

УДК 6.011+533.231.4

ПАРАМЕТРЫ РАДИАЦИОННЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНЫХ, ПРИЗЕМНЫХ И НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ ЗАРЯДОВ МАССОЙ ДО 1 000 т

Б. Д. Христофоров

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, khrist@idg.chph.ras.ru

Представлены результаты измерения и обработки размеров, энергии и мощности излучения взрывного облака в широких временных (до 10 с/кг^{1/3}) и спектральных (до 28 мкм) интервалах при взрывах литых зарядов ТГ 50/50 и тротила массой от 0.01 кг до 1 000 т на земле и в воздухе на разных высотах. Приведено их сравнение с литературными данными. Эти взрывчатые вещества имеют максимальные радиационные характеристики вследствие высокого содержания углерода в продуктах. В условиях взрывов в воздухе измеренная излученная энергия приближалась к 50 % от энергии взрыва. При наземных взрывах излучение было анизотропно из-за экранировки выброшенным грунтом, а отношение энергий, излученных вверх и вдоль поверхности земли, могло превышать порядок величины.

Ключевые слова: взрывы ВВ, взрывное облако, излучение, энергия, мощность, температура, спектральные характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Взрывы взрывчатых веществ (ВВ) в воздухе обычно применяют в горном и военном деле, в научных исследованиях. Главными поражающими факторами являются ударная волна (УВ), взрывное облако и излучение. Несмотря на большое количество работ, они еще недостаточно изучены, особенно в поздней стадии, когда на развитие излучающего облака существенно влияют турбулентность, свойства ВВ и грунтов [1–14]. Ниже приведены результаты измерения и обработки временных зависимостей размеров излучающей области, энергии и мощности излучения в широких временных (до 10 с/кг^{1/3}) и спектральных (0.2 ÷ 28 мкм) интервалах при взрыве зарядов ТГ 50/50 и тротила массой от 0.01 кг до 1 000 т на разных высотах в воздухе и на земле. Сравнительно большая концентрация углерода в продуктах взрыва (ПВ) обеспечивает высокую степень их черноты и радиационные характеристики взрывов.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Во взрывных камерах проводились взрывы сферических литых зарядов ТГ 50/50 массой до 0.1 кг, а на полигоне — массой 0.082, 0.95

и 5 кг на задерненном грунте и в воздухе на высоте до 4 м. Наземные взрывы тротильных боеприпасов массой 10 и 900 т проходили соответственно летом и зимой. У заряда массой 900 т в виде цилиндра высотой 7 м и диаметром 25 м со средней плотностью заряжения 0.28 т/м³ общая масса инертных материалов (металл, дерево) примерно равнялась массе ВВ. Все взрывы инициировались в центре зарядов.

Развитие взрывов фотографировалось с разных направлений и расстояний высокоскоростными камерами с различной скоростью регистрации. Энергию и мощность излучения измеряли с погрешностью до 10 % и временным разрешением до 1 мкс. Измерения проводились за оптическими фильтрами пироэлектрическими датчиками с равномерной спектральной чувствительностью. Применялись 4 типа широкополосных оптических фильтров для дальнего и ближнего ИК-излучения — 0.2 ÷ 28, 0.2 ÷ 11.6, 0.2 ÷ 3.4, 1.9 ÷ 3.6 мкм, 5-й тип — для видимого диапазона 0.4 ÷ 0.7 мкм. Для измерения энергии излучения использовали и более инерционные термопарные датчики. Чувствительные элементы всех датчиков покрывали золотой чернью. Время измерения достигало десятков секунд.

В табл. 1 приведен состав продуктов взрыва ВВ, имеющих отрицательный кислородный баланс, где ρ , D , T , q — плотность, скорость детонации, температура и теплота взрыва.

