

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ МЕТАНОУГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

А. А. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru

Приведены расчетные и экспериментальные данные о параметрах горения и детонации в кислородных и воздушных горючих смесях, топливом в которых являются метан и угольная пыль.

Ключевые слова: горение, детонация, критическая энергия зажигания, критическая энергия инициирования детонации, взрывоопасность, экология.

Проблема описания режимов распространения — от низкоскоростного ламинарного пламени до высокоскоростной детонации — в каналах со сложными граничными условиями (переменная геометрия, изменяющиеся коэффициенты гидравлического сопротивления и поглощения, перфорация стенок, ответвления и повороты, реагирующий или инертный каркас) столь многопараметрична, что трудно ожидать ее детального компьютерного моделирования в рамках строгой математической модели, описывающей все многообразие режимов распространения горения и детонации в указанных системах. Подобная модель должна учитывать базовые механизмы газодинамики и кинетики химических реакций в чрезвычайно широком диапазоне основных параметров горения и детонации: от дозвуковых до сверхзвуковых скоростей течения, от комнатной температуры до нескольких тысяч градусов, от стандартных давлений до высоких, с учетом неустойчивости химически реагирующей среды, развития возмущений и их самоорганизации и т. д. Совместная система уравнений газодинамики и химической кинетики, описывающая распространение волн в химически активных средах, неустойчива, а реализуемые структуры волн горения и детонации существенно неоднородны.

Для оценки последствий аварийного возгорания метана необходимо четко представлять возможные сценарии возникновения и развития

очага горения в условиях шахт, чтобы максимально обезопасить людей и оборудование от воздействия горячих продуктов. К настоящему времени экспериментально хорошо изучены процессы низкоскоростного горения смесей с метаном — одним из главных виновников трагедий на шахтах. Процессы высокоскоростной детонации и тем более нестационарного горения (например, процесс ускорения пламени вплоть до перехода горения в детонацию) изучены в значительно меньшей степени. К сожалению, даже в современной справочной литературе по безопасности [1] процессы низкого и высокоскоростного горения рассматриваются в рамках единого термина «пожаровзрывоопасность». С научной точки зрения его нельзя признать корректным, поскольку, как правило, пожароопасность связана с низкоскоростным горением, а взрыв — с высокоскоростным детонационным процессом. Несопоставимы по динамическому воздействию и последствия пожара и взрыва газовой смеси.

Многие углеводородные топлива и добавки к смесям (например, водяной пар, тяжелые углеводороды) при аварийной ситуации могут находиться как в газовой фазе, так и в виде капель диспергированной жидкости. Угольная пыль вообще находится в твердой фазе. Влияние жидкой и твердой фаз, строго говоря, должно учитываться в рамках модели гетерогенной газочапельной или пылегазовой среды со своим уравнением состояния для жидких и твердых компонентов. Однако приближенная оценка влияния жидкой и твердой фаз может быть сделана и в рамках модели идеального газа при следующих допущениях: жидкая или твердая фаза представляется в виде мелкодисперсного распыленного облака капель или частиц с пренебрежимо малыми размерами, что

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-01-00634а), Сибирского отделения в рамках программы Президиума РАН № 26 «Горение и взрыв», ведущей научной школы РФ «Механика ударных и детонационных процессов».

позволяет пренебречь всеми физическими релаксационными процессами (ускорение, дробление, срыв микрокапель с границы пограничного слоя), а энтальпия и энтропия исходного жидкого или твердого компонента «подправляются» на величины, соответствующие фазовому переходу жидкость — газ или твердое тело — жидкость — газ (при данной температуре). В такой постановке часть химической энергии смеси будет затрачена на фазовый переход, что повлечет за собой изменение основных параметров горения и детонации (в той или иной мере, заранее трудно предсказуемой).

Выполнены расчеты параметров горения и детонации смесей метан — кислород, метан — кислород — азот, метан — воздух в широком диапазоне изменения начальной концентрации компонентов горючей смеси и их стехиометрического соотношения (с помощью программы «Безопасность» [2]). В качестве стандартного состояния выбраны $p_0 = 10^5$ Па и $T_0 = 298$ К.

Расчеты с участием атома углерода (как основного компонента угля) проведены по нескольким вариантам:

- 1) газообразный углерод — кислород;
- 2) конденсированный углерод — кислород;
- 3) газообразный и конденсированный углерод с различными долями между фазами в смеси с кислородом;
- 4) газообразный и конденсированный углерод с различными долями между фазами в смеси с воздухом;
- 5) объединенная смесь из двух стехиометрических смесей метан — воздух и углерод — воздух при различных соотношениях этих смесей в объединенной смеси. В качестве подвариантов углерод при фиксированной в данном варианте общей массе рассматривался как смесь газообразной и конденсированной фаз с варьированием доли индивидуальной фазы от нуля до единицы;
- 6) смесь метан — воздух фиксированного состава с постепенным добавлением конденсированного углерода (аналог реальной ситуации аварийного взрыва метана в шахте с вовлечением угольной пыли в процесс горения).

Основная цель расчетов — получение количественной информации о параметрах волн горения и детонации с целью анализа и выработки предложений по перспективным методам предупреждения и ослабления последствий шахтных взрывов.

Известно, что при описании осредненного

значения периода индукции любого топлива по формуле Аррениуса

$$\tau = \frac{A \exp(E/RT)}{[f]^{k_1} [o]^{k_2} [in]^{k_3}}$$

существует значительный разброс кинетических данных, потому проблема выбора корректных кинетических данных — одна из базовых при решении задачи о детонационной опасности исследуемого топлива. В представленной формуле E — энергия активации «лимитирующей» реакции индукционного периода, R — универсальная газовая постоянная, T — температура смеси в зоне индукции, в квадратных скобках — концентрации компонентов смеси (f — топливо, o — окислитель, in — инертная добавка), A , k_i — численные коэффициенты. Для метановых смесей нами использованы константы из [3]: $A = 6 \cdot 10^{-6}$ с · моль/л, $E = 33\,200$ кал/моль, $k_1 = 0$, $k_2 = 1$, $k_3 = 0$.

