
ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 533.6.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЕМ НАСЫПНОГО МАТЕРИАЛА В КОНИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

© 2021 г. С. В. Хомик^{1*}, И. В. Гук², А. Н. Иванцов¹, С. П. Медведев¹, Э. К. Андержанов¹,
А. И. Михайлин^{1,2}, М. В. Сильников^{1,2}, А. М. Тереза¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²АО “НПО Спецматериалов”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sergei.khomik@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2021;

после доработки 15.03.2021;

принята в печать 22.03.2021

В экспериментах с использованием конической ударной трубы определены избыточное давление и импульс фазы сжатия, передаваемые жесткой стенке через слой дисперсного материала при распространении вдоль него сферической ударной волны. Исследованы слои песка различной дисперсности и толщины при варьировании интенсивности ударной волны. Выявлены условия, при которых происходит увеличение амплитуды ударной волны. Импульс фазы сжатия ударной волны, передаваемый через насыпную среду, слабо зависит от толщины слоя и интенсивности ударно-волнового воздействия.

Ключевые слова: коническая ударная труба, сферическая ударная волна, дисперсный материал, взрывозащитное покрытие.

DOI: 10.31857/S0207401X21080045

ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия воздушной ударной волны со слоем насыпного материала имеет разнообразные аспекты, связанные как с фундаментальными закономерностями двухфазных течений, так и с практическими вопросами обеспечения взрывобезопасности. Исторически научно-исследовательская активность в этой области была обусловлена проблемой предотвращения и подавления пылевых взрывов [1–3]. Пылевой взрыв (ПВ) на практике, как правило, не ограничивается локальным актом сгорания изолированной газодисперсной системы. Особенностью ПВ является его способность распространяться на большие расстояния, вовлекая во взрывной процесс все новые массы пылевого материала. Так, значительные разрушения наблюдаются при взрывах в угольных шахтах и в системах пневмотранспорта, где сыпучий материал не локализован, а как правило, распределен в виде осевшего на стенках и дне канала слоя. Другим примером подобного рода может служить процесс последовательного воспламенения муки в хранилище элеватора при распростра-

нении волны давления и горячих продуктов взрыва по системе вентиляции.

Для рассматриваемых сценариев аварий типичной является ситуация, когда волны сжатия или ударные волны (УВ) проникают в объем, частично заполненный насыпной средой. Исторически специалистов, исследующих ПВ, интересовали два аспекта проблемы взаимодействия УВ со слоями сыпучих веществ. Первый аспект связан с изучением структуры ударной волны, скользящей вдоль поверхности слоя, а второй — с исследованием динамики подъема пыли и создания взрывоопасного облака в газовом потоке, индуцированном УВ. В работе [4] представлен подробный обзор экспериментальных и теоретических работ в этой области. Для моделирования взрывных процессов критическое значение играют также исследования воспламенения пылевзвесей за ударными волнами [5].

Однако, как оказалось, формирование пылевого облака не исчерпывает картину ударно-волнового действия в объемах, частично заполненных насыпной средой или содержащих таковую в виде тонких слоев на ограничивающих поверхностях. Так же,



Рис. 1. Вид внутренней поверхности КУТ: 1 — слой песка толщиной $h = 20$ мм, дисперсность — 0.5–0.8 мм; 2 — датчик давления перед насыпным слоем.

как и для пористого сжимаемого материала, такого, например, как пенополиуретан [6, 7], при наличии насыпного слоя на жесткой подложке наблюдается эффект значительного кратковременного усиления приложенной ударно-волновой нагрузки [8]. Этот фактор следует учитывать при оценках динамического воздействия пылевых взрывов, а также при использовании насыпных материалов в качестве взрывозащитных покрытий. Экспериментальные данные, представленные в работе [8] и затем подтвержденные в [9], получены в случае плоских УВ, формирующихся в ударных трубах постоянного сечения. Между тем применительно к реальным сценариям аварийных ситуаций повышенный интерес представляют сферические взрывные волны (СУВ) со спадающим за фронтом давлением. Такие профили давления характерны для взрывов в открытом пространстве зарядов конденсированных взрывчатых веществ и для разлета газонаполненных сосудов. Отдельные наблюдения в работе [8] свидетельствуют о том, что форма профиля давления может оказывать влияние на параметры передаваемой через насыпной слой ударно-волновой нагрузки. Этот эффект был установлен с помощью методики генерации в ударной трубе плоской УВ треугольного (взрывного) профиля давления [10]. Однако, как показано в работах [11, 12], несмотря на возможности расширения области применения ударной трубы постоянного сечения [13], для моделирования СУВ целесообразно использовать конические ударные трубы (КУТ). В работе [14] продемонстрирована эффективность КУТ для исследования взрывозащитных свойств покрытия из текстиля.

