Христофоров Б.Д.
*Институт динамики геосфер РАН
Москва, Россия*

doi: 10.18411/lj2016-5-5-12

Исследование параметров ударных волн при взрывах ВВ, разрядах и лазерном облучении на входе труб

Введение

Взрывы ВВ в трубах применяются при взрывной штамповке, определении динамической прочности металлов и сплавов, для создания тяги в ракетных двигателях, для разработки новых технологий [1, 2]. Возможность направлять и концентрировать действие взрыва ВВ трубами применяется в беспилотных летательных аппаратах для повышения мощности двигателей [3]. Фугасное действие неконтактных взрывов в трубах может создавать более высокий, чем при контактных взрывах удельный импульс при низких разрушающих давлениях, повысить КПД взрывных двигателей и процессов обработки металлов [1, 4]. Взрывы ВВ в трубах применяются при извлечении газа и нефти, в сланцевых технологиях наклонного бурения с протяженными горизонтальными участками и многостадийным гидроразрывом пласта, которые определяют в настоящее время мировую экономику [5]. Ниже приведены результаты исследований параметров газодинамических процессов при взрывах, разрядах и лазерном облучении на входе, внутри и на выходе труб применявшихся при моделировании гроз, их воздействия на наземные объекты и летательные аппараты, обработке различных материалов и в технологических процессах, связанных с добычей газа и нефти [6].

Материалы и методы

На рис.1а, б показана типичная экспериментальная установка для исследования действия взрыва ВВ в трубах и фотография ударной волны (УВ) вытекающей из трубы при взрыве ВВ у ее противоположного конца. Взрывы ВВ проводились в центре входного, а измерения на оси у выходного сечения стальных труб длиной $L = 1$ и $0,5$ м, радиусом $r = 0,075$ и $0,046$ м. Заряды ВВ с теплотой взрыва $Q = 4,8$ МДж/кг, плотностью около 1600 кг/м³ массой $m = (1-16)10^{-3}$ кг инициировались в центре. Скоростной фотокамерой сопряженной с теневой установкой снималось движение фронта УВ через окна в трубах и вытекание УВ из труб. Вдоль оси труб, на их выходе и выходе размещались пьезоэлектрические датчики и другая измерительная аппаратура.

Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования действия взрыва ВВ в трубах (а) и фотография УВ вытекающей из трубы после взрыва (б): 1 - труба, 2 - фронт УВ, 3 - контактная граница между воздухом в УВ и продуктами взрыва, 4 - область перемешанных продуктов взрыва и горячего воздуха за УВ.

На рис. 2 приведена постановка опытов при электрическом разряде и лазерном облучении на воздухозаборнике (ВЗ) летательного аппарата (ЛА).

Рис. 2. Слева - воздухозаборник летательного аппарата. Справа разряд на конусе у входа в воздухозаборник вид сбоку, время слева направо и сверху вниз, между кадрами $13,5$ мкс. Внизу затекание плазмы разряда в воздухозаборник, вид спереди, время между кадрами 330 мкс. Энергия разряда $E_{\text{э}} = 18$ кДж. Частота работы двигателя $n = 93\%$ от максимальной при скорости продувки 200 м/с

В опытах применялась батарея конденсаторов емкостью до 13000 мкФ, напряжением до 5 кВ, запасаемой энергией до 160 кДж. При разряде батареи через плоский проводник возникал электрический взрыв. Облучение преград проводилось импульсными лазерами с взрывной накачкой на длине волны 1,315 мкм. При взрывах, разрядах и облучении скоростные фотокамеры с разных направлений регистрировали плазменный факел. Пьезоэлектрические датчики и импульсомеры измеряли УВ внутри и снаружи труб. Электрический ток i , напряжение U , длительность t_0 и электрическая энергия $E_{\text{э}}$ разряда измерялись поясом Роговского и делителем напряжения. Для измерения параметров лазерного излучения применялся специальный измерительный комплекс

Результаты

Некоторые результаты измерений параметров УВ и облака плазмы внутри и вне труб при взрывах, разрядах и лазерном облучении приведены в таблицах и на рисунках. В таблицах 1 и 2 приведены результаты различных вариантов измерений параметров УВ при взрывах ВВ на входе в трубы (рис. 1), где mQ – энергия взрыва, X – расстояние от входного торца трубы до датчика, ΔP_m , τ_+ , I_+ , J_+ соответственно приращение максимального давления, длительность, полный и удельный импульс положительной фазы УВ.

