

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКА НА ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА В ВОЗДУХЕ И ВОДЕ

Б. Д. Христофоров

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

Приведены результаты экспериментального исследования параметров ударной волны и продуктов в ближней зоне взрывов в воздухе и воде при широком изменении теплоты взрыва и плотности заряжения взрывчатых веществ. Показано, что влияние этих характеристик на действие взрывов в ближней зоне можно охарактеризовать одним параметром — объемной концентрацией энергии в источнике. При его изменении происходит существенное перераспределение энергии между продуктами взрыва и ударной волной, что может влиять на бризантность и нарушать энергетическое подобие взрывов.

Ключевые слова: взрыв, продукты взрыва, ударная волна.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с участвовавшими природными и техногенными катастрофами взрывного типа полезно иметь простые оценки эффективности действия различных источников взрыва в ближней зоне, где разрушения максимальны.

Для проведения таких оценок были привлечены результаты лабораторных измерений действия взрывов в воздухе и воде, инициируемых в центре сферических зарядов массой $M = (0,4 \div 3) \cdot 10^{-3}$ кг из тэна плотностью $\rho_0 = 1600$ и 400 кг/м³ и из азид свинца плотностью $\rho_0 = 1600$ и 850 кг/м³, теплота взрыва Q которых практически не зависит от плотности заряжения [1, 2]. Для тэна $Q = 5,852$ МДж/кг (1400 ккал/кг), для азид свинца $Q = 1,526$ МДж/кг (365 ккал/кг). При этом плотность использованных зарядов перекрывает диапазон этих параметров в практике взрывных работ. Дополнительно были использованы результаты подводных взрывов пресованного тэна в центре сферических полостей с воздухом [3] и данные полигонных измерений наземных взрывов газовых смесей с воздухом и кислородом массой до 20 кг [4]. Это позволило еще на три порядка снизить объемную концентрацию энергии взрыва $Q\rho_0$. Параметры ударной волны (УВ) и продуктов взрыва определялись по результатам высокоскоростной фотосъемки и измерений пьезоэлектрическими датчиками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 02-05-64134).

ВЗРЫВЫ В ВОЗДУХЕ

На рис. 1 приведены зависимости приращения максимального давления Δp от приведенного расстояния $R^0 = R/M^{1/3}$ в УВ при взрывах сферических зарядов тэна и азид свинца разной плотности, а также результаты расчетов в соответствии с принципом энергетического подобия по формуле М. А. Садовского [5]. Видно, что при $R^0 > 0,8$ м/кг^{1/3} экспериментальные данные согласуются с формулой М. А. Садовского. В этой области имеет место энергетическое подобие и давление на фронте УВ не зависит от плотности взрывчатого вещества (ВВ) и снижается при уменьшении теплоты взрыва. Вблизи заряда, при $R^0 < 0,8$ м/кг^{1/3}, наблюдается лишь геометрическое подобие и давление уменьшается при снижении плотности ВВ и теплоты взрыва.

На рис. 2 показаны зависимости Δp от приведенного расстояния $R^* = R/(MQ)^{1/3}$ (MQ — энергия взрывов) при взрывах тех же, что и выше, зарядов ВВ и детонирующих смесей газов с кислородом и воздухом в стехиометрическом соотношении с кислородом (взяты из [4]). Характеристики зарядов ВВ и газовых смесей представлены в табл. 1, где R_0 — радиус заряда, Δp_0 — начальное давление УВ на границе с зарядом, которое уменьшается при переходе от тэна плотностью 1600 кг/м³ к азиду свинца минимальной плотности и соответственно составляет 108; 21; 12; 8,8 МПа. На больших расстояниях для этих ВВ максимальное давление УВ зависит лишь

