УДК 234.222.2

# ФОРМИРОВАНИЕ СХОДЯЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ОБРАТНОЙ КРИВИЗНОЙ ФРОНТА

В. Г. Султанов<sup>1</sup>, С. В. Дудин<sup>1</sup>, В. А. Сосиков<sup>1</sup>, С. И. Торунов<sup>1</sup>, Е. В. Василёнок<sup>2</sup>, А. В. Размыслов<sup>1</sup>, Д. Ю. Рапота<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, sultan@ficp.ac.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва

При использовании метода многоточечного инициирования боковой поверхности цилиндрического заряда в сечении, перпендикулярном оси, формируется детонационная волна со сложной газодинамической структурой, имеющая форму многоугольника с вершинами в местах сопряжения волн. Стороны многоугольника всегда выпуклые по направлению к оси заряда. Для получения гладкой цилиндрической детонационной волны с обратной кривизной предложено использовать в точках инициирования специальные устройства — линзы из инертного материала. Экспериментально определены динамические характеристики материала, и обоснован метод построения профиля линзы. Проведено математическое моделирование работы узла инициирования и формирования цилиндрической детонационной волны в заряде. Показаны особенности работы одиночного узла инициирования и узла, входящего в состав экспериментальной сборки. Представлена динамика осесимметричного сжатия сходящейся детонационной волной, проведено ее сравнение с расчетами.

Ключевые слова: детонационная волна, кривизна фронта, ударная волна, взрывчатое вещество, математическое моделирование, уравнение состояния.

DOI 10.15372/FGV2022.9254

#### ВВЕДЕНИЕ

Впервые упоминание о распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва при распространении сферической детонационной волны (ДВ) относится к началу 40-х годов прошлого века. Сделано это было в работе Я. Б. Зельдовича [1], но представленные выкладки относились к ДВ, распространяющейся от центра взрывчатого вещества (BB), т. е. относились к ДВ с прямой кривизной. При попытке использовать ДВ для сжатия перед экспериментаторами встал вопрос о формировании и свойствах волны с обратной кривизной. Одним из методов формирования такой волны является использование специальных линз из ВВ с низкой скоростью детонации или из инертного материала. Еще в мае 1944 г. физики в Лос-Аламосе пришли к выводу, что «создать взрывные линзы было гораздо сложнее, чем просто попытаться получить сферическую взрывную волну...». Ведущий британский специалист того времени по гидродинамике Д. Тейлор показал, что «обычными методами проблему не решить и что взрывные линзы — это единственный выход» [2]. Определенные попытки в этом направлении были сделаны в Лос-Аламосе, результаты изложены в работе [3].

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Для решения ряда практических и научных задач, связанных с использованием взрывных линз, возникает необходимость применения сходящихся ДВ различной формы, а именно цилиндрических, конических, сферических. Основной проблемой в этом случае является формирование сходящейся ДВ с обратной кривизной фронта. Одним из основных требований является отсутствие на детонационном фронте локальных областей с повышенным давлением, т. е. узлов, которые могут быть причиной неустойчивости или неконтролируемых вредных выбросов при взаимодействии ДВ с объек-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785).

<sup>©</sup> Султанов В. Г., Дудин С. В., Сосиков В. А., Торунов С. И., Василёнок Е. В., Размыслов А. В.,

Рапота Д. Ю., 2023.