Таблица 1.

Параметры отраженных УВ на расстоянии L в трубах при взрывах ВВ.

Параметры взрывчатых веществ на расстоянии 20 м от трубки при взрывах ВВ:									
mQ, кДж	I, Нсек	J, Пас	ΔP _м , МПа	mQ/S, МДж/м ²	mQ, кДж	I, Нсек	J, Пас	ΔP _м , МПа	mQ/S, МДж/м ²
L = 1 м, r = 0,075 м, S = 0,0177 м ²					L = 0,5 м, r = 0,046 м, S = 0,00664 м ²				
Взрывы у открытого конца труб									
52,5	27,9	1580	10	2,98	52,5	24,5	3700	62	7,91
76	36,4	2070	13,7	4,3	68,4	31	4700	85	10,4
Взрывы у закрытого конца труб									
26,3	27,4	1550	9,1	1,49	26,3	23,6	3550	61	3,96
40,6	40,7	2300	14,8	2,30	38,7	34,4	5180	94	5,83
52,5	51,4	2902	19,5	2,98	65,4	56,2	8470		9,85
76,0	71,1	4015	29	4,30	73,1	62,7	9450		11,01

Таблица 2.

Параметры выходящих из труб УВ на расстоянии X при взрывах ВВ.

Параметры выходящих из трубы СВ на расстоянии X при взрывах ВВ.											
mQ, кДж	X, м	ΔP_M , МПа	τ_{+} , мсек	J ₊ , Пас	I ₊ , Нс	mQ, кДж	X, м	ΔP_M , МПа	τ_{+} , мсек	J ₊ , Пас	I ₊ , Нс
L = 1 м, r = 0,075м, S = 0,0177м ²						L = 0,5 м, r = 0,046 м, S = 0,00664м ²					
Взрывы у открытого конца труб											
27,3	0,98	1,3	0,6	280	4,95	3,87	0,48	0,72	0,4	120	0,797
27,3	1,0	1,2	0,44	180	3,18	3,87	0,50	0,7	0,35	110	0,731
27,3	1,07	0,7	0,2	90	1,59	3,87	0,546	0,6	0,24	72	0,480
33,4	0,98	1,2	0,65	290	5,13	33,5	0,48	4,5	0,42	945	6,28
33,4	1,0	1,1	0,48	210	3,72	33,5	0,50	4,2	0,37	777	5,16
73	1,0	2,01	0,61	520	9,2	73,4	0,50	9,2	0,35	1420	9,43
Взрывы у закрытого конца труб											
27,4	0,98	1,5	0,65	577	10,2	3,87	0,48	1,5	0,45	223	1,48
40,5	0,98	2,2	0,71	904	16,0	26,4	0,48	6,7	0,48	1405	9,33
52,6	0,98	2,7	0,70	1120	18,8	38,7	0,48	9,8	0,50	1750	11,6
76	0,98	3,7	0,75	1605	28,4	73,1	0,48	17,0	0,58	3530	23,4

В таблицах 3, 4 приведены характерные результаты измерений при разряде и облучении на конусе ЛА в 10 см от входа в ВЗ после окончания выделения энергии и данные измерений в ВЗ, где Е - полная энергия плазмы с учетом энергии горения фольги, Еэ – энергия в разряде, m1 - масса фольги инициатора разряда, h и V1 - высота подъема и объем факела на преграде к концу выделения энергии. Тя_{ик} - яркостная температура плазмы в ИК области. $\Delta p_{0,5}$, Δp_3 , $\Delta p_{6,4}$ – безразмерные давления на фронте УВ на расстояниях L = 0,5; 3 и 6,4 м от входа в ВЗ.

Таблица 3.

Параметры разрядной и лазерной плазмы перед воздухозаборником летательного аппарата.

	Разрядная плазма				Лазерная плазма			
Е, кДж	35	27	19	14	23	19,5	18	30
Еэ, кДж	31	22,7	15	10,4	-	-	-	-
m1, г	0,14	0,14	0,14	0,14	-	-	-	-
h, см	21	18	14	11,5	-	-	11,5	21
V1, литр	52	42	26	20	31	29	-	-
Т _{я_{ик}} , К	27,5	21	22	21	-	23	-	32

Таблица 4.

