

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ БЫТОВЫХ ГАЗОВ

А. А. Васильев

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

Представлены расчетные и экспериментальные данные о важнейших параметрах горения и детонации этана, пропана и бутана в смеси с кислородом, воздухом при разбавлении их инертными газами и изменении начального давления.

Ключевые слова: горение, детонация, критический диаметр дифракции, критические энергии инициирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Возрастающее количество аварийных ситуаций и катастроф с бытовыми газами (пропан  $C_3H_8$ —бутан  $C_4H_{10}$  с примесью этана  $C_2H_6$ ) заставляет проанализировать их основные характеристики (скорость, давление, температура) в процессах горения и детонации. Мерой взрывоопасности горючей смеси традиционно является критическая энергия инициирования рассматриваемого процесса (горения или детонации): чем меньше энергия инициирования, тем более опасна смесь.

С учетом того, что энергия инициирования детонации  $E_{*ν}$  может быть определена через характерный размер структуры многофронтной детонационной волны — размер ячейки  $a$ , этот размер, наряду с  $E_{*ν}$ , представляет одну из важнейших характеристик смеси (индекс симметрии  $ν = 1, 2, 3$  соответствует плоскому, цилиндрическому и сферическому случаям).

Бытовые газы и их отдельные характеристики привлекали внимание многих исследователей. Для топливно-кислородных смесей (ТКС), типичных для лабораторных исследований, эксперименты проводились, как правило, при пониженных начальных давлениях, когда размер ячеек достаточно большой (порядка миллиметра и больше) и легко регистрируется на следовых отпечатках. С точки зрения опасности основной интерес представляют взрывы при атмосферном давлении, требующие особых способов регистрации мелкоячейистой структуры («двойная экспозиция» — см. ниже) в ТКС или крупномасштабных высокоскоростных полигонных исследований для

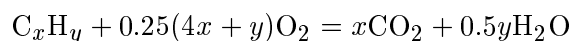
топливно-воздушных смесей (ТВС).

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований горения и детонации бытовых газов.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Методика расчета важнейших параметров детонации, включая размер ячейки  $a$  и критическую энергию инициирования, подробно изложена в [1] и положена в основу компьютерной программы «Безопасность» (см., например, [2]). Расчеты ведутся в предположении идеальности газовых компонентов и химического равновесия продуктов. За стандартное состояние выбраны значения  $p_0 = 10^5$  Па (1.0 атм) и  $T_0 = 298$  К, расчеты проведены также при других давлениях и температурах.

Перед представлением результатов следует сделать замечание по поводу неадекватности используемой в литературе терминологии. Так, в большинстве отечественных работ по горению и взрыву под стехиометрической понимается смесь, продукты которой окислены до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Для произвольного углеводородного топлива с уравнением реакции в виде



молярная доля топлива  $C_f$  в смеси определяется формулой

$$C_f = 4/(4x + y + 4)$$

и характеризует естественным образом общепринятые концентрационные пределы реагирования смеси (нижний и верхний). Наряду с концентрацией горючего довольно часто используется коэффициент стехиометрии  $\phi$ , определяемый как отношение молярных долей топлива

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-01-00129 и 06-08-00761).