В данной статье изложена часть наиболее интересных результатов. На рис. 1 приведены критические энергии зажигания (линия II) метановоздушных смесей с минимальной энергией порядка миллиджоуля и критические энергии инициирования детонации (область выше линии I) с минимальным значением порядка

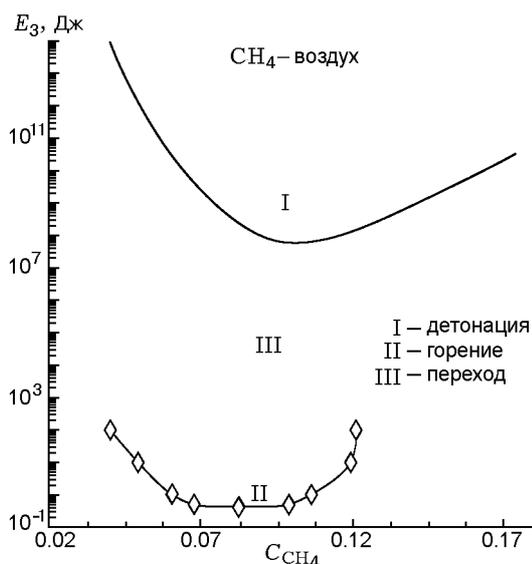


Рис. 1. Критическая энергия зажигания сферического пламени (линия II) и критическая энергия инициирования сферической детонации (область выше линии I) в метановоздушных смесях (область III соответствует возбуждению переходных режимов)

Таблица 1

Параметры стехиометрических смесей метана, этана, пропана с кислородом и воздухом

Смесь	D_0 , м/с	p_d , атм	T_d , К	p_v , атм	T_v , К	T_p , К	T_{df} , К	E_3 , Дж	a , мм
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	2 390	29.3	3 725	14.8	3 541	3 053	2 921	112	2.3
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2$	2 369	34	3 800	17.2	3 609	3 084	2 950	0.54	0.6
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$	2 357	36.2	3 827	18.3	3 634	3 094	2 960	0.62	0.6
CH_4 — воздух (st)	1 803	17.2	2 778	8.8	2 585	2 224	2 031	$7.57 \cdot 10^7$	187
C_2H_6 — воздух (st)	1 802	18	2 812	9.2	2 620	2 257	2 068	$7.70 \cdot 10^4$	29.1
C_3H_8 — воздух (st)	1 800	18.2	2 821	9.3	2 629	2 266	2 078	$1.39 \cdot 10^5$	35.3

Таблица 2

Параметры смесей метан — кислород

Соотношение метана и кислорода	C_{fuel} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
1/19	0.05	334	1 392	11.3	586	7.6	1 945	11.5	306	486	$1.75 \cdot 10^9$
1/9	0.1	338	1 732	17.5	775	13.5	2 828	20.3	554	12.2	$1.95 \cdot 10^4$
3/17	0.15	342	1 916	21	873	17	3 216	25.5	713	4.5	874
1/4	0.2	346	2 060	23.6	945	19.4	3 438	29.4	843	3.2	296
103	0.25	351	2 190	25.9	1 007	21.5	3 585	32.7	961	2.7	174
3/7	0.3	355	2 312	28	1 065	23.4	3 684	35.5	1 071	2.5	127
1/2	0.33	358	2 390	29.3	1 101	24.5	3 725	37.1	1 140	2.3	112
7/13	0.35	360	2 428	29.9	1 119	25	3 737	37.8	1 172	2.3	106
2/3	0.4	365	2 532	31.5	1 166	26.4	3 726	39.2	1 252	2.2	99.3
9/11	0.45	371	2 610	32.2	1 196	26.8	3 606	39.1	1 285	2.2	126
1/1	0.5	376	2 635	31.5	1 193	25.5	3 326	36.6	1 238	3.2	454
11/9	0.55	382	2 575	28.5	1 140	22.1	2 850	31.1	1 085	8.3	9 970
3/2	0.6	389	2 376	22.9	1 017	16.6	2 164	22.6	815	52	$3.34 \cdot 10^6$

10^8 Дж (для метанокислородных смесей минимальная энергия зажигания порядка 10^{-3} Дж, а возбуждения детонации — порядка 100 Дж). Как видно из рис. 1, огромная разница минимальных значений энергии (на $5 \div 10$ порядков) свидетельствует о том, что на начальной стадии аварийного возгорания в шахте всегда реализуются лишь воспламенение метановоздушной смеси и распространение пламени в режиме ламинарного горения (нормальная скорость — 0.34 м/с). После перекрытия сечения шахты пламя распространяется вдоль штрека, ускоряясь как за счет автотурбулизации, так и за счет искусственной турбулизации при взаимодействии со стенками. Фронт ламинар-

ного пламени превращается в турбулентный, скорость его распространения увеличивается. Максимальная скорость турбулентного пламени в метановоздушной смеси составляет примерно 60 м/с. Более того, специалистам хорошо известны нестационарные режимы ускорения пламени, вплоть до перехода горения в детонацию (при выполнении определенных требований) — область III. На рисунках C_{CH_4} — молярная доля (концентрация) метана в смеси.