Таблица 1

Параметры ВВ и состав ПВ [8]

ВВ	ρ , кг/м ³	D , км/с	q , МДж/кг	T , 10 ³ К	CO ₂	CO	C	H ₂ O	H ₂	O ₂	N ₂
					моль/моль ВВ						
ТГ 50/50	1 600	7.6	4.87	3.7	0.6	2.54	1.86	2.2	0.48	—	2.3
Тротил	1 600	6.9	4.18	3.2	0.37	3.30	3.27	1.9	0.6	—	1.5

В опытах применялись стационарные и передвижные измерительные комплексы отечественной и зарубежной аппаратуры, включающие набор кинокамер, шлейфных и катодных осциллографов, магнитофонов. Их скорость, длительность регистрации и временное разрешение изменялись в широких пределах. Для оптических измерений применялись камеры типа СФР, АКС, АФА и другие с частотой съемки $10^6 \div 0.5$ кадр/с. Осциллографы ОК-33, С8-17, магнитофоны Брюль и Кьер и т. д. обеспечивали регистрацию в диапазоне частот от 10 МГц до 0.01 Гц. При оцифровке сигналов также использовались аналого-цифровые преобразователи с выходом на компьютер. Калибровка датчиков проводилась от эталонного источника света ЭВ-45 путем сравнения с показаниями измерителя энергии ИМО-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ И ПРИЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

На рис. 1 показаны ночные фотографии развития светящегося облака наземного взрыва ТГ 50/50, сделанные с разной скоростью съемки. Появляющиеся на излучающей поверхности темные пятна обусловлены прорывом более холодных ПВ в горячий воздух за УВ. После прихода примерно через 3 мс отраженной от земли УВ сферическое облако взрыва начало сплющиваться и разрывалось на две части. Одновременно пиродатчики регистрировали энергию и мощность излучения с погрешностью до 10 % и временным разрешением до 1 мкс. По этим данным определяли радиационные температуры взрыва в разных спектральных интервалах.

По результатам измерения плотностей энергии ε и мощности W находили значения полной энергии $E = 4\pi r^2 \varepsilon$ и мощности $F = 4\pi r^2 W$ излучения (здесь r — расстояние от центра взрыва до точки измерения). Плотность потока W и радиационную температуру T облака взрыва рассчитывали по измеренной пло-

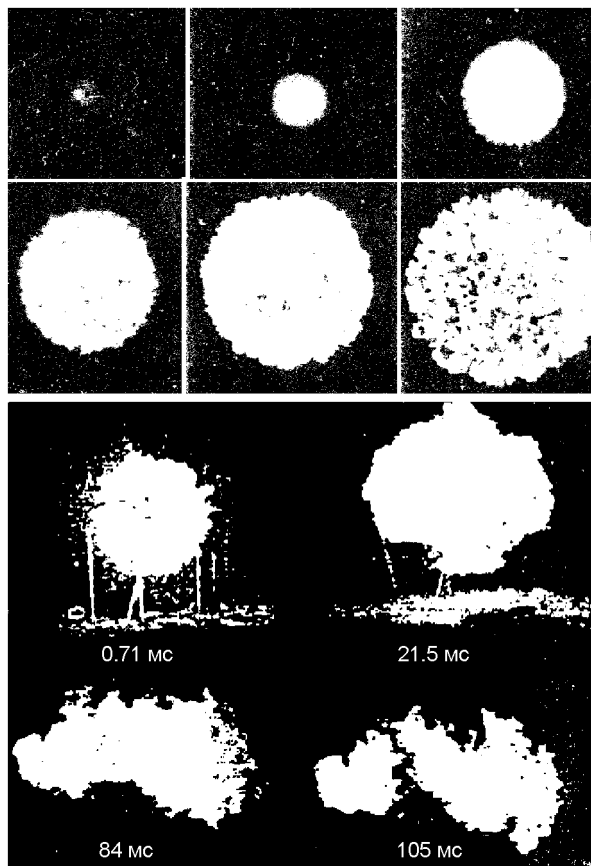


Рис. 1. Ночные фотографии взрыва сферического заряда ТГ 50/50 массой 0.95 кг на высоте 1.87 м, сделанные высокоскоростной (кадры сверху, время между кадрами 32 мкс) и низкоскоростной камерами

щади излучающей поверхности. Погрешность определения параметров радиационных и газодинамических процессов не превышала 10 %.