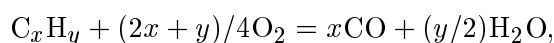
Смесь	$D_0$ , м/с	$p_d$ , атм	$T_d$ , К	$p_v$ , атм	$T_v$ , К	$T_p$ , К	$T_{df}$ , К	$E_3$ , Дж
$C_2H_6 + 3.5O_2$ (стех.)	2 368.6	33.97	3 800	17.15	3 609	3 084	2 950	0.54
$C_3H_8 + 5O_2$ (стех.)	2 357.2	36.2	3 827	18.26	3 634	3 094	2 960	0.62
$C_4H_{10} + 6.5O_2$ (стех.)	2 350	37.5	3 841	18.9	3 646	3 099	2 964	0.78
$C_2H_6 + \text{воздух}$ (стех.)	1 802.3	17.95	2 812	9.19	2 620	2 257	2 068	$7.70 \cdot 10^4$
$C_3H_8 + \text{воздух}$ (стех.)	1 799.9	18.24	2 821	9.33	2 629	2 266	2 078	$1.39 \cdot 10^5$
$C_4H_{10} + \text{воздух}$ (стех.)	1 797.8	18.39	2 823	9.4	2 632	2 268	2 081	$2.23 \cdot 10^5$
$C_3H_8 + 5O_2$ (стех.)	2 357.2	36.2	3 827	18.26	3 634	3 094	2 960	0.62
$C_3H_8 + 9O_2$	2 087.6	27.87	3 566	14.12	3 388	2 941	2 809	3.2
$C_3H_8 + 3O_2$	2 580.1	44.21	3 768	22.24	3 549	2 979	2 819	0.3
$7C_3H_8 + 13O_2$	2 503.3	41.34	2 802	20.81	2 528	2 018	1 769	3.1
$0.2C_3H_8 + \text{воздух}$ (стех.)	1 799.9	18.24	2 821	9.33	2 629	2 266	2 078	$1.39 \cdot 10^5$
$0.09714C_3H_8 + \text{воздух}$	1 482.7	11.91	2 012	6.18	1 805	1 480	1 294	$8.13 \cdot 10^7$
$0.4139C_3H_8 + \text{воздух}$	1 739.1	16.6	2 210	8.51	1 973	1 589	1 389	$1.13 \cdot 10^6$

и окислителя в исследуемой смеси, нормированное на аналогичное отношение в смеси стехиометрического состава. Например, для произвольной смеси  $C_xH_y + \alpha O_2$

$$\phi = (1/\alpha)/(1/\alpha_{st}) = \alpha_{st}/\alpha = \alpha_{st}C_f/(1 - C_f).$$

Для уравнения со стехиометрией по  $CO_2$   $\alpha_{st} = (4x + y)/4$  (см. выше), тогда  $\phi = (4x + y)/4\alpha$  (при этом  $C_f = 1/(1 + \alpha)$ ).

В то же время во многих зарубежных статьях стехиометрической считается смесь, продуктами которой являются  $CO$  и  $H_2O$ :



с другим соотношением между топливом и окислителем. Отметим, что в химии стехиометрическим вообще называется любое соотношение между количествами молей топлива и окислителя.

В таблице представлены значения скорости детонации  $D_0$ , давления, температуры и критической энергии инициирования сферической детонации ( $E_3$ ) при типичных процессах; индекс  $d$  соответствует детонации,  $v$  — мгновенному взрыву в бомбе постоянного объема ( $v = \text{const}$ ),  $p$  — сгоранию при постоянном давлении,  $df$  — дефлаграционному горению с максимальной скоростью (точка касания к нижней ветви адиабаты энерговыделения). Приведены данные для стехиометрических (по  $CO_2$ ) смесей с кислородом и воздухом (воздух =  $O_2 + 3.76N_2$ ) и для нескольких смесей с  $\phi \neq 1$ .

Например, смесь  $C_3H_8 + 5O_2$  характеризуется следующими параметрами детонации: скорость волны  $D_0 = 2357$  м/с, ее число Маха  $M_0 = 7.64$ , давление продуктов  $P = p/p_0 = 36.2$ , температура продуктов  $T = 3827$  К, массовая скорость  $u = 1088$  м/с, удельное энерговыделение  $Q = 1088$  кал/г, динамический напор  $\rho u^2 = 30.6$  атм, размер ячейки  $a = 0.6$  мм, критические энергии инициирования для плоского, цилиндрического и сферического случаев соответственно  $E_1 = 0.4$  Дж/см<sup>2</sup>,  $E_2 = 0.2$  Дж/см и  $E_3 = 0.6$  Дж.