том, находящимся соосно с волной [4]. В 1954 г. Вудом и Киркаулом [5] была рассмотрена задача о распространении детонации с искривленным фронтом. В этой работе были заложены основы построения теории неидеальной детонации с искривленным фронтом и предсказана связь кинетики химической реакции с кривизной фронта в предположении сферического фронта. Более подробно динамика сходящейся ДВ с обратной кривизной была рассмотрена Л. Д. Ландау и К. П. Станюковичем [6] и позднее Я. Б. Зельдовичем [7], который высказал предположение об асимптотическом законе возрастания давления при движении к центру для сферической и цилиндрической волн. В работе Гуэри [8] были выполнены численные расчеты по модели [7] с некоторыми уточнениями. Дальнейшее развитие эта модель нашла в работах С. А. Кинеловского [9–11], где сходящаяся к центру цилиндрическая ДВ рассматривалась как гладкий поршень. Однозначная связь искривления фронта с параметрами ДВ была многократно подтверждена в экспериментах, проведенных в РФЯЦ-ВНИИ ТФ, в том числе для конденсированных ВВ [12, 13]. При решении многих практических задач, таких как формирование импульсных магнитных полей [14], работа генераторов сверхвысоких давлений [15], использование кумулятивных зарядов [16] или специальных устройств [17, 18], детальная структура ДВ подробно не изучалась. В данной работе рассмотрено формирование сходящейся ДВ методом многоточечного инициирования. При этом необходимо получить ДВ от каждой точки с обратной кривизной и радиусом, равным радиусу основного заряда. В сумме ДВ от всех точек инициирования должны образовать цилиндр, движущийся к своей оси.

Экспериментальная отработка полноразмерных зарядов такого типа является достаточно трудоемкой и требует площадок для работы с зарядами с большим тротиловым эквивалентом. Для экспериментальных исследований динамики формирования сходящейся ДВ, т. е. имеющей обратную кривизну, в ИПХФ РАН была создана лабораторная установка, в которой используется заряд ВВ порядка 1 кг [4, 19], что позволяет проводить эксперименты во взрывных куполах и в камерах небольшого объема. Для визуализации процессов использовалась отечественная высокоскоростная камера НАНОГЕЙТ-22/16, имеющая простран-



Рис. 1. Осесимметричная ДВ, сформированная методом многоточечного инициирования без использования линз

ственное и временное разрешение на уровне мировых аналогов. С помощью этой камеры исследовалась динамика выхода ударной волны (УВ) на внешнюю поверхность цилиндрического заряда и сложная структура цилиндрической ДВ, которая сформирована методом многоточечного инициирования без использования специальных линз (рис. 1). Недостатком этого метода является сложная форма ДВ. На ней отчетливо просматриваются точки сопряжения ДВ от соседних точек инициирования, так называемые «узлы». ДВ, сформированная таким образом, имеет форму многоугольника с вершинами в «узлах» (см. рис. 1), стороны которого имеют кривизну с центром в точке инициирования. Выпуклость каждой стороны многоугольника обращена в сторону оси сжатия.

Ранее было показано, что эта волна сохраняет структуру и особенности до полного схождения. Также было проведено математическое моделирование и расчеты по модели Я. Б. Зельдовича, результаты которых представлены в работах [19, 20]. Сложная структура ДВ, имеющая «узлы», т. е. точки повышенного давления в области сопряжения ДВ от соседних точек инициирования, а за «узлами» — струи течения продуктов детонации («жгуты»), может стать причиной развития гидродинамической неустойчивости по мере сжатия. Возможные пути сглаживания ДВ представлены в работе [21].

С целью уменьшения объема экспериментальных отработок проведено математическое



Рис. 2. Схема узла инициирования с линзой из инертного материала

моделирование инициирования и формирования ДВ с обратной кривизной с использованием линз из инертного материала, которая является основным элементом узла инициирования, показанного на рис. 2. Для уточнения динамических параметров материала линзы выполнены специальные эксперименты с интерферометрической диагностикой. Регистрация выхода УВ на цилиндрическую поверхность линзы, которая обращена к заряду, проводилась методом щелевой развертки высокоскоростной камерой СФР.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На первом этапе решения проблемы создания гладкой цилиндрической ДВ при многоточечном инициировании предлагалось создать волну с обратной кривизной для каждой точки инициирования. Единичный узел инициирования (см. рис. 2) имеет форму полого раструба, наполненного пластическим взрывчатым веществом (ПВВ). В нижнюю часть вводится детонационный шнур. В верхней части узла установлена линза. Внешняя ее поверхность имеет цилиндрическую форму, повторяющую боковую поверхность основного заряда. Радиус кривизны этой поверхности равен радиусу основного заряда. Внутренняя поверхность линзы имеет плотный контакт с ПВВ, которым заполнен раструб.

