

УДК 532.593; 533.6.071.8; 502

И. С. Ануфриев¹, А. Н. Голованов², А. Ф. Цимбалюк², О. В. Шарыпов^{1,3}

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: sharypov@itp.nsc.ru

ДИНАМИКА УДАРНЫХ ВОЛН В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛАХ С КОНФУЗОРАМИ *

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния конических конфузоров на интенсивность ударной волны, инициируемой в ударной трубе взрывом порохового заряда. Для заданных условий опытным путем найдены оптимальные геометрические параметры конфузора, обеспечивающие максимальное давление во фронте ударной волны на выходе из канала. Разработана математическая модель и выполнено численное моделирование осесимметричного ударно-волнового течения невязкого газа в канале. Экспериментально показано, что применение оптимального конфузора обеспечивает значительное повышение эффективности газодинамического воздействия на процесс горения лесных горючих материалов.

Ключевые слова: нестационарные ударные волны, горение, экспериментальное исследование, математическое моделирование, газодинамическое воздействие на пламя.

Введение

Фундаментальные закономерности процессов инициирования ударных волн (УВ) в газовых средах и их взаимодействие с отражающими поверхностями в настоящее время подробно исследованы. УВ широко используются при изучении физики неравновесных процессов. Все большее применение УВ находят в области решения прикладных задач. Одно из важных направлений практического применения УВ связано с их взаимодействием с процессами горения. В зависимости от конкретных условий УВ могут приводить, как к интенсификации горения (вплоть до перехода к детонационному режиму), так и к его подавлению (вплоть до прекращения). Последнее позволило разработать ударно-волновые методы борьбы с лесными пожарами [1]. Фронт как верхового, так и низового лесного пожара

имеет сложную структуру, включающую зоны прогрева, сушки, пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), зажигания и горения газообразных продуктов, зону догорания. Воздействуя на зону пиролиза, можно управлять процессом, препятствуя распространению пламени [1; 2]. Реализация ударно-волнового метода пожаротушения требует создания безопасных, надежных и компактных устройств, примеры которых известны [3]. В настоящее время актуальной является задача повышения эффективности подобных устройств. Один из путей решения данной проблемы – повышение интенсивности генерируемой УВ. Способ, предложенный в [4], предполагает использование ударной трубы с коническим конфузорным насадком. Основная задача настоящей работы – экспериментальное и теоретическое обоснование данного способа, включающее исследование динамики УВ в канале и опре-

* Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00296-а) и Федерального агентства по образованию (АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проекты № 2.1.1/2269; 2.2.1.1/1269; 2.1.2/1270).

деление оптимальных геометрических параметров конфузора, а также проверка эффективности способа в полунатурных условиях, моделирующих низовой лесной пожар.

Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование влияния конического конфузора на интенсивность УВ осуществлялось с помощью ударной трубы (рис. 1).

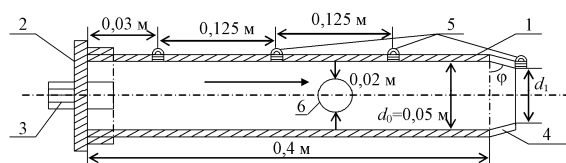


Рис. 1. Схема ударной трубы

На схеме обозначены: 1 – стальная цилиндрическая труба (длиной 0,4 м и диаметром 0,05 м); 2 – крышка; 3 – механизм иницирования; 4 – конический конфузор (диаметр выходного отверстия d_1 , угол раствора φ); 5 – пьезоэлектрические датчики давления (ЛХ-610); 6 – окно для визуализации газодинамической картины течения.

УВ возникала в результате взрыва монтажного порохового патрона шифра Д (диаметр 6,8 мм). Данный способ получения УВ был выбран из соображений экономичности при возможном практическом использовании в новом устройстве для борьбы с низовыми лесными пожарами.

Методика проведения экспериментов

В экспериментах регистрировалось давление во фронте УВ и скорость УВ. Был проведен полный двухфакторный эксперимент по влиянию конических конфузоров на перепад давления во фронте генерируемой УВ на выходе из канала. В процессе проведения экспериментов варьировались два фактора: угол раствора конфузора φ ($35 \div 65^\circ$) и диаметр выходного отверстия d_1 ($0,01 \div 0,02$ м).