Для смеси  $C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2)$  расчет дает следующие параметры:  $D_0 = 1800$  м/с,  $M_0 = 5.27$ ,  $P = 18.2$ ,  $T = 2821$  К,  $u = 1029$  м/с,  $Q = 556$  кал/г,  $\rho u^2 = 14.2$  атм,  $a = 35$  мм,  $E_1 = 28$  Дж/см<sup>2</sup>,  $E_2 = 470$  Дж/см и  $E_3 = 1.4 \cdot 10^5$  Дж. Последняя величина, эквивалентная по энергии  $\approx 35$  г конденсированного ВВ, свидетельствует об относительной легкости инициирования детонации в стехиометрической смеси пропана с воздухом (а также остальных бытовых газов).

Зависимости скорости детонации  $D_0$  (рис. 1) и удельного химического энерговыделения  $Q$  (рис. 2) от молярной концентрации топлива в смеси  $C_f$  имеют характерные U-образные профили с максимумами как для ТКС, так и для ТВС на основе этана, пропана и бутана. Отметим, что смеси топливных газов с кислородом в некоторой области

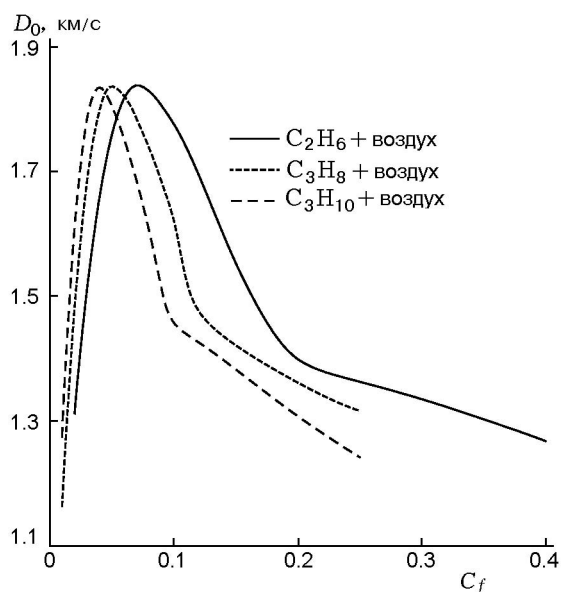


Рис. 1

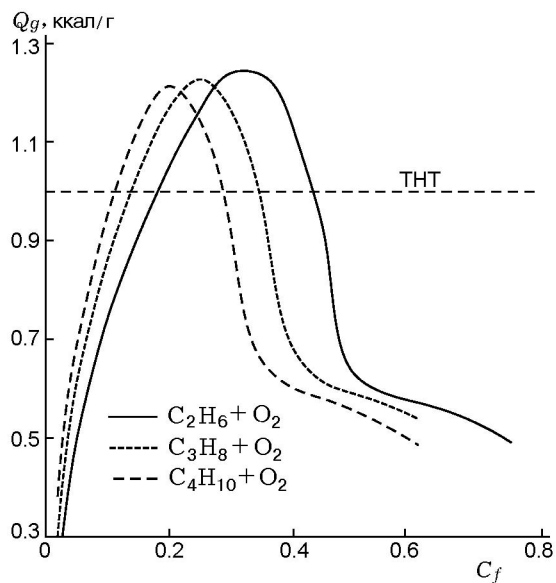


Рис. 2

концентраций обладают большим энерговыделением по сравнению с классическим эталоном взрыва — тротилом (область выше штриховой горизонтальной линии на рис. 2, обозначенной TNT).

Зависимости критической энергии иницирования детонации  $E_{*v}$  и размера ячейки многофронтной детонации  $a$  для этих же смесей от молярной концентрации топлива в смеси имеют характерные U-образные профили с минимумами.

## СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

О степени достоверности расчетных параметров можно судить по рис. 3–5, где они сравниваются с данными экспериментов [1–16].

