

Влияния структурных дефектов заряда взрывчатого вещества на эволюцию детонационной волны

77-30569/291243

12, декабрь 2011

Козырев А. В., Соловьев В. С.

УДК 623.4.08

МГТУ им. Н.Э. Баумана
sm4@sm.bmstu.ru

Несовершенство технологии снаряжения средств поражения и боеприпасов взрывчатым веществом (ВВ), а так же эксплуатационные и функциональные воздействия на заряд до его санкционированного подрыва в составе изделия являются причинами появления дефектов структуры ВВ. Структурные неоднородности можно условно разделить на локальные и распределенные по объему заряда ВВ. К локальным дефектам относятся поры, свищи, компактные инертные включения, трещины, зазоры, отслоения, непрочности и т. п. Распределенные дефекты носят характер разнородности заряда, а также флуктуаций процентного содержания компонент смесевых ВВ.

Влияние структурных дефектов заряда ВВ на процесс распространения детонации сводится к искажению формы фронта детонационной волны (ДВ) и появлению зафронтальной неоднородности потока продуктов взрыва. Это в свою очередь приводит к дестабилизации пространственно-временных характеристик процесса передачи-отбора энергии от продуктов детонации нагружаемыми элементами конструкции средств поражения и боеприпасов и уменьшению их поражающего действия.

В настоящей работе путем численного моделирования проанализирован механизм влияния компактных и плоских дефектов структуры заряда ВВ на эволюцию фронта ДВ. Установлены количественные характеристики возмущений фронта ДВ, генерируемых инертными включениями в исходном ВВ с различной акустической жесткостью, а также плоскими полыми дефектами в виде щелей ориентированных под различными углами к направлению распространения детонации.

1. Влияние газовых полостей и инертных включений

Степень влияния полых сферических дефектов в литых зарядах тротил-гексогена на геометрические характеристики ДВ экспериментально исследовалась коллективом авторов [1] методом высокоскоростной фоторегистрации свечения выхода фронта на торец заряда. Установлено, что при нахождении дефекта диаметром $d_{pore} = 5...10$ мм на глубине $(1...2)d_{pore}$ наблюдается осевой выброс на фронте ДВ и более слабое свечение продуктов детонации за фронтом в этой области. С увеличением глубины расположения дефекта происходит нормализация формы фронта ДВ. При удалении дефекта от торца на расстояние $(4...6)d_{pore}$ от торца заряда, его влияние проявляется в уменьшении кривизны фронта ДВ на оси заряда.

Выявлено, что заполнение полостей дефектов инертным наполнителем типа церезина или вазелина снижает их влияние на характеристики детонационного течения в $5...15$ раз.

В настоящей работе методом численного моделирования, изложенным в [2], исследовалось влияние *воздушных пор и инертных включений* в заряде флегматизированного октогена (*октоген/нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%*, $\rho_0=1.84 \text{ г/см}^3$) на эволюцию фронта ДВ.

Вычислительные эксперименты проводились в рамках двумерной осесимметричной схемы взаимодействия плоской ДВ со сферической воздушной порой или инертным включением, диаметр которых варьировался в диапазоне $d_{\text{pore}}=0,25 \dots 2,5 \text{ мм}$.

Детальное исследование газодинамических особенностей процесса взаимодействия плоской ДВ со *сферической воздушной полостью* выявило следующие основные этапы (рис. 1, 2).

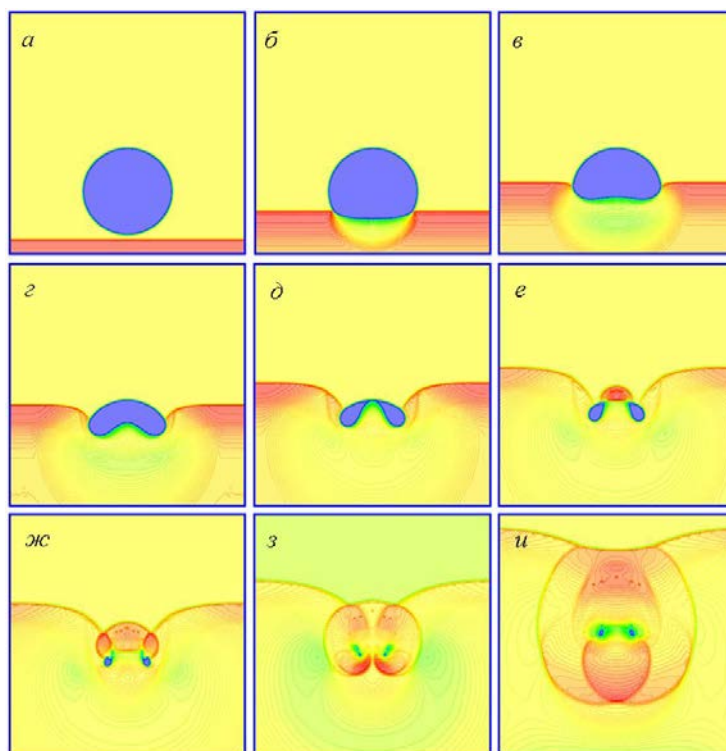


Рис. 1. Растровые изображения распределения плотности среды в последовательные моменты времени при прохождении плоской ДВ воздушной сферической поры

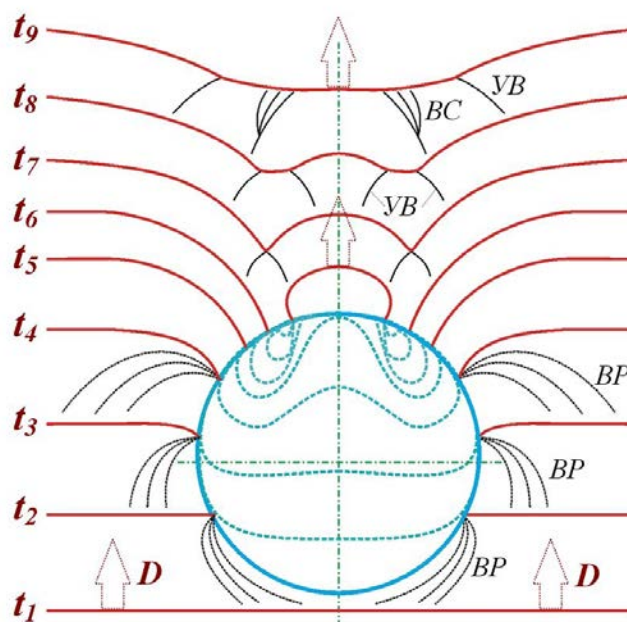


Рис. 2. Поэтапная схема процесса взаимодействия плоской ДВ со сферической газовой полостью в заряде ВВ: *UB* – ударная волна, *BP* – волна разряжения, *BC* – волна сжатия

1) В начальной фазе процесса взаимодействия в окрестности дна сферической полости происходит отражения ДВ от существенно менее жесткой границы сильной волной разряжения. При этом характерно, что пока угол α между касательной к поверхности границы поры и нормалью к фронту ДВ превышает критического значения χ , участки ДВ в окрестности дефекта изолированы от влияния границы и поверхность фронта остается невозмущенной (рис. 1 б). Область влияния возмущенных участков фронта ДВ на соседние характеризуется полууглом характеристического коноида χ (рис. 3). В первом приближении тангенс χ можно вычислить через отношение скорости распространения акустических возмущений вдоль фронта ДВ к ее нормальной скорости [3]: $\tan(\chi) = \lambda(D)/D$, где

$$\lambda^2 = \frac{\rho c^2 u}{dp/dD + \rho_0 D du/dD} = \frac{2D^2}{3(k+1)/k - 2d \ln k / d \ln D},$$

ρ_0, ρ – начальная плотность ВВ и плотность за фронтом ДВ, соответственно, c – скорость звука, u – массовая скорость вещества за фронтом ДВ, k – показатель политропы продуктов детонации в плоскости Чепмена-Жуге.

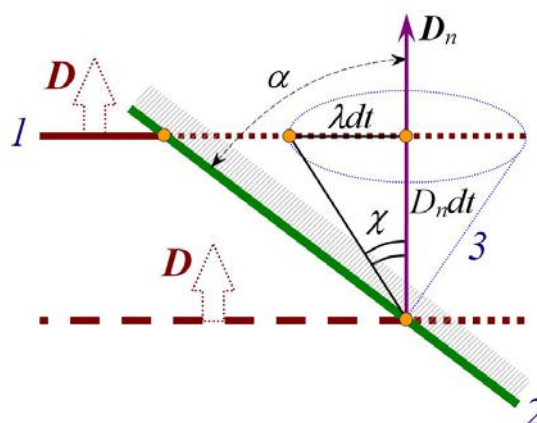


Рис. 3. Схема ориентации областей участков ДВ на границе области ВВ:
1 – фронт ДВ, 2 – граница области ВВ, 3 – касательная к границе области ВВ,
4 – образующая характеристического коноида

2) По мере дальнейшего продвижения ДВ вдоль сферической поры, угол α взаимодействия фронта с границей уменьшается, и при значениях меньших χ возмущения разряжения со стороны границы с акустически менее жесткой средой начинают оказывать воздействие на течение за фронтом ДВ в радиальном направлении. Происходит локальное торможение участков ДВ в окрестности поры, волновая поверхность искривляется с тенденцией достижения условия звукового течения за фронтом в точке на границе раздела сред (звуковой угол α^*) (рис. 1 в-д) [4]

$$\alpha^* = \text{arccctg} \left(\frac{D_n^2}{(D_n - u) \sqrt{bu(2D_n + bu)}} \right),$$

где D_n – нормальная составляющая скорости детонационного фронта, u – приращение массовой скорости за фронтом ДВ, a , b – эмпирические коэффициенты ударной адиабаты ВВ в форме $D_n = a + bu$.