Цель работы — выявление с помощью экспериментов в конической ударной трубе закономерностей взаимодействия сферической ударной волны со слоем насыпного материала. В качестве

объекта исследования выбран песок различной дисперсности. Основное внимание уделено определению влияния размера частиц на избыточное давление и импульс фазы сжатия, передаваемые защищаемому объекту (жесткой подложке) при различных интенсивностях СУВ. Полученные данные могут быть полезны для феноменологического описания поведения взрывозащитных покрытий при воздействии динамической нагрузки и для валидации расчетных моделей, как уже зарекомендовавших себя [15–17], так и разработанных недавно [18–20].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились в конической ударной трубе КУТ-14, состоящей из камеры высокого давления (КВД) и открытой конической камеры низкого давления с углом раствора 14° и длиной до 3 м. Камеры разделялись разрывными мембранами из алюминиевой или медной фольги с различными давлениями разрыва. Камера высокого давления представляет собой цилиндр длиной 100 мм и радиусом 54 мм. Общий вид горизонтально расположенной КУТ-14, оснащенной датчиками давления, приведен в работе [14]. В представленных опытах один из датчиков, смонтированных вдоль нижней образующей конуса, был покрыт слоем песка толщиной от 10 до 30 мм. Внутренняя часть трубы со слоем песка толщиной 20 мм показана на рис. 1 со стороны открытого выходного сечения КУТ-14. Использовали две ситовые фракции — с размером частиц 0.1–0.2 и 0.5–0.8 мм. На верхней образующей конуса, в том же сечении трубы, что и датчик, покрытый насыпным слоем, располагался дублирующий датчик давления. Таким образом, в каждом эксперименте одновременно регистрировались профили давле-

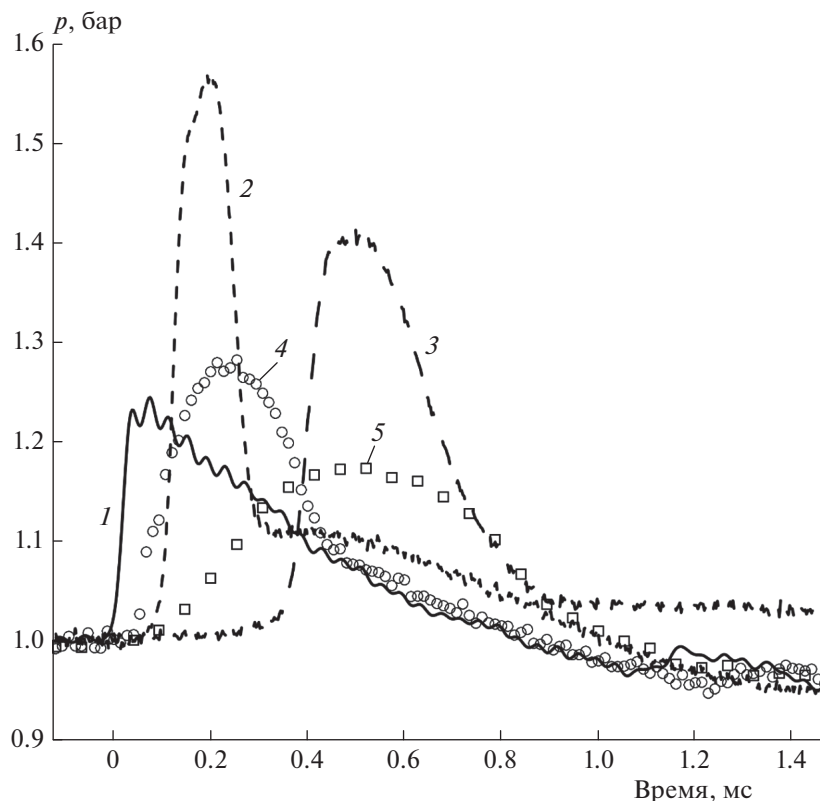


Рис. 2. Профили давления на стенке конической ударной трубы при различных параметрах насыпного слоя. Толщина слоя: 1 — 0; 2, 4 — 10 мм; 3, 5 — 30 мм. Размер частиц песка: 2, 3 — 0.1–0.2 мм; 4, 5 — 0.5–0.8 мм.

