

МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПРИ БОЛЬШИХ СТЕПЕНЯХ РАСШИРЕНИЯ

*Становов Александр Александрович (postmaster@ifv.vniief.ru), Богданов Евгений Николаевич,
Чудаков Евгений Алексеевич, Антонюк Леонид Константинович, Яговкин Александр Олегович,
Князев Вадим Николаевич, Воронков Ростислав Анатольевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработано экспериментальное устройство, с помощью которого проведены эксперименты по исследованию метательного действия продуктов взрыва (ПВ) взрывчатого вещества (ВВ) на основе октогена с целью верификации уравнений состояния (УРС) ПВ. С использованием лазерного гетеродин-интерферометра зарегистрирована информация о движении лайнеров из алюминия толщиной 1 и 2 мм на базах измерения до 60 мм.

Проведено расчетное моделирование постановки эксперимента для исследования разгона лайнера расширяющимися ПБВВ на основе октогена.

Результаты работы показали, что разработанное экспериментальное устройство можно использовать в дальнейших исследованиях УРС ПВ как универсальное устройство для исследования метательной способности ПВ.

Ключевые слова: уравнение состояния, взрывчатое вещество, продукты взрыва, моделирование, гетеродин-интерферометр.

METHOD FOR EXPLOSION PRODUCTS EQUATIONS OF STATE VERIFICATION AT HIGH DEGREE OF EXPANSION

*Stanovov Alexander Alexandrovich (postmaster@ifv.vniief.ru), Bogdanov Evgeny Nikolaevich,
Chudakov Evgeny Alekseevich, Antonyuk Leonid Konstantinovich, Yagovkin Alexander Olegovich,
Knyazev Vadim Nikolaevich, Voronkov Rostislav Anatolyevich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

An experimental facility is designed to perform a study of HMX based HE explosion products launching ability for the purpose of verifying the explosion products equations of state. Using a laser heterodyne interferometer, velocity histories of aluminum liners with the thicknesses of 1 and 2 mm were recorded through the distance up to 60 mm.

A computational simulation of the experimental facility for studying the liners acceleration by expanding HMX based HE explosion products is carried out.

The results of the work show that the developed experimental setup can be used in further studies of the equations of states of explosion products as a universal facility for studying the explosion products launching ability.

Keywords: equation of state, explosive, explosion products, modeling, heterodynes interferometer.

Введение

Одним из наиболее приемлемых тестов для верификации УРС ПВ являются эксперименты по исследованию метательного действия продуктов взрыва. В исследованиях отечественных и иностранных специалистов наибольшее распространение получи-

ли две основные редакции экспериментов: эксперименты по метанию плоских металлических лайнеров – метод М-60 [0] и эксперименты по метанию металлической цилиндрической оболочки – метод Т-20 [0]. Степень расширения ПВ в методах М-60 и Т-20 составляет 5–7 раз относительно состояния Чепмена – Жуге, а получаемая экспериментальная

информация недостаточна для верификации широкодиапазонных УРС ПВ, так как носит дискретный характер измерений и не соответствует современным требованиям к точности измерений. Для верификации УРС ПВ необходимы данные о метательной способности ПВ при больших степенях расширения (≈ 10 раз), когда становятся заметны отклонения в результатах расчета с различными УРС ПВ. При этом регистрация экспериментальной информации должна носить непрерывный характер измерений и обладать относительной погрешностью не более 2 %.

В работе предложена и расчетно обоснована постановка экспериментов по исследованию метательного действия продуктов взрыва ВВ на основе октогена. Для проведения экспериментальных исследований предложена схема экспериментального устройства, в котором продукты взрыва разгоняют тонкие (1 мм) алюминиевые пластины на больших базах – до 60 мм. В данной постановке опытов достигаются степени расширения ПВ ≈ 10 раз, а регистрация осуществляется с помощью метода лазерного гетеродин-интерферометра PDV [0].

С использованием разработанного экспериментального устройства проведены эксперименты с взрывчатым составом на основе октогена. С помощью гетеродин-интерферометра зарегистрирована информация о движении пластин на базах измерения до 60 мм.