3) Параллельно с описанными волновыми эффектами (пункты 1 и 2) в придонной области поры формируется высокоскоростной струйный выплеск продуктов детонации, заполняющий внутренний объем поры и, в заключительной фазе процесса ее схлопывания, обгоняющий участки фронта ДВ вблизи границы раздела сред (рис. 1 г-д).

4) При взаимодействии струи продуктов детонации с противоположащими (по ходу движения ДВ) слоями ВВ формируется вторичная пересжатая ДВ, которая, в свою очередь, взаимодействует с падающей ДВ через маховскую конфигурацию кольцевой формы, формирует за сферическим дефектом сплошной локально искривленный фронт (рис. 1 е-и).

Серия проведенных вычислительных экспериментов с различными размерами макропор в оговоренном диапазоне значений показала, что полное сглаживание характеристик потока наблюдается на расстоянии в 10...15 раз превышающем характерный размер дефекта. Зависимость амплитуды геометрических возмущений на поверхности фронта ДВ, создаваемых сферической воздушной полостью, от относительного расстояния, пройденного ДВ, представлена рис. 4.

Экспериментальное подтверждение сделанным выводам приведено на рис. 5 и 6 из [5], где рентгенографически зафиксировано отсутствие заметных возмущений формы фронта ДВ после прохождения ею серии каналов квадратного поперечного сечения со стороной 1.58 мм, выполненных в зарядах флегматизированного октогена и сплава ТГ-40/60.

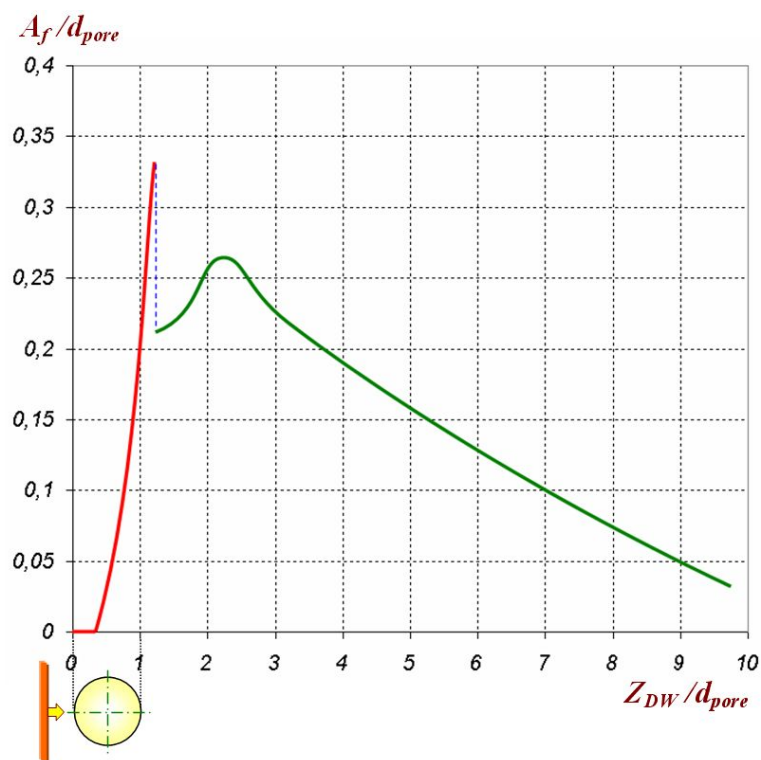


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды возмущения фронта детонационной волны A_f/d_{pore} , образующегося при прохождении поры диаметром d_{pore} от безразмерной дистанции Z_{DW}/d_{pore}

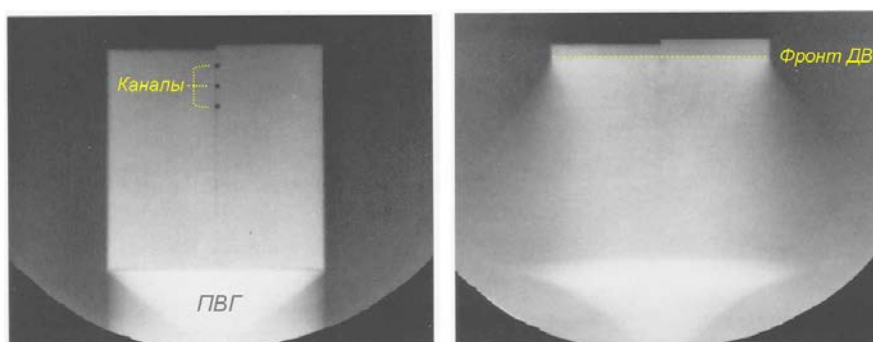


Рис. 5. Прохождение ДВ серии из 3-х каналов квадратного сечения со стороной 1.58 мм в заряде флегматизированного октогена (PBX-9404, $\rho_0=1.84$ г/см³) [5]

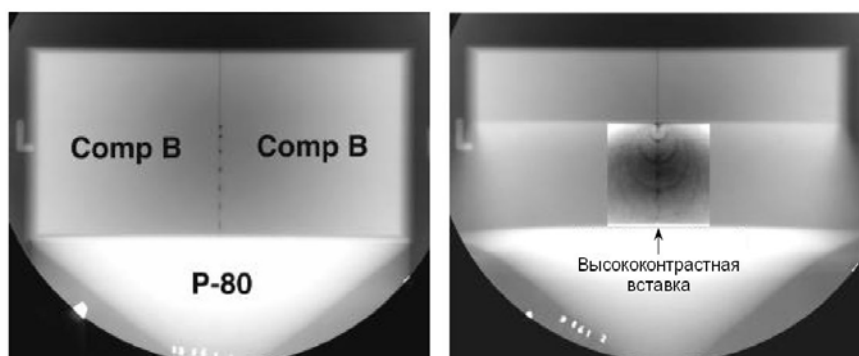


Рис. 6. Прохождение ДВ серии из 7-х каналов квадратного сечения со стороной 1.58 мм в литом заряде типа ТГ-40/60 (Comp B) [5]

Исследование газодинамических особенностей процесса взаимодействия плоской ДВ с акустически более *жестким инертным включением* сферической формы выявило следующие основные этапы (рис. 7 и 8).

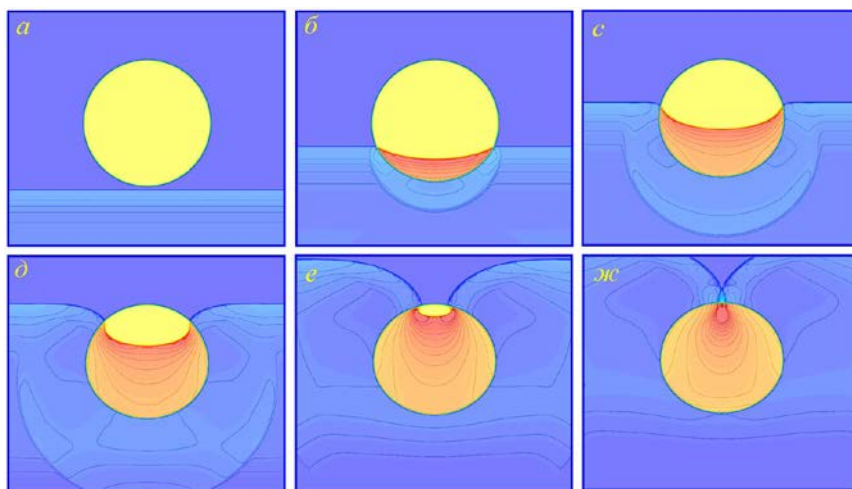


Рис. 7. Растровые изображения распределения плотности среды в последовательные моменты времени при прохождении плоской ДВ жесткого инертного включения сферической формы