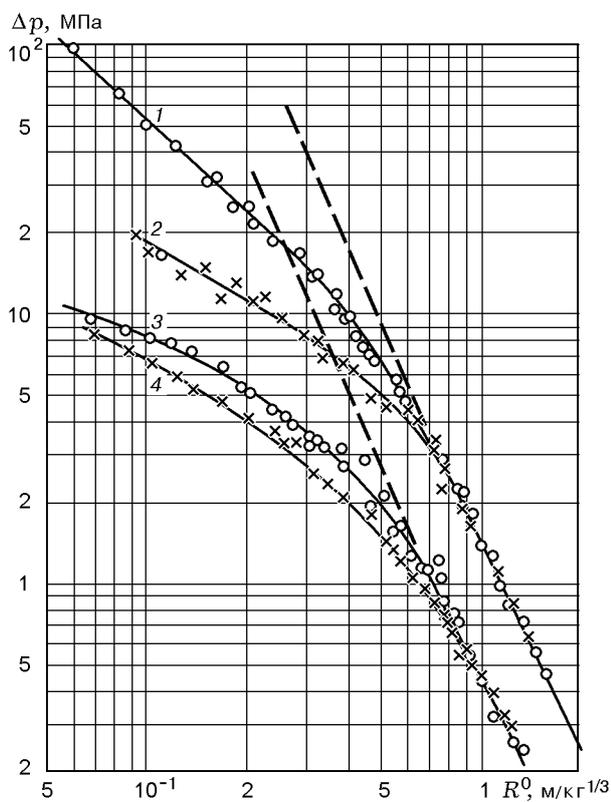


Рис. 1. Зависимости приращения максимального давления от приведенного расстояния $R^0 = R/M^{1/3}$ в УВ при взрывах ВВ в воздухе:

1, 2 — тэн, $\rho_0 = 1600$ и 400 кг/м³; 3, 4 — азид свинца, $\rho_0 = 1600$ и 850 кг/м³ соответственно; штриховые линии — расчеты по формуле М. А. Садовского

от энергии взрыва и описывается общей зависимостью. Переход к общей зависимости при взрывах тэна плотностью 400 кг/м³ и азида свинца плотностью 1600 и 850 кг/м³ происходит соответственно при $R^* = 0,40$; $0,55$ и $0,70$ м/МДж^{1/3}, когда продукты взрыва, движущиеся в ближней зоне вплотную за фронтом, передают свою кинетическую энергию УВ и перестают расширяться.

Характерные значения Δp_0 для смесей с кислородом и воздухом значительно ниже и составляют соответственно около $2,5$ и $1,5$ МПа. Зависимости $\Delta p(R^*)$ для взрывов газовых смесей практически не зависят от вида газа и определяются формулами:

$$\Delta p = 0,152/(R^*)^{1,7}, \quad 0,3 \leq R^* \leq 1,9 \text{ м/МДж}^{1/3};$$

$$\Delta p = 0,116/(R^*)^{1,7}, \quad 0,5 \leq R^* \leq 1,9 \text{ м/МДж}^{1/3}.$$

У границы с зарядом, в диапазоне $R_0^* <$

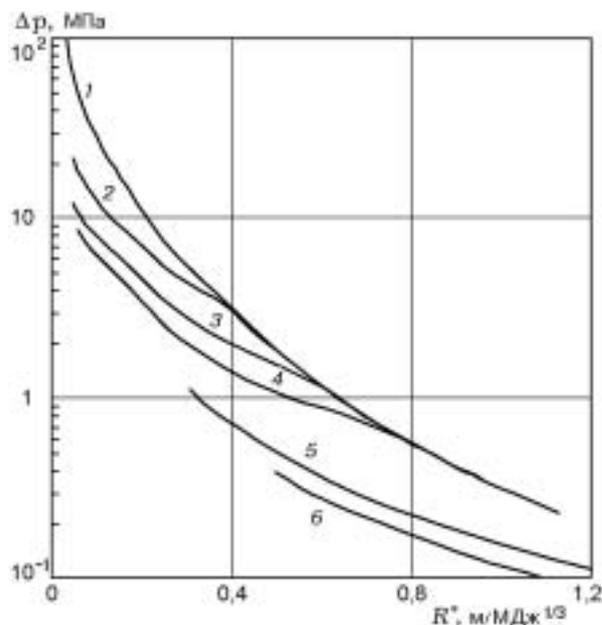


Рис. 2. Зависимости приращения максимального давления от приведенного расстояния $R^* = R/(MQ)^{1/3}$ в УВ при взрывах ВВ и детонирующих смесей газов в воздухе:

1, 2 — тэн, $\rho_0 = 1600$ и 400 кг/м³; 3, 4 — азид свинца, $\rho_0 = 1600$ и 850 кг/м³; 5, 6 — взрывы смесей детонирующих газов с кислородом и воздухом соответственно

$R^* < 0,3$ м/МДж^{1/3} для смесей с кислородом и диапазоне $R_0^* < R^* < 0,5$ м/МДж^{1/3} для смесей с воздухом, наблюдается резкое убывание давления с расстоянием при слабой зависимости величины Δp_0 от типа газа. При $R^* > 1,9$ м/МДж^{1/3} зависимости $\Delta p(R^*)$ при детонации газов [4], не показанные на рис. 2, описываются трехчленными формулами, аналогичными формуле М. А. Садовского [4, 5]. Во всем исследованном диапазоне приведенных расстояний зависимости $\Delta p(R^*)$ для смесей с кислородом расположены выше, чем для смесей с воздухом, и значительно ниже данных для ВВ. Это свидетельствует о том, что доля энергии продуктов взрыва, передаваемая при их расширении в УВ при газовой детонации, значительно ниже, чем при взрывах ВВ.

Из приведенных результатов исследований и данных табл. 1 видно, что объемная плотность энергии заряда $Q\rho_0$ является основной характеристикой, определяющей механическую эффективность взрывов в ближней зоне. Причем закон энергетического подобия выполняется в исследованном диапазоне расстояний лишь при $Q\rho_0 = 10^4 \div 10^3$ МДж/м³.

Таблица 1

Характеристики зарядов ВВ и газовых смесей

Тип ВВ	ρ_0 , кг/м ³	Q , МДж/кг	$Q\rho_0$, МДж/м ³	$R_0/(MQ)^{1/3}$, м/МДж ^{1/3}	Δp_0 , МПа
Тэн	1 600	5,85	9 360	0,0294	108
	400	5,85	2 340	0,047	21
Азид свинца	1 600	1,526	2 441	0,046	12
	850	1,526	1 297	0,0568	8,8
Пропан с кислородом, $C_3H_8 + 5O_2$	1,44	10,03	14,44	0,25	2,60
Метан с кислородом, $CH_4 + 2O_2$	1,13	10,03	11,33	0,28	2,52
Ацетилен с воздухом, $C_2H_2 + 2,5O_2 + 9,4N_2$	1,21	3,407	4,12	0,39	1,66
Пропан с воздухом, $C_3H_8 + 5O_2 + 18,8N_2$	1,25	2,792	3,49	0,41	1,52
Метан с воздухом, $CH_4 + 2O_2 + 7,5N_2$	1,17	2,759	3,23	0,42	1,24

Таблица 2

Сравнение подводных взрывов зарядов тэна плотностью 1 600 кг/м³ (№ 1) с взрывами в полостях с воздухом (№ 2–6)

№ п/п	R_1 , 10 ⁻² м	M , 10 ⁻³ кг	R_1/R_0	$R_1/M^{1/3}$, м/кг ^{1/3}	MQ/V , МДж/м ³	Δp_0 , МПа	E_0/M , МДж/кг	E_0/MQ	Δp_{10} , МПа	E_{10}/MQ
1	—	0,8 ÷ 2,4	1	0,053	9 360	14 900	3,480	0,594	4,070	0,249
2	1,25	0,84	2,5	0,132	601,1	750	2,170	0,371	3,145	0,137
3	1,85	2,4	2,61	0,138	529,8	500	1,990	0,340	3,089	0,149
4	1,75	0,42	4,66	0,247	92,7	12,8	0,71	0,121	2,157	0,057
5	4,17	0,8	8,48	0,449	15,4	10,6	0,21	0,036	1,461	0,018
6	4,37	0,4	11,2	0,593	6,7	6,1	0,13	0,022	1,114	0,010