Полная сборка для формирования цилиндрической ДВ с использованием 18 узлов инициирования показана на рис. 3. При одновременном инициировании вершин всех узлов ДВ проходит через раструб, наполненный ПВВ, и



Рис. 3. Сборка для формирования цилиндрической ДВ:

в центре — основной заряд, к боковой поверхности примыкают 18 узлов инициирования

выходит на линзу из инертного материала. По линзе идет УВ, и при выходе на ее внешнюю поверхность волна должна иметь обратную кривизну и амплитуду, достаточную для инициирования ВВ основного цилиндрического заряда. Для выполнения этих условий необходимо четко знать динамические свойства материала линзы, уравнения состояния ВВ, материала линзы и иметь возможность точно рассчитать ее профиль.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЕДИНИЧНОГО УЗЛА ИНИЦИИРОВАНИЯ

С целью отработки узла инициирования был проведен ряд предварительных экспериментов. Они были направлены на диагностику работы узла инициирования и определение динамических характеристик материалов узла. Был выбран профиль поверхности линзы, рассчитанный по схеме, представленной на рис. 4.

Инициирование ПВВ, которым заполнен раструб узла инициирования, происходит в точке O. ДВ распространяется по прямым OA(с краю), OB (точка B выбрана произвольно) и OD (в центре). При переходе УВ из ПВВ в полимер (отрезок BC), из которого изготовлена линза, в первом приближении считаем, что изменение ее направления мало. Для того чтобы УВ вышла на поверхность цилиндрического заряда одновременно во всех точках (A, C, E), необходимо, чтобы время прохождения этих траекторий было одинаковым.



Рис. 4. Схема расчета поверхности линзы



Рис. 5. Пример расчетной сетки поверхности линзы

Считая, что линза в краевых точках имеет нулевую толщину, получаем систему уравнений:

$$\frac{OA}{v_{\text{пл}}} = t_{\text{в}}, \quad t_{\text{в}} = \frac{OB}{v_{\text{пл}}} + \frac{BC}{v_{\text{ин}}} = \frac{OD}{v_{\text{пл}}} + \frac{DE}{v_{\text{ин}}},$$

$$OB + BC = OC$$
,  $OD + DE = OE$ ,

где  $t_{\rm B}$  — время прохождения волной всего пути,  $v_{\rm пл}$  — скорость ДВ в ПВВ,  $v_{\rm ин}$  — скорость УВ в инертном слое (линзе), O — точка инициирования детонации. Зная длину траекторий OE и OA, которые определяются параметрами сборки (количество узлов инициирования, их размеры и диаметр заряда), можно вычислить координаты точек D и B. Непосредственно в программе задается точечная сетка, по которой и вычисляется оптимальная форма поверхности (рис. 5).



Рис. 6. Щелевая развертка выхода УВ на цилиндрическую поверхность узла инициирования (временная развертка сверху вниз)

Для визуализации выхода УВ на свободную цилиндрическую поверхность линзы использовалась высокоскоростная камера СФР в целевом режиме. По этим данным можно определить поле скоростей УВ в пластике в зависимости от профиля линзы. Характерный результат целевой развертки выхода УВ приведен на рис. 6. По хронограмме видно, что УВ вышла на цилиндрическую поверхность линзы в центральной части на базе 14.5 мм (при общей базе 20 мм) с разновременностью 0.1 мкс. По краям линзы наблюдается отставание выхода УВ по сравнению с центральной частью. Кроме этого, съемка позволяет определить скорость УВ в пластике линзы, которая составила 5.16 км/с.