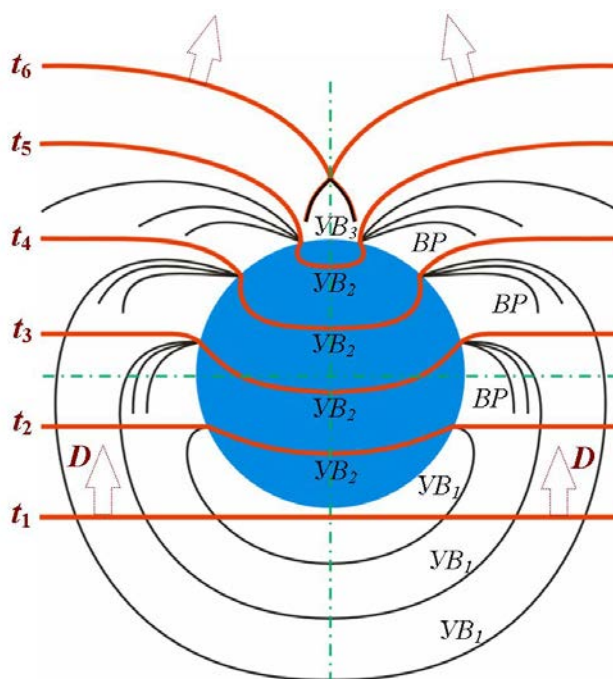


Рис. 8. Поэтапная схема процесса взаимодействия плоской ДВ со сферическим инертным включением меньшей чем у ВВ ударной сжимаемостью: UB_1 , UB_3 – отраженные ударные волны в продукты детонации, UB_2 – проходящая ударная волна в дефекте, BP – центрированная косая волна разряжения

1) На начальном этапе при взаимодействии ДВ с более жесткой границей в окрестности оси симметрии происходит распад разрыва: формирование проходящей и отраженной ударных волн в жестком инертном включении и продуктах детонации, соответственно (рис. 7 а). При этом характерно (аналогично случаю с газовой полостью), что пока угол α между касательной к поверхности границы сред и нормалью к фронту ДВ превышает критического значения χ , участки ДВ в окрестности дефекта изолированы

от влияния более жесткой границы, и поверхность фронта остается невозмущенной (рис. 7 б).

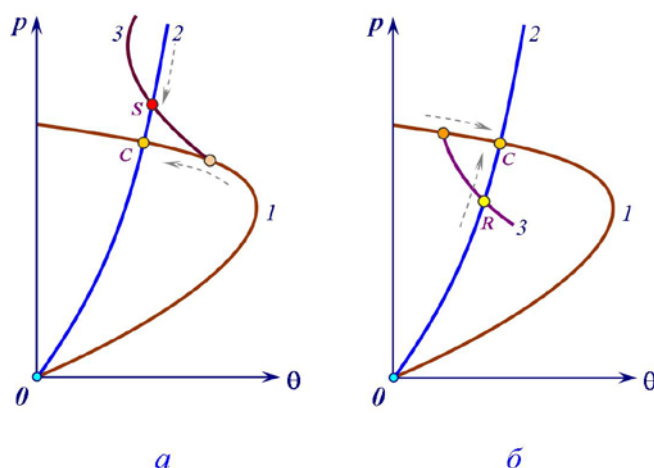


Рис. 9. Качественный ударно-полярный анализ нестационарного взаимодействия ДВ с акустически более жесткой границей под различными углами: *1* – ударная поляра ВВ; *2* – ударная поляра инертной среды; *3 (а)* – поляра разгрузки ударно-сжатого ВВ; *3 (б)* – поляра двойного сжатия ВВ; *С* – состояние на границе раздела сред при безотражательном взаимодействии; *С* – состояние на границе раздела сред при отражении ударной волны в регулярном режиме; *В* – состояние на границе раздела сред при отражении волны разряжения

2) По мере дальнейшего продвижения ДВ вдоль жесткого инертного включения угол взаимодействия с границей α уменьшается, и при значениях меньших χ возмущения сжатия со стороны границы с акустически более жесткой средой начинают оказывать воздействие на течение за фронтом ДВ в радиальном направлении. Происходит ускорение разложения на участках ДВ в окрестности границы с порой, фронт выпучивается, усиливая геометрическую тенденцию достижения угла безотражательного взаимодействия (рис. 7 в-д, рис. 9 а).

3) По мере дальнейшего уменьшения угла α ниже значения, соответствующего режиму безотражательного взаимодействия, характер распада разрыва с генерацией ударных волн в обеих средах сменяется режимом течения Прандтля-Майера в области продуктов детонации [6]. При этом возмущения разряжения, обусловленные дифракцией реагирующего потока, вызывают локальное торможение участков ДВ в окрестности границы с инертным включением, и фронт ДВ искривляется (рис. 9 б).

4) Окончательно процесс дифракции ДВ на дефекте завершается встречным осевым взаимодействием противолежащих участков ДВ в регулярном режиме. По мере увеличения угла взаимодействия ДВ регулярный режим отражения сменяется маховским, через который происходит постепенное выравнивание локального излома на поверхности фронта, обусловленного прохождением жесткого инертного включения.

Серия проведенных вычислительных экспериментов с различными размерами инертных включений в оговоренном диапазоне значений показала, что полное сглаживание характеристик потока наблюдается на расстоянии в 8...12 раз превышающем характерный размер дефекта.

Зависимость амплитуды геометрических возмущений на поверхности фронта ДВ, возникающих при взаимодействии с жестким инертным сферическим включением, от относительного расстояния, пройденного ДВ, представлена рис. 10.

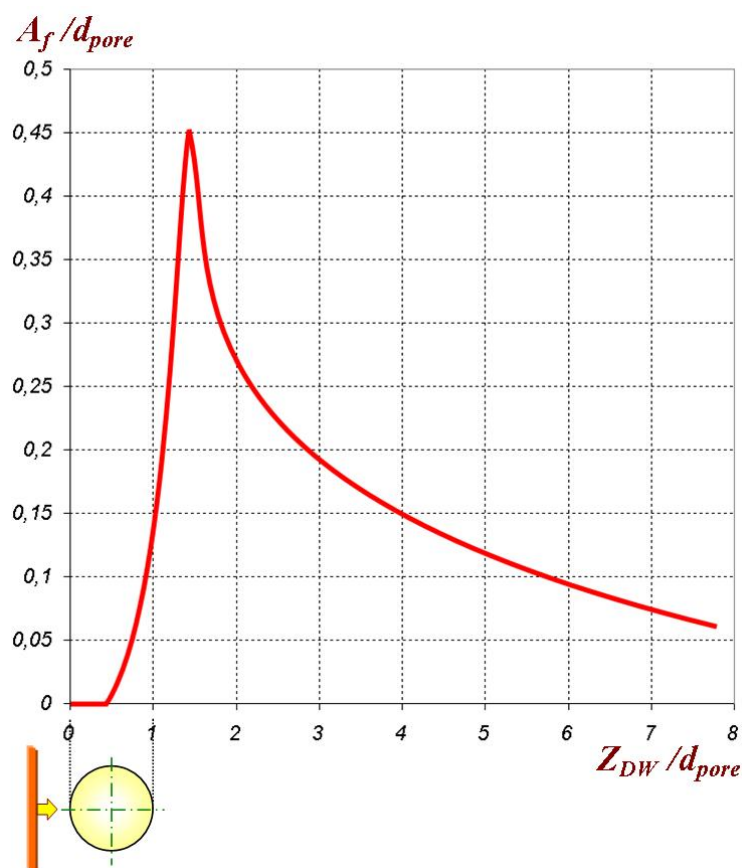


Рис. 10. Зависимость относительной амплитуды возмущения фронта детонационной волны A_f/d_{pore} , образующегося при прохождении жесткого сферического включения диаметром d_{pore} от безразмерной дистанции Z_{DW}/d_{pore}

Исследование механизма взаимодействия плоской ДВ со сферическим *инертным включением*, характеризующимся *ударной сжимаемостью идентичной исходному ВВ* (рис. 11), выявило следующие основные газодинамические особенности (рис. 12). При взаимодействии ДВ с границей раздела сред наблюдается преимущественно безотражательный режим ударно-волнового сжатия дефекта. При этом в область продуктов детонации за фронтом ДВ в окрестности границы отражается простая волна разряжения, обусловленная отсутствием выделения химической энергии в объеме, занимаемом инертным включением.

Анализ распределения характеристик потока реагирующей среды по завершению процесса дифракции ДВ инертном включении показал отсутствие существенного влияния данного типа дефектов на форму фронта ДВ и распределение параметров потока продуктов разложения за ним.