Временные зависимости отношения излученной энергии к энергии взрыва (E/Q) и приведенной мощности излучения ($F/m^{2/3}$), зарегистрированные в различных спектральных интервалах при взрыве зарядов массой $m = 0.082$ и 0.95 кг, приведены на рис. 2. В спектральных диапазонах $0.2 \div 28$, $0.2 \div 11.6$,

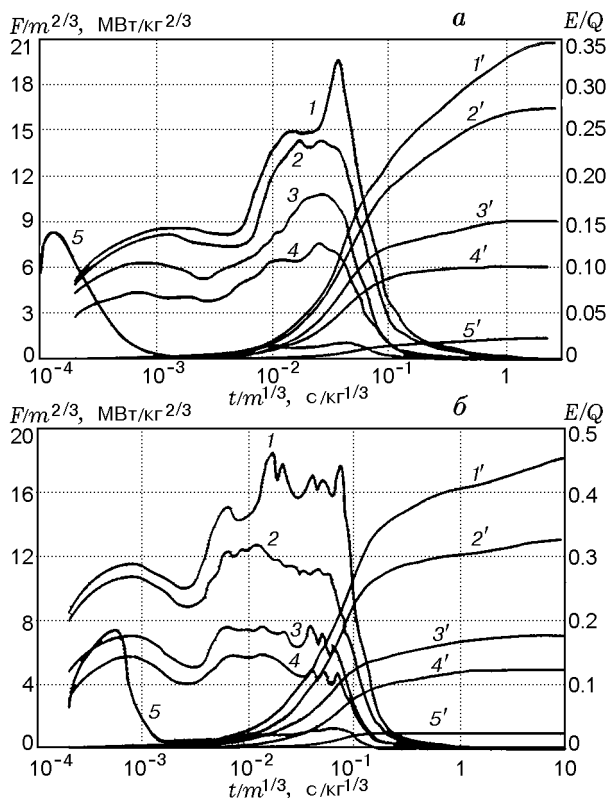


Рис. 2. Временные зависимости доли излученной энергии (E/Q , линии $1'-5'$) и приведенной мощности излучения ($F/m^2/3$, линии $1-5$) для взрывов сферических зарядов ТГ 50/50, полученные в различных спектральных интервалах:

$1, 1' - 0.2 \div 28$ мкм, $2, 2' - 0.2 \div 11.6$ мкм, $3, 3' - 0.2 \div 3.4$ мкм, $4, 4' - 1.9 \div 3.6$ мкм, $5, 5' - 0.4 \div 0.7$ мкм (для этого диапазона E/Q и $F/m^2/3$ увеличены в 10 раз); a — взрыв заряда массой 0.082 кг на высоте 1.5 м, b — 0.95 кг на высоте 1.87 м

$0.2 \div 3.4, 1.9 \div 3.6$ мкм за все время измерения значения E/Q составили соответственно около 0.34, 0.27, 0.15, 0.1 и 0.47, 0.33, 0.18, 0.12, а в диапазоне $11.6 \div 28$ мкм — около 0.07 и 0.15.

Отношение E/Q растет со временем и массой ВВ, а время высвечивания — с увеличением длины волны излучения. Основная часть энергии взрыва излучалась примерно за $1 \text{ с/кг}^{1/3}$ в инфракрасной области спектра. На рис. 3 приведены зависимости E/Q от времени t^0 при взрывах зарядов массой 0.011, 0.082, 0.95 и 5 кг. На рис. 4 показаны радиационные температуры T и плотности потока излучения W при взрыве заряда массой

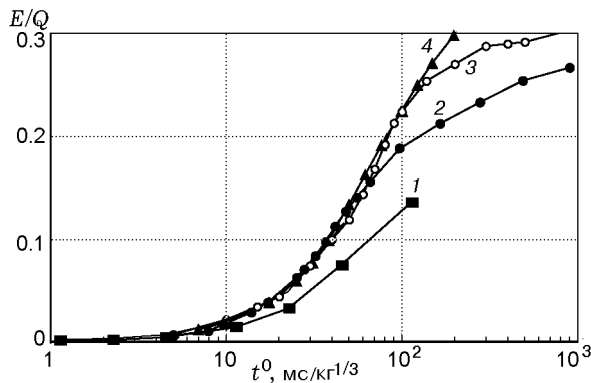


Рис. 3. Временные зависимости доли излученной энергии взрыва заряда ТГ 50/50 на высоте 1.9 м:

1 — 0.011 кг (спектральный интервал $0.2 \div 3.4$ мкм); $2-4$ — 0.082, 0.95 и 5 кг ($0.2 \div 11.6$ мкм)