ния и под слоем, и на стенке над ним. В качестве толкающего газа в КВД использовалась смесь гелия с воздухом при различном начальном давлении, определяемом давлением разрыва мембраны. Расстояние от КВД до посадочных отверстий датчиков, расположенных друг напротив друга, составляет 1.144 м. В этом сечении на фронте проходящей ударной волны избыточное давление в газе составляло от 0.16 до 0.75 бар в зависимости от используемой мембраны. Во всех опытах коническая камера низкого давления была заполнена воздухом при нормальных условиях.

Разработанная методика определения взрывозащитных свойств различных покрытий основана на предположении, что помещенный на датчик давления слой насыпного или другого материала несущественно искажает картину течения в КУТ. Действительно, в месте измерений поперечное сечение конической секции составляет около 300 мм, что намного больше максимальной толщины насыпного слоя (30 мм). Тем не менее для обоснования применяемой методики, наряду с получением экспериментальных данных, целесообразно провести численное моделирование влияния наличия слоя насыпного материала на картину течения в КУТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах проводилось сравнение амплитуды и профиля давления СУВ, регистрируемых на стенке трубы в отсутствие насыпного слоя и при его наличии. Пример такого сравнения приведен на рис. 2, где представлены зависимости давления от времени, записанные датчиками над слоем и под ним при толщине слоя $h = 10$ и 30 мм для насыпной среды различной дисперсности. Избыточное давление на фронте СУВ $\Delta p_0 = 0.23$ бар. Как видно, давление на стенке под слоем растет достаточно плавно, и по мере увеличения толщины слоя возрастает ширина профиля волны сжатия с одновременным уменьшением амплитуды. Одновременно с этим происходит увеличение задержки между моментами прихода ударной волны на датчик в газе и датчик, расположенный под слоем. Этот эффект хорошо виден при сравнении кривых 2 и 3 для частиц размером 0.1–0.2 мм, что обусловлено малой скоростью распространения волн давления в мелкодисперсной насыпной среде [21]. При этом максимальная амплитуда избыточного давления под слоем, Δp_m , значительно превышает величину Δp_0 . Из представленных на рис. 2 записей

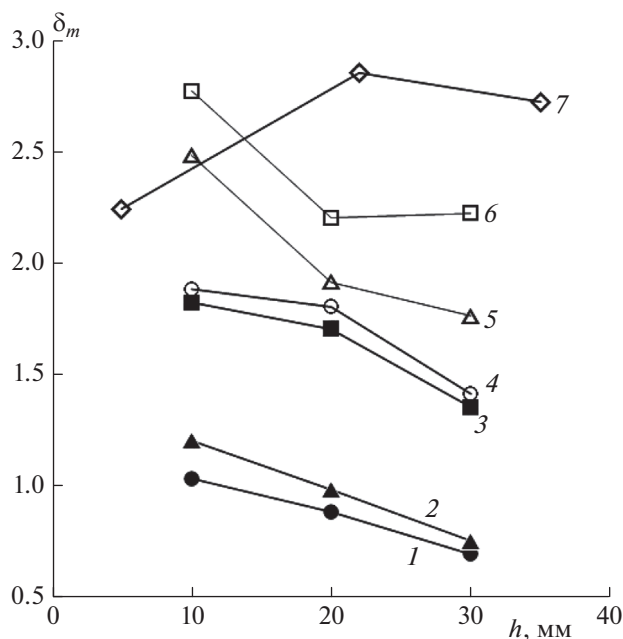


Рис. 3. Зависимость максимальной величины коэффициента относительной нагрузки от толщины слоя песка фракций 0.1–0.2 (кривые 4–6) и 0.5–0.8 мм (кривые 1–3) при различных интенсивностях СУВ: $\Delta p_0 = 0.16$ (кривые 1, 4), 0.23 (кривые 2, 5), 0.5 бар (кривые 3, 6); кривая 7 — данные [8].