В табл. 1 приведены скорость детонации D_0 , температура T_d и давление p_d продуктов детонации, температура T_v и давление p_v продуктов при мгновенном взрыве в бомбе постоянного объема, температура продуктов горения

Таблица 3

Параметры смесей метан — кислород, разбавленных азотом

C_{inert} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
0	359	2390	29.3	1101	24.5	3725	37.1	1140	2.3	112
0.1	358	2322	27.8	1069	23.2	3653	34.8	1066	3.2	277
0.2	358	2255	26.4	1037	21.9	3579	32.5	994	4.4	749
0.25	357	2220	25.7	1020	21.2	3538	31.4	958	5.2	1300
0.33	357	2161	24.4	991	20.1	3460	29.4	896	7.3	3670
0.4	357	2112	23.4	967	19.2	3389	27.8	846	10	9640
0.5	356	2031	21.8	926	17.6	3258	25.3	766	17.8	$5.78 \cdot 10^4$
0.6	356	1939	19.9	879	15.9	3084	22.4	679	40.1	$6.94 \cdot 10^5$
0.7	355	1824	17.6	816	13.6	2828	19.1	576	144	$3.44 \cdot 10^7$
0.715	355	1803	17.2	805	13.2	2778	18.5	559	187	$7.57 \cdot 10^7$
0.73	355	1785	16.8	794	12.9	2733	18	544	237	$1.56 \cdot 10^8$

Таблица 4

Параметры смесей метан — воздух с различной концентрацией метана

C_{CH_4}	C_{fuel} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
0.2	0.040	351	1380	10	572	6.5	1755	9.2	269	$1.72 \cdot 10^4$	$9.49 \cdot 10^{13}$
0.3	0.059	352	1579	13.1	676	9.2	2238	13.2	391	$1.49 \cdot 10^3$	$4.46 \cdot 10^{10}$
0.4	0.077	354	1717	15.6	754	11.6	2593	16.5	492	368	$5.89 \cdot 10^8$
0.5	0.095	355	1801	17.2	804	13.2	2780	18.4	555	182	$7.06 \cdot 10^7$
0.6	0.112	356	1833	17.5	811	13.2	2783	18.8	571	194	$8.29 \cdot 10^7$
0.8	0.144	358	1801	16.2	774	11.6	2489	16.9	518	473	$1.35 \cdot 10^9$
1.0	0.173	361	1736	14.8	735	10.2	2161	14.5	450	$1.29 \cdot 10^3$	$3.40 \cdot 10^{10}$

T_p в режиме $p = \text{const}$, температура продуктов дефлаграционного горения T_{df} с максимальной скоростью (касание к дозвуковой части адиабаты энергосвечения), энергия инициирования сферической детонации E_3 , размер ячейки детонационного фронта a для стехиометрических смесей метана с кислородом и метана с воздухом (данные для этана и пропана взяты для сравнения из [4]).

В табл. 2 представлены данные для смесей метан — кислород: молярная доля метана в смеси C_{fuel} , скорость звука c_0 в исходной смеси, скорость детонации D_0 , давление продуктов детонации p_d , массовая скорость продуктов u_d ,

динамический напор продуктов ρu_d^2 , температура продуктов T_d , безразмерный $q = Q/c_0^2$ и удельный Q_{gas} тепловой эффект, размер ячейки детонационного фронта a , энергия инициирования сферической детонации E_3 . Эти же параметры приведены в табл. 3 для стехиометрической смеси метан — кислород при разбавлении ее азотом — $0.5CH_4 + O_2 + nN_2$ ($C_{inert} = n/(n + 1.5)$ — молярная доля инертного газа в смеси), а в табл. 4 — для метановоздушных смесей при различных молярных концентрациях метана в смеси $\alpha CH_4 + O_2 + 3.76N_2$ ($C_{fuel} = \alpha/(\alpha + 4.76)$, C_{fuel} меняется внутри концентрационных пределов).

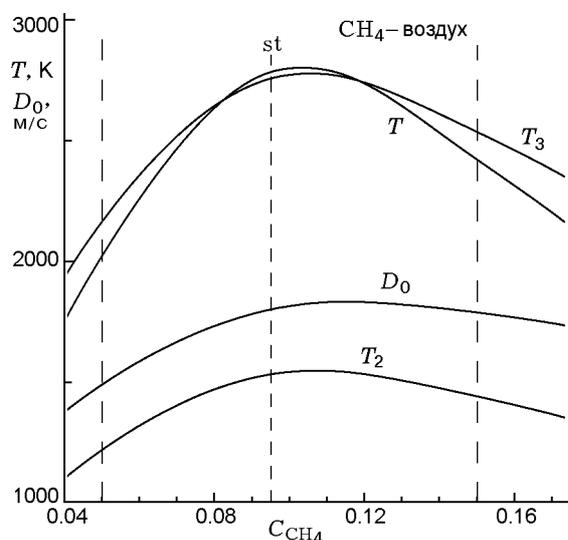


Рис. 2. Скорость детонации, температуры продуктов (T), газа в зоне индукции за падающей волной (T_2) и при отражении газа в зоне индукции от жесткой стенки (T_3) для метановоздушных смесей при различных молярных концентрациях метана в смеси:

вертикальная штриховая линия, обозначенная «st», соответствует стехиометрическому соотношению метана и воздуха, штриховые линии слева и справа от нее соответствуют нижнему и верхнему концентрационным пределам детонации

На рис. 2 представлены скорость детонации, температуры продуктов, газа в зоне индукции за падающей волной и при отражении газа в зоне индукции от жесткой стенки для метановоздушных смесей, различающихся молярной концентрацией метана. На рис. 3 приведена скорость детонации стехиометрической метаноокислородной смеси, разбавленной азотом в различных молярных концентрациях.