ВЗРЫВЫ В ВОДЕ

На рис. 3 приведены зависимости приращения максимального давления Δp и приведенной энергии $\varepsilon = E/M$ от приведенного расстояния R^0 в УВ при взрывах сферических зарядов тэна и азид свинца разной плотности в диапазоне $0,053 < R^0 < 10$ м/кг^{1/3} [2]. При переходе от взрыва тэна к взрыву азид свинца и снижении плотности ВВ значения Δp и ε снижаются и медленнее затухают с расстоянием. На границе с зарядом $\Delta p_0 = 14\,900$, $2\,120$ МПа для тэна ($\rho_0 = 1\,600$ и 400 кг/м³) и $\Delta p_0 = 2\,360$, 996 МПа для азид свинца ($\rho_0 = 1\,600$ и 850 кг/м³). Приведенная энергия УВ на границе с зарядом для тэна $\varepsilon_0 = E_0/M = 3,48$ и $2,5$, для азид свинца — $0,65$ и $0,55$ МДж/кг, при этом $E_0/MQ = 0,594$, $0,427$ для тэна и $0,425$, $0,362$ для азид свинца. Доля энергии взрыва, уносимая на максимальное приведенное расстояние

яние $R_{10}^0 = 10$ м/кг^{1/3}, соответственно равна $E_{10}/MQ = 0,250$, $0,289$ и $0,263$, $0,234$. Энергетическое подобие не выполняется во всем исследованном диапазоне расстояний.

На рис. 4 представлены зависимости $\Delta p(R^0)$ и $\varepsilon(R^0)$ в УВ при подводных взрывах сферических зарядов тэна плотностью $1\,600$ кг/м³ и взрывах в центре сферических полостей с воздухом. В табл. 2 приведены для сравнения характеристики подводных взрывов зарядов тэна плотностью $1\,600$ кг/м³ (№ 1) и взрывов в полостях с воздухом (№ 2–6). Давление и энергия УВ уменьшаются с увеличением отношения радиуса полости к радиусу заряда (R_1/R_0) во всем диапазоне измерений. При $R_1/R_0 = 11,2$ начальное максимальное давление УВ при взрыве зарядов тэна в воде более чем на три порядка меньше, чем при $R_1/R_0 = 1$. При этом энергия УВ на границе

Таблица 3
Распределение энергии УВ и газового пузыря при подводных взрывах ВВ

№ п/п	ρ_0 , кг/м ³	R_{\max} , м/кг ^{1/3}	R_{\max} , м/МДж ^{1/3}	T_{\max} , с/кг ^{1/3}	T_{\max} , с/МДж ^{1/3}	Y/MQ , %	E_1/MQ , %	E_0/MQ , %
ТЭн								
1	1600	1,73	0,96	0,274	0,152	37,9	6,2	59,4
2	400	2,01	1,12	0,310	0,172	58,9	5,57	42,7
Азид свинца								
3	1600	1,22	1,06	0,199	0,173	51,2	5,7	42,5
4	850	1,24	1,08	0,202	0,175	53,8	6,1	36,2

Таблица 4

Распределение энергии УВ и газового пузыря
при подводных взрывах тэна в полостях с воздухом

№ п/п	R_1/R_0	R_{\max}/R_0	T_{\max}/R_0 , с/м	Y/MQ , %	E_1/MQ , %	E_2/MQ , %	E_0/MQ , %
1	1	32,6	5,17	37,9	6,2	0	59,4
2	2,65	38,1	6,25	59,8	5,65	3	31,5
3	2,86	36	5,64	51,2	5,7	10,6	32,5
4	3,84	33,6	5,61	41,2	6,1	35,2	17,5
5	5	33,6	6,0	41,2	5,95	41,8	11
6	9	33,4	—	40,4	6	50,6	3
7	11,2	30,9	—	32,6	6,35	59	2

с зарядом E_0 уменьшается почти в 30 раз. На максимальном приведенном расстоянии $R^0 = 10$ м/кг^{1/3} приращение давления снижается примерно в 4 раза, а энергия — в 25 раз. Отмеченные отклонения от закона энергетического подобия при взрывах в полости значительно выше, чем при взрывах различных ВВ.