Для получения ударной адиабаты материала линзы были проведены специальные эксперименты с использованием интерферометра VISAR и построена ударная адиабата в форме D = a + bU (a = 2.141, b = 1.60). В этих экспериментах также была определена скорость распространения УВ в полимере линзы, которая составила 5.20 км/с, что практически совпадает со значением, полученным при регистрации на СФР.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛА ИНИЦИИРОВАНИЯ

С целью унификации и более точного расчета профиля поверхности линзы и оптимизации работы узлов инициирования было проведено математическое моделирование процессов начиная от инициирования ПВВ до выхода ДВ в основной цилиндрический заряд при работе нескольких соседних узлов инициирования. Моделирование проводилось в гидродинамическом пакете с открытым исходным кодом blastFOAM [22], являющимся расширением пакета OpenFOAM. Внедренные разработчиками в пакет blastFOAM уравнения состояния в форме Ми — Грюнайзена позволяют использовать в расчетах полученные экспериментально

Взрывчатое вещество	Параметры в точке Чепмена — Жуге					Уравнение состояния JWL					
	$ ho_0, \ \Gamma/\mathrm{CM}^3$	$p,$ $\Gamma \Pi a$	<i>D</i> , км/с	$E_0, \ \Gamma\Pi \mathrm{a}$	Г	A, ГПа	<i>В</i> , ГПа	<i>С</i> , ГПа	$R_1$	$R_2$	ω
Основной заряд	1.717	29.5	7.98	8.50	2.706	524.2	7.678	1.082	4.20	1.10	0.34
ПВВ	1.59	25.0	7.50	8.00	2.578	382.4	6.635	1.444	4.10	1.10	0.38

Уравнения состояния в форме JWL

ударные адиабаты веществ [23].

Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе уточнялась ударная адиабата материала линзы, полученная при одномерных расчетах в предварительных экспериментах. Далее уточнялись константы уравнения состояния продуктов детонации, проводились двумерные расчеты с точной геометрией узла инициирования, и по совпадению/различию массовой скорости в расчете и эксперименте подбирались константы для уравнения продуктов взрыва в форме JWL.

Для получения результата, приближенного к реальному эксперименту, в расчет были импортированы данные по ударно-волновым линзам и системе многоточечного инициировании. Точная геометрия построена в пакете, который использовался для 3D-моделирования Salome. В пакет загружалась точная геометрия поверхности линзы и раструба. Затем строилась и выгружалась полная геометрия, необходимая для построения исходной расчетной сетки пакетом blastFOAM. Эта сетка формировалась из расчета временного разрешения 0.01 мкс в ударно-волновой линзе, что соответствует 50 мкм на ячейку в линзе и ПВВ. Оставшиеся детали узла инициирования моделировались с разрешением 100 мкм. Свободное пространство вокруг узлов «заполнялось» воздухом (идеальный газ) и моделировалось с разрешением 200 мкм. Для описания поведения материала линзы использовалось уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена, где в качестве опорных кривых использовалась ударная адиабата, полученная в эксперименте. Исходное ПВВ описывалось уравнением состояния Мурнагана, продукты детонации — уравнением состояния в форме JWL [24], представленными в таблице.

Сопоставление расчета с результатами реального эксперимента в варианте с использованием полной сборки узла инициирования показало хорошее совпадение по массовой скорости УВ в пластике D = 5.2 км/с.

Фактически при моделировании была проведена двойная верификация как по уравнению состояния материала линзы, так и по используемым уравнениям состояния исходного BB и продуктов взрыва, что позволяет авторам с уверенностью говорить, что моделирование достаточно точно описывает данный эксперимент.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для получения точности расчетов 0.01 мкс (предел для экспериментальных измерений в данном случае) моделирование проводилось в двумерной постановке со стороной квадратной расчетной ячейки 50 мкм. Рассматривался продольный двумерный срез вдоль оси сборки.