Безразмерное давление на фронте УВ в воздухозаборнике при разрядах и облучении (звездочки в значениях энергии).

Обсуждение результатов

На рис. 3а и 3б показаны безразмерные зависимости приращения давления Δp на фронте и удельного импульса $I/E_{1/3}$ в УВ от безразмерного расстояния λ в сферических УВ. Светлыми и черными ромбами показаны

результаты измерений при лазерном облучении и разрядах. Сплошными и пунктирными линиями показаны расчеты Brode [7] для сферического взрыва тротила и нагретой сферы. Зависимости $\Delta P_m(R/m^{1/3})$ и $I/m^{1/3}(R/m^{1/3})$ для максимального давления и удельного импульса УВ при взрыве описываются формулами Садовского (1) совпадающими с расчетами Броуда при $R/m^{1/3} \geq 1$ для сферического взрыва тротила.

$$\Delta P_m = 0,084/(R/m^{1/3}) + 0,27/(R/m^{1/3})^2 + 0,695/(R/m^{1/3})^3, \quad I = 184/(R/m^{2/3}) \quad (1)$$

где давление ΔP_m на фронте УВ в МПа, расстояние R в м, m масса тротила в кг [1,7]. Теплота взрыва тротила принята $Q = 4,2 \text{ МДж/кг}$, $E = mQ$, $R/m^{1/3} = 3,47\lambda = 3,47R/(E/P_0)^{1/3}$.

Рис.3. Зависимости приращения безразмерного давления Δp на фронте (а) и приведенного удельного импульса $I/E^{1/3}$ в сферической УВ (б) от приведенного расстояния λ . Сплошными и пунктирными линиями показаны расчеты Brode для сферического взрыва тротила и нагретой сферы [7]. Светлые и черные ромбы - измерения при лазерном облучении и разрядах. Большие кресты и звезды - измерения при разрядах и скорости внешнего обдува 40 и 80 % от максимальной.

Средние значения тротилового эквивалента разряда $TЭ = 0,27$ и $0,34$ для максимального давления и удельного импульса УВ получены сравнением результатов измерений с расчетами по формулам (1) для взрыва тротила. При сравнении с расчетами (пунктир на рис. 3) для взрыва горячей сферы, практически совпавшими с опытными данными, $TЭ = 1$ для давления и импульса. Параметры УВ при внешнем обдуве на рис. 3а (кресты и звезды) для моделирования влияния бури на интенсивность грозы показали, что при скоростях обдува выше 100 м/с давление может возрасти более, чем вдвое, а $TЭ$ на порядок. При сравнении расчетов параметров сферической УВ для ВВ с

измерениями при разрядах на плоских преградах, выделившаяся энергия по данным специальных взрывных экспериментов, полагалась равной $E = 2(E_{\text{э}} - E_{\text{е}})$, а при разрядах на конусе

$E = 1,75(E_{\text{э}} - E_{\text{е}})$, где $E_{\text{э}}$ – энергия разряда, $E_{\text{е}} = 3$ кДж/г - энергия нагрева фольги инициатора разряда до пробоя воздуха. При лазерном облучении плоскости и конуса энергия взрыва в воздухе полагалась соответственно равной $E = 2E_{\text{л}}$ и $E = 1,75E_{\text{л}}$, где $E_{\text{л}}$ – энергия лазерного излучения, поглощенная в плазме.

В [1] приведены параметры фронта УВ и условия перехода сферической УВ в плоскую при взрыве мощных ВВ на входе открытых труб разного диаметра. Разработана методика определения параметров фронта УВ в трубах в ближней зоне и эмпирические формулы (2) для их расчета

$$\Delta P_{\text{м}} = (0,79E/X + 0,39 (E/X)^{0,5}) \cdot \exp(-0,004X/r); \quad \tau_{+} = X; \quad J_{+} = 1000\Delta P_{\text{м}}\tau_{+}/2 \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{м}}$ в МПа, $E = mQ/2S$ в МДж/м². τ_{+} в мс, X в м, J_{+} в Пас., Давление отраженной УВ рассчитывалось по формуле

$$\Delta P_{\text{м}} = K_{\text{р}}((0,79E/X + 0,39 (E/X)^{0,5}) \cdot \exp(-0,004X/r)); \quad K_{\text{р}} = 5,48\Delta P_{\text{м}}^{0,245} \quad (3).$$