В табл. 3 и 4 по данным высокоскоростной фотосъемки и пьезоэлектрических измерений приведен энергетический баланс подводных взрывов зарядов тэна и азид свинца разной плотности, а также взрывов тэна в полостях с воздухом, где R_{\max} — максимальный радиус пузыря, T_{\max} — период первой пульсации, $Y = \rho_0(4\pi R_{\max}^3/3)$ — работа расширения газового пузыря против гидростатического давления ρ_0 , E_0 — начальная энергия УВ, E_1 — конечная энергия продуктов взрыва в полости, E_2 — энергия нагретого ударной волной воздуха в полости.

При переходе от взрыва тэна к взрыву азид свинца и уменьшению плотности ВВ проис-

ходит перераспределение энергии между УВ и продуктами: меньше энергии идет в УВ и больше на работу газового пузыря и в продукты взрыва. При взрывах в полости в диапазоне $1 \leq R_1/R_0 \leq 2,65$ параметры газового пузыря увеличиваются. При $R_1/R_0 = 2,65$ максимальный радиус и период первой пульсации увеличиваются соответственно на 17 и 21 %, а работа против сил гидростатического давления Y на 57 % больше, чем при нормальном взрыве. При $2,65 < R_1/R_0 < 11,2$ параметры газового пузыря уменьшаются и в конце диапазона становятся немного меньше, чем при нормальном взрыве. При расширении пузыря до максимального радиуса его энергия затрачивается на работу Y против внешнего давления. Остаточная энергия пузыря $E_1 + E_2 = MQ - Y - E_0$, где начальная энергия УВ E_0 определялась экстраполяцией кривых на рис. 4, б до границы полости, энергия E_1 — по адиабате продуктов взрыва [6], а E_2 — из баланса энергии, который показывает, что с увеличением размера

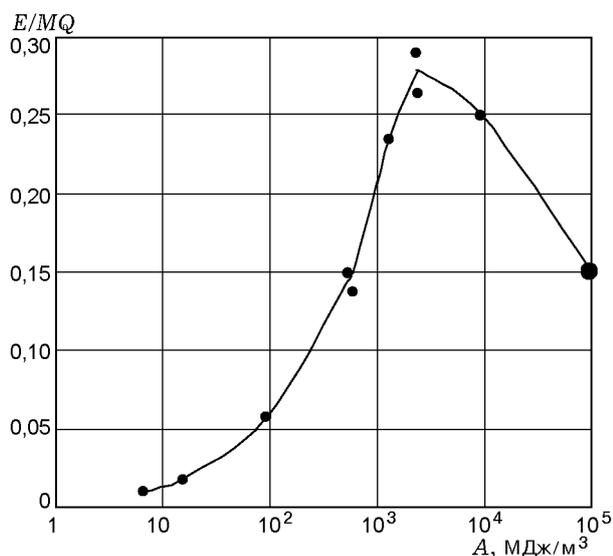


Рис. 5. Зависимость приведенной энергии УВ от объемной концентрации энергии в источнике взрыва на приведенном расстоянии $R^0 = 10 \text{ м/кг}^{1/3}$:

большой кружок — атомный взрыв

полости энергия УВ уменьшается больше чем на порядок, а энергия газов в пузыре соответственно возрастает.

При $R_1/R_0 = 11,2$ доля энергии взрыва, уносимая УВ, $E_0/MQ = 2 \%$, а доля энергии, остающаяся в газовом пузыре после его расширения до максимального размера, $E_1 + E_2 = 0,654MQ$, при этом энергия нагретого воздуха в полости достигает $0,59MQ$. Так как этот горячий газ находится при атмосферном давлении, работы он не совершает. Это должно привести к уменьшению энергии гидроакустического сигнала на больших расстояниях.

На рис. 5 показана зависимость приведенной энергии УВ E/MQ от объемной плотности энергии в источнике взрыва $A = MQ/V$ на приведенном расстоянии $R^0 = 10 \text{ м/кг}^{1/3}$, которая имеет максимум при $A = A_0 = 2500 \text{ МДж/м}^3$. С увеличением A при $A < A_0$ энергия, уносимая ударной волной на большие расстояния, возрастает из-за увеличения ее начального значения на границе с зарядом. При $A > A_0$ энергия, уносимая ударной волной на большие расстояния, уменьшается, так как ее потери за счет диссипации превышают приращение начальной энергии УВ, связанной с ростом A . Для точечного взрыва ($A \gg A_0$, большой кружок на рис. 5 [6]) энергия УВ на больших расстояниях примерно вдвое меньше, чем при взрыве тротила ($A = A_0$).