Результаты проведенной работы указывают на то, что разработанное экспериментальное устройство можно использовать в исследованиях УРС ПВ и как универсальное устройство для исследования метательного действия ПВ.

Постановка экспериментов

С учетом предъявляемых требований к экспериментам разработана конструкция устройства для исследования метательного действия продуктов взрыва. В нагружающем устройстве в качестве исследуемого образца используется заряд из ВВ основе октогена диаметром 120 мм и толщиной $L = 60$ мм, стационарная детонация в котором инициируется генератором плоских ударных волн со свинцовой вставкой. Диаметр 120 мм позволяет получить необходимый уровень симметрии лайнера, одновременность выхода ударной волны из плосковолнового генератора составляет менее 0,05 мкс в круге диаметром 80 мм. В конструкции нагружающего устройства используются алюминиевые лайнеры толщиной $\delta = 1$ и 2 мм. Указанные значения толщин позволяют получать необходимые условия для надежной верификации УРС ПВ, в том числе в области низких давлений при больших степенях расширения. С целью уменьшения влияния боковой волны разрежения лайнеры профилированы, при разгоне центральную часть лайнера выбивает, что позволяет получать удовлетворительные характеристики симметрии в центральной области поверхности лайнера диаметром 30 мм на базах движения до 60 мм.

На рис. 1 представлен эскиз экспериментального устройства.

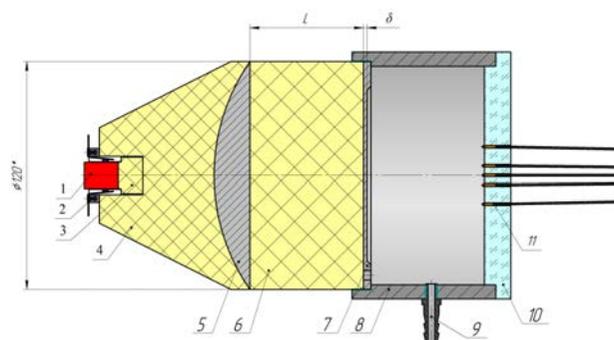


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки для исследования метательной способности продуктов взрыва состава на основе октогена: 1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – промежуточный детонатор; 4 – генератор плоской ударной волны; 5 – свинцовая вставка (линза); 6 – активный заряд ВВ на основе октогена $\varnothing 120 \times 60$ мм; 7 – лайнер из алюминия; 8 – корпус из стали; 9 – штуцер; 10 – крышка; 11 – коллиматор методики PDV

Для регистрации движения алюминиевых лайнеров используются 13 каналов комплекса лазерного гетеродин-интерферометра. Коллиматоры установлены на трех диаметрах 10, 20 и 30 мм по 4 штуки через 45° . Еще один коллиматор располагается на оси сборки. Такое количество коллиматоров увеличивает надежность и уменьшает случайную составляющую погрешности измерений скорости (согласно [0] методическая погрешность определения скорости составляет 20 м/с при погрешности измерения моментов времени 10 нс).

Схема расположения коллиматоров представлена на рис. 2.

Внутренний объем сборки, ограниченный стальным корпусом, алюминиевым лайнером и крышкой, вакуумируется до остаточного давления 0,01 атм.

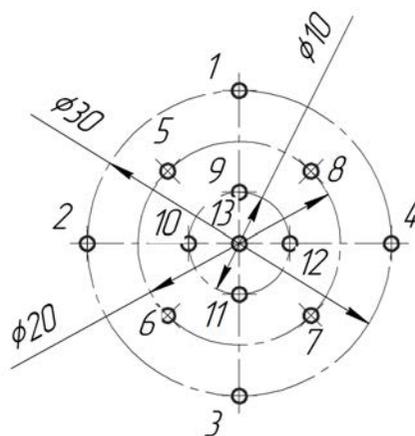


Рис. 2. Схема расположения коллиматоров PDV

Расчетное моделирование устройства для исследования метательного действия ПВ

Расчетное моделирование проводилось в одномерной и двумерной постановке.