На рис. 4 проведено сравнение расчетов и измерений зависимостей $\Delta P_{\text{м}}$ и J от энергии взрыва mQ для отраженных УВ при взрывах у закрытого и открытого концов труб по формулам (2,3), когда $E = mQ/S$ и $mQ/2S$ МДж/м², соответственно, $S = \pi r^2$. При одинаковых массах ВВ и длинах труб давление и импульс УВ примерно вдвое выше при взрыве у закрытого конца. При расчетах применялся измеренный коэффициент отражения импульса $K_{\text{ж}} = 2,06$.

Рис 4. Зависимости максимального давления $\Delta P_{\text{м}}$ и удельного импульса J от энергии взрыва mQ в отраженных УВ при взрывах у открытого и закрытого конца труб соответственно (сплошные и прозрачные маркеры). Сплошные линии и пунктир - расчеты для $L = 1$ и $0,5$ м по формулам (2,3).

На рис 5 приведены 4 различных варианта взрыва ВВ на маятнике и значения приведенного импульса I/m в м/с для ВВ со скоростью детонации $D = 7500$ м/с и плотностью 1600 кг/м³, которые могут применяться в различных практических приложениях. Для взрыва заряда без оболочки с диаметром равным диаметру преграды $I/m = 0,081D = 611$ м/с [8]. Когда диаметр преграды много больше диаметра заряда, импульс возрастает вдвое (1) и составляет 1220 м/с. Для заряда (2) в жесткой оболочке $I = (8/27) mD$, $I/m = 2200$ м/с [8].

Рис. 5. Различные варианты измерения импульса взрыва ВВ на маятнике. 1, 2 - взрыв заряда без и с жесткой оболочкой. 3, 4 - взрывы на входе открытой и закрытой труб. В таблице значения приведенного импульса I/m для разных видов воздействия.

Измерения и расчеты параметров УВ в трубах показали, что при отражении от преграды можно почти на порядок увеличить максимальное давление и вдвое удельный импульс по сравнению с прямой УВ. В варианте (3) среднее по всем опытам значение $I/m = 2400$ м/с. При взрывах у закрытого конца трубы (4) давление и импульс возрастают еще в 2 раза. При этом характерные значения I/m на преграду могут достигать 5000 м/с. Снижение давлений по сравнению с контактным взрывом позволяет отказаться от защитных экранов и прокладок во взрывных двигателях [5,7] увеличить полезную массу M разгоняемых устройств и КПД действия взрыва $\eta = (m/M) (I/m)^2 / 2Q$.

На рис. 6 мелкий пунктир - взрыв 11 г смеси $50/50$ литого тротила с гексогеном [3]. Крупный пунктир - расчет Броуда взрыва тротила [7]. Сплошная линия - расчет Броуда для изотермы 3 кК взрыва горячей сферы [7]. Звезда - характерное значение $V1/E$ для молнии после окончания разряда.

Рис. 6. Зависимости V/E от $t/E^{1/3}$. Мелкий пунктир - взрыв 11 г смеси 50/50 литого тротила с гексогеном [6]. Крупный пунктир - расчет Броуда взрыва тротила [7]. Сплошная линия - расчет Броуда для изотермы 3 кК взрыва горячей сферы [7]. Квадраты – разряд и облучение на конусе с энергией $E = 32$ кДж, когда двигатель не работает ($n=0$).

По данным датчиков давления на расстояниях 0,5; 3,4 и 6,4 м от входа внутри ВЗ в таблице 4 приведены характерные значения давлений Δp в УВ при $n = 0$; 70 и 93%. На рис. 7 а,б построены зависимости приращения максимального безразмерного давления УВ от приведенных расстояний $\Delta p(r/E^{1/2})$ и $\Delta p(R1/E^{1/2})$ внутри ВЗ при разных энергиях плазмы и скоростях вращения ротора двигателя от $n = 0$ до $n = 0,93$ (r – расстояние УВ от разряда).