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ влияния плотности заряжения и теплоты взрыва различных ВВ на механическое действие взрыва в воде и воздухе в ближней зоне.

2. При одинаковых энергиях взрывов отмечена зависимость параметров УВ и продуктов взрыва от объемной плотности энергии в источнике из-за перераспределения энергии между ударной волной и продуктами, что может влиять на брызгантность и нарушать энергетическое подобие взрывов.

3. При взрывах ВВ в воздухе продукты, двигаясь вплотную к фронту, успевают отдать УВ свою энергию и энергетическое подобие восстанавливается. При газовых взрывах и взрывах ВВ в воде продукты расширяются со значительно меньшей скоростью, чем скорость фронта УВ, и не успевают отдать свою энергию, что приводит к нарушению энергетического подобия. С уменьшением объемной концентрации энергии взрыва в источнике доля энергии в ударной волне резко уменьшается, а в продуктах взрыва возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров Б. Д. Параметры фронта ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азида свинца разной плотности // Механическое действие взрыва. М.: ИДГ РАН, 1994. С. 217–224.
2. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов разной плотности из тэна и азида свинца // Там же. С. 249–258.
3. Христофоров Б. Д. О подобии ударных волн при взрыве сферических зарядов в воде и в воздухе // Там же. С. 259–263.
4. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Науч.-техн. проблемы горения и взрыва. 1965. № 2. С. 22–34.
5. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Механическое действие взрыва. М.: ИДГ РАН, 1994. С. 7–102.
6. Коробейников В. П., Христофоров Б. Д. Подводный взрыв // Итоги науки и техники. Гидромеханика. Т. 9. М.: ВИНТИ, 1976. С. 54–119.

Поступила в редакцию 20/V 2003 г.