Целью одномерного моделирования являлось исследование влияния плоскостолнового генератора на процесс движения лайнера из алюминия. Для этого в расчетную схему вводились слои ТГ 50/50 и свинца с толщинами, равными толщинам элементов конструкции на оси генератора (80 и 11 мм, соответственно). Данный подход упрощен, но позволяет получить оценку «сверху» для возможного увеличения скорости лайнера, связанного с влиянием плоскостолнового генератора.

Для состава ТГ 50/50 использовался УРС ПВ в форме В. Н. Зубарева [0]. Для свинца использовался УРС Ми–Грюнайзена с параметрами, которые подбирались на основе экспериментальных данных из [0]. Для активного заряда из ВВ на основе октогена использовался УРС ПВ на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса (мВдВ) [0].

Схема постановки расчета представлена на рис. 3.

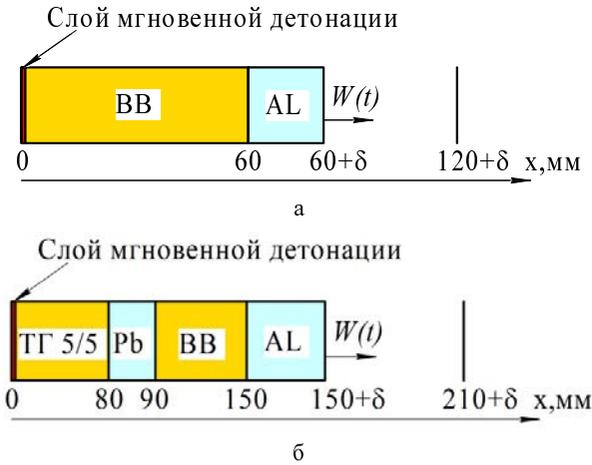


Рис. 3. Постановка одномерного расчета: а – без генератора; б – с генератором; δ – толщина алюминиевого лайнера

Зависимости скорости лайнеров из алюминия, полученные в результате моделирования приведены на рис. 4.

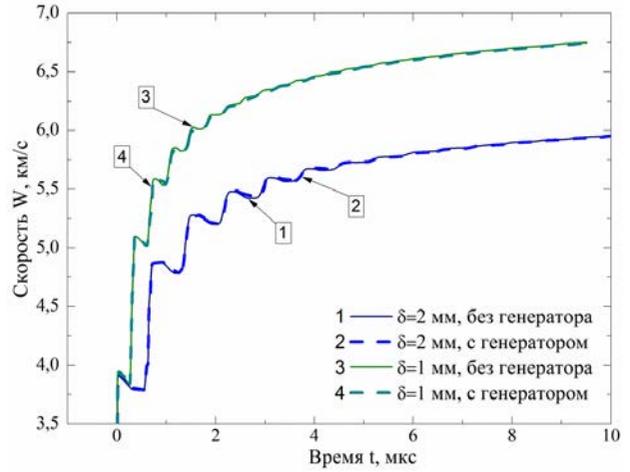


Рис. 4. Зависимости скорости алюминиевых лайнеров от времени: 1 – $\delta = 2$ мм, без генератора, 2 – $\delta = 2$ мм, с генератором, 3 – $\delta = 1$ мм, без генератора; 4 – $\delta = 1$ мм, с генератором

Из рис. 4 видно, что плоскостолновой генератор практически не влияет на результаты расчета скорости лайнера. Максимальное отличие между значениями максимальной скорости менее 1 %.

Для оценки формы алюминиевого лайнера проведены расчеты в двумерной постановке, в осесимметричном приближении. Расчеты проводились для лайнера из алюминия толщиной 1 и 2 мм. Схема постановки расчета для лайнера толщиной 2 мм представлена на рис. 5.

Плоскостолновой генератор, детонация ВВ и разлет продуктов взрыва моделировались с помощью эйлерового решателя на неподвижной сетке. Размер счетной ячейки в эйлеровой области составлял $0,1 \times 0,1$ мм. На границах эйлеровой области задавалось граничное условие, обеспечивающее свободное вытекание.

