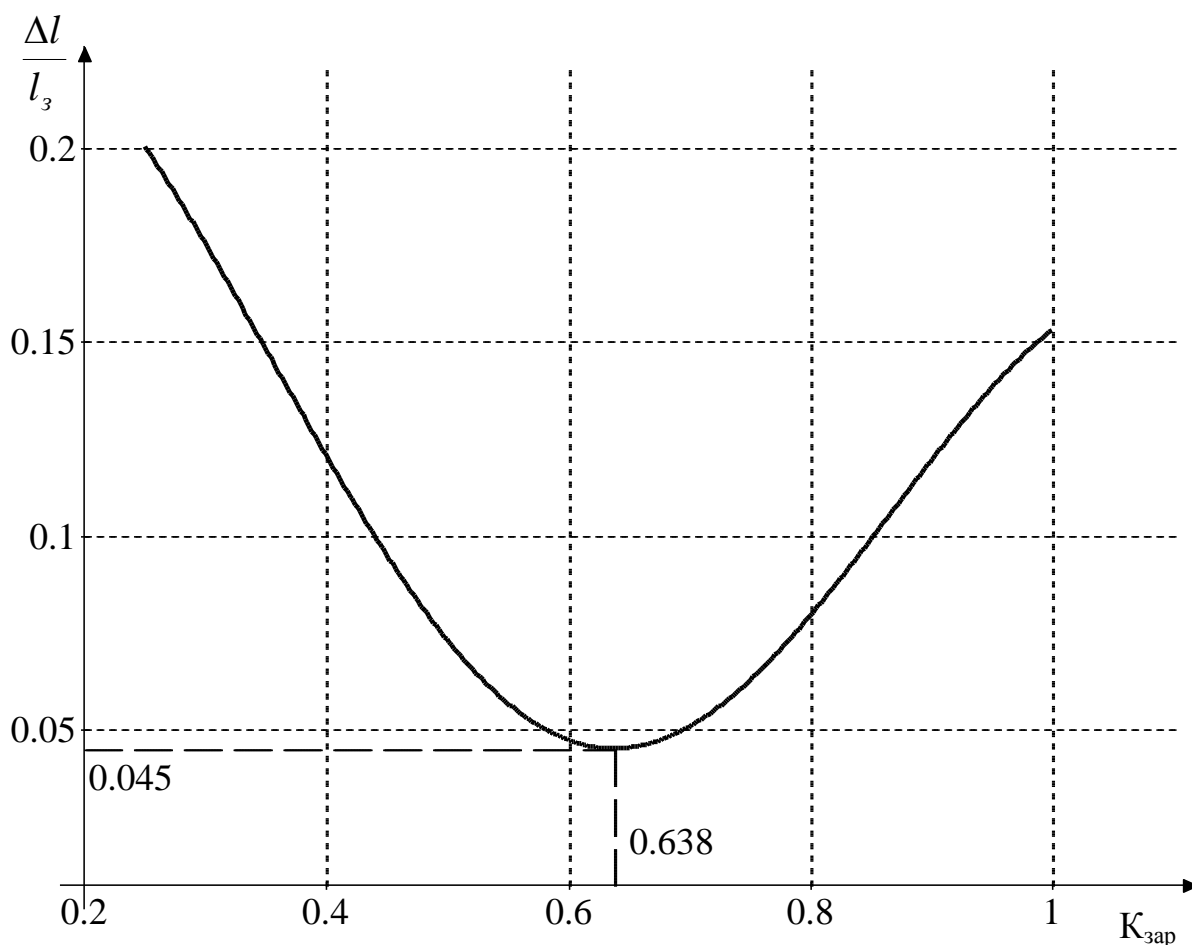


Рис. 7. Зависимость длины заряда ВВ, детонирующей после встречи отраженной ударной волны с дном шпура от коэффициента заряжения

На рис. 9 представлен результат опыта, когда встреча УВ в зазоре шпура произошла над длинным патроном ВВ, а на рис. 10 представлен результат опыта, когда встреча УВ произошла над инертным промежутком между патронами. Как видно из результатов, встреча и отражение УВ над патроном ВВ приводит к затуханию детонации в нем. Тогда как если встреча УВ происходит над инертным промежутком, то детонируют оба патрона с высокой скоростью детонации.