профилей давления видно, что увеличение размера частиц до 0.5–0.8 мм приводит к сильному уменьшению максимального избыточного давления на стенке под слоем. И если при толщине слоя 10 мм наблюдается небольшое усиление нагрузки ($\Delta p_m \approx 1.2\Delta p_0$), то при $h = 30$ мм интенсивность волн оказывается меньше, чем в его отсутствие.

При анализе полученных экспериментальных зависимостей полезно использовать введенный в [8] коэффициент максимальной относительной

нагрузки: $\delta_m = \Delta p_m / \Delta p_0$. По аналогии введем коэффициент изменения импульса фазы сжатия: $\eta_m = I_m / I_0$, где I_m — импульс фазы сжатия под насыпным слоем, а I_0 — импульс фазы сжатия без слоя. Оба эти импульса определялись путем расчета площади под графиком профиля давления соответствующего датчика. На рис. 3 представлены результаты экспериментально определенных величин δ_m для фракций песка 0.1–0.2 мм (кривые 4–6) и 0.5–0.8 мм (кривые 1–3) при различных интенсивностях СУВ. Из графиков видно, что при толщине слоя 10 мм для исследованного диапазона величин Δp_0 всегда $\delta_m > 1$, т.е. происходит усиление передаваемого на подложку ударно-волнового воздействия. Ослабление СУВ дисперсным материалом имеет место только в случае слоя крупнодисперсного песка толщиной $h = 30$ мм (кривая 2) при интенсивности СУВ 0.23 бар и слоев толщиной $h = 20$ и 30 мм (кривая 1) при $\Delta p_0 = 0.16$ бар. С уменьшением размера частиц отмечается увеличение параметра δ_m . Как отмечено в [8], это происходит за счет возможности сжатия насыпного слоя (более плотной упаковки) в случае свободной засыпки мелкодисперсным материалом. Для крупных частиц такая возможность практически отсутствует, что подтверждается уменьшением величины δ_m . Обращает на себя внимание полное качественное и близкое количественное соответствие изменения коэффициента δ_{max} для слоя частиц размером 0.5–0.8 мм при интенсивности нестационарной ударной волны $\Delta p_0 = 0.5$ бар (кривая 3) и слоя частиц размером 0.1–0.2 мм при в два раза меньшей интенсивности СУВ (кривая 4). Таким образом, как уменьшение размера частиц, так и увеличение интенсивности ударной волны приводят к одинаковому результату. На этом же рисунке (рис. 3, кривая 7) приведены данные из работы [8] для зависимости величины δ_m от толщины слоя песка дисперсностью 0.1–0.2 мм при

Таблица 1. Зависимость коэффициента изменения импульса фазы сжатия (η_m) от дисперсности, толщины слоя (h , мм) и интенсивности СУВ

Дисперсность частиц, мм	Δp_0 , бар	η_m		
		$h = 10$	$h = 20$	$h = 30$
0.1–0.2	0.16	1.42	1.55	1.38
	0.23	1.42	1.52	1.55
	0.50	1.4	1.46	1.6
0.5–0.8	0.16	0.91	0.98	0.82
	0.23	0.89	0.77	0.89
	0.50	0.72	0.92	0.83