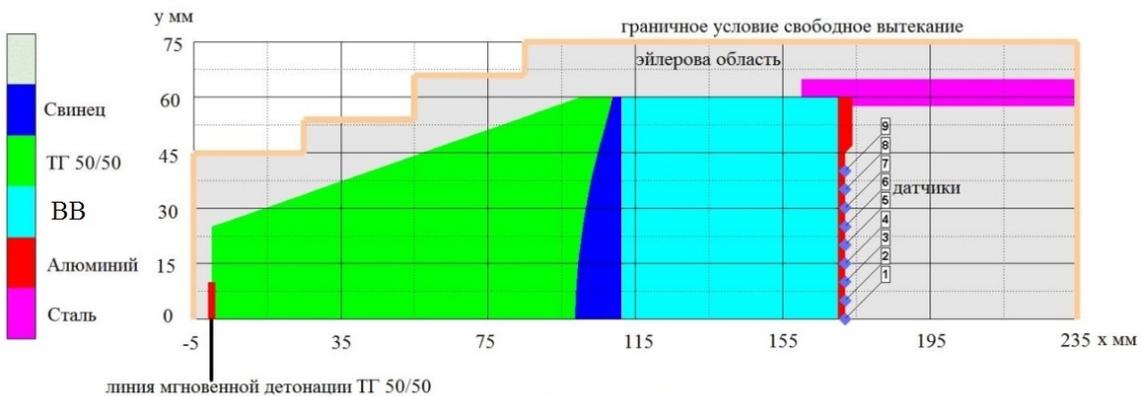


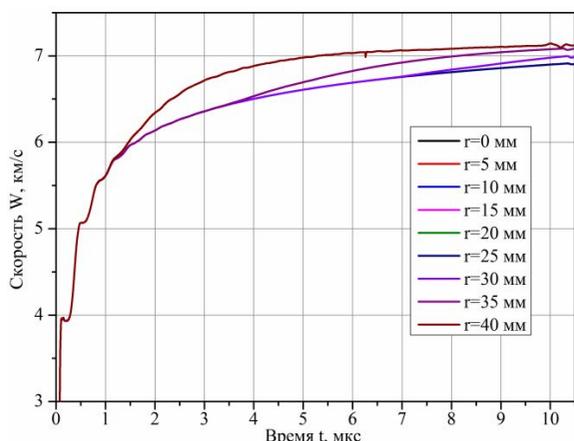
Рис. 5. Постановка двумерного расчета

Лайнер из алюминия и стальной корпус рассчитывались на подвижной неравномерной сетке с помощью лагранжевого решателя. Размер счетной ячейки в лагранжевой области составлял $0,1 \times 0,1$ мм. Взаимодействие математических областей обеспечивалось путем задания соответствующих контактных условий.

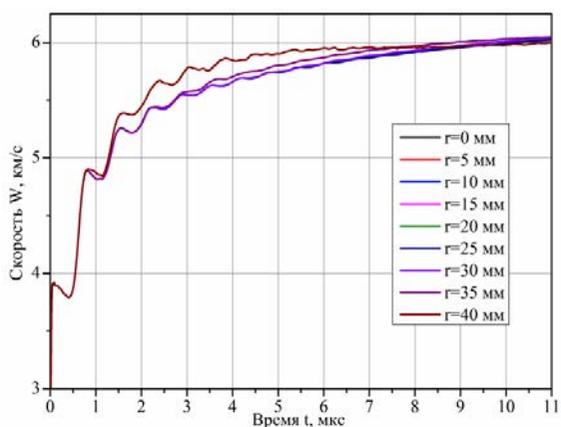
В лайнере из алюминия располагались датчики, которые регистрировали временные зависимости скорости и перемещений.

Для описания детонации и разлета продуктов взрыва ТГ 50/50 и ВВ на основе октогена использовалось уравнение состояния JWL[0], параметры которых подбирались на основе УРС ПВ мВдВ [0]. В ТГ 50/50 задавалась мгновенная детонация по кругу (см. рис. 5) диаметром 120 мм. В ВВ на основе октогена задавалась детонация по кругу диаметром 120 мм в момент входа УВ в заряд ВВ.