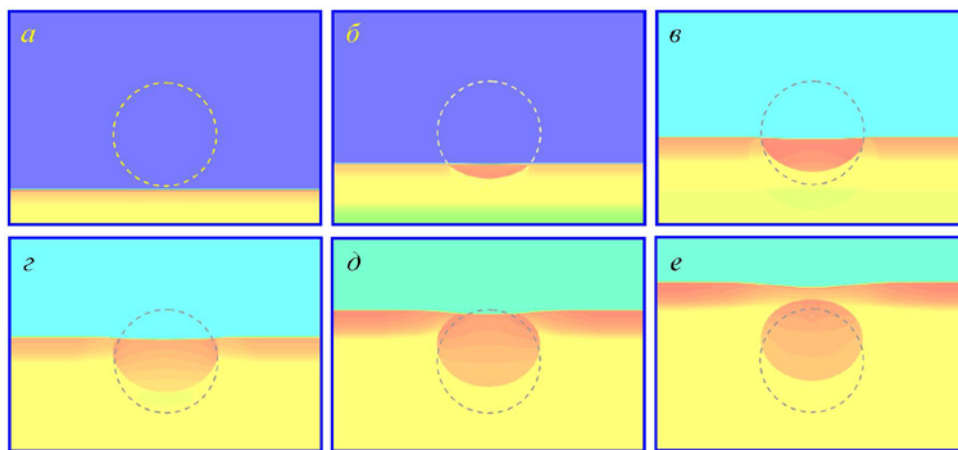


Рис. 11. Растровые изображения распределения плотности среды в последовательные моменты времени при прохождении плоской ДВ сферического инертного включения с ударной сжимаемостью идентичной исходному ВВ

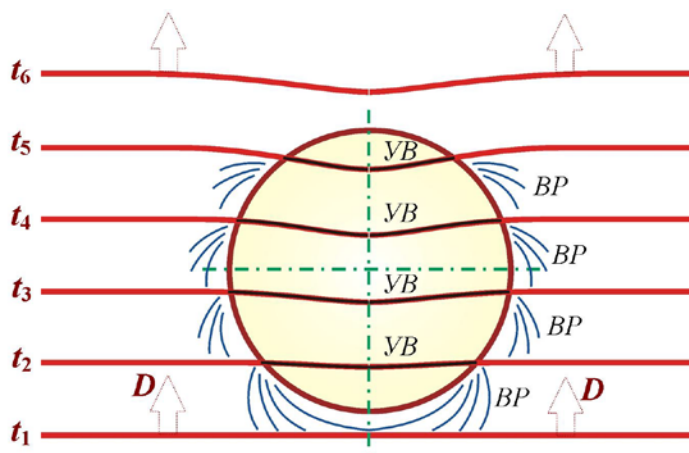


Рис. 12. Поэтапная схема процесса взаимодействия плоской ДВ со сферическим инертным включением с ударной сжимаемостью идентичной исходному ВВ:
УВ - проходящая ударная волна в дефекте, *ВР* – простая волна разряжения

Зависимость амплитуды геометрических возмущений на поверхности фронта ДВ, возникающих при безотражательном взаимодействии с инертным сферическим включением, от относительного расстояния, пройденного ДВ, представлена рис. 13.

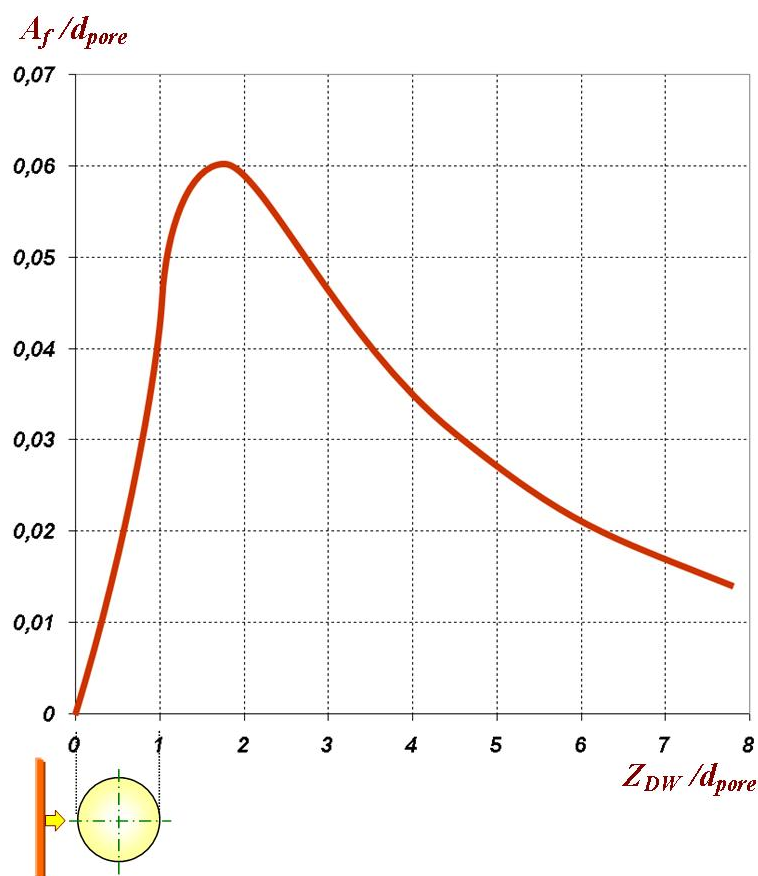


Рис. 13. Зависимость относительной амплитуды возмущения фронта детонационной волны A_f/d_{pore} , образующегося при прохождении инертного включения диаметром d_{pore} от безразмерной дистанции Z_{DW}/d_{pore}

Таким образом, исходя из результатов численного моделирования и существующих экспериментальных данных, можно констатировать, что пространственный масштаб генерируемых точечными дефектами флуктуаций потока и характерные времена их существования значительно меньше пространственно-временного масштаба распространения ДВ по всему заряду ВВ, а их влияние на эволюцию детонационного течения может не учитываться.

2. Влияние узких зазоров и трещин

В зависимости от ориентации плоских дефектов (*щелей*) в заряде ВВ по отношению к направлению распространения ДВ можно выделить три их основные категории: *перпендикулярные* ($\varepsilon=90^\circ$) (рис. 14 а), *параллельные* ($\varepsilon=0^\circ$) (рис. 14 б) и *наклоненные под острым углом* ($0<\varepsilon<90^\circ$) щели (рис. 14 в).

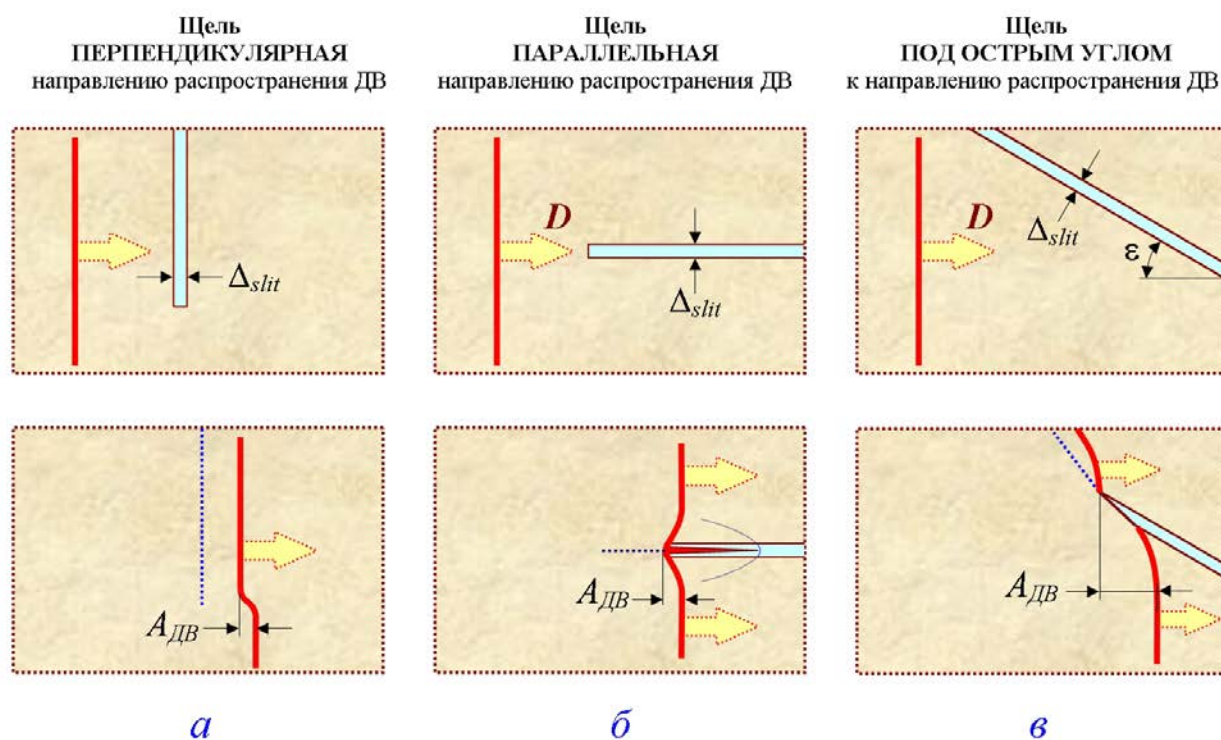


Рис. 14. Варианты ориентации щелей в заряде ВВ относительно направления распространения ДВ: *а)* - перпендикулярная, *б)* - параллельная, *в)* - наклоненная под острым углом

Вопрос о механизме влияния узких зазоров и трещин в объеме ВВ (*плоских дефектов*) на характеристики развития детонационного процесса в зарядах ВВ на сегодняшний день по многим позициям остается открытым.