Давление регистрировалось на стенках канала и на выходе из него. Сигнал с датчиков давления поступал на цифровой осциллограф и обрабатывался на компьютере.

Суммарная относительная погрешность определения давления не превышала 5 %.

Скорость УВ определялась как отношение расстояния между двумя датчиками давления к интервалу времени, в течение которого УВ проходит этот участок. Число Маха не превышало значения $M = 3$.

Результаты измерений и их анализ

На рис. 2 представлены измеренные значения максимального давления на стенке канала и на выходе из него при различных углах раствора конфузора с диаметром выходного отверстия $d_1 = 0,02$ м. Экспериментальные точки представляют собой результат осреднения значений, полученных в серии опытов. Линии на рис. 2 построены на основе сплайн-интерполяции полученных экспериментальных данных.

Результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют о линейном понижении давления во фронте УВ по мере ее распространения в цилиндрической части канала. Влияние конфузора обеспечивает изменение характера динамики УВ: ослабление УВ прекращается и наблюдается повышение давления.

Величина давления на выходе из канала зависит от геометрических характеристик используемых в экспериментах конических конфузоров. Наибольший эффект наблюдался для конфузора с $\varphi = 55^\circ$, $d_1 = 0,02$ м («оптимальный конфузор»).

Математическая модель

Для теоретического обоснования полученных данных предложена математическая модель исследуемого процесса.

Рассматривается течение, образующееся в длинной цилиндрической камере с коническим сужением на выходе в результате взрыва порохового заряда. Таким образом, задача сводится к расчету нестационарного истечения из гильзы, заполненной пороховыми газами под высоким давлением, через узкий канал (ствол) в широкий канал с сужением на выходе. Предполагается, что заполняющий гильзу порох сгорает мгновенно. Течение в стволе и в гильзе считается одномерным, в объеме камеры с конфузором – двумерным, осесимметричным. Газ является совершенным. Задача решается без учета вязкости, что может вносить в расчеты опре-

деленную погрешность. Однако эта погрешность, как показало тестирование расчетного метода, незначительна при моделировании неоднородных безотрывных сверхзвуковых течений.

В силу сделанных выше допущений интегральные законы сохранения массы, импульса и энергии для широкого канала [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \rho u dx dy + \int_{\Gamma} \rho v (u dy - v dx) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \rho u dx dy + \int_{\Gamma} \rho u (u dy - v dx) + P dy &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \rho v dx dy + \int_{\Gamma} \rho v (u dy - v dx) - P dx &= \\ &= \iint_S P dx dy, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y E dx dy + \int_{\Gamma} y (E + 2P) (u dy - v dx) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y c dx dy + \int_{\Gamma} y c (u dy - v dx) = 0,$$

для гильзы и ствола:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \rho dx dy + \int_{\Gamma} \rho u dy &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \rho u dx dy + \int_{\Gamma} (\rho u^2 + P) dy &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y E dx dy + \int_{\Gamma} (E + 2P) u dy &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y c dx dy + \int_{\Gamma} c u dy &= 0, \\ E = \rho(2e + u^2), \quad e = \frac{P}{\rho(\gamma - 1)}, \\ \gamma = 1 + \frac{cM_p + (1 - c)M_a}{\frac{cM_p}{(\gamma_a - 1)} + \frac{(1 - c)M_a}{(\gamma_p - 1)}}, \end{aligned}$$

здесь Γ – замкнутый контур, ограничивающий площадку S ; P – давление; ρ – плотность; u, v – проекции вектора скорости на оси цилиндрической системы координат, начало которой совпадает с торцом гильзы, и которая направлена по оси симметрии в сторону камеры; c – массовая концентрация воздуха; E – удвоенная полная энергия; γ – показатель адиабаты газовой смеси, индекс a отнесен к параметрам воздуха, индекс p – к параметрам пороховых газов ($\gamma_a = 1,41$; $\gamma_p = 1,27$); M_a, M_p – молярная масса газовых смесей ($M_a = 0,029$ кг/моль; $M_p = 0,03$ кг/моль).