Результаты двумерных расчетов для устройств с толщинами лайнеров 1, 2 мм представлены на рис. 6 в виде зависимостей скорости свободной поверхности алюминиевого лайнера от времени на разных расстояниях r (0–40 мм) от оси симметрии сборки.



а



б

Рис. 6. Зависимости скорости свободной поверхности алюминиевого лайнера от времени: а – алюминиевый лайнер 1 мм; б – алюминиевый лайнер 2 мм

Из анализа рис. 6 следует, что на базе измерения 60 мм на поверхности алюминиевого лайнера наблюдается плоский симметричный участок диаметром около 50 мм.

Для наглядности, на рис. 7 и 8 представлены на разные моменты времени процессы движения алюминиевого лайнера толщиной 1, 2 мм соответственно. Отсчет времени производится от момента инициирования плосковолнового генератора.

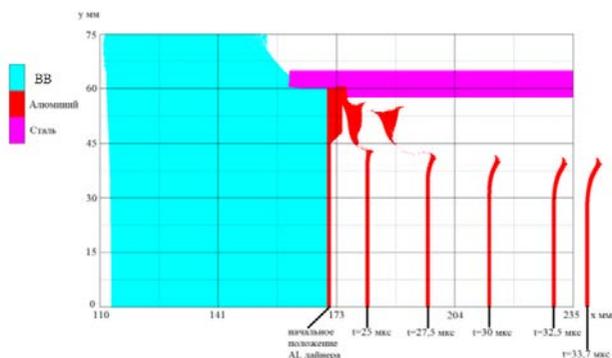


Рис. 7. Процесс движения алюминиевого лайнера толщиной 1 мм

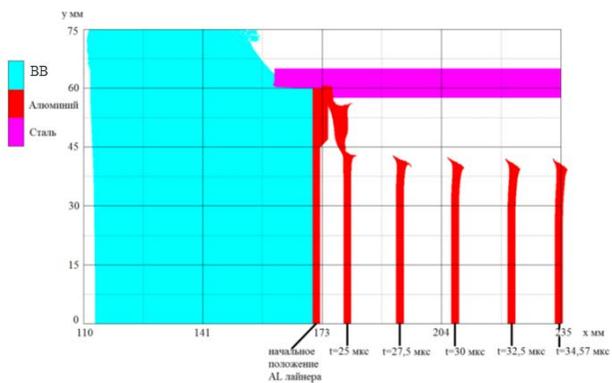


Рис. 8. Процесс движения алюминиевого лайнера толщиной 2 мм

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при толщине лайнеров 1, 2 мм на базе пролета 60 мм их центральная часть диаметром около 50 мм движется плоско-параллельно – максимальная разнородность не превышает 10 м/с, а максимальная асимметрия – 0,1 мм.

На рис. 9 представлены расчетные (по УРС ПВ на основе модели мВдВ) изэнтропа и зависимости давления в продуктах взрыва ВВ на основе октогена от плотности для двух постановок экспериментов. Состояния в продуктах взрыва рядом с границей раздела с лайнером, реализуемые при метании алюминиевых лайнеров толщиной 2 и 1 мм, располагаются практически вплотную к изэнтропе расширения ПВ. Из рис. 9 видно, что с использованием предложенной постановки возможно достижения степеней расширения ПВ около $\rho_{СТ}/\rho \sim 10$ раз относительно состояния в точке Чепмена–Жуге.