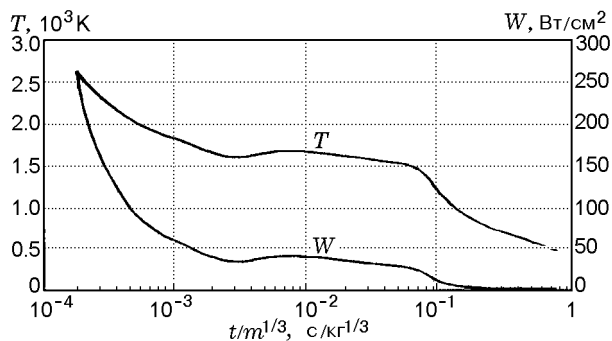


Рис. 4. Временные зависимости радиационной температуры и плотности потока излучения с поверхности облака взрыва в спектральном интервале $0.2 \div 11.6$ мкм при взрыве заряда ТГ 50/50 массой 0.95 кг на высоте 1.87 м, рассчитанные по экспериментальным данным

0.95 кг, зарегистрированные в интервале времени $0.0002 \div 1 \text{ с/кг}^{1/3}$ в спектральном диапазоне $0.2 \div 11.6$ мкм. Значения T и W определяли по измеренной площади излучающей поверхности и мощности излучения. Радиационная температура взрыва быстро снижалась с начального значения 2600 до 1600 К за время $0.0002 \div 0.002 \text{ с/кг}^{1/3}$ и оставалась на уровне $1600 \div 1500$ К до $0.07 \text{ с/кг}^{1/3}$. При этом излучалось около половины полной энергии излучения. Потом температура снова резко снижалась и высвечивание продолжалось в основном в дальнем ИК-диапазоне. Спектральный состав излучения был близок к излучению черного тела, за исключением видимой области $0.4 \div 0.7$ мкм, где мощность и энергия излучения значительно превышали характерные для

Таблица 2

Размеры излучающей области взрывов

t^0 , мс/кг ^{1/3}	$H/m^{1/3}$, м/кг ^{1/3}			$R/m^{1/3}$, м/кг ^{1/3}			V/m , м ³ /кг		
	0.95 кг	10 т	900 т	0.95 кг	10 т	900 т	0.95 кг	10 т	900 т
0.5	—	1.03	1.10	—	0.78	0.70	—	1.1	1.0
1	1.80	1.55	1.80	1.20	1.20	0.92	5.0	4.5	4.7
5	1.90	2.66	2.47	1.60	1.20	1.13	6.0	18	11
10	1.90	2.94	2.92	1.60	1.60	1.60	12	22	10
50	2.50	2.90	4.70	2.10	2.18	1.90	20	28	50
100	2.90	3.10	7.23	2.50	2.60	2.70	25	30	88
500	4.50	6.00	21.0	3.50	4.60	5.60	65	200	700
1000	7.22	9.80	27.0	3.70	5.20	7.64	200	400	2000

черного тела. В итоге в довольно узкой видимой области спектра для заряда массой 0.95 кг отношение E/Q составило ≈ 0.15 и 0.24 % за время 0.1 и 0.2 с/кг^{1/3}. Это может быть связано с повышением степени черноты излучающего газа у границы с ПВ при их прорыве, видном на рис. 1 в виде черных пятен, в более горячий и прозрачный воздух на стадии расширения ПВ.

РАДИАЦИОННО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Результаты измерения высоты H , среднего радиуса R и оценки объема V облаков наземных взрывов зарядов массой 10 т летом и

900 т зимой приведены в табл. 2. На рис. 5 для наземных взрывов зарядов массой 5 кг, 10 и 900 т показаны зависимости доли энергии излучения E/Q и приведенной ее мощности $F/m^{2/3}$ в спектральном диапазоне $0.2 \div 11.6$ мкм от времени в интервале до 0.2 с/кг^{1/3}. Интенсивность излучения вдоль поверхности земли значительно ниже у наземных взрывов, чем у воздушных, из-за экранировки излучения выброшенным из воронки грунтом и сильно зависит от свойств грунта.

Если при взрывах летом увеличение массы заряда с 5 кг до 10 т приводило к повышению E/Q с 3.9 до 12 %, то при взрыве зимой зарядом массой 900 т отношение E/Q составило лишь 6.6 %. Это вызвано экранировкой взрыва снегом, поднимавшимся за УВ, и снижением температуры взрыва из-за снега на заряде.