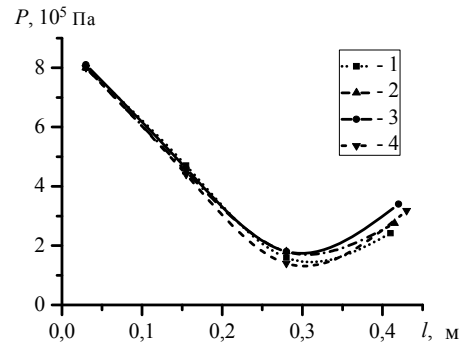


Рис. 2. Давление на стенке и на выходе из канала при различных углах раствора конфузора: 1 – 35°; 2 – 45°; 3 – 55°; 4 – 65°

В качестве начальных условий в стволе и в широком канале задавались параметры невозмущенного воздуха, в гильзе они вычислялись по формулам:

$$\rho_0 = \frac{m}{\Omega}, \quad E_0 = \frac{2Qm}{\Omega}, \quad P_0 = \frac{E(\gamma_p - 1)}{2},$$

где m – масса пороха в гильзе ($m = 0,38$ г); Q – удельная теплота сгорания пороха ($Q = 2728,9$ Дж/г); Ω – объем гильзы.

Граничные условия: на стенках – условие непротекания, на выходе из канала – условие отсутствия обратного влияния на поток.

Численное решение задачи осуществлялось на основе метода Годунова (схема первого порядка точности) [6]. Область решения разбивалась расчетной сеткой на $N_x \times N_y$ ячеек: $i = 1, \dots, N_x$, отвечает оси x ($N_x = 400$), $j = 1, \dots, N_y$ – оси y ($N_y = 40$). Для апробации использованного метода была выбрана задача о течении идеального газа ($\gamma = 1,41$) в радиально-коническом сопле. Второй задачей, на которой тестировался метод, была задача о расчете обтекания равномерным сверхзвуковым потоком идеального газа ($M = 5$) тела типа конус, затупленный по сфере [7]. Тесты подтвердили применимость метода для решения газодинамических задач с ударными волнами.

Результаты численных расчетов

При численном моделировании были заданы значения физических и геометрических параметров, соответствующие экспериментам на ударной трубе. Результаты расчетов показывают, что при выстреле монтажного

порохового патрона образуется типичная сверхзвуковая струя в ограниченном пространстве (рис. 3, а–б).

Скачки давления периодически отражаются от стенок канала (рис. 3, в), их интенсивность во времени уменьшается. Падение

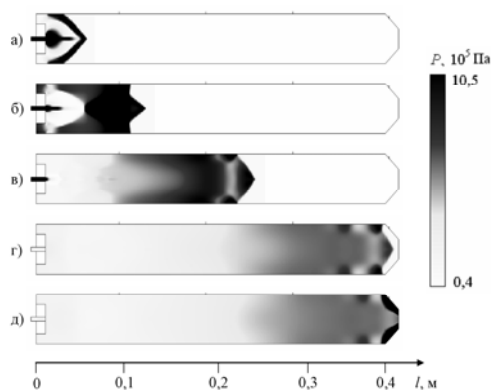


Рис. 3. Распределение давления в ударной трубе в последовательные моменты времени: $t = 0,2 \cdot 10^{-4}$ с (а); $t = 0,7 \cdot 10^{-4}$ с (б); $t = 1,6 \cdot 10^{-4}$ с (в); $t = 3,0 \cdot 10^{-4}$ с (г); $t = 3,2 \cdot 10^{-4}$ с (д)

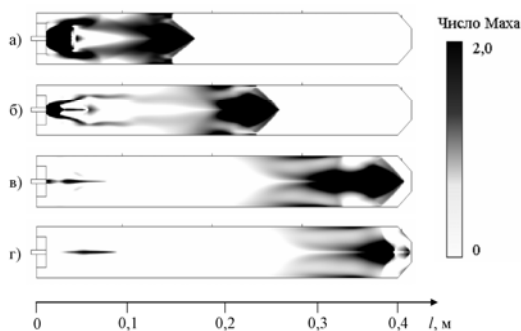


Рис. 4. Значения числа Маха в камере в последовательные моменты времени: $t = 1,0 \cdot 10^{-4}$ с (а); $t = 1,7 \cdot 10^{-4}$ с (б); $t = 2,8 \cdot 10^{-4}$ с (в); $t = 3,4 \cdot 10^{-4}$ с (г)