Таким образом, можно определить параметры ударных волн в точке их встречи исходя из скорости детонации патронов аммонита №6ЖВ и средней скорости движения УВ в зазоре шпура.

Для опыта со встречами УВ в зазоре шпура над зарядом ВВ получим следующие параметры:

$D_{ВВ1}=4571$  м/с;  $V_{ср}=(V_1+V_2)/2=4760$  м/с;  $P_{УВпр}=12564669$  Па;  $P_{ФУВ}=25624053$  Па;  $\rho_{ФУВ}=2.01$ ;  $P_{отр}=204992381$  Па;  $\rho_{отр}=7.03$ ;  $T_{ФУВ}=8127$  °К;  $T_{отр}=17609$  °К.

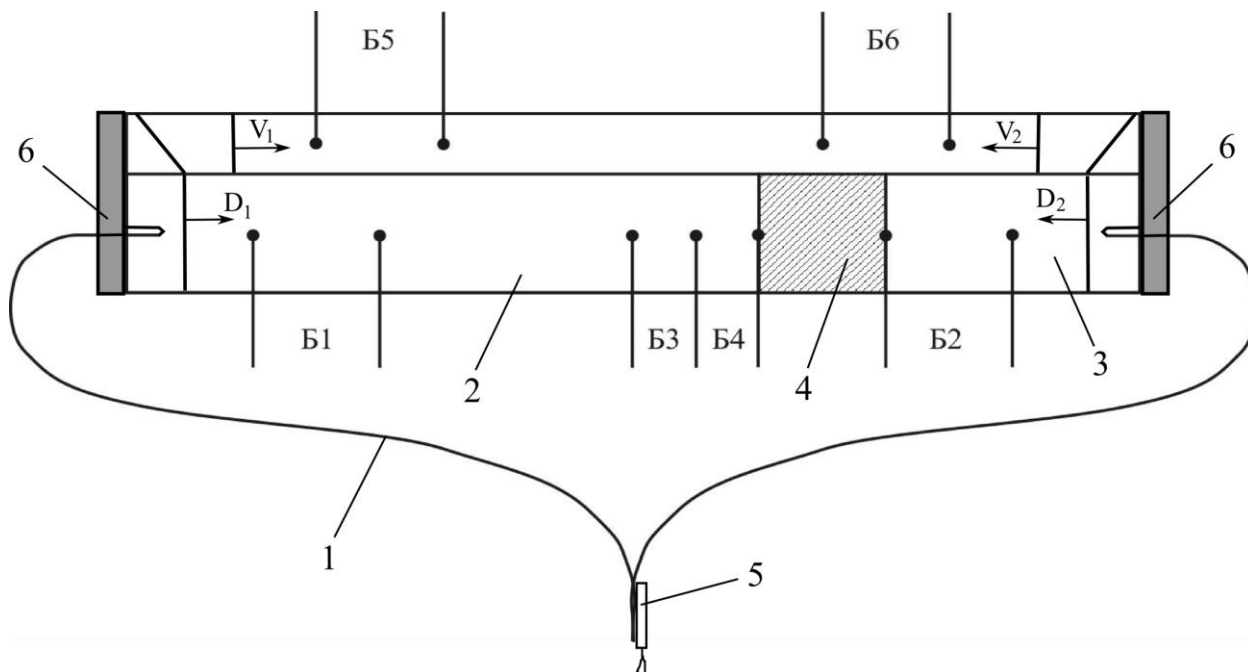


Рис. 8. Схема исследования столкновения УВ над не детонирующим зарядом  
 Б1..Б6 – базы измерения скорости детонации и распространения УВ; 1 – ДШ; 2 – длинный патрон ВВ; 3 – короткий патрон ВВ; 4 – инертный промежуток; 5 – ЭД; 6 - забойка