Радиационные характеристики облака взрыва заряда массой 900 т в спектральных диапазонах $0.2 \div 11.6$ и $0.2 \div 4.3$ мкм примерно совпадали в течение почти всего времени измерения. Высвечивание в диапазоне $0.2 \div 4.3$ мкм к моменту времени 170 мс/кг^{1/3} практически прекращалось. В диапазоне $0.2 \div 11.6$ мкм прирост энергии излучения регистрировался до момента 400 мс/кг^{1/3}. В интервале $700 \div 1700$ мс/кг^{1/3} вновь наблюдалось возрастание E/Q примерно на 40 % в диапазоне $4.3 \div 11.6$ мкм. Радиационная температура в диапазонах $0.2 \div 11.6$ и $0.2 \div 4.3$ мкм возрастала от 1000 до 1100 К к моменту 10 мс/кг^{1/3}, а после начала всплывания взрывного облака при 40 мс/кг^{1/3} плавно увеличивалась до

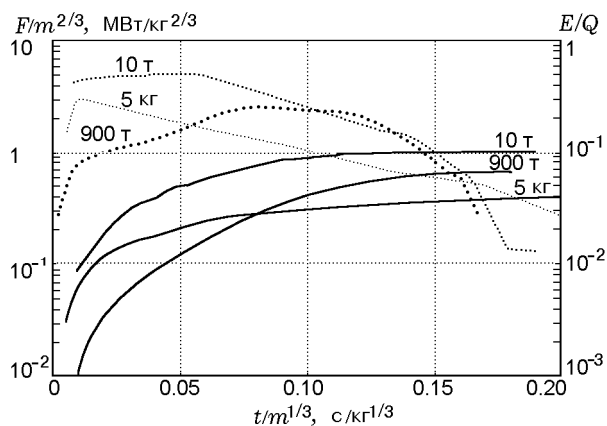


Рис. 5. Временные зависимости доли излученной энергии (сплошные линии) и приведенной мощности излучения (пунктирные линии) в спектральном диапазоне $0.2 \div 11.6$ мкм для наземных взрывов зарядов массой 5 кг, 10 т и 900 т

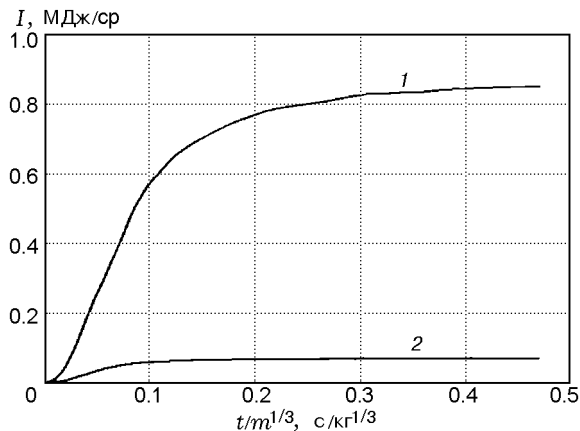


Рис. 6. Временные зависимости энергетической интенсивности излучения в направлении поперек (1) и вдоль поверхности земли (2) в спектральном интервале 0.2 ÷ 11.6 мкм при наземном взрыве заряда массой 5 кг

1300 К к моменту 80 мс/кг^{1/3}. В дальнейшем температура взрыва медленно убывала до 800 К при 170 мс/кг^{1/3}.

Несмотря на отмеченное снижение выхода излучения в направлении вдоль поверхности земли при наземных взрывах, из-за экранировки выброшенным грунтом вверх могло излучаться больше энергии, чем при воздушных и приземных взрывах. Это подтверждают приведенные на рис. 6 данные измерений при наземном взрыве заряда массой 5 кг, где энергетическая интенсивность *I* излучения в направлении вверх в 12 раз превышает измеренную вдоль поверхности земли и на 30 % больше аналогичных измерений для такого же взрыва на высоте 1.9 м (см. рис. 3). Это может быть связано с увеличением тротилового эквивалента наземного взрыва по сравнению с воздушным, с дополнительным разогревом ПВ отраженной от земли УВ и отсутствием экранировки излучения выброшенным грунтом в этом направлении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 7–9 и в табл. 3 приведены расчетные данные [7–9] для взрыва тротила и результаты наших измерений для ТГ 50/50. В табл. 3 включены также рассчитанные в [9] параметры: начальное давление и температура УВ *p* = 67 МПа и *T* = 10 700 К, время расширения ПВ до стационарной контактной границы с нагретым за фронтом УВ воздухом *t*⁰ = 0.6 мс/кг^{1/3}