Расчеты для метановых топливно-кислородных смесей (ТКС) указывают на наличие максимума $D_0 \approx 2635$ м/с вблизи эквимольного соотношения ($C = 0.5$). Для топливно-воздушных смесей (ТВС) максимум $D_0 \approx 1833$ м/с несколько сдвинут от эквимольного соотношения ($C = 0.174$) в сторону верхнего концентрационного предела. Для стехиометрических составов ТКС и ТВС $D_0 = 2390$ и 1801 м/с. Максимальная температура продуктов $T \approx 3737$ К для ТКС и $T \approx 2783$ К для ТВС достигается для околостехиометрических составов, в то время как для стехиометрических составов $T = 3725$ и 2780 К соответственно, т. е. максимумы скорости и темпера-

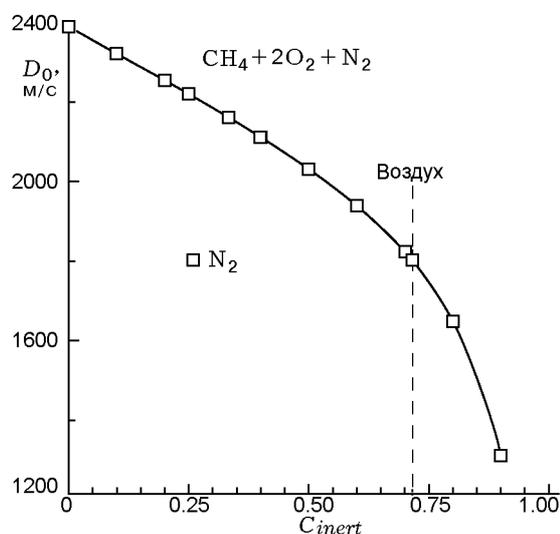


Рис. 3. Скорость детонации стехиометрической метаноокислородной смеси при ее разбавлении азотом в различных молярных концентрациях

туры сдвинуты друг относительно друга. Общее свойство: скорость детонации, температура в зоне индукции детонационной волны (T_2), температура продуктов реакции ($T = T_d$) и температура газа на стенке при отражении детонационной волны (T_3) уменьшаются по мере приближения к пределам. Особо отметим, что система уравнений для детонации имеет решение и вне экспериментально измеренных концентрационных пределов, что лишнее свидетельствует об условности предельных величин и необходимости разработки строгой теории концентрационных пределов.

Молекулярные массы исходной смеси μ_0 и продуктов детонации μ (г/моль), перепад давления $P = p/p_0$, отношение температур $\theta = T/T_0$ в продуктах детонации и безразмерный тепловой эффект q демонстрируют следующее поведение: $\mu < \mu_0$, а максимумы давления $P \approx 32.2$ для ТКС и $P \approx 17.5$ для ТВС в случае околэквимольных смесей сдвинуты относительно максимумов температуры продуктов $\theta \approx 12.53$ и $\theta \approx 9.34$ соответственно, достигаемых вблизи околостехиометрических составов. Приближение к пределам уменьшает P , θ и q . Для стехиометрических составов $P = 29.3$ и $\theta = 12.5$ (ТКС) и $P = 17.2$ и $\theta = 9.3$ (ТВС).

Для ТКС максимальный тепловой эффект реакции $Q = 1285$ кал/г характерен для смеси 45 % $\text{CH}_4 + 55$ % O_2 , для метановоздушных смесей $Q \approx 570$ кал/г. Исходя из вида зависи-

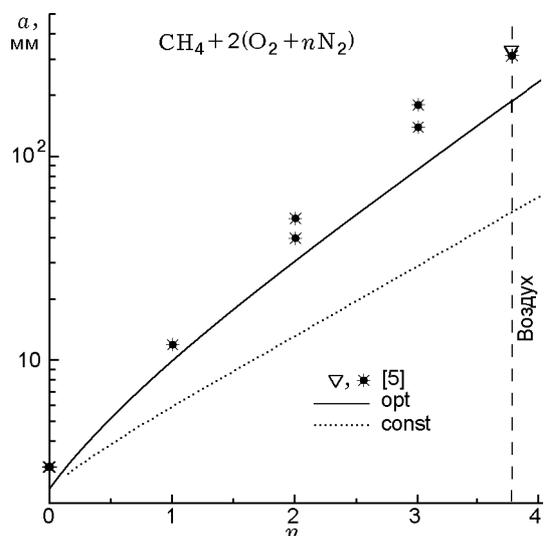


Рис. 4. Изменение размера ячейки в метановой смеси при различном разбавлении азотом

мостей скачка давления в детонационной волне P_d и при мгновенном взрыве P_v для оценок можно полагать $P_d \approx 2P_v$.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные данные о размере ячеек в смесях $\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + n\text{N}_2)$ при различных значениях n и начальном давлении $p_0 = 1$ атм (воздух — $\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$). Для азота представлены две расчетные линии: одна (пунктирная) получена с использованием традиционной формулы Аррениуса для «обобщенной» кинетической модели с постоянными коэффициентами, вторая (сплошная) — по методике, учитывающей дополнительное влияние азота на период индукции [5]. Экспериментальные точки при $n = 3.76$ соответствуют спиновому режиму детонации в стехиометрической смеси метана с воздухом в трубе диаметром 100 мм при $p_0 = 1$ атм, что дает характерный размер ячейки детонационной волны $a \approx 314$ мм. Отметим, что расчетный размер ячейки $a = 187$ мм для стехиометрической метановоздушной смеси даже по варианту расчета [5] несколько занижен по сравнению с экспериментальной величиной $a = 314$ мм, хотя общую тенденцию поведения размеров ячейки при изменении степени разбавления азотом зависимость $a(n)$ описывает вполне корректно.

Характерную U-образную форму имеют зависимости поперечного размера ячейки a многофронтной детонации (и других параметров, пропорциональных a [6], например энер-

гии инициирования) от C_{CH_4} . Минимальный размер ячейки равен $a \approx 2.2$ мм для ТКС и $a \approx 182$ мм для ТВС и близок к значению a в смесях стехиометрического состава.

Характерную U-образную форму имеют зависимости критической энергии инициирования детонации метановых смесей для плоского (E_1 , Дж/см²), цилиндрического (E_2 , Дж/см) и сферического (E_3 , Дж) случаев симметрии (аналогично — критические энергии воспламенения). Минимальные энергии для ТКС равны 2.7 Дж/см², 3.8 Дж/см и 100 Дж; для ТВС — 270 Дж/см², $2.3 \cdot 10^4$ Дж/см и $7 \cdot 10^7$ Дж (последнее значение эквивалентно ≈ 17 кг тротила). Отметим чрезвычайно быстрое нарастание всех этих величин вблизи пределов [7].