Проведенные расчеты для линзы, построенной исходя из условия скорости УВ волны в материале линзы 5.2 км/с, показали высокую точность (одновременность) выхода УВ из линзы на поверхность основного цилиндрического заряда. Вычисленные времена задержки (разновременность выхода) составили порядка 0.03 мкс (в пределах трех расчетных ячеек), т. е. на пределе разрешающей способности расчета. Отдельно была проведена оценка скорости фронта УВ вдоль лучей построения ударно-волновой линзы. Одно из основных допущений при построении линзы заключалось в неизменности скорости как детонационного фронта (7.4 км/с), что в общем не вызывает сомнений в случае стационарной детонации, так и фронта УВ в линзе (5.2 км/с), последнее, однако, не является очевидным фактом. Дальше будет показано, что УВ в линзе изменяет свое направление, отклоняясь к центру основного заряда ВВ. При этом мы опре-



Рис. 7. Линии тока после прохождения детонационной волны из пластического BB в ударноволновую линзу:

УВ — фронт сформировавшейся в ударноволновой линзе ударной волны; линии тока показывают направление массовой скорости в линзе и продуктах детонации пластического BB деляем направление движения по массовой скорости за фронтом. Тем не менее моделирование показывает, что скорость фронта УВ 5.2 км/с сохраняется вдоль основных расчетных прямых OA, OBC, ODE (см. рис. 4) в используемой модели построения линзы. Расчеты проводились для углов наклона 0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 024 рад. Несмотря на то, что используемая методика построения предполагала сохранение скорости УВ вдоль лучей построения ударно-волновой линзы, расчеты показали, что УВ при входе в линзу преломляется и меняет направление в сторону центра основного заряда ВВ. Следует отметить, что форма поверхности линзы, полученная в рамках приближенного подхода (см. рис. 5), практически совпадает с численными расчетами по модели в центре и имеет небольшое отличие на краях линзы. Это связано с преломлением УВ в линзе. Линии тока в ударно-волновой линзе в момент времени 7.1 мкс от начала инициирования в вершине конуса представлены на рис. 7. Фронт УВ в линзе еще не достиг границы выхода на поверхность заряда, а линии тока идут от внешней поверхности линзы к внутренней по направлению к центру основного заряда. Такая направленность линий тока позволяет сделать еще



Рис. 8. Расчет формы ДВ (давление) после выхода УВ из линзы в основной заряд: *а* — без заполнения пластическим ВВ места стыковки линз, *б* — с заполнением пластическим ВВ; сплошные черные линии — линии тока



Рис. 9. Форма ДВ после выхода из линзы в основной заряд без заполнения пластическим BB места стыковки линз. Эксперимент (a) и расчет (b)

один немаловажный вывод о характере движения ДВ в основном ВВ в местах сопряжения соседних линз.

Еще одной проблемой формирования гладкой сходящейся цилиндрической волны являются места сопряжения ДВ от соседних узлов инициирования. Как было сказано ранее, цилиндрическая ДВ имеет сложную структуру, состоящую из зон повышенного давления («узлов») и отходящих от них струй течения продуктов детонации («жгутов»).

Расчеты показали (рис. 8), что один из способов выровнять фронт ДВ в зоне сопряжения — это заполнить пластическим ВВ щель между линзами, которые образуют цилиндрическую поверхность. На рис. 9 показана форма ДВ после выхода из линзы в основной заряд без заполнения пластическим ВВ места стыковки линз (эксперимент и расчет).

Другой способ выравнивания ДВ заключается в следующем. Линии тока после прохождения ДВ из ПВВ на ударно-волновую линзу отклоняются в сторону оси симметрии линзы (см. рис. 7). Чтобы исключить образование «жгутов», необходимо организовать течение таким образом, чтобы линии тока в соседних линзах в месте их соприкосновения были параллельны и УВ в соседних линзах были одной интенсивности. Это отдельная сложная задача, которая требует дополнительных исследований.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На основании предварительных экспериментов и математического моделирования процессов взаимодействия ДВ с линзой из инертного материала были проведены расчеты профиля линзы для получения УВ с обратной кривизной и достаточной интенсивности, чтобы инициировать внешнюю цилиндрическую поверхность основного заряда. С этими узлами инициирования была собрана полная модельная лабораторная установка, в которую вошли основной цилиндрический заряд диаметром 150 мм, толщиной 18 мм и 18 узлов инициирования (см. рис. 3).