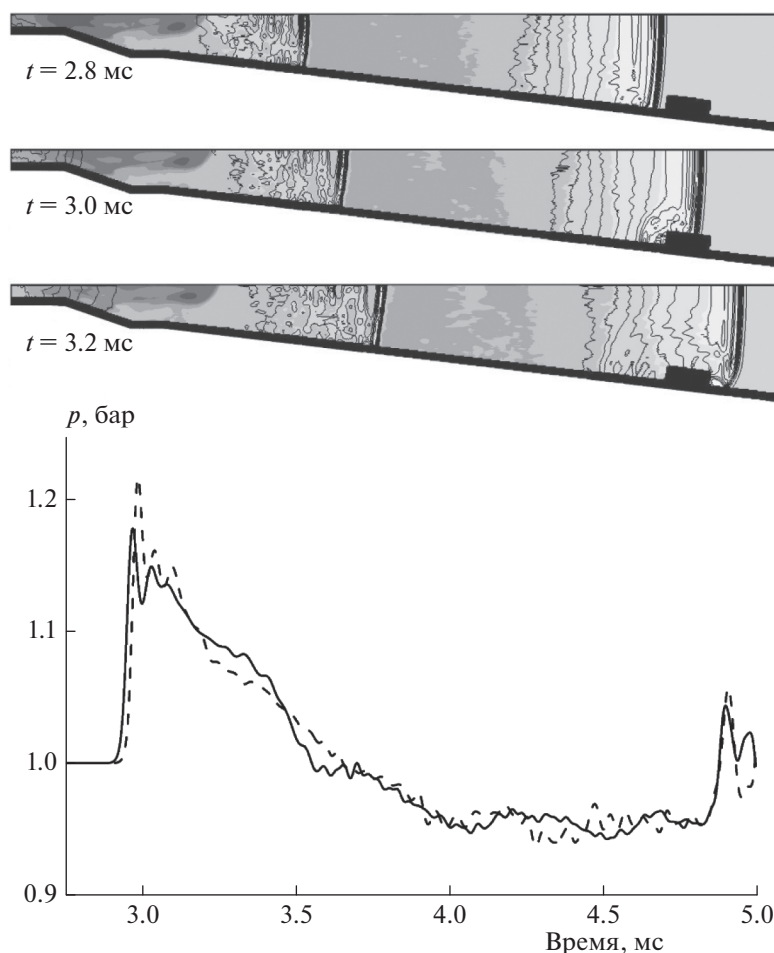


Рис. 4. Расчетные кадры картины течения и профили давления в измерительном сечении. Ось симметрии для КУТ расположена по горизонтали в верхней части каждого кадра. Изолинии давления — через 0.02 бар. Профили давления: сплошная линия — в отсутствие модельного цилиндра, штриховая — в центре цилиндра на его поверхности.

воздействию на него плоской ударной волны ступенчатого профиля давления с $\Delta p_0 = 1.5$ бар. Видно, что характер зависимости разный и максимум достигается при $h = 20\text{--}30$ мм, а не при $h = 10$ мм, как в экспериментах в КУТ. Этот эффект является следствием быстрого спада давления за фронтом СУВ.

Данные по влиянию дисперсности, толщины насыпного слоя и интенсивности нестационарной ударной волны на коэффициент изменения импульса фазы сжатия (η_m) представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что для песка фракции 0.1–0.2 мм, несмотря на разброс опытных данных, коэффициент η_m во всем диапазоне величины h и интенсивности СУВ больше единицы: $\eta_m = 1.4\text{--}1.6$. Увеличение размера частиц приводит к изменению характера зависимости η_m от интенсивности волны и толщины слоя. Коэффициент изменения импульса фазы сжатия для частиц фракции 0.5–

0.8 мм становится меньше единицы $\eta_m = 0.7\text{--}0.9$. Таким образом, в случае мелких частиц следует ожидать усиление передаваемой через насыпной слой ударно-волновой нагрузки как по давлению, так и по импульсу фазы сжатия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для обоснования применяемой экспериментальной методики необходимо оценить, как изменяется картина течения в КУТ в присутствии насыпного слоя. В работе [11] показано, что особенности течения в КУТ могут быть выявлены с помощью численного моделирования с использованием пакета прикладных программ для газодинамических расчетов GAS DYNAMICS TOOL (GDT) [22]. Пакет GDT ранее апробирован на различных задачах определения закономерностей течения в КУТ [11, 12], а также инициирования детонации в сложной гео-