Результаты взаимодействия ДВ с искусственно смоделированными трещинами (*щелями*) различной ширины и ориентации относительно направления распространения детонации для некоторых взрывчатых составов фиксировались по средствам рентгенографической и высокоскоростной фотосъемки [5]. Фоторегистрация искажений геометрических характеристик поверхности фронта ДВ при прохождении трещины переменной ширины 120...250 мкм в брикете пластифицированного ТАТБ представлена на рис. 15 [7].

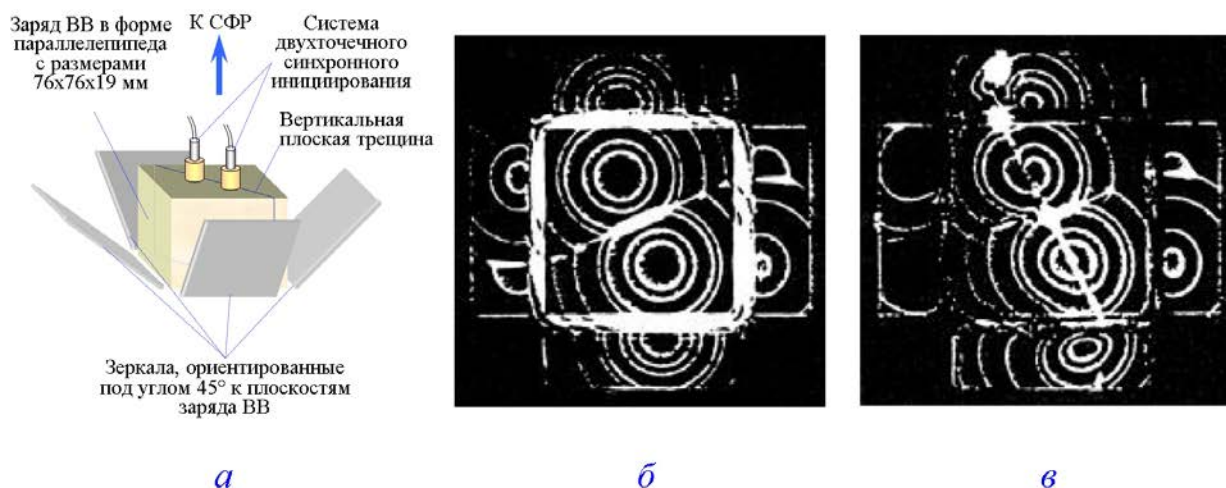


Рис. 15. Мультипликационное изображение свечения выхода фронта ДВ плоские грани заряда РВХ-9502 (ТАТБ/флуорополимер (Kel-F 800) 95/5%, $\rho_0=1.895 \text{ г/см}^3$):

- а)* - схема экспериментальной сборки; *б)* - мультипликационное изображение свечения выхода фронта ДВ при детонации монолитного заряда;
в) - мультипликационное изображение свечения выхода фронта ДВ при детонации заряда содержащего трещину шириной 120...250 мкм

Результат рентгенографической съемки распространения плоской ДВ вдоль сквозных вертикальных трещин шириной 127 мкм и 1000 мкм в зарядах ТГ-40/60 представлен на **рис. 16**. Изображения наглядно демонстрируют существование двух качественно отличающихся между собой механизмов взаимодействия ДВ с сонаправленной плоской щелью.

Первый механизм реализует *течение с образованием кумулятивного потока продуктов детонации в щели*, опережающего фронт ДВ и оказывающего компрессионное воздействие на прилежащие к щели слои ВВ. При этом участки фронта, движущиеся непосредственно вдоль границы щели начинают опережать участки ДВ, распространяющиеся по ненагруженному ВВ и наблюдается локальное выпучивание волновой поверхности (**рис. 16 а**).

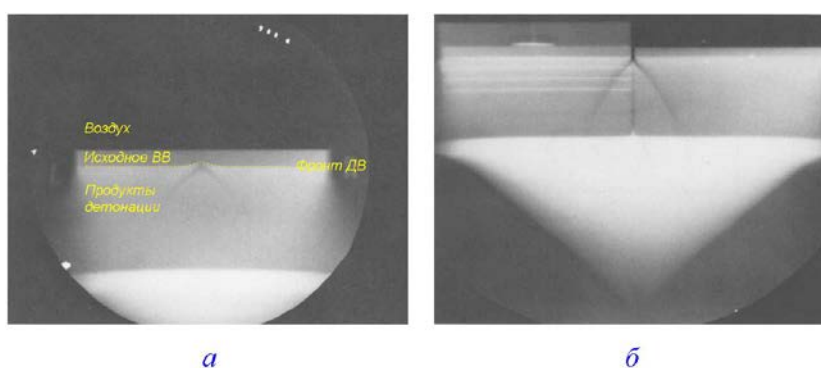


Рис. 16. Рентгенограмма процесса детонации заряда ТГ-40/60 (Comp В-3), содержащего сквозную вертикальную трещину: *а)* - шириной 127 мкм, *б)* - шириной 1,0 мм [5]

Второй тип *течения без образования кумулятивного потока* продуктов взрыва в пространстве щели перед фронтом ДВ реализуется при ширинах плоских дефектов, значительно превышающих протяженность зоны реакции в непосредственной близости к границе (**рис. 16 б**). В этом случае отраженные ударные волны в расширяющихся в

пространство щели продуктах детонации противодействуют образованию кумулятивной струи.

Задержка времени прохождения ДВ через воздушные промежутки шириной 2.08 мм и 3.07 в цилиндрических зарядах LX-17 (ТАТБ/флуорополимер (*Kel-F 800*) 92.5/7.5%, $\rho_0=1.914$ г/см³) диаметром 25.4 мм регистрировалась в [8] с помощью лазерной интерферометрии скорости ударной волны в водном растворе хлорида цезия (CsCl). Конструктивно раствор заключался в тонкостенную тефлоновую трубку, вмонтированную в осевое отверстие по всей длине заряда. Для заряда с воздушным промежутком шириной 2.08 мм была зафиксирована задержка прихода ДВ в 491 нс относительно временем детонации сплошного заряда. Наличие в заряде воздушного зазора шириной 3.07 мм показало отсутствие возбуждения (*прохождения*) детонации в сегменте заряда ВВ за промежутком.

Влияние воздушных щелей различной ориентации к направлению движения ДВ в литых взрывчатых составах (*литой ТГ-35/65, литой ТНТ/октоген 35/65, литой под давлением ТНТ/октоген 15/85*) исследовалось экспериментально методом щелевой фоторегистрации в [9]. Показано, что скорость кумулятивного потока существенно не зависит от угла ориентации щели к направлению движения ДВ и превышает скорость детонации *Чепмена-Жуге* ВВ в среднем в ~1,5 раза. Плоские воздушные щели шириной 300 мкм продуцируют задержку прихода ДВ не превышающую 100 нс вне зависимости от типа ВВ. Измерения задержек прихода фронта ДВ, генерируемых щелями шириной 1 мм с углами ε ориентации к направлению движения ДВ в диапазоне от 9,5° до 50,6° показали наличие максимумов разновременности при угле $\varepsilon=30,2^\circ$ со следующими значениями: для ТГ-35/65 – 260 нс, ТНТ/октоген 35/65 – 200 нс, ТНТ/октоген 15/85 – 180 нс.

В ряде экспериментальных работ исследовалось влияние плоских дефектов на характеристики контактного (*бризантного*) действия взрыва по методу следовых отпечатков на металлических пластинах-свидетелях [7, 10].

Так, в [7] зафиксировано значительное местное усиление контактного действия взрыва зарядов пластифицированного ТАТБ (РВХ-9502), содержащих сквозную плоскую щель шириной 1 мм параллельную направлению распространения ДВ ($\varepsilon=0^\circ$). Нагружение стальной пластины-свидетеля осуществлялось в режиме падающей детонации. При этом форма вмятины в области под щелью отличалась образованием канала по всей длине щели со средним размером поперечного сечения ≈ 10 мм (рис. 17 а).

Эксперименты по схеме со щелью шириной 1 мм, лежащей в плоскости встречного взаимодействия двух ДВ (*плоскости симметрии экспериментальной сборки, $\varepsilon=90^\circ$*), продемонстрировали незначительное усиление местного контактного действия взрыва с образования канавки в пластине-свидетеле со средним размером сечения ≈ 1 мм (рис. 17 б).