Детонационные шнуры были собраны в специальном устройстве, которое находится на обратной стороне платформы и имеет один детонатор. После инициирования детонационные волны по шнурам должны прийти одновременно на все узлы инициирования. Визуализация процесса осуществлялась высокоскоростной отечественной камерой НАНОГЕЙТ-22/16. Регистрация велась по 8 оптическим каналам на 16 кадров с экспозицией 5 нс и временем между кадрами 1 мкс.

Выход ДВ на основной заряд показан на рис. 10. Отсчет времени начинается от момента срабатывания детонатора. В интервале от 38 до 39 мкс ДВ проходит по ПВВ, которое находится внутри раструбов узлов инициирования. Свечение ДВ проникает через стенки раструба, и поэтому ДВ отчетливо видна. На 41-й микросекунде волна выходит на внутреннюю поверхность линзы, и на 42-й микросекунде возбуждается цилиндрическая поверхность основного заряда.

Динамика ДВ при цилиндрическом осесимметричном сжатии показана на рис. 11. В



Рис. 10. ДВ в узлах инициирования (направление движения к правому нижнему углу, показана 1/4 часть заряда)



Рис. 11. Динамика ДВ при цилиндрическом осесимметричном сжатии (направление движения к правому нижнему углу)

момент времени 45 мкс ДВ уже сформировалась. Ее отклонение от окружности можно объяснить некоторой технологической разновременностью прихода ДВ на узлы инициирования. Этот эффект наблюдается уже на 42-й микросекунде. Полное схлопывание сходящейся ДВ происходит примерно на 50-й микросекунде. Установить точный момент схлопывания по высокоскоростной съемке очень сложно, поскольку, как показано в работах [7] и [21], скорость детонации перед схлопыванием возрастает более чем в 1.5 раза.

На рис. 12 представлены результаты математической обработки кинограммы процесса, т. е. зависимость осредненного радиуса цилиндрической поверхности от времени. Скорость ДВ в узлах инициирования составляет  $D_1 = 7.47$  км/с, а скорость на цилиндрическом