Рис 7а, б. Зависимости приращения Δp максимального давления УВ от приведенного расстояния в $m/\text{kJ}^{1/2}$ внутри воздухозаборника при частотах вращения двигателя $n = 0$ - крест, $n = 0,7$ – звезды, $n = 0,8$ – круг, $n = 0,93$ – ромб, r – расстояние УВ от разряда. $R1 = r(1 - n \cdot 0,59)$ учитывает снос УВ потоком, E – энергия, вложенная в факел.

С увеличением n давление Δp существенно возрастает. На рис. 7б приведена зависимость Δp от расстояния $R1/E^{1/2}$ при $R1 = r(1 - n \cdot 0,59)$ в ВЗ в координатах учитывающих сокращение пути УВ в движущемся в ВЗ газе. При этом $0,59 = 200/340$ - отношение максимальной скорости продувки при $n = 1$ к

скорости звука. Все данные на рис.7 б ложатся на общую зависимость, что подтверждает сделанное предположение. На рис. 8 показаны зависимости Δp (L/E_k) в УВ внутри ВЗ при частоте вращения двигателя $n = 0$, где доля энергии источника E_k в трубе $E_k = (E/2\pi r t^2)((r_0^2 + r t^2)^{1/2} - r_0)/((r_0^2 + r t^2)^{1/2})$. Кресты и линия - данные измерений при разряде и их тренд. Пунктир - расчет взрыва ВВ по формуле (2) для трубы постоянного сечения, где не учтен тротиловый эквивалент разряда $TЭ = 0,27$, что завышает результаты расчета.

Рис.8. Зависимости приращения максимального давления УВ Δp от приведенного расстояния L/E_k внутри ВЗ при частоте вращения двигателя $n = 0$. Пунктир расчет по формуле (2). Кресты и линия - данные измерений и их тренд, E_k – доля энергии источника в трубе.

Наличие излома на зависимостях Δp на рис.7а,б и рис.8 от приведенного расстояния вызвано торможением УВ расширяющимся конусом в ВЗ до расстояния 3 м. Результаты измерения объемов V_1 плазмы на конусе после окончания разряда приведенных на рис. 6 и таблице 3, можно описать эмпирической формулой $V_1/Eэ = 0,91 + 29 m_1/E$. При $m_1/Eэ \sim 0$, $V_1/Eэ = 0,91$, что близко к расчету Броуда [7] для объема ограниченного изотермой 3 кК, для которой V_1/E около 0,75 м³/МДж, что характерно для разряда при молнии.

Заключение

Исследованы параметры ударных волн и плазменного факела при взрывах ВВ, разрядах и лазерном облучении у входа, выхода и внутри труб. Определены условия для получения оптимальных ударно волновых нагрузок при взрывах в трубах. Показаны преимущества фугасного действия взрыва в трубах по сравнению с бризантным при контактных взрывах. Определены тротиловые эквиваленты при разрядах и лазерном воздействии. Проведено измерение параметров УВ в воздухозаборниках летательных аппаратов при разрядах и облучении и разных скоростях работы двигателя. Разработанные методики применялись при исследовании газодинамической устойчивости двигателей

летательных аппаратов, отработке их средств грозозащиты, добыче нефти и газа и в других технических приложениях.

Литература:

1. Khristoforov B. Investigation of shock wave parameters at explosives blasts in the tubes with air // Universal journal of engineering science. 2013. (2). с. 28 - 33, <http://www.hrpub.org> DOI: 10.13189/ujes.2013.010202.
2. Кутузов Б.Н., Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О. Создание малогабаритного взрывореактивного комплекса и области его применения // Горный журнал. М. 2008. №5. С. 50-53.
3. Bestgen R.F., Nunn J.R. Энергия взрыва конденсированных ВВ применительно к движению ракет // Вопросы ракетной техники. 1974. № 12. С. 32 - 42.
4. Соловьёв В.О. Факторы, влияющие на кпд многоимпульсных взрывных устройств с отражателями // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2002. № 3. С. 50-55.
5. Сланцевая революция в США: внутренние и глобальные изменения на энергетических рынках // ИНЭИ РАН. Экономический журнал ВШЭ, 2013. Т. 17. № 3. С. 487–511.
6. Христофоров Б.Д. Влияние свойств источника на действие взрыва в воздухе и воде // Физика горения и взрыва. 2004. № 6 (40). С.107 – 114.
7. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов. М.: Мир. 1976.
8. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Барометрическое действие взрывов. СПб, Издательство Астерион. 2006.