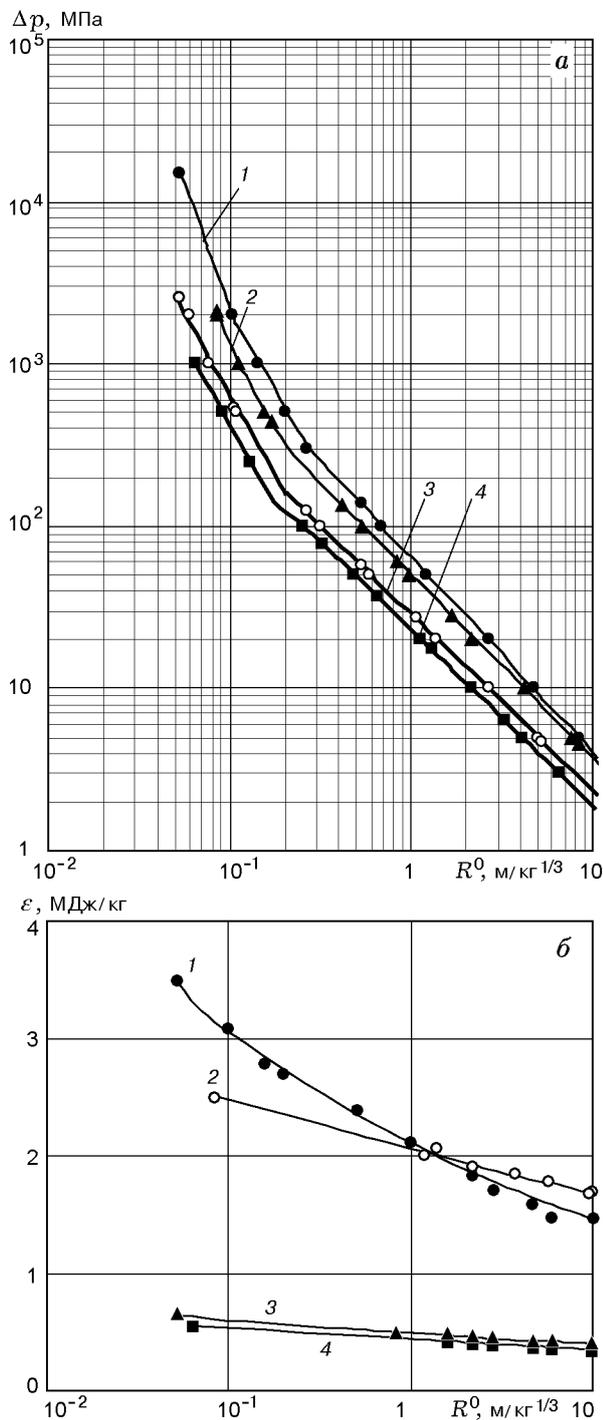


Рис. 3. Зависимости приращения максимального давления (а) и энергии УВ (б) от приведенного расстояния R^0 в УВ при подводных взрывах сферических зарядов тэна (1, 2) и азида свинца (3, 4) разной плотности:

1, 3 — $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, 2 — $\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$, 4 — $\rho_0 = 850 \text{ кг/м}^3$

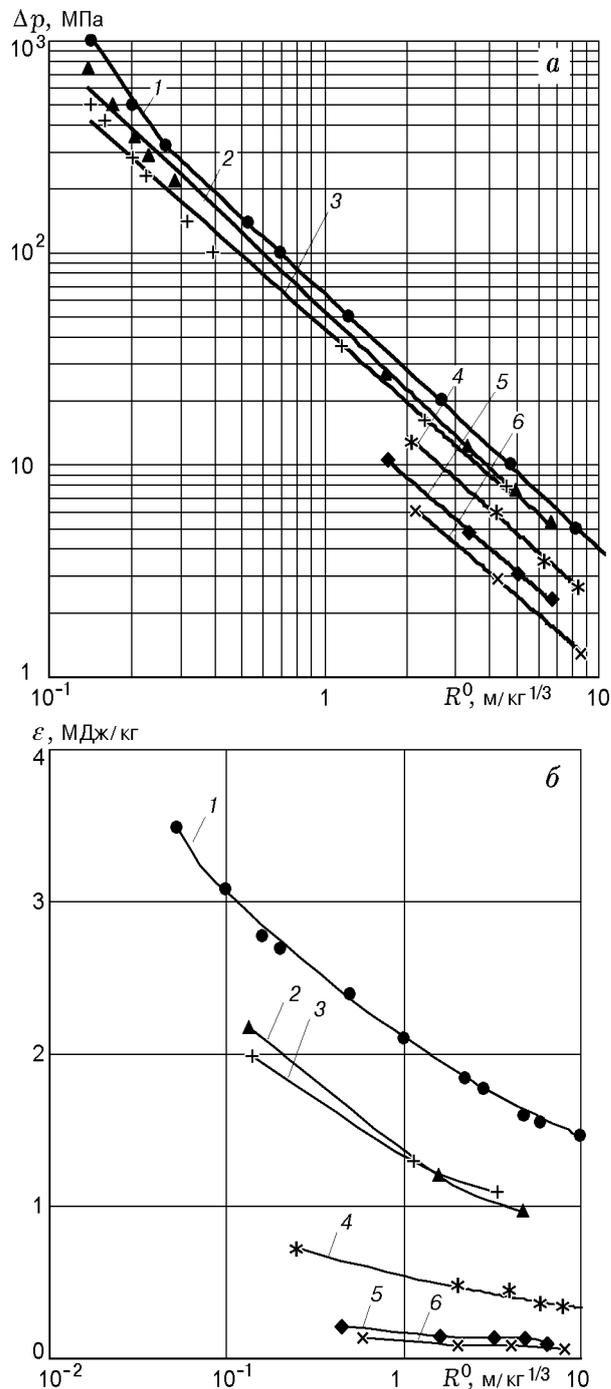


Рис. 4. Зависимости приращения максимального давления (а) и энергии УВ (б) от приведенного расстояния R^0 в УВ при взрывах сферических зарядов тэна плотностью 1600 кг/м^3 в воде (кривая 1) и при подводных взрывах в полостях с воздухом (кривые 2–6):

кривые 1–6 соответствуют номерам взрывов в табл. 2