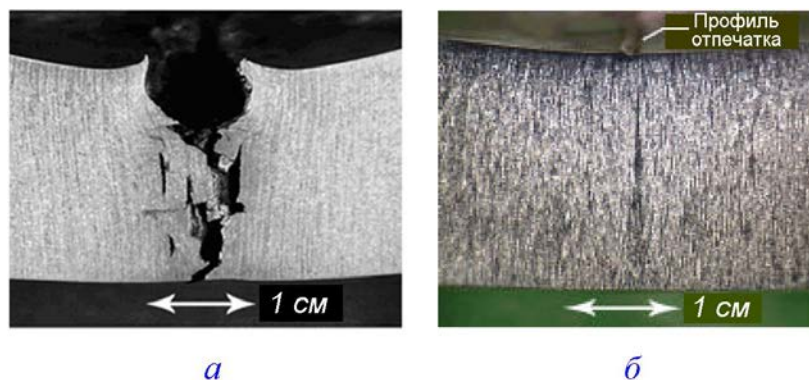


Рис. 17. Форма сечений отпечатков на стальных пластинах-свидетелях контактного действия взрыва заряда пластифицированного ТАТБ (РВХ-9502), содержащего плоскую щель шириной 1 мм: а) - параллельную, б) - шириной 1.0 мм

Сквозная щель шириной 1 мм, ориентированная под углом $\varepsilon=10^\circ$ к направлению распространения ДВ, продуцировала на пластине-свидетеле отпечаток с профилем идентичным по форме и размерам полученному под параллельной трещиной ($\varepsilon=0^\circ$) (рис. 17 а). Отпечатки на пластине-свидетеле под трещинами с углом наклона $\varepsilon=20^\circ$ и 30° совпадали с полученными в схеме эксперимента с перпендикулярным расположением щели ($\varepsilon=90^\circ$) (рис. 17 б). Таким образом, можно утверждать, что пороговое значение угла наклона трещины к направлению распространения ДВ, при котором происходит смена режима взаимодействия, лежит в диапазоне $\varepsilon \in (10^\circ \dots 20^\circ)$.

В [10] оценивалось усиление контактного действия взрыва зарядов из пластифицированного ТЭНа высотой 15 мм, содержащих щели параллельные направлению движения ДВ ($\varepsilon=0^\circ$) высотой 8 мм и шириной 10, 20, 70, 320 и 480 мкм. Результаты опытов показали, что канавки, образовавшиеся на алюминиевой пластине-свидетеле под щелями, имели средние размеры (ширина и глубина выемок оказались близкими по величине) 0.3 мм, 0.3 мм, 1 мм, 1.4 мм, 1.6 мм, соответственно.

В рамках настоящей работы методом численного моделирования, изложенным в [2], исследовалось влияние воздушных щелей в заряде флегматизированного октогена (октоген/нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%, $\rho_0=1.84 \text{ г/см}^3$) шириной до одного миллиметра ($\Delta_{slit} \leq 1 \text{ мм}$) на эволюцию фронта ДВ. Вычислительные эксперименты проводились в рамках плоской двумерной схемы взаимодействия ДВ с плоскими щелями, заполненными воздухом, ориентированной под различными углами $\varepsilon \in [0^\circ \dots 90^\circ]$ к направлению распространения детонации.

Газодинамический механизм взаимодействия плоской ДВ с *воздушной щелью перпендикулярной направлению распространения детонации* ($\varepsilon = 90^\circ$) представляет собой следующую совокупность процессов.

На начальном этапе взаимодействия ДВ с менее жесткой границей раздела сред происходит одномерный распад разрыва с образованием ударной волны в зазоре и центрированной волны разряжения в продуктах детонации, интенсивно разгружающихся в пространство щели (рис. 18).

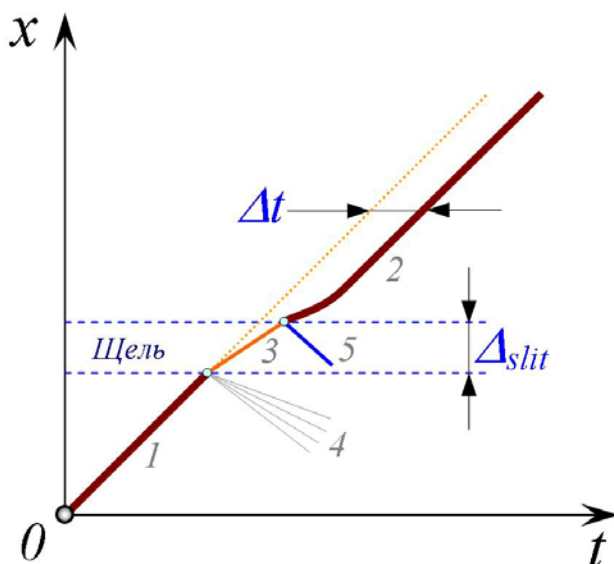


Рис. 18. Пространственно-временная (x-t) диаграмма взаимодействия фронта ДВ с перпендикулярной ($\varepsilon=90^\circ$) щелью: 1 –траектория фронта ДВ до взаимодействия с щелью, 2 – траектория фронта ДВ после взаимодействия с щелью, 3 – траектории фронта воздушной ударной волны в щели и передней граница потока продуктов детонации, 4 – волна разряжения в продуктах детонации, 5 – отраженная ударная волна в продуктах детонации

При ударе высокоскоростного потока продуктов детонации о противоположную границу щели в ВВ формируется интенсивная инициирующая ударная волна, которая, быстро переходя в ДВ, завершает процесс форсирования детонацией щели. Временная задержка ДВ, формируемая щелями перпендикулярными направлению распространения детонации, определяется этапом движения потока продуктов детонации в щели к ее противоположной границе, а также процессом перехода инициирующей ударной волны в детонационную.

Зависимость разновременности прихода фронта от ширины воздушной щели перпендикулярной направлению движения плоской ДВ во флегматизированном октогене представлена на [рис. 19 \(кривая 1\)](#).

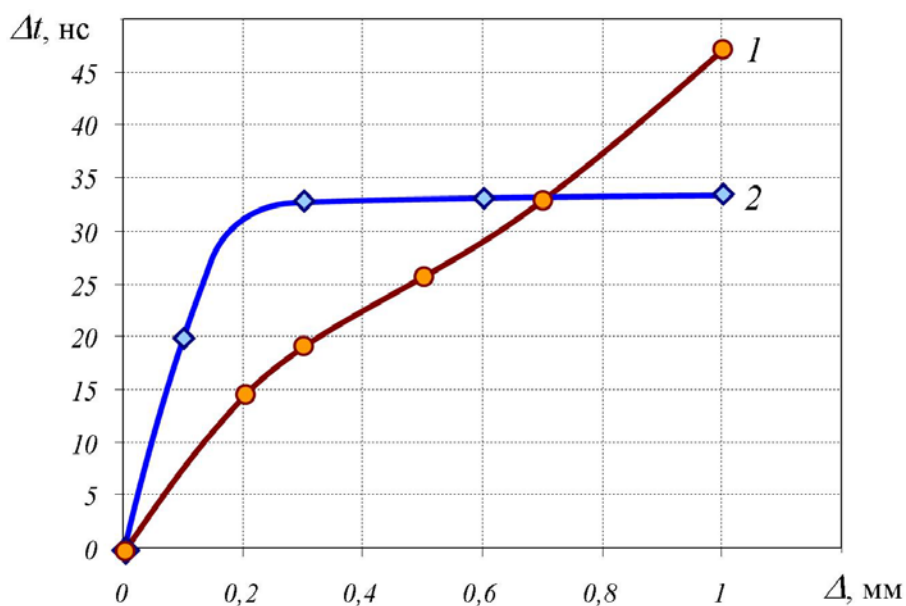


Рис. 19. Зависимости разновременности фронта ДВ от ширины воздушной щели во флегматизированном октогене (октоген/ нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%, $\rho_0 = 1.84 \text{ г/см}^3$): **1**- щель перпендикулярная направлению движения ДВ ($\epsilon = 90^\circ$); **2**- щель параллельная направлению движения ДВ ($\epsilon = 0^\circ$)

Структура течения, образующаяся при взаимодействии плоской ДВ с *воздушной щелью параллельной направлению распространения детонации* ($\epsilon = 0^\circ$), характеризуется следующими особенностями.

Встречные симметричные потоки смеси продуктов детонации и частично непрореагировавшего ВВ (слой Ю.Б. Харитона), разлетающиеся с границ области ВВ в пространство щели, взаимодействуют в плоскости симметрии с образованием газокумулятивного потока ([рис. 20](#)).