Рис. 12. Обработка эксперимента по схождению цилиндрической ДВ

блоке  $D_2 = 8.50$  км/с, что очень хорошо совпадает с расчетными значениями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе достаточно подробно рассмотрено формирование сходящейся ДВ с обратной кривизной фронта при многоточечном инициировании. Использовались специальные сборки — узлы инициирования, где основным элементом является линза из инертного материала. Представлен универсальный подход к подбору материала линзы, когда динамические характеристики материала определяются в специальной серии предварительных экспериментов. На основании полученных уравнений состояния ВВ и динамических параметров линзы представлена возможность оптимизации профиля линзы. Проведено математическое моделирование процессов от момента инициирования до выхода УВ в основной цилиндрический заряд с учетом работы соседних узлов инициирования. Это позволило подробно рассмотреть взаимодействие ДВ с поверхностью линзы и картину распространения УВ в материале линзы. При моделировании инициирования и начальной стадии движения ДВ в основном цилиндрическом заряде подробно рассмотрен механизм образования «жгутов» и «узлов». Предложены методы сглаживания сложной структуры ДВ путем доработки стыковки узлов инициирования. Также показано, что для получения более ровной цилиндрической ДВ с обратной кривизной необходимо повышать требования к одновременности начала работы узлов инициирования. Полученная математическая модель позволяет рассматривать возможность формирования сходящейся ДВ с обратной кривизной для различных материалов линзы и свойств BB, а также дает возможность оптимизации процессов инициирования и формирования ДВ различной конфигурации: цилиндрической, конической, плоской, сферической.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Зельдович Я. Б. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности, при сферическом распространении детонационной волны // ЖЭТФ. 1942. Т. 12, № 9. С. 389–406.
- 2. Первушин А. И. Атомный проект. История сверхоружия. СПб.: Торговый дом «Амфора», 2015.
- 3. Fritz J. N. A Simple Plane-Wave Explosive Lens. — Los Alamos Nat. Lab., New Mexico, 1990.
- 4. Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I. Experimental investigation of cylindrical detonation wave // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 774. — 012074. — DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012074.
- Wood W. W. Diameter effect in condensed explosive. The relation between velocity and radius of curvature of the detonation wave // J. Chem. Phys. — 1954. — V. 22, N 11. — 1920. — DOI: 10.1063/1.1739940.
- Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Гостехиздат, 1955.
- Зельдович Я. Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна // ЖЭТФ. — 1959. — Т. 36, № 3. — С. 782–192.
- Guerri L., Taroni A. Computation of the flow behind converging detonation wave in cylindrical or spherical geometry // Euratom Rep., Eur 1874.e. — 1964.
- Кинеловский С. А., Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. Схождение кольца к центру под действием продуктов взрыва // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-е, Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1970. — Вып. 5. — С. 23–32.
- Кинеловский С. А., Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. О движении цилиндрического поршня к центру // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-е, Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1971. — Вып. 7. — С. 105–114.
- 11. Кинеловский С. А., Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. Движение цилиндрического поршня, окруженного слоем расширяющегося газа // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-е, Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1971. — Вып. 7. — С. 115– 124.

- Смирнов Е. Б., Аверин А. Н., Лобойко Б. Г., Костицын О. В., Беленовский Ю. А., Просвирнин К. М., Киселев А. Н. Динамика фронта детонационной волны в твердых взрывчатых веществах // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 69–78.
- Таржанов В. И., Петров Д. В., Гармашев А. Ю., Кучко Д. П., Воробьев А. В., Ральников М. А., Боярников Д. С., Аминов Ю. А., Никитенко Ю. Р. Пересжатие сферически сходящейся детонации в пластифицированном ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 3. — С. 148–154. — DOI: 10.15372/FGV20220316.
- Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
   Nikolaev D., Ternovoi V., Kim V., Shu-
- Nikolaev D., Ternovoi V., Kim V., Shutov A. Plane shock compression generators, utilizing convergence of conical shock waves // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500. — 142026. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/14/142026.
- Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов. — Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики, 2005.
- 17. Пат. РФ № 2498200 от 10.11.2013. Контактно-секторный заряд из листового взрывчатого вещества / Гирин Ю. В., Мартынов А. Г., Ульянов Р. В., Чепурнов А. А.
- Пат. РФ № 2451895 от 27.05.2012. Устройство для формирования взрывной волны / Бондаренко Н. М., Галкин Е. А., Губачев В. А., Филиппов В. А.

- Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I. Formation features of cylindrical detonation wave at multipoint initiation // J. Phys.: Conf. Ser. — 2017. — V. 946. — 012057. — DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012057.
- Shutov A. V., Sultanov V. G., Dudin S. V. Mathematic simulation of cylindrical detonation wave // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 774. — 012075. — DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012075.
- Sosikov V. A., Torunov S. I., Dudin S. V. Smoothing the front of the detonation wave in experiments with multipoint initiation // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1147. — 012027. — DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012027.
- Heylmun J., Vonk P., Brewer T. blastFoam: An OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with Application to High-Explosive Detonation. — Synthetik Appl. Technol., LLC, 2019.
- Heylmun J., Vonk P., Brewer T. blastFoam User Guide. — Synthetik Appl. Technol., LLC, 30 Oct. 2019.
- 24. **Dobratz B. M.** LLNL Explosive Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. — Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, California, USA, 1981.

Поступила в редакцию 18.11.2022. Принята к публикации 14.12.2022.