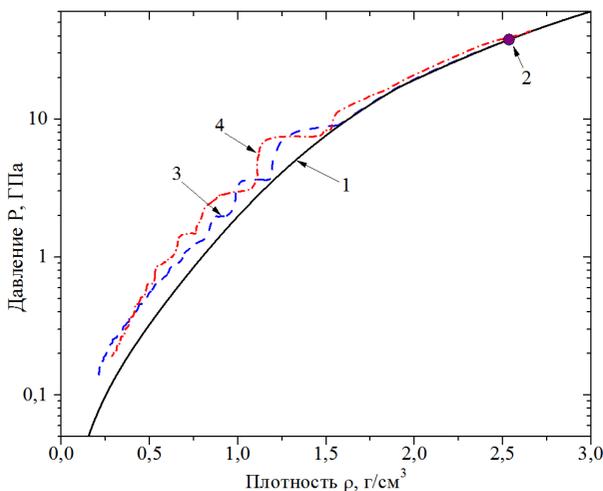


Рис. 9. Расчетные зависимости давления от плотности в продуктах взрыва ВВ на основе октогена: 1 – изэнтропа расширения ПВ; 2 – состояние в точке Чепмена–Жуге; 3 – состояния в ПВ при метании алюминиевого лайнера толщиной 1 мм; 4 – состояния в ПВ при метании алюминиевого лайнера толщиной 2 мм

Представленные выше результаты расчетного моделирования подтвердили работоспособность выбранной редакции экспериментов (см. рис. 1)

Результаты экспериментов

На рис. 10 для иллюстрации представлены спектрограммы опытов с ВВ на основе октогена.

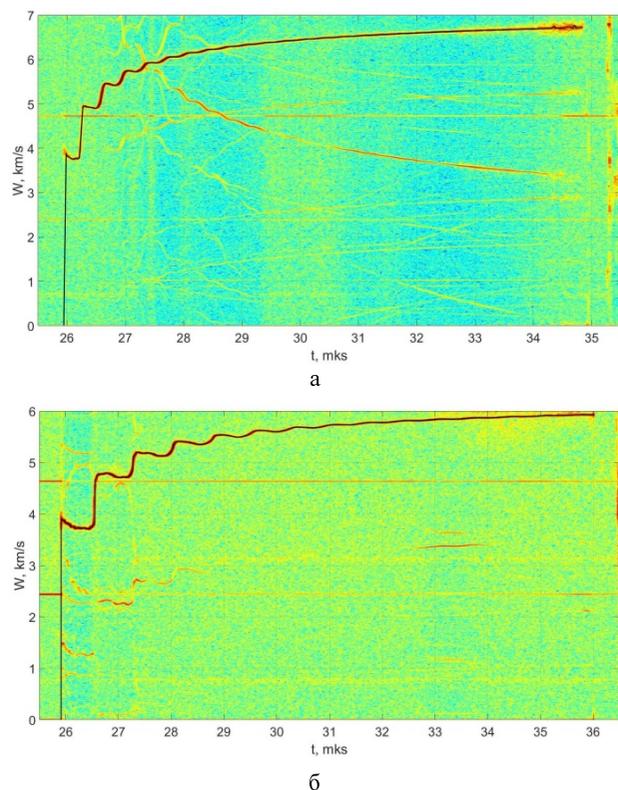


Рис. 10. Спектрограммы опытов: а – опыт № 1 ($\delta = 1$ мм); б – опыт № 2 ($\delta = 2$ мм)

На рис. 11 представлены зависимости момента времени выхода ударной волны на свободную поверхность лайнера от угла установки коллиматоров. Среднеквадратичное отклонение момента выхода ударной волны от среднего значения в проведенных опытах составило 10–15 нс, что является признаком хорошей симметрии выхода детонационной волны из заряда ВВ.