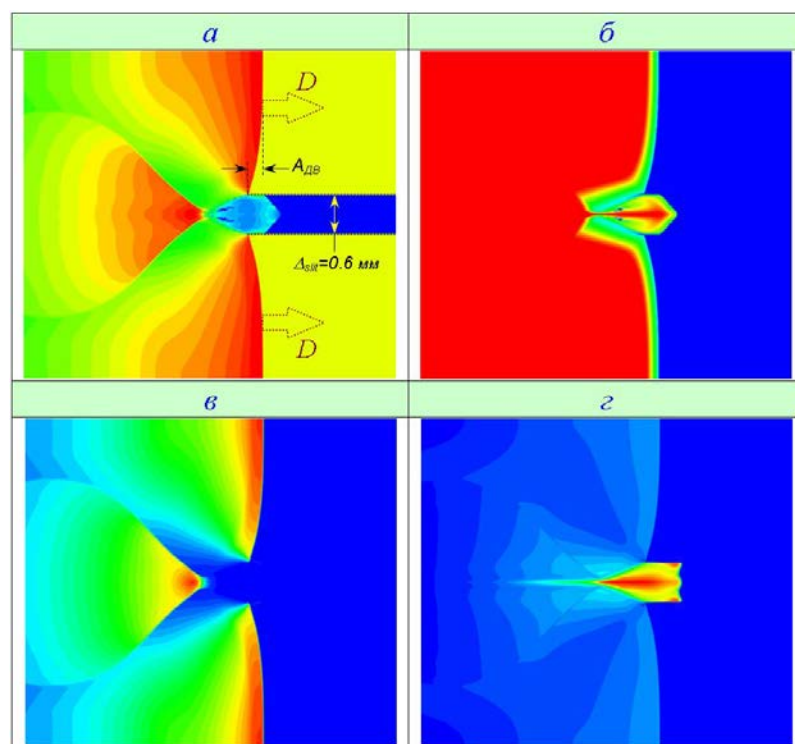


Рис. 20. Растровые изображения распределения параметров реагирующей среды при взаимодействии ДВ с параллельной плоской щелью ($\varepsilon = 0^\circ$): а) - распределение плотности сред, б) - распределение массовой концентрации продуктов детонации, в) - распределение давления сред, г) - распределение модуля массовой скорости движения сред

Если ширина щели превышает протяженность зоны реакции в ДВ (*ширину химпика*), то на границе области ВВ по обе стороны от щели реализуется течение идентичное возникающему на абсолютно свободной границе плоского заряда [4]. В связи с этим степень искривленности профиля ДВ с увеличением ширины щели выше порогового уровня ($\sim \Delta_{зхр}$) практически не изменяется. В случае если поперечный размер щели меньше ширины химпика, форма ДВ в окрестности плоского дефекта заметно не меняется.

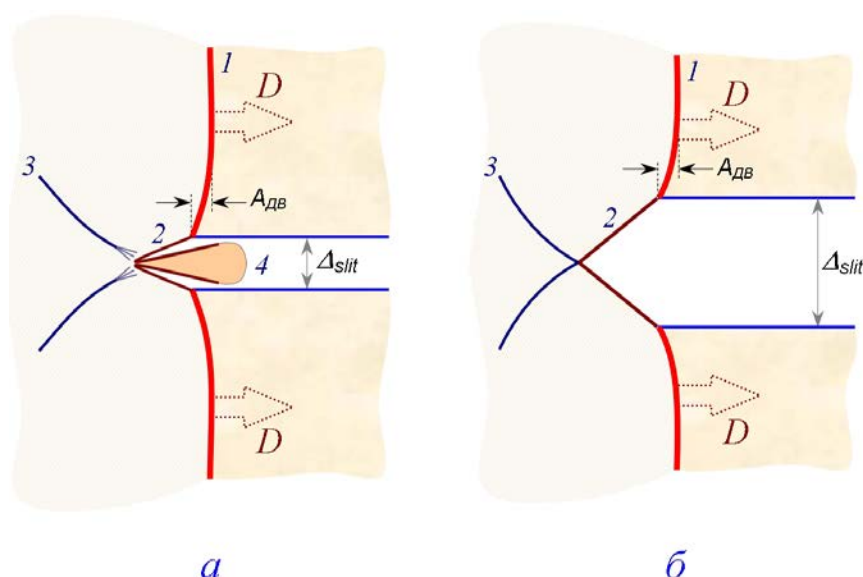


Рис. 21. Структуры течения, образуемые при взаимодействии ДВ с параллельной плоской щелью ($\varepsilon = 0^\circ$): *а)* - с образованием газокумулятивного потока продуктов детонации; *б)* - с ударно-волновым взаимодействием симметричных встречных потоков

Зависимость разновременности прихода фронта от ширины воздушной щели параллельной направлению движения плоской ДВ во флегматизированном октогене (октоген/ нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%, $\rho_0 = 1.84 \text{ г/см}^3$) представлена на рис. 19 (кривая 2).

В достаточно широких параллельных ($\varepsilon = 0^\circ$) щелях возможно образование структуры течения без газокумулятивного эффекта, если реализуется условие сверхзвукового перемещения точки контакта симметрично взаимодействующих разреженных потоков частично непрореагировавшей смеси (рис. 21). В этом случае отраженные косые ударные волны изолируют среду перед собой от тыльных возмущений, препятствуя формированию обратной (кумулятивной) струи [11].

Наиболее сильное влияние на симметрию течения оказывают *плоские щели, ориентированные под острым углом ($0^\circ < \varepsilon < 90^\circ$)* к направлению распространения ДВ (рис. 22).

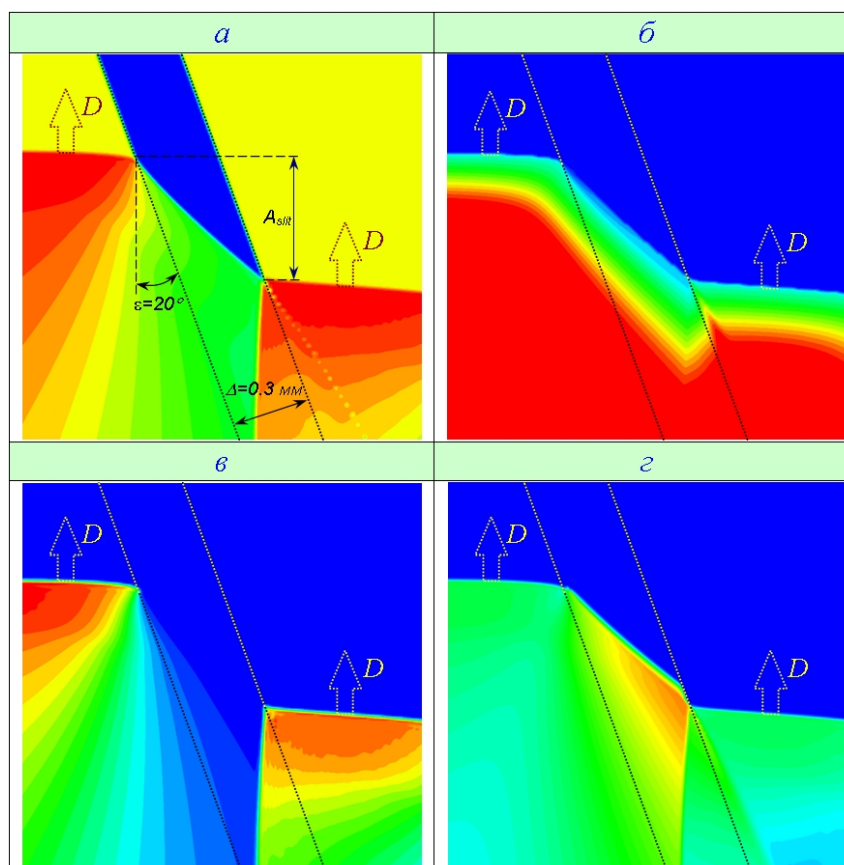


Рис. 22. Растровые изображения распределения параметров реагирующей среды при взаимодействии ДВ с наклонной плоской щелью ($\varepsilon = 20^\circ$): *а)* - распределение плотности сред, *б)* - распределение массовой концентрации продуктов детонации, *в)* - распределение давления сред, *з)* - распределение модуля массовой скорости движения сред

Структура течения, образующаяся при взаимодействии плоской ДВ с наклонной воздушной щелью, состоит из следующих газодинамических особенностей.

Поток смеси продуктов детонации и частично непрореагировавшего ВВ (*слой Ю.Б. Харитона*), разлетающийся с левой границы области ВВ в пространство щели, взаимодействует с правой границей, генерируя в прилежащих слоях ВВ с некоторым запаздыванием $A_{ДВ}$ вторичную ДВ (*рис. 23*). При этом, режим распространения вторичной ДВ носит принудительный характер, вследствие того, что первичное ударно-волновое сжатие, вызывающее интенсивное разложение исходного ВВ справа от щели, обеспечивается ударом потока реагирующего вещества извне.