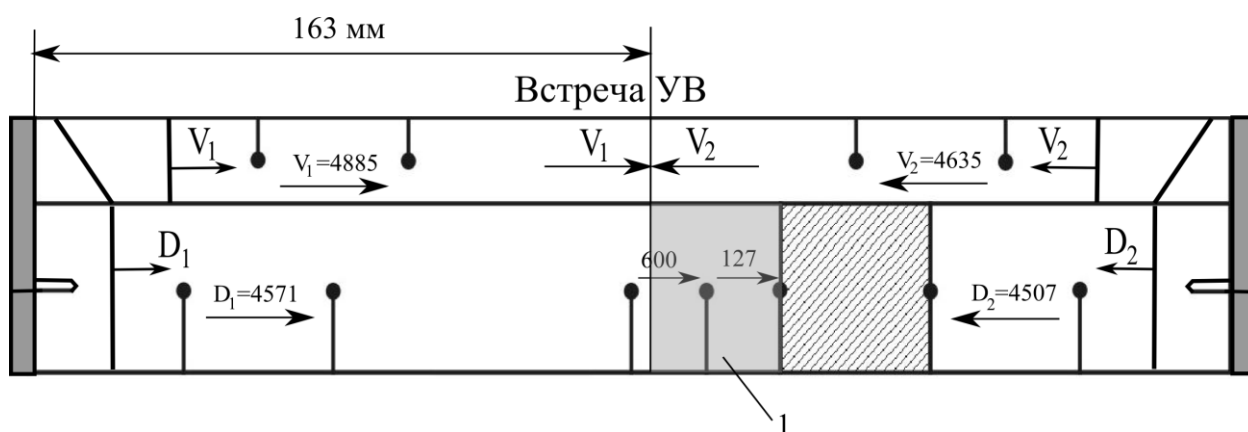
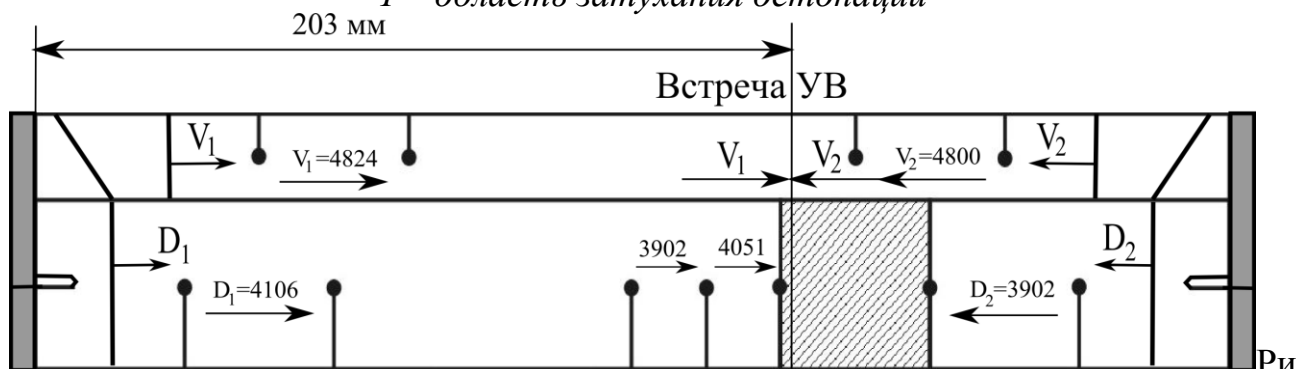


Рис. 9. Схема результата опыта, когда встреча ударных волн происходит над длинным детонирующим патроном  
 1 – область затухания детонации



с. 10. Встреча ударных волн над инертным промежутком

Для опыта со встречей УВ над инертным промежутком и полной детонацией длинного патрона ВВ:

$D_{ВВ1}=4106$  м/с;  $V_{ср}=(V_1+V_2)/2=4812$  м/с;  $P_{УВпр}=12840691$  Па;  $P_{ФУВ}=26186964$  Па;  $\rho_{ФУВ}=2.01$ ;  $P_{отр}=209495671$  Па;  $\rho_{отр}=7.03$ ;  $T_{ФУВ}=8259$  °К;  $T_{отр}=17894$  °К.

Полученные результаты позволяют установить следующее. Ударные волны, образующиеся в зазоре над детонирующим зарядом аммонита №6ЖВ, не всегда могут быть причиной затухания детонации шпурового заряда ВВ. В то же время отраженные ударные волны от преграды или дна шпура создают в зазоре шпура столь высокое давление и настолько сильно ионизируют газ, что он превращается в плазму. Плотная плазма динамически воздействует на заряд и уплотняет ВВ впереди детонационного фронта, чем выше давление, тем больше уплотнение. Получаемая плазма в зазоре шпура при отражении ударных волн имеет достаточно малый дебаевский радиус  $1,5 \cdot 10^{-4}$  см [9], поэтому плазму можно считать квазинейтральной, то есть разделение электрических зарядов в ней мало и несопоставимо с величиной зазора. Тем не менее, плазма с температурой около 18000 °К помимо давления на заряд ВВ создает мощный тепловой поток, который спекает и расплавляет частицы ВВ, а его расплав заполняет поровое пространство в заряде.