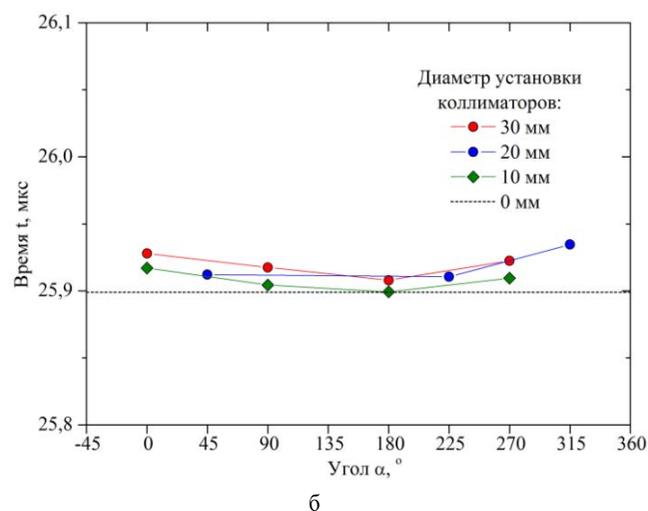
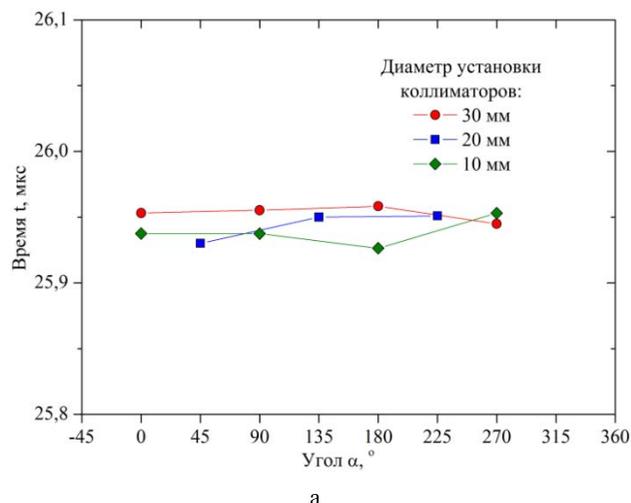
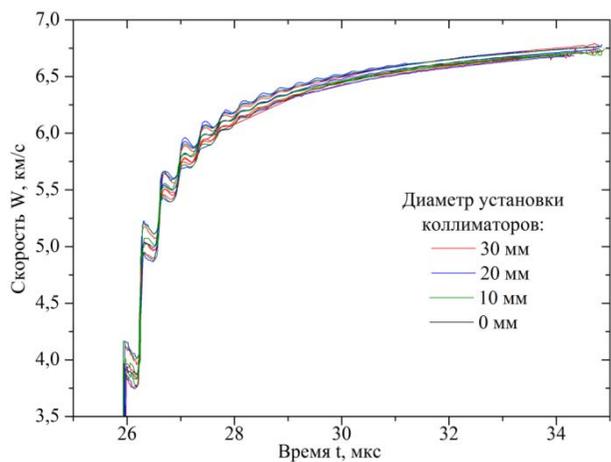
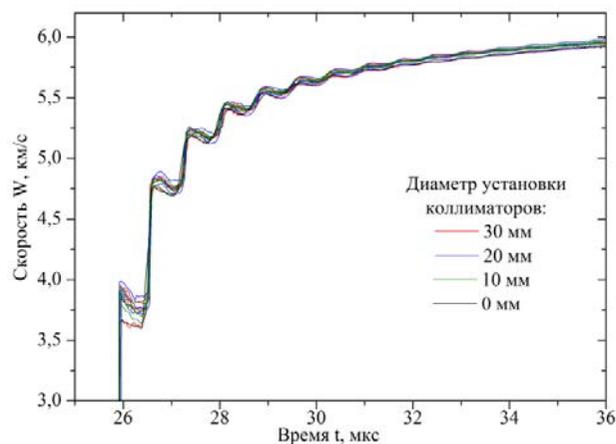


Рис. 11. Зависимости момента времени выхода ударной волны на свободную поверхность лайнера от угла установки коллиматоров в опытах: а – опыт № 1 ($\delta = 1$ мм); б – опыт № 2 ($\delta = 2$ мм)

На рис. 12 представлены зарегистрированные в опытах № 1–2 зависимости скорости свободной поверхности лайнера от времени. Представленные зависимости демонстрируют согласие между зарегистрированными профилями скорости, имеющийся разброс по скоростям можно объяснить неоднородностью структуры детонационного фронта (ВВ гетерогенно).