Для определения нагрузок представляет интерес динамический напор ρu_d^2 продуктов детонации и газа в зоне индукции (ρ — плотность, u — массовая скорость): его максимальные значения соответственно равны 27 и 540 атм для ТКС и 13 и 166 атм для ТВС. Динамический напор в ударной волне значительно выше, чем в детонационной (при одинаковой скорости волны).

На рис. 5 в логарифмическом масштабе представлен химический состав основных продуктов детонации в зависимости от молярной доли метана в ТВС. Вертикальной штрихо-

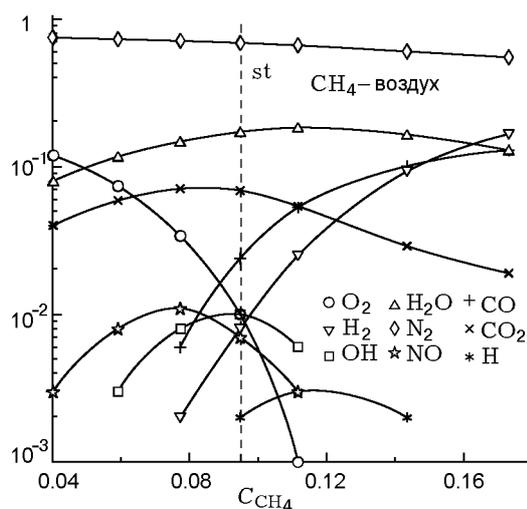


Рис. 5. Молярный состав основных продуктов детонации метановоздушных смесей с различным содержанием метана в них:

при обогащении смеси метаном в продуктах увеличивается доля горючего синтез-газа (смесь водорода и оксида углерода)

Таблица 5

Параметры стехиометрической смеси углерод — кислород
при различных соотношениях газовой и конденсированной фаз

C_{gas} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	p_v , атм	T_v , К
0	412	2 036	17.6	920	13.9	3 952	114	4 636	9	3 746
0.1	412	2 215	20.6	998	16.3	4 278	106	4 291	10.5	4 033
0.2	412	2 401	24.1	1 077	18.9	4 632	97.5	3 951	12.2	4 338
0.3	412	2 605	27.7	1 157	21.6	5 056	89.5	3 626	14.1	4 690
0.4	412	2 849	32.3	1 239	24.4	5 670	82.5	3 345	16.4	5 164
0.5	412	3 158	39.4	1 370	29.8	6 706	78.3	3 160	19.7	5 966
0.6	412	3 373	46.8	1 531	38.6	7 528	72.8	2 950	23.3	6 936
0.7	412	3 506	51.3	1 617	43.6	7 956	66.3	2 689	25.6	7 468
0.8	412	3 612	54.8	1 678	47.3	8 251	59.5	2 412	27.4	7 795
0.9	412	3 705	57.9	1 730	50.5	8 487	52.6	2 132	29.1	8 042
1	412	3 791	60.8	1 778	53.5	8 691	45.8	1 854	30.4	8 249

Таблица 6

Параметры стехиометрической смеси углерод — воздух
при различных соотношениях газовой и конденсированной фаз

C_{gas} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	p_v , атм	T_v , К
0	372	1 703	14.5	757	10.9	2 826	49.7	1 642	7.5	2 638
0.1	372	1 787	15.9	798	12.2	3 048	47.6	1 572	8.2	2 855
0.2	372	1 865	17.3	835	13.4	3 254	45.4	1 498	8.9	3 048
0.3	372	1 942	18.7	869	14.5	3 454	43.1	1 422	9.6	3 232
0.4	372	2 018	20	902	15.6	3 657	40.8	1 347	10.2	3 413
0.5	372	2 096	21.5	934	16.7	3 868	38.6	1 274	11	3 598
0.6	372	2 177	23	967	17.8	4 092	36.5	1 204	11.7	3 790
0.7	372	2 261	24.6	1 000	19	4 334	34.5	1 139	12.5	3 994
0.8	372	2 349	26.4	1 034	20.2	4 602	32.7	1 079	13.4	4 216
0.9	372	2 441	28.3	1 071	21.6	4 896	31.1	1 026	14.4	4 460
1	372	2 534	30.5	1 113	23.4	5 211	29.6	977	15.4	4 731

вой линией в центре обозначен стехиометрический состав (0.095). Обратим внимание на то, что максимумы концентраций отдельных компонентов сдвинуты друг относительно друга. Во всем диапазоне концентраций метана в продуктах можно зафиксировать азот, водяной пар и диоксид углерода. Датчики, фиксиру-

ющие воспламенение смеси и свечение продуктов, должны быть «привязаны» к этим компонентам.

При ускорении пламени наблюдается формирование волн сжатия, которые, в свою очередь, способны привести к переходу горения в детонацию. В момент перехода (своеобраз-

Таблица 7

Параметры смеси угольная пыль — воздух при различных концентрациях угольной пыли

C_{fuel} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	p_v , атм	T_v , К
0.01	350	678	2.7	212	0.8	552	3.1	92	1.6	486
0.02	351	836	3.8	296	1.6	756	6.3	185	2.2	663
0.03	352	957	4.9	359	2.4	947	9.4	279	2.7	833
0.04	354	1058	5.9	410	3.2	1129	12.5	374	3.2	996
0.05	355	1146	6.9	454	3.9	1304	15.6	470	3.7	1154
0.06	356	1224	7.8	493	4.6	1473	18.7	567	4.1	1307
0.07	358	1294	8.6	528	5.3	1637	21.8	665	4.6	1458
0.08	359	1358	9.4	561	6	1797	24.8	764	5	1605
0.1	361	1471	11	619	7.3	2106	30.9	964	5.7	1892
0.15	368	1661	13.9	732	10.3	2698	44.5	1443	7.2	2497
0.174	372	1703	14.5	757	10.9	2826	49.7	1642	7.5	2638
0.2	376	1724	14.5	762	10.8	2869	54.8	1849	7.5	2659
0.25	383	1661	12.5	699	8.5	2571	61.9	2172	6.5	2298
0.3	391	1468	9.5	601	5.9	1962	67.1	2454	5	1743
0.35	400	918	3.4	325	1.5	892	70.7	2699	2.1	786