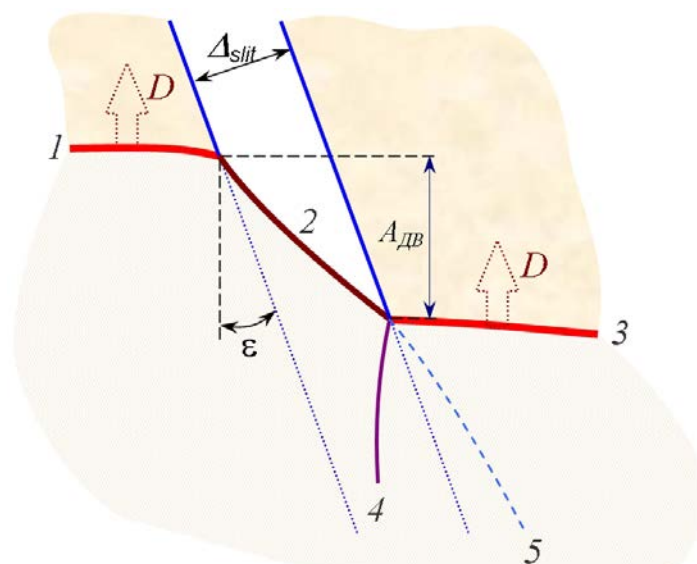


Рис. 23. Структура течения, формируемая при взаимодействии ДВ с щелью, ориентированной под острым углом к направлению распространения детонации ($0^\circ < \varepsilon < 90^\circ$): 1 – ДВ, 2 – фронт потока реагирующей смеси, 3 – принудительно инициированная ДВ, 4 – ударная волна в продуктах детонации, 5 – траектория контактного разрыва

Зависимость асинхронности фронта ДВ от угла наклона воздушных щелей шириной 0.3 мм, 0.5 мм и 1.0 мм в заряде флегматизированного октогена (октоген/нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%, $\rho_0 = 1.84 \text{ г/см}^3$) представлена на рис. 24. Характерной особенностью приведенных зависимостей является достижение ими максимумов значений при одном и том же значении угла ориентации трещин $\varepsilon \approx 27^\circ$. В случае если вершины трещины не вышли на свободную поверхность заряда, то возможно огибание их ДВ.

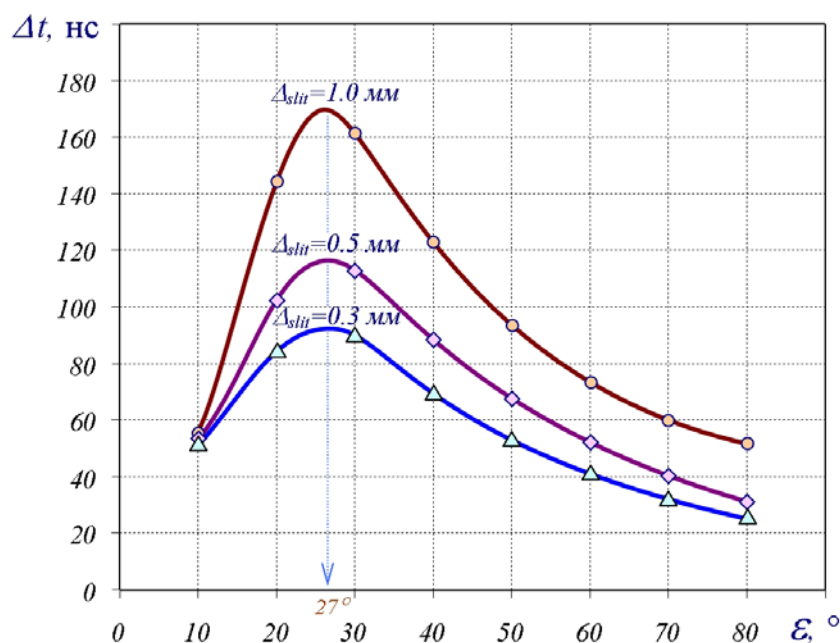


Рис. 24. Зависимости разновременности фронта ДВ от угла наклона воздушных щелей различной ширины во флегматизированном октогене (октоген/ нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%, $\rho_0 = 1.84 \text{ г/см}^3$)

Заключение

Масштаб фронтальных возмущений детонационного течения, возникающих при взаимодействии плоской стационарной ДВ с компактными дефектами структуры заряда в виде газовых полостей и инертных включений различной жесткости, соответствует долям средней величины дефекта. Наибольшие фронтальные возмущения генерируют компактные неоднородности в виде жестких инертных включений в заряде ВВ. Максимальное относительное значение амплитуды искажений фронта ДВ составляет величину порядка 0.45 от среднего размера дефекта. При этом полное сглаживание фронтальных характеристик потока наблюдается на расстоянии в 8...12 раз превышающем характерный размер дефекта.

В результате анализа влияния трещин в заряде ВВ на симметрию детонационного течения установлены зависимости асинхронности фронта ДВ от угла наклона воздушных щелей шириной 0.3 мм, 0.5 мм и 1.0 мм. Наиболее сильное влияние на симметрию детонационного течения оказывают плоские щели, ориентированные под углом $\approx 30^\circ$ к направлению распространения ДВ.

Литература

1. Развитие возмущений на фронте детонации / А.А. Викторов [и др.] // ФГВ, 1983. Т. 19, №4. С.113-116.
2. Козырев А.В., Соловьев В.С. Приоритетные численные алгоритмы для расчета течений с детонацией // Оборонная техника, 2004. №1-2. С.23-35.
3. Соловьев В.С., Козырев А.В. Анализ процесса зарождения и развития асимметрии детонационного течения в кумулятивных зарядах с инертными линзами // Оборонная техника, 2002. №1-2. С.71-79.
4. Ударные и детонационные волны. Методы исследования / В.С. Соловьев [и др.] Изд. 2. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2004. 376 с.
5. Mader C.L. LASL PHERMEX Data Vol. I-III. Berkeley: University of California Press, 1980.
6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1963. 728с.
7. Davis W.C., Hill L.G. Joints, Cracks, and Caps in Detonation Explosives // Proc. of 12th Int. Symp. on Detonation. San Diego, California, 2002.
8. Propagation or failure of detonation across an air gap in an LX-17 column: continuous time-dependent detonation or shock speed using the Embedded Fiber Optic (EFO) technique / D.E. Hare [et al.] // Lawrence Livermore National Laboratory report: LLNL-TR-400791, 2008.
9. Held M. Influence of Slits to the Detonation Front // Proc. of 31st Int. Annual Conf. of ICT. Karlsruhe, 2000.
10. Володина Н.А., Ольхов О.В., Фёдоров А.В. Распространение детонационной волны по конденсированным ВВ, содержащим дефекты // Труды межд. конф. «Х Забабахинские научные чтения». Снежинск, 2010.
11. Физика взрыва / А.В. Бабкин [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 2. 656 с.

Influence of structural defects on Evolution of detonation wave in high explosive charge

77-30569/291243

12, December 2011

Kozyrev A.V., Soloviev V.S.

Bauman Moscow State Technical University

sm4@sm.bmstu.ru

Technology imperfections, operational and functional affects on high explosive charges of projectiles and ammunitions cause birth structural defects. Influence mechanisms of compact and flat local defects on the evolution of detonation wave were studied with the help of computational fluid dynamics method. Amplitude of detonation wave front deformations in relation to the compressible behavior of point defects and cracks with different orientations was calculated.

Publications with keywords: [numerical modelling](#), [high explosive](#), [detonation](#), [detonation wave](#), [structural defect](#)

Publications with words: [numerical modelling](#), [high explosive](#), [detonation](#), [detonation wave](#), [structural defect](#)

Reference

1. A.A. Viktorov, et al., Fizika gorenii i vzryva 19 (4) (1983) 113-116.
2. Kozyrev A.V., Solov'ev V.S., Oboronnaia tekhnika 1-2 (2004) 23-35.
3. Solov'ev V.S., Kozyrev A.V., Oboronnaia tekhnika 1-2 (2002) 71-79.
4. V.S. Solov'ev, et al., Shock and detonation waves. Methods of research, Moscow, FIZMATLIT, 2004, 376 p.
5. Mader C.L., LASL PHERMEX Data, Vol. I-III, Berkeley, University of California Press, 1980.
6. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V., Theoretical hydromechanics, Part II, Moscow, FIZMATGIZ, 1963, 728 p.
7. Davis W.C., Hill L.G., Joints, Cracks, and Caps in Detonation Explosives, in: Proc. of 12th Int. Symp. on Detonation, San Diego, California, 2002.
8. D.E. Hare, et al., Propagation or failure of detonation across an air gap in an LX-17 column: continuous time-dependent detonation or shock speed using the Embedded Fiber Optic (EFO) technique, Lawrence Livermore National Laboratory report: LLNL-TR-400791, 2008.
9. Held M., Influence of Slits to the Detonation Front, in: Proc. of 31st Int. Annual Conf. of ICT, Karlsruhe, 2000.
10. Volodina N.A., Ol'khov O.V., Fedorov A.V., in: Proc of the Int. Conf. «X Zababakhin scientific readings», Snezhinsk, 2010.
11. A.V. Babkin, et al., Physics of explosion, Vol. 2, Moscow, FIZMATLIT, 2002, 656 p.