Экспериментальные исследования касались в основном измерения «диаметра дифракции» и размера ячейки в трубах и каналах различных размеров. При распространении детонационной волны (ДВ) в области резкого изменения геометрического размера заряда (например, в области перехода ДВ из трубы в полупространство ( $\nu = 3$ ) или из узкого канала в более широкий ( $\nu = 2$ )) возникает сложное нестационарное газодинамическое течение, получившее обобщенное название дифракции. Для ДВ в горючих газовых смесях дифракционное явление сопровождается разрушением и восстановлением упорядоченной ячеистой структуры многофронтной ДВ. В тех случаях, когда размер ячейки был более 2 мм (для соответствующего состава смеси и давления), использовалась съемка самосвечения многофронтной ДВ методом открытого затвора, для более мелких ячеек — следовая методика с «двойной экспозицией». Суть последней заключается в том, что закопченная фольга вначале подвергается воздействию относительно сильной ударной волны или ДВ с очень крупной ячейкой (при весьма малом давлении) с целью увеличения адгезии сажевого слоя с подложкой и уноса копоти со слабым сцеплением, затем на эту предварительно обработанную фольгу с закрепленным сажевым слоем производится запись мелкоячеистой структуры ДВ при исследуемом давлении.

Слева на рис. 3 представлены данные о критическом диаметре дифракции ( $\nu = 3$ ) для смесей бытовых газов с кислородом при их постепенном разбавлении азотом в зависимости от молярной концентрации азота. Справа на рисунке приведены данные о критических энергиях иницирования этих же газов в смеси с воздухом в зависимости от молярной концентрации топлива в смеси.

На рис. 4, а, б представлены данные о размере ячейки  $a$  в зависимости от начального давления  $p_0$  для смесей  $C_3H_8 + 5O_2$  и  $C_3H_8 + 5O_2 + 6Ar$  соответственно. На рис. 5, а приведены данные о размере ячейки  $a$  в смеси  $C_3H_8 + 5(O_2 + zN_2)$  в зависимости от молярной концентрации азота в смеси, а на рис. 5, б —