Таблица 8

Параметры смеси, полученной смешиванием стехиометрических смесей метан — воздух и угольная пыль — воздух

C_{CH_4} , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	p_v , атм	T_v , К
0	372	1703	14.5	757	10.9	2826	49.7	1642	7.5	2638
0.1	370	1710	14.7	761	11.1	2811	46.9	1534	7.6	2626
0.2	368	1720	14.9	766	11.3	2805	44.1	1428	7.7	2619
0.3	366	1730	15.2	770	11.6	2800	41.1	1321	7.8	2614
0.4	365	1740	15.5	775	11.8	2795	38.2	1214	8	2609
0.5	363	1750	15.7	780	12	2792	35.1	1106	8.1	2604
0.6	361	1761	16	785	12.2	2788	32	998	8.2	2600
0.7	360	1771	16.3	790	12.5	2785	28.8	889	8.4	2596
0.8	358	1782	16.6	795	12.7	2782	25.5	779	8.5	2592
0.9	356	1792	16.9	800	13	2780	22.1	670	8.6	2589
1	354	1803	17.2	895	13.2	2778	18.6	559	8.8	2585

Таблица 9

Параметры стехиометрической смеси метан — воздух, дополненной угольной пылью

C_C , молярная доля	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p_d , атм	u_d , м/с	ρu_d^2 , атм	T_d , К	q	Q_{gas} , кал/г	p_v , атм	T_v , К
0.05	355	1810	17.2	808	13.2	2797	20.6	623	8.8	2603
0.1	356	1815	17.2	809	13.2	2805	22.5	683	8.8	2604
0.15	358	1816	17.1	807	13	2802	24.2	740	8.7	2592
0.2	359	1815	16.9	803	12.8	2790	25.8	794	8.6	2568
0.25	360	1812	16.7	798	12.5	2769	27.3	845	8.5	2537
0.3	361	1806	16.4	791	12.2	2742	28.7	894	8.4	2501
0.35	362	1799	16.2	784	11.9	2709	30	941	8.3	2463
0.4	363	1790	15.9	776	11.5	2672	31.3	986	8.1	2422
0.45	364	1780	15.6	769	11.2	2632	32.5	1031	8	2380
0.5	365	1769	15.3	761	10.9	2590	33.7	1074	7.8	2337
0.6	367	1746	14.7	746	10.3	2503	36.1	1158	7.6	2250
0.7	369	1720	14.1	731	9.8	2411	38.1	1240	7.2	2162
0.8	371	1692	13.5	715	9.2	2318	40.1	1320	7	2074
1	375	1630	12.3	682	8.2	2129	43.9	1476	6.4	1896
1.2	379	1563	11.1	646	7.2	1936	47.4	1626	5.8	1718
1.4	382	1487	9.9	607	6.2	1740	50.7	1771	5.2	1538
1.6	386	1428	9.2	592	5.9	1638	54.1	1923	4.8	1467
1.8	389	1409	9	595	5.9	1658	57.6	2086	4.7	1507
2	392	1390	8.8	593	5.8	1675	61.2	2243	4.6	1540
2.2	395	1369	8.5	588	5.7	1687	64.1	2396	4.5	1566
2.4	398	1347	8.2	581	5.5	1694	67.1	2544	4.3	1586
2.6	401	1324	7.9	573	5.3	1698	69.8	2688	4.2	1600
2.8	404	1299	7.6	563	5.1	1698	72.4	2828	4	1607
3	407	1271	7.2	550	4.8	1685	74.8	2962	3.8	1600

ный локальный взрыв) давление в зоне взрыва может превышать не только давление мгновенного взрыва в бомбе постоянного объема ($p_v = 8.8$ атм), но и давление детонации ($p_d = 17.2$ атм). После перехода формируется детонационная волна.

В табл. 5 представлены данные для стехиометрической смеси углерод — кислород ($\alpha C_{gas} + (1 - \alpha)C_{cond} + O_2$) при различных соотношениях газовой и конденсированной фаз ($C_{gas} = \alpha/2$ — доля газовой фазы). Значение $C_{gas} = 0$ соответствует детонации ультрадис-

персной угольной пыли. Результаты для смеси углерод — воздух в аналогичной постановке ($\alpha C_{gas} + (1 - \alpha)C_{cond} + O_2 + 3.76N_2$) представлены в табл. 6. В табл. 7 приведены параметры смеси мелкодисперсная угольная пыль — воздух ($\alpha C_{cond} + O_2 + 3.76N_2$) при различных концентрациях угольной пыли ($C_{cond} = C_C = \alpha/(\alpha + 4.76)$). Табл. 8 содержит данные для случая, когда две стехиометрические смеси метан — воздух и угольная пыль — воздух объединяются в единую смесь $0.5\alpha CH_4 + (1 - \alpha)C_{cond} + O_2 + 3.76N_2$, ее параметры зави-

сят от объемного соотношения между стехиометрическими смесями. В табл. 9 представлены данные для случая, когда к стехиометрической смеси метан — воздух постепенно добавляется угольная пыль — $0.5\text{CH}_4 + \alpha C_{cond} + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$.