Рассчитаем величину теплового потока от плазмы на поверхность заряда ВВ по следующей формуле:

$$q_n = \pi^{-1} \sigma_c T^4, \text{ Вт/м}^2,$$

где  $\sigma_c$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>.

Для опыта встречи УВ над длинным патроном аммонита №6ЖВ:

$$q_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 176096^4 / \pi = 1735194516 \text{ Вт/м}^2.$$

Для опыта встречи УВ над инертным промежутком между патронами:

$$q_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 17894^4 / \pi = 1886768078 \text{ Вт/м}^2.$$

Как видно из расчета, при встрече УВ над ВВ тепловой поток составил 174 кВт/см<sup>2</sup>, что может приводить к расплавлению и спеканию еще не детонировавшей части заряда ВВ. Поэтому действие канального эффекта на устойчивость детонации ВВ в шпуровом заряде определяется не только динамическим уплотнением ВВ высокоплотной плазмой за фронтом отраженной УВ, но и ее тепловым потоком, вызывающим спекание ВВ и снижение его пористости.

## ВЫВОДЫ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при детонации заряда в зазоре шпура ударная волна создает высокое давление воздуха, которое может подпрессовывать ВВ до критической плотности, при которой развитие детонации ВВ неустойчиво. Давление газа в шпуре зависит от скорости распространения ударной волны в зазоре и угла встречи расширяющихся продуктов детонации ВВ со стенкой шпура;

- динамическое действие давления воздуха за фронтом ударной волны хотя и приводит к неравномерному переуплотнению ВВ впереди фронта детонации, но к нарушению детонации заряда может и не привести. Однако с увеличением времени воздействия избыточного давления, которое выше критического давления детонации ВВ, может произойти уменьшение диаметра ВВ вплоть до



критического, при котором детонация в заряде сама по себе неустойчивая, и тогда действие внешнего давления на устойчивость детонации заряда ВВ будет определяющим;

- давление во фронте отраженной ударной волны от дна шпура может приводить не только к переуплотнению заряда ВВ, но и к возникновению плотной плазмы в зазоре шпура над патроном ВВ, в этом случае высокая температура плазмы создает тепловой поток, который приводит к спеканию частиц еще не детонировавшего ВВ, что также может являться дополнительной причиной отказа детонации заряда ВВ в донной части шпура;

- величина заряда ВВ в донной части, подвергающегося действию высокотемпературной плазмы и высокому давлению во фронте отраженной УВ, зависит от коэффициента заряжания шпура и при его оптимальном значении равна 4,5%, а в крайних случаях до 15..20% от общей длины шпурового заряда.

Дальнейшие работы необходимо проводить по изучению воздействия внешней плазмы на процесс детонации заряда ВВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Калякин. Исследование передачи детонации между патронами взрывчатых веществ в рассредоточенном заряде / Калякин С.А., Лабинский К.Н. / Высокоэнергетическая обработка материалов: Сб. научн. статей. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 50-59
2. И.А. Артеменко. Исследование скорости детонации шпуровых зарядов антигризутных взрывчатых веществ. М.: Углетехиздат, 1950. – 20 С.
3. К. Бауман. Исследование скорости детонации взрывчатых веществ в условиях горных взрывных работ. М. Госгортехиздат, 1962. – 64 с.
4. И.Ф. Кобылкин Ударные и детонационные волны. Методы и исследования / Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., Соловьев В.Е., Сысоев Н.Н. – М.: Физматлит, 2004.– 875 с.
5. Л.П. Орленко. Физика взрыва и удара: Учебник для вузов / М.: Физматлит., 2008. – 304 С.
6. A.N. Dremin Etude sur l'arret de la detonation par l'effet du canal / A.N. Dremin, R. Vanden Berghe / Explosifs, №1, 1968.– P. 5-23.
7. А.Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968. – 255 с.
8. С.А. Калякин. Исследование неидеальных режимов детонации промышленных ВВ / Калякин С.А., Лабинский К.Н. // Вестник КДПУ им. М. Остроградского. Вып. 6/2009. Ч.1. – Кременчуг, 2009. – С159-165.
9. Л.А. Арцимович. Физика плазмы для физиков / Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. / М.: Атомиздат, 1979. – 320 с.