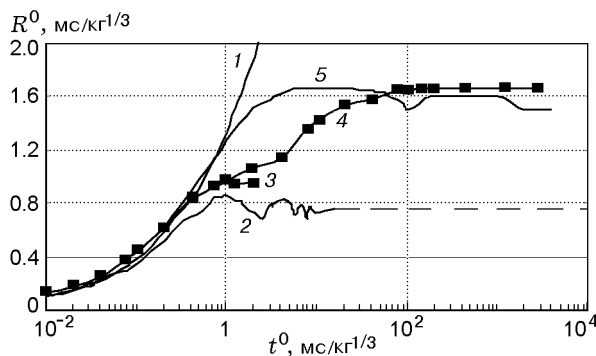


Рис. 7. Сравнение рассчитанных в [9] для взрыва тротила временных зависимостей приведенных размеров *R*⁰(*t*⁰) для УВ (1) и ПВ (2) с результатами измерения осредненного радиуса излучающей области при взрыве зарядов ТГ 50/50 массой 0.011, 0.082 и 0.95 кг (3–5)

на расстоянии *R*⁰ = 0.73 м/кг^{1/3}.

После прихода второй УВ к центру ПВ при *t*⁰ = 1.3 мс/кг^{1/3} их температура возрастает до 1500 К и возникает повторная вспышка. От центра ПВ температура падает до 580 К вблизи стационарной контактной границы, где температура воздуха 1200 К. Средняя температура ПВ при этом 630 К. В расчете не учтено турбулентное перемешивание ПВ на контактной границе с воздухом, существенно влияющее на радиационные процессы.

На рис. 7 приведены средние значения радиуса (в вертикальном и горизонтальном направлениях) излучающей области при взрыве заряда массой 0.95 кг на высоте 1.87 м. Для зарядов массой 0.011 и 0.082 кг на высоте 1.5 м влияние отраженной УВ на форму и радиационные характеристики взрыва было несущественным. Измеренный в конце регистрации радиус излучающего облака всех взрывов примерно вдвое превышал расчетный радиус ПВ [9]. Расчетное время расширения ПВ до атмосферного давления и выхода на стационарную стадию (≈0.7 мс/кг^{1/3}) примерно на два порядка меньше измеренного времени расширения светящейся области для заряда массой 0.082 кг.

На рис. 8 представлены временные зависимости радиационных температур (4–6) при взрыве зарядов массой 0.011, 0.082, 0.95 кг в спектральных диапазонах 0.2 ÷ 3.4, 0.2 ÷ 28, 0.2 ÷ 11.6 мкм, а также результаты расчета [9] температур (1–3) фронта УВ, воздуха на границе с ПВ и средней температуры ПВ. Для сравнения показана оценка лучевого пораже-

Таблица 3

Расчетные параметры УВ и ПВ при взрыве тротила в воздухе [9]

Продукты взрыва				Фронт УВ			
T , К	p , МПа	$R/m^{1/3}$, м/кг ^{1/3}	t^0 , мс/кг ^{1/3}	T , К	p , МПа	$R/m^{1/3}$, м/кг ^{1/3}	t^0 , мс/кг ^{1/3}
—	—	—	—	10 700	67	0.053	0
1 500	10	0.184	0.031	3 700	10	0.398	0.058
1 000	3.0	0.254	0.072	1 600	3.0	0.856	0.196
800	1.0	0.339	0.083	750	1.0	1.065	0.594
—	0.1	0.73	0.6	—	—	—	—
500	0.1	0.8	0.8	300	0.11	10.47	18.93

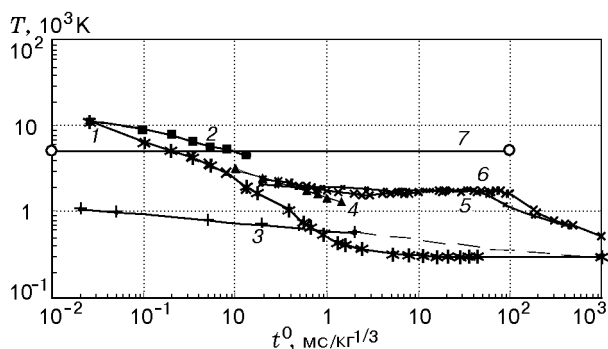


Рис. 8. Сравнение температур фронта УВ (1), воздуха на границе с ПВ (2) и средней температуры ПВ (3) (штриховая линия — экстраполяция), рассчитанных для взрыва тротила [9], с радиационными температурами (4–6), измеренными при взрыве зарядов ТГ 50/50 массами 0.011, 0.082 и 0.95 кг в спектральных диапазонах 0.2 ÷ 3.6, 0.2 ÷ 28 и 0.2 ÷ 11.6 мкм соответственно (7 — расчетная температура облака взрыва из [7])