Результаты некоторых расчетов параметров для смесей с атомами углерода даны на рис. 6–11. На рис. 6 приведена скорость детонации в стехиометрической смеси углерода с воздухом в случае, когда углерод находится по частям в газовой и конденсированной фазах, в зависимости от молярной концентрации конденсированной угольной пыли. На рис. 7, 8 представлены зависимости тепловых эффектов и размера ячейки детонационного фронта смеси углерода (угольной пыли) с воздухом от молярной концентрации топлива. На рис. 9–11 показаны зависимости скорости детонации и молярной концентрации конденсированной угольной пыли для трех случаев: смешиваются две стехиометрические смеси метан — воздух и угольная пыль — воздух (с сохранением условия стехиометричности по обоим топливам (метану и углероду)); к стехиометрической смеси метан — воздух добавляется угольная пыль; в стехиометрической смеси углерода с кислородом углерод находится по частям в газовой и конденсированной фазах.

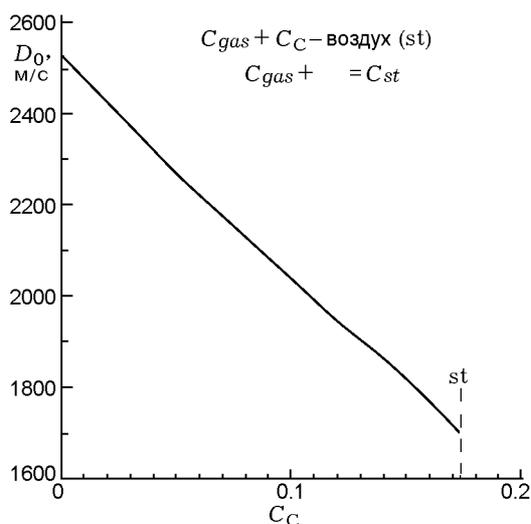


Рис. 6. Скорость детонации в стехиометрической смеси углерода с воздухом в случае, когда углерод находится по частям в газовой и конденсированной фазах, в зависимости от молярной концентрации конденсированной угольной пыли

В вариантах расчета с участием атомов углерода как основного компонента угольной пыли следует обратить внимание, что при горении углерода в кислороде температура продуктов превышает 8 000 К (выше температуры на поверхности Солнца). При сгорании углерода в воздухе температура достигает $\approx 5\,000\text{ К}$,

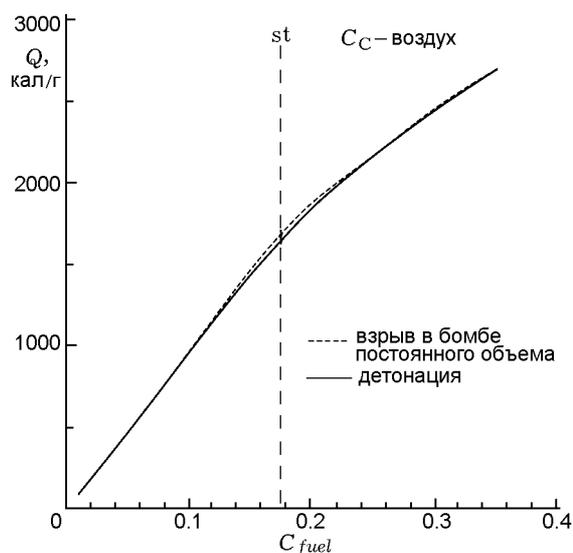


Рис. 7. Тепловые эффекты в смеси углерода с воздухом в зависимости от молярной концентрации топлива

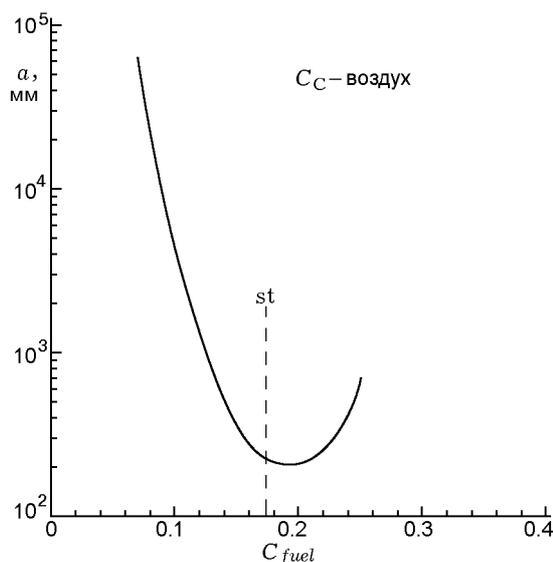


Рис. 8. Размер ячейки детонационного фронта в смеси углерода (угольной пыли) с воздухом в зависимости от молярной концентрации топлива

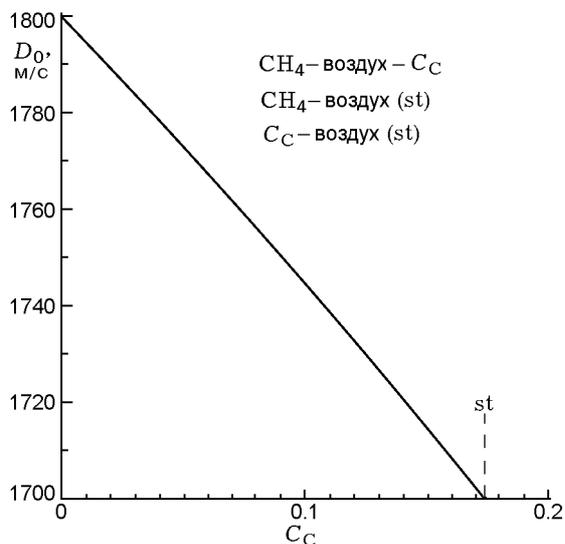


Рис. 9. Скорость детонации смеси, полученной смешиванием стехиометрических смесей метан — воздух и угольная пыль — воздух (с сохранением условия стехиометричности по обоим топливам (метану и углероду)), в зависимости от молярной концентрации конденсированной угольной пыли