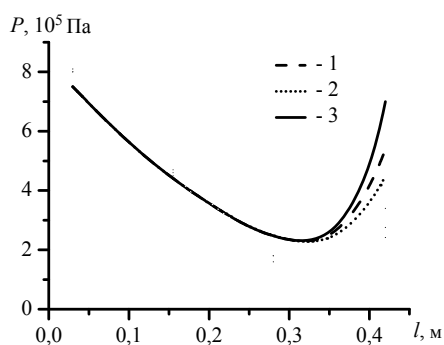


Рис. 5. Давление на стенке канала при различных углах раствора конфузора (результаты численных расчетов): 1 – 35°; 2 – 45°; 3 – 55°

давления в гильзе в итоге приводит к исчезновению струйного течения вблизи среза гильзы (рис. 3, з). При подходе ударно-волновой структуры к конической части канала (рис. 3, д), образуется маховское (нерегулярное) отражение волн от стенок, что приводит к резкому повышению давления в потоке.

На рис. 4 представлены распределения числа Маха в последовательные моменты времени. Видно, что часть газа движется вдоль оси в центральной части канала, другая часть газа растекается вдоль стенок.

На рис. 5 представлены результаты расчета давления на стенке канала при различных углах раствора конфузоров ($d_1 = 0,02$ м).

Видно, что в области конфузоров происходит резкое увеличение давления. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (см. рис. 2). Наибольшее различие наблюдается в области конфузора. Это связано с тем, что датчик давления был расположен на срезе насадки, на его показания влияли процессы ослабления ударной волны при выходе в открытое пространство. Численные результаты не включают описания этих процессов и относятся только к течению в ограниченном пространстве ударной трубы с конфузуром. Другой возможной причиной наблюдаемых количественных расхождений между расчетами (см. рис. 5) и экспериментом (см. рис. 2) может явиться пренебрежение вязкостью газа. Модель не описывает возможное возникновение отрывной зоны в угловой точке, влияющее на течение в области конфузора и на параметры ударной волны. Подобный эффект требует дополнительного изучения.

Разработанная математическая модель и созданный численный алгоритм позволяют расширять область исследований, в том числе за счет рассмотрения других конструкций генераторов УВ.

Воздействие на очаг горения

Предложенный способ генерации УВ был апробирован в полунатурных условиях, моделирующих низовой лесной пожар. В серии опытов изучалось газодинамическое воздействие на процесс горения ЛГМ. Целью экспериментов была проверка эффективности подобных устройств при реализа-

ции ударно-волнового метода тушения низового лесного пожара.

Исследования проводились с помощью экспериментального комплекса (рис. 6), который включает в себя стенд для моделирования низовых лесных пожаров – I (состоящий из основания – 1, кюветы – 2, слоя грунта – 3) и ударную трубу – II, расположенную на безопасном расстоянии от стенда. В качестве ЛГМ использовались опавшая листва березы, осины, тополя, хвоя сосны, ели и кедра, а также тонкие веточки деревьев с небольшим включением травы. Относительное влагосодержание составляло $0,07 \div 0,13$, что ниже критического значения, при котором возникают лесные пожары [1].

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На стенде I (на поверхности грунта) размещался слой ЛГМ, плотность укладки ЛГМ изменялась в пределах $11 \div 25 \text{ кг/м}^3$, толщина слоя составляла $0,06 \div 0,08 \text{ м}$, что соответствовало натурным условиям для толщины и высоты опада ЛГМ. Зажигание производилось таким образом, чтобы пламя одновременно возникало на всей поверхности ЛГМ. Возможное в натуральных условиях влияние ветра не учитывалось. Высота пламени не превышала $0,5 \text{ м}$. Тушение моделируемого низового лесного пожара осуществлялось с помощью генератора УВ.

Проведенные полунатурные испытания показали, что использование ударной трубы с оптимальным коническим конфузуром обеспечивает значительно более высокую эффективность газодинамического воздействия на горение ЛГМ. Без использования конфузора один «выстрел» с расстояния 1 м обеспечивал локальное прекращение горения ЛГМ на площади с радиусом $0,15 \div 0,2 \text{ м}$. Использование конфузора оптимальной формы позволяло достичь такого же эффекта, но с расстояния 2 м (которое является минимальным по требованиям безопасности проведения работ по борьбе с лесными пожарами).