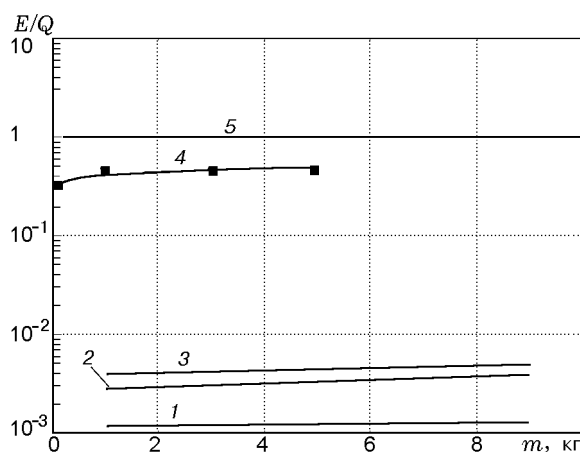


Рис. 9. Зависимости отношения полной излученной энергии к энергии взрыва от массы ВВ:

1–3 — расчет энергии, излученной ПВ, УВ, и их суммы по результатам измерений при взрыве тротила [8]; 4 — результаты наших измерений при взрыве заряда ТГ 50/50; 5 — $E/Q = 1$ [7]

ния (линия 7), принятая в США в предположении, что вся энергия взрыва ВВ излучается ($E/Q = 1$) с постоянной температурой 500 К за время 0.1 с/кг^{1/3} [7].

При $t^0 < 0.1$ мс/кг^{1/3} радиационные температуры близки к температуре фронта (1), которая значительно превышает температуру ПВ (3). При $t^0 > 1$ мс/кг^{1/3} температура фронта ниже температуры ПВ, равной ≈ 550 К. В диапазоне $1 < t^0 < 100$ мс/кг^{1/3} измеренная радиационная температура более чем в три раза превышает расчетную температуру УВ и ПВ.

Полученное высокое значение радиационной температуры, превышающее в поздней стадии взрыва температуры УВ, ПВ и полного

высвечивания до $E/Q \approx 0.5$, связано с высокой степенью черноты излучающего облака из-за турбулентного перемешивания [12, 15] непрозрачных ПВ с воздухом, разогретым в УВ, который оптически прозрачен при $T < 2000$ К.

На рис. 9 приведена зависимость E/Q от массы ВВ, определенная по результатам наших измерений (4) при воздушных и приземных взрывах, в сравнении с данными работ [7, 8]. Последние были получены при взрывах тротила массой 1 ÷ 10 кг путем пересчета показаний пироэлектрических датчиков в диапазоне 7 ÷ 14 мкм на всю область спектра с учетом результатов расчета [9, 16, 17]. Расчетное значение отношения E/Q составило менее 0.5 % и

слабо возрастало с ростом массы ВВ. Учитывались расчетные размеры излучающей области, поглощение излучения ПВ горячим воздухом за УВ, зависимости коэффициентов черноты воздуха от температуры и содержание в нем примесей H_2O и CO_2 при температурах ниже 3500 К. Из-за низкой расчетной температуры ПВ и УВ на основной стадии излучения максимум спектра и почти все излучение приходилось на ИК-область.

Приведенные в [8] значения $E/Q < 0.5$ % почти на два порядка меньше наших данных. Это связано с меньшим, чем у нас, на 1–2 порядка временем регистрации (≈ 0.1 с/кг^{1/3}) и с погрешностями расчета полной излученной энергии по температуре, оптической прозрачности и размерам излучающей области. Согласно нашим измерениям радиационная температура, размеры излучающего облака и энергия излучения значительно выше рассчитанных без учета перемешивания непрозрачных (из-за большого содержания углерода) ПВ с более горячим, но оптически прозрачным воздухом за фронтом УВ. Поэтому максимум спектра излучения взрыва приходится на ближний ИК-диапазон за пределами области $7 \div 14$ мкм.