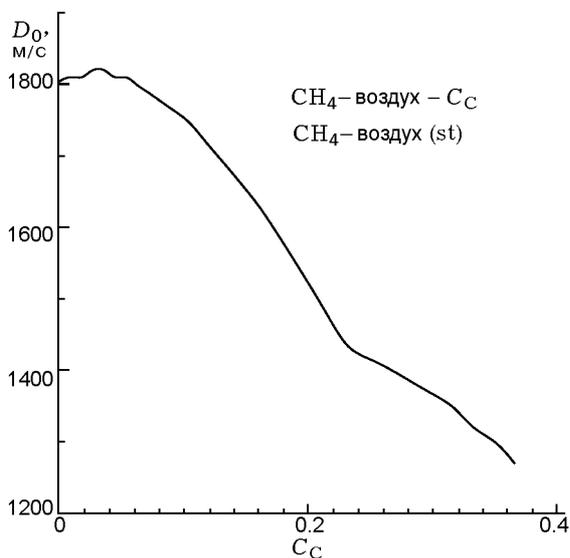


Рис. 10. Скорость детонации стехиометрической смеси метан — воздух, в которую добавлена угольная пыль, в зависимости от ее молярной концентрации

в то время как при сгорании метана — не более 3 000 К. Это однозначно свидетельствует о необходимости учета роли угольной пыли при прогнозировании последствий метановых взрывов в шахтах.

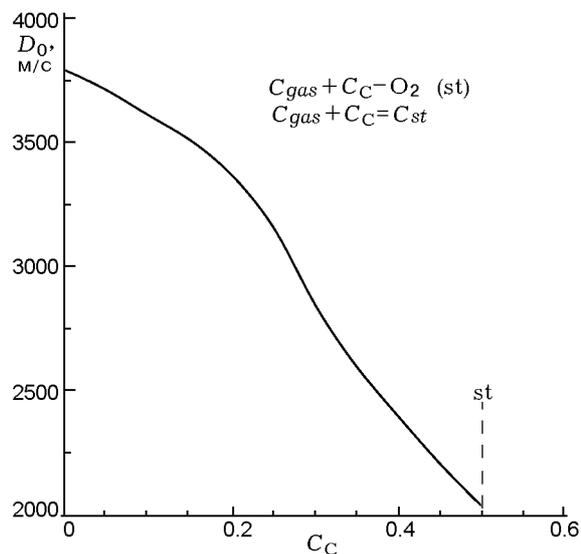


Рис. 11. Скорость детонации стехиометрической смеси углерода с кислородом в случае, когда углерод находится по частям в газовой и конденсированной фазах, в зависимости от молярной концентрации конденсированной угольной пыли

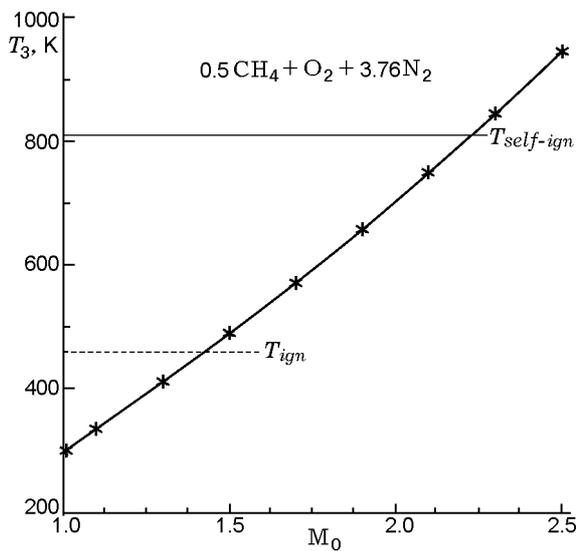


Рис. 12. Зависимость температуры газа за отраженной ударной волной в метановоздушной смеси от числа Маха (отношение скорости волны к скорости звука):

горизонтальная линия T_{ign} — температура вспышки, $T_{self-ign}$ — температура самовоспламенения смеси; видно, что ударная волна при $M > 1.45$ уже становится опасной

При воздействии на взрывную волну нужно иметь в виду, что недостаточно «сорванная» взрывная волна способна восстановиться при последующем столкновении со стенками или препятствиями [7, 8], поскольку при отражении ударной волны заметно возрастает температура и смесь может воспламениться. На рис. 12 приведены зависимости температуры за ударной волной в метановоздушной смеси. Видно, что в плане воспламенения смеси (критерий — температура достигает температуры вспышки) опасными являются волны, скорость которых выше звуковой примерно в 1.45 раза. За такой волной давление возрастает примерно вдвое по сравнению с начальным.

Итак, в данной работе представлены параметры горения и детонации смесей метан — кислород, метан — кислород — азот, метан — воздух, угольная пыль — кислород, угольная пыль — воздух, метан — воздух — угольная пыль (характерных для аварийных взрывов в шахтах) в широком диапазоне изменения начальной концентрации компонентов горючей смеси и их стехиометрического соотношения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: справочник. В 2 кн. /

- под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. — М.: Химия, 1990.
2. **Васильев А. А., Валишев А. И., Васильев В. А., Панфилова Л. В.** Характеристики горения и детонации гидразина и его метилпроизводных // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 81–96.
3. **Солоухин Р. И.** Методы измерений и основные результаты в экспериментах на ударных трубах // 7-й Междунар. симп. по ударным трубам. — Новосибирск, 1969.
4. **Васильев А. А.** Детонационные свойства предельных углеводородов // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 82–90.
5. **Васильев А. А.** О влиянии азота на параметры многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 1. — С. 79–83.
6. **Vasil'ev A. A.** Cell size as the main geometric parameter of multifront detonation wave // J. Propulsion and Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1245–1260.
7. **Васильев А. А.** Вопросы инициирования и его оптимизации // Тр. конф. «Успехи механики сплошных сред», Владивосток, 29 сентября — 5 октября 2009 г. — С. 103–117.
8. **Васильев А. А., Васильев В. А.** Дифракция волн горения и детонации // Инж.-физ. журн. — 2010. — Т. 83, № 6. — С. 1111–1129.

Поступила в редакцию 29/IV 2012 г.