метрической конфигурации [23]. Особенности и детали методики численного моделирования течения в КУТ подробно рассмотрены в [11]. Расчеты для текущей задачи проведены в трехмерной постановке при размере расчетной ячейки, равной 2 мм. На рис. 4 представлены результаты численного моделирования картины течения и профиля давления в измерительном сечении. С учетом того, что объем песка под действием УВ уменьшается незначительно [8], локализованный насыпной слой задавался в виде недеформируемого твердого тела цилиндрической формы диаметром 60 мм, выступающего на 30 мм от нижней образующей КУТ. Указанный объект легко различим в правой части расчетных кадров, представленных на рис. 4. Время на первом и последующих кадрах, а также на профилях давления отсчитывается от момента разрыва виртуальной мембраны, разделяющей КВД и коническую секцию низкого давления. Сравнение между собой кадров при $t = 2.8$ и 3.0 мс показывает, что после взаимодействия с передней границей модельного цилиндра фронт СУВ несколько искажается за счет формирования присоединенных ударно-волновых конфигураций. После прохождения цилиндра картина течения восстанавливается. В нижней части рис. 4 представлены профили давления в отсутствие модельного цилиндра и в центре цилиндра, когда по его поверхности распространяется СУВ. Видно, что профили давления различаются незначительно. Отметим, что при моделировании насыпного слоя в виде цилиндра не учитывается реальная экспериментальная конфигурация с пологими границами слоя (см. рис. 1). Таким образом, проведенные расчеты выполнены для наиболее неблагоприятных условий с точки зрения искажения фронта ударной волны. Учитывая эти факторы, можно заключить, что методика одновременной регистрации профиля давления под слоем и на стенке может быть использована для определения величины коэффициента передачи ударно-волновой нагрузки как по давлению, так и по импульсу фазы сжатия СУВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментов с использованием конической ударной трубы разработана и обоснована методика исследования закономерностей передачи ударно-волновой нагрузки через слой насыпного материала при воздействии сферической ударной волны. Эксперименты показали, что давление и импульс, передаваемые через слой насыпного материала (песка), зависят от интенсивности СУВ и толщины слоя. Установлено, что максимальное давление, передаваемое подложке, может значительно превышать величину давления

при распространении СУВ в отсутствие покрытия. С увеличением размера частиц и уменьшением интенсивности СУВ этот эффект исчезает, и насыпное покрытие ослабляет ударно-волновое воздействие. Передаваемый через насыпной слой импульс фазы сжатия превышает исходный в случае мелкодисперсных материалов и уменьшается при использовании крупных частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00554).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия, 1976.
2. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.
3. Eckhoff R.K. Dust Explosions in the Process Industries: Identification, Assessment and Control of Dust Hazards. Elsevier, 2003.
4. Федоров А.В. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 1. С. 21.
5. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Тимофеев Е.И., Цыганов С.А., Хомик С.В. // Хим. физика. 1983. Т. 2. № 8. С. 1127.
6. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Козарко С.М., Попов О.Е. // ЖПМТФ. 1975. № 6. С. 74.
7. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. № 4. С. 831.
8. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Borisov A.A., Polenov A.N., Frolov S.M., Tsyganov S.A. // Arch. Combust. 1989. V. 9. № 1/4. P. 153.
9. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. // Exp. Fluids. 1997. V. 22. № 5. P. 432.
10. Гельфанд Б.Е., Поленов А.Н., Фролов С.М., Цыганов С.А. // Хим. физика. 1986. Т. 5. № 1. С. 121.
11. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Сильников М.В., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
12. Medvedev S.P., Khomik S.V., Ivantsov A.N., Anderzhanov E.K., Tereza A.M., Mikhailin A.I., Silnikov M.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012084.
13. Gelfand B.E., Bartenev A.M., Medvedev S.P., Polenov A.N., Khomik S.V., Lenartz M., Grönig H. // Shock Waves. 1994. V. 4. № 2. P. 137.
14. Медведев С.П., Андержанов Э.К., Гук И.В., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Сильников М.В., Помазов В.С., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 24.
15. Кутушев А.Г., Родионов С.П. // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 2. С. 105.
16. Gubaidullin A.A., Britan A., Dudko D.N. // Shock Waves. 2003. V. 13. P. 41.
17. Fedorov A.V., Fedorchenko I.A., Leont'ev I.V. // Shock Waves. 2006. V. 15. P. 453.
18. Уткин П.С. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 11. С. 61.

19. Сидоренко Д.А., Уткин П.С. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 43.
20. Порошина Я.Э., Уткин П.С. // Горение и взрыв. 2020. Т. 13. № 1. С. 95.
21. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Тимофеев Е.И., Фролов С.М., Цыганов С.А. // ЖПМТФ. 1986. № 1. С. 141.
22. Зибаров А.В. Пакет прикладных программ GAS DYNAMICS TOOL и его применение в задачах численного моделирования газодинамических процессов. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Тула: ТГУ, 2000. С. 317.
23. Михалкин В.Н., Медведев С.П., Маилков А.Е., Хомик С.В. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 52.