Результаты полунатурных экспериментов позволили авторам предложить вариант нового устройства для локализации и тушения низовых лесных пожаров [8]. Дальнейшее повышение эффективности этого метода требует более полного понимания механизмов, лежащих в основе наблюдаемых явлений. Предварительно можно сделать следующие замечания. Поскольку после выхода

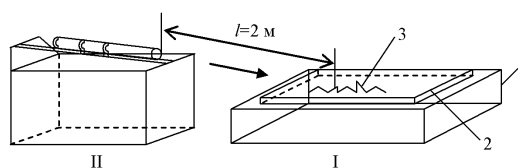


Рис. 6. Схема экспериментального комплекса для изучения влияния УВ на процесс горения ЛГМ

в открытое пространство ударно-волновая структура сохраняется лишь на определенном расстоянии от конфузора (менее 1 м), то УВ не может оказывать непосредственного влияния на процесс горения. Газодинамическое воздействие, приводящее к гашению пламени, обеспечивается высокоскоростным потоком. Эффективность гашения, очевидно, зависит от интенсивности этого потока и продолжительности его воздействия на очаг горения. По-видимому, в качестве объяснения наблюдаемого эффекта следует предположить, что повышение давления во фронте УВ на выходе из ударной трубы сопровождается увеличением времени интенсивного газодинамического воздействия на горящую поверхность. Данное предположение нуждается в дополнительном обосновании, связанном с исследованием динамики течения после выхода УВ из конфузора и выявлением роли дополнительных факторов, не учитываемых в настоящей работе (например, объема цилиндрической части ударной трубы).

Заключение

Экспериментальные и теоретические результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают, что использование ударной трубы с коническим конфузуром обеспечивает значительное повышение давления во фронте УВ на выходе из канала. Для заданных условий опытным путем найдены оптимальные геометрические параметры конфузора. Разработана математическая модель и выполнено численное моделирование осесимметричного ударно-волнового течения в газе, возникающего в результате истечения сверхзвуковой струи в канал. Экспериментально показано, что применение оптимального конфузора обеспечивает значительное повышение эффективности газодинамического воздействия на процесс горения ЛГМ.

Практическая значимость выполненной работы связана с возможностью использования результатов при разработке устройств для борьбы с лесными пожарами.

Список литературы

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.

2. Гришин А. М., Голованов А. Н., Ануфриев И. С., Лоцман А. М. Взаимодействие ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов // Экологические системы и приборы. 2005. № 7. С. 38–40.

3. Гришин А. М., Антонов В. А., Наймушина Л. Ю., Голованов А. Н., Кустов Ю. В. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров. Патент № 2033826 СИ Россия, МКИ 6А 62С 3/0,2. № 4852597. Заявл. 20.07.90. Опубл. 30.04.95. Бюл. № 12. 4 с.

4. Anufriev I. S., Golovanov A. N., Tsimbalyuk A. F., Sharyov O. V. Shock-Wave Effect on the Fire // Proceedings. Seventh International Symposium on Hazards, Prevention and Mitiga-

tion of Industrial Explosions. St. Petersburg, Russia, 2008. Vol. 3. P. 284–289.

5. Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.

6. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

7. Цимбальюк А. Ф. Численное моделирование процессов неравновесной кристаллизации и плавления частиц в сверхзвуковых неизобарических струях: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 1999. 110 с.

8. Голованов А. Н., Панкратов Ю. П., Цимбальюк А. Ф., Ануфриев И. С., Лоцман А. М., Клочков А. А. Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров. Решение Роспатента о выдаче патента на полезную модель от 06.05.2008.

Материал поступил в редколлегию 06.03.2009

I. S. Anufriev, A. N. Golovanov, A. F. Tsimbalyuk, O. V. Sharyov

DYNAMICS OF SHOCK WAVES IN THE CYLINDRICAL CHANNEL WITH CONFUSERS

Current work covers experimental and theoretical investigation of conic confusers impact on the intensity shock wave, generated in the shock tube by explosion of gunpowder charge. For given conditions optimal geometric characteristics of the confuser, providing maximal pressure in the shock wave front, were found experimentally. The mathematical model was developed and numerical simulation of the axisymmetric shock-wave gas flow in the channel was carried out. Experimentally was shown, that the application of the optimal confuser provides significant increase of the efficiency gas-dynamic effect on the combustion of forest combustible materials.

Keywords: non-stationary shock waves, combustion, experimental investigation, mathematical simulation, gas-dynamic effect on flame.