а



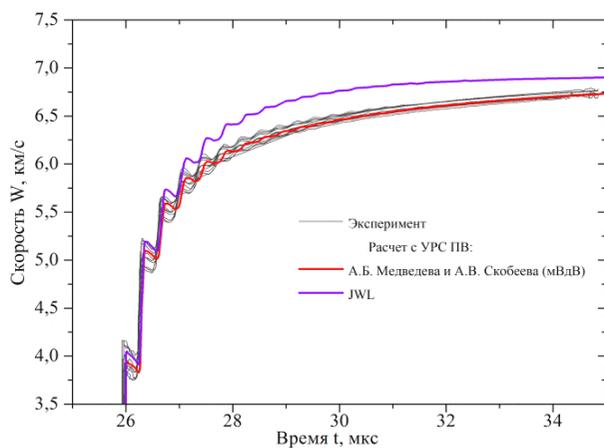
б

Рис. 12. Зависимости скорости свободной поверхности лайнера от времени в опытах: а – опыт № 1 ($\delta = 1$ мм); б – опыт № 2 ($\delta = 2$ мм)

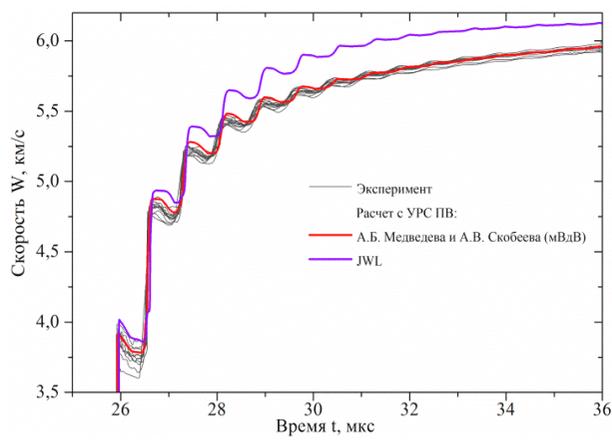
Сравнение результатов экспериментов с результатами одномерного расчетного моделирования

На рис. 13 представлены экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности лайнера от времени в сравнении с результатами одномерных расчетов. Для продуктов взрыва ВВ на основе октогена использовалось УРС ПВ на основе модели мВдВ в табличном виде [5] и УРС JWL [0].

Как видно из рис. 13, экспериментальные зависимости скорости 2-мм и 1-мм лайнера от времени, метаемого продуктами взрыва ВВ на основе октогена, адекватно воспроизводятся УРС ПВ на основе модели мВдВ.



а



б

Рис. 13. Зависимости скорости свободной поверхности лайнера от времени: а – лайнер толщиной 1 мм в опыте № 1; б – лайнер толщиной 2 мм в опыте № 2

Заключение

Предложена редакция экспериментов по исследованию метательной способности продуктов взрыва ВВ на основе октогена и предложен метод верификации УРС ПВ.

Расчетное моделирование в одномерной и двумерной постановках показало работоспособность экспериментального устройства.

С применением лазерного гетеродин-интерферометра получен необходимый для уточнения УРС ПВ объем информации о метательном действии продуктов взрыва.

Экспериментальным и расчетным путем показано, что в разработанной редакции эксперимента ПВ расширяются в ~ 10 раз относительно состояния Чепмена – Жуге.

Результаты проведенной работы указывают на то, что разработанное экспериментальное устройство можно использовать как для уточнения уравнений состояний продуктов взрыва взрывчатых веществ, так и как универсальное устройство для исследования метательной способности ВВ.

Список литературы

1. Экспериментальные методы в физике ударных волн и детонации: монография / Под ред. Жерноклетова М. В. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. С. 519.

2. Способ определения параметров разлета цилиндрической оболочки под действием взрыва / Исаак А. М., Клочков И. С. // Изобретения. Полезные модели. 2000. № 13 (ч. 2).

3. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук Михайлова А. Л. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 322.

4. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва

конденсированных ВВ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 127–132.

5. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / Под ред. Трунина Р. Ф. 2-е изд., перераб. и доп. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 531.

6. Копышев В. П., Медведев А. Б., Хрусталев В. В. Уравнение состояния продуктов взрыва на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса // ФГВ. 2006. Т. 42, № 3. С. 87–99.

7. Lee, E., Finger, M., Collins, W. JWL Equation of State Coefficients for High Explosives / Lawrence Livermore Laboratory, Rept-UCID-16189, 1973.