В [12, 15] показано, что на контактной границе происходит перемешивание тяжелых ПВ с более легким и горячим воздухом из-за развивающейся неустойчивости Рэлея — Тейлора. При этом размеры излучающей области из смеси ПВ и горячего воздуха, радиационная температура и излучаемая энергия взрыва должны возрасти по сравнению с приведенными в [8, 9] вследствие увеличения размеров, степени черноты и температуры излучающей области. Поэтому в наших опытах применялись ВВ с отрицательным кислородным балансом, дающие большее содержание углерода в ПВ, и время регистрации исследуемых процессов было на два порядка больше.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что приземные и наземные взрывы мощных ВВ с отрицательным кислородным балансом, в продуктах которых содержится много углерода, являются мощными источниками ИК-излучения с энергией до 10^{12} Дж и выше, которая может достигать 50 % от энергии взрыва.

2. Основная энергия излучается на поздней стадии взрыва нагретым ударной волной

воздухом и продуктами взрыва после их расширения до атмосферного давления и турбулентного перемешивания, которое повышает степень черноты излучающего газа.

3. С ростом массы ВВ нарушается энергетическое подобие параметров, определяющих излучение взрыва из-за возрастания приведенных времен высвечивания и размеров излучающей области вследствие влияния турбулентности в поздней стадии взрыва.

4. Спектральный состав излучения близок к излучению черного тела, за исключением видимой области $0.4 \div 0.7$ мкм, где мощность и энергия излучения значительно превышают характерные для планковского спектра.

5. При наземных взрывах горизонтальный выход излучения много меньше вертикального из-за экранировки грунтом из воронки. Вертикальное высвечивание выше, чем у воздушного, из-за большего тротилового эквивалента наземного взрыва и действия отраженной УВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Зецер Ю. И., Киселев Ю. Н., Немчинов И. В., Христофоров Б. Д. Активные геофизические ракетные эксперименты с инъекцией высокоскоростной плазменной струи в ионосфере // Докл. РАН. — 1993. — Т. 331, № 4. — С. 486–489.
2. Киселев Ю. Н., Гаврилов Б. Г., Зецер Ю. И., Поклад Ю. В., Рыбаков В. А. Радиационные характеристики и динамика области взаимодействия высокоскоростной струи с ионосферой в геофизических ракетных экспериментах «Флакрус» // Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества: сб. науч. тр. ИДГ РАН. — 1998. — С. 181–190.
3. Светцов В. В. Взрывы метеороидов и оценка их параметров по световому излучению // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 4. — С. 117–128.
4. Христофоров Б. Д. Влияние свойств источника на действие взрыва в воздухе и воде // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 6. — С. 115–120.
5. Киселев Ю. Н., Христофоров Б. Д. Выход излучения во внешнюю среду при взрывах ВВ в воздухе // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН. — 2006. — С. 296–304.
6. Адушкин В. В., Христофоров Б. Д. База данных «Природные и техногенные катастрофические явления взрывного типа с выбросом продуктов в атмосферу». — Рег. свид. № 7568. Зарегистрировано за № 0220108099 в Государственном регистре 16.09.2009.

7. Бейкер У., Кокс П., Уэстейн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. — М.: Мир, 1986.
8. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
9. Brode H. L. Blast wave from a spherical charge // J. Phys. Fluids. — 1959. — V. 2, N 2. — P. 217–229.
10. Архипов В. В., Дивнов И. И., Зотов Н. И., Киселев Ю. Н., Христофоров Б. Д., Юрьев В. Л. Исследование радиационных характеристик излучателей на основе горения аэрозвесей порошков алюминия // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 67–71.
11. Махвиладзе Г. М., Робертс Дж. П., Якуш С. Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. II. Тепловое излучение // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 4. — С. 12–23.
12. Рождественский В. Б., Христофоров Б. Д., Юрьев В. Л. Влияние состава продуктов на радиационные характеристики взрыва ВВ в воздухе // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 26, № 5. — С. 145–148.
13. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966.
14. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. — М.: Наука, 1977.
15. Анисимов С. И., Зельдович Я. Б. Рэлей-тейлоровская неустойчивость границы между продуктами детонации и газом при сферическом взрыве // Письма в ЖТФ. — 1977. — Т. 3, № 20. — С. 1081.
16. Авилова И. В., Биберман Л. М., Воробьев В. С. Оптические свойства горячего воздуха. — М.: Наука, 1970.
17. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением: пер. с англ. — М.: Мир, 1975.

Поступила в редакцию 25/XII 2012 г.