#### REFERENCES

1. S.A. Kalyakin. Researching of transmitting of detonation between the charges of explosives in dispersed charge / Kalyakin S.A., Labinskiy K.N. / High-energetic processing of the materials: Comp. of scient. Articles. – Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2009. – P. 50-59

2. I.A. Artyemenko. Researching of detonation speed of blast-hole charges of permissible explosives. M.: Ugletehizdat, 1950. – 20 p.
3. K. Bauman. Researching of detonation speed in conditions of mine explosive works. M. Gosgortehizdat, 1962. – 64 p.
4. I.F. Kobylkin. Shock and detonation waves. Methods and researching / Kobylkin I.F., Selivanov V.V., Solovyev V.E., Sysoev N.N. – M.: Fizmatlit, 2004.– 875 p.
5. L.P. Orlenko. Physics of explosion and impact: Tutorial / M.: Fizmatlit., 2008. – 304 p.
6. A.N. Dremin Etude sur l'arret de la detonation par l'effet du canal / A.N. Dremin, R. Vanden Berghe / Explosifs, №1, 1968.– P. 5-23.
7. A.F. Belyaev. Flammation, detonation and work of explosion of condensate systems. M.: Science, 1968. – 255 p.
8. S.A. Kalyakin. Researching of non-ideal regimes of detonation of industrial explosives / Kalyakin S.A., Labinskiy K.N. // Vistnyk KDU im. Ostrogradskogo. Iss. 6/2009. Part 1. – Kremenichug, 2009. – P. 159-165.
9. L.A. Arcimovich. Physics of plasma for the physicals / Arcimovich L.A., Sagdeev R.Z. / M.: Atomizdat, 1979. – 320 p.

## **THE RESEARCH OF THE CHANNEL EFFECT IMPACT ON THE PROCESS OF DETONATION DAMPING IN THE BLAST-HOLE**

**S. Kalyakin, K. Labinskiy**

Donetsk state technical university

Artyoma str., 58, 83001, Donetsk, Ukraine.

E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)

Results of the research of the dependence of the movement speed of shock wave in the gap between the wall of the blast-hole and the external surface of the blast-hole from the detonation velocity and the hole charging coefficient are given in the article. The parameters of the shock wave reflecting from the walls and from the bottom of the blast-hole influencing the blast-hole charge are determined. It is shown, that the gas plasma is generated behind the front of the reflecting shock wave, the heat flow influences the charge and sinters the explosive. The length of the charge in the bottom part of the blast-hole where the dumping of detonation is possible in the result of compaction and sintering of explosives depending on the detonation velocity and the hole charging coefficient is determined.

**Keywords:** detonation velocity, reflected shock wave, hole charging coefficient, plasma, channel effect, sintering of explosives, dumping of explosive's detonation

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАНАЛЬНОГО ЕФЕКТУ НА ПРОЦЕС ЗАТУХАННЯ ДЕТОНАЦІЇ ВР У ШПУРІ**

**С.О. Калякін, К.М. Лабінський**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, 83001, м. Донецьк, Україна.

E-mail: [bootor@gmail.com](mailto:bootor@gmail.com)

У статті наведені результати досліджень залежності швидкості руху ударної хвилі у зазорі між стінками шпуру та боковою поверхнею шпурового заряду від

швидкості детонації ВР та коефіцієнта заряджання шпуру. Визначені параметри віддзеркаленої від стінок шпуру ударної хвилі, що діє на заряд ВР. Показано, що за фронтом віддзеркаленої ударної хвилі утворюється газова плазма, тепловий потік якої діє на заряд та призводить до спікання ВР. Встановлена величина шпурового заряду ВР у донній частині, де можливе затухання детонації у результаті ущільнення та спікання ВР в залежності від швидкості детонації ВР та його коефіцієнту заряджання.

**Ключові слова:** швидкість детонації, віддзеркалена ударна хвиля, коефіцієнт заряджання ВР, плазма, канальний ефект, спікання ВР, затухання детонації заряду.