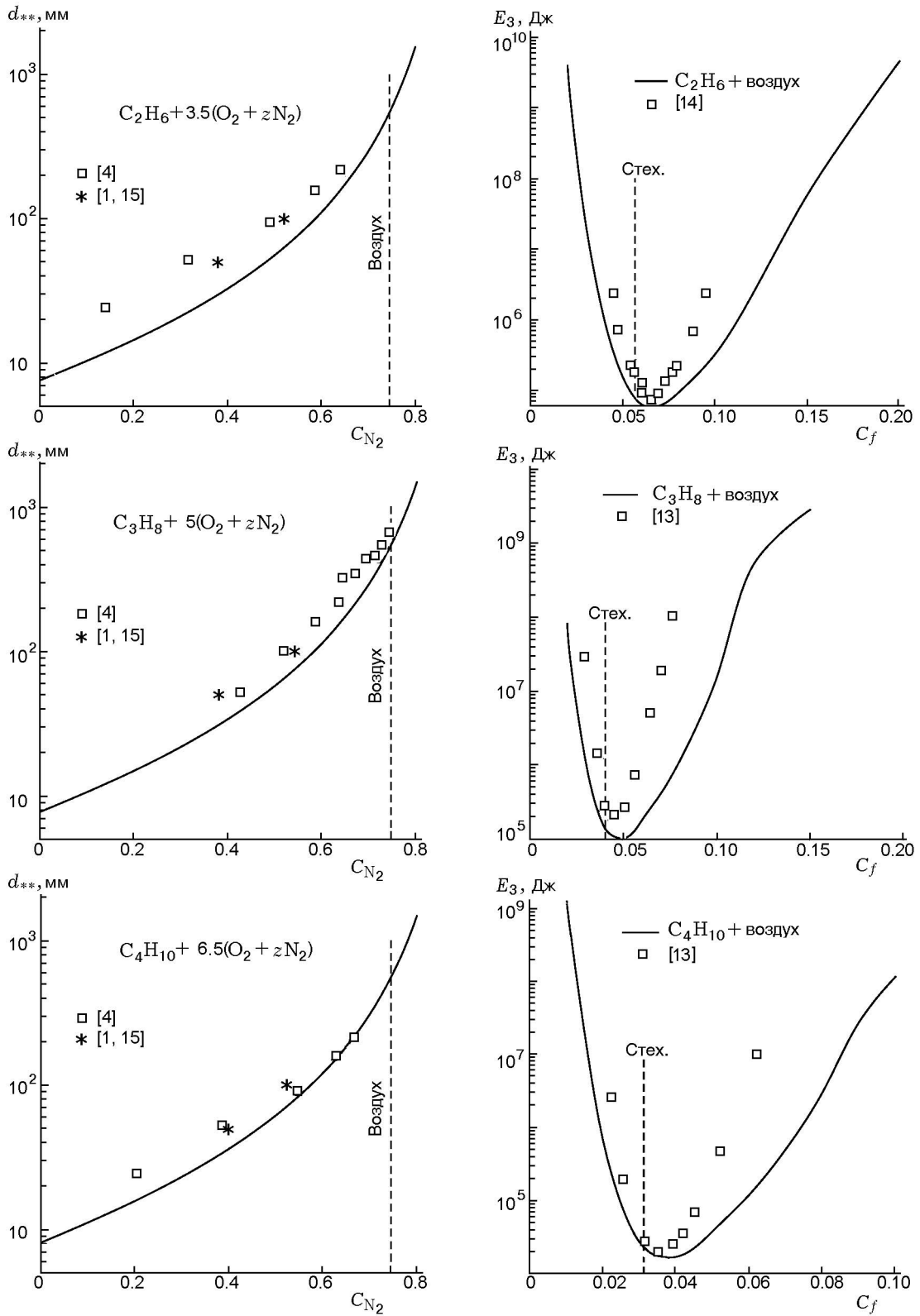


Рис. 3

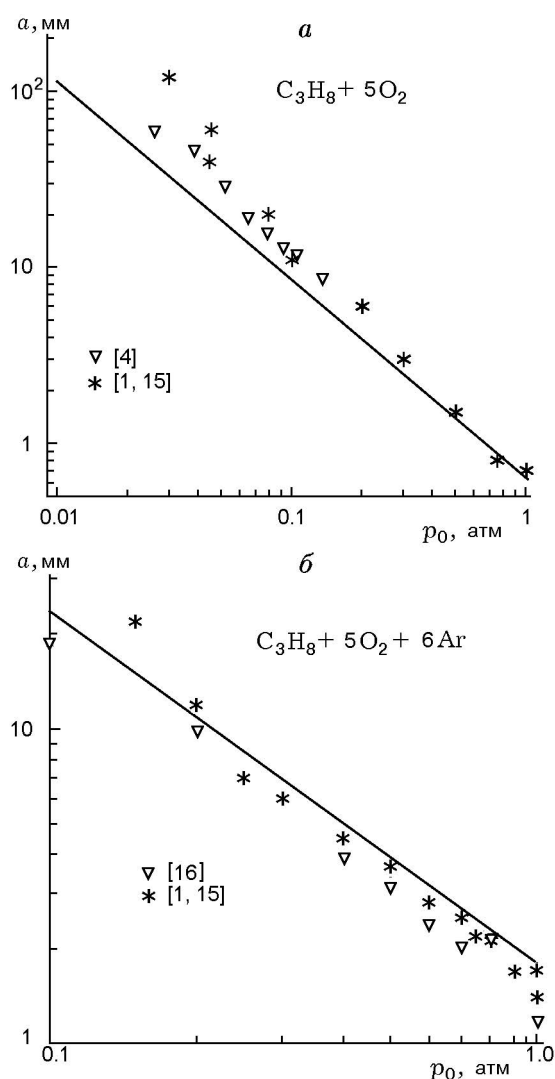


Рис. 4

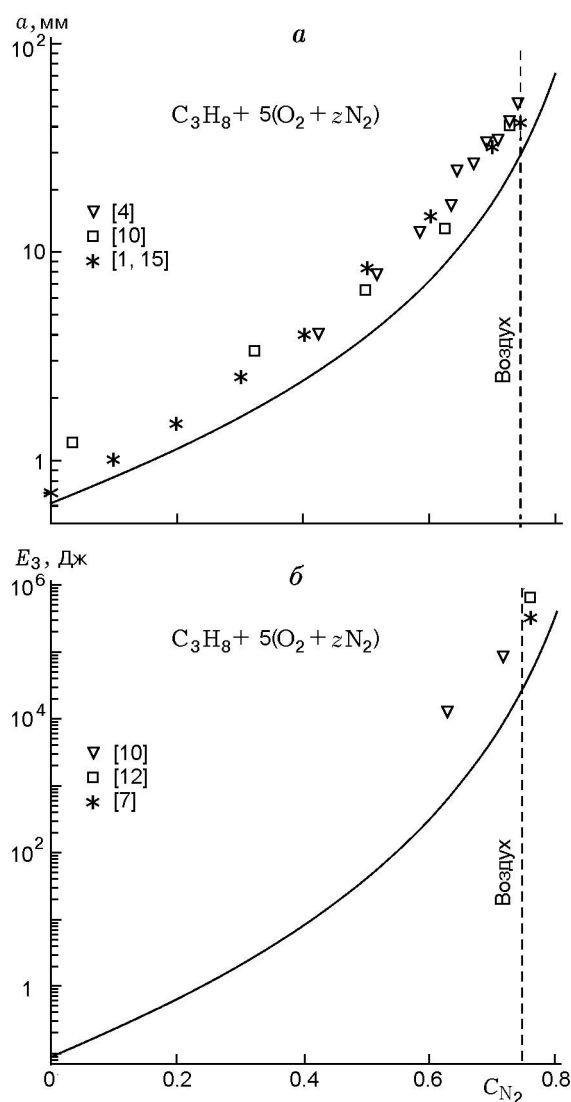


Рис. 5

критической энергии иницирования  $E_3$  для этой же смеси.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные на рисунках данные свидетельствуют о достаточно хорошем соответствии расчетных и экспериментальных величин. Программа «Безопасность» рекомендуется для использования в прогнозных оценках взрывоопасности различных горючих систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А. Околоскритические режимы газовой детонации: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1995.
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. Matsui H., Lee J. H. On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixtures // 17th Symp. (Intern.) on Combustion, 1978. P. 1269–1280.
4. Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M. The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures // Combust. Flame. 1982. V. 48. P. 63–83.
5. Lee J. H., Knystautas R., Guirao C. The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonability limits // Fuel-Air Explosions / J. H. Lee, C. Guirao (Eds). University of Waterloo Press, 1982. P. 157–189.

6. **Knystautas R., Guirao C., Lee J. H., Sulmistras A.** Measurement of cell size in hydrocarbon-air mixtures and predictions of critical tube diameter, critical initiation energy and detonation limits // *Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations* / I. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). N.-Y., 1983. P. 23–37. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 94).
7. **Bull D. C., Elsworth I. E., Hooper G.** Initiation of spherical detonation in hydrocarbon-air mixtures // *Acta Astronaut.* 1978. V. 5. P. 997–1008.
8. **Tieszen S. R., Stamps D. W., Westbrook C. K., Pitz W. J.** Gaseous hydrocarbon-air detonations // *Combust. Flame.* 1991. V. 84, N 3. P. 376–390.
9. **Вестбрук Ч., Уртъев П.** Применение химической кинетики для определения критических параметров газовой детонации // *Физика горения и взрыва.* 1983. Т. 19, № 6. С. 65–76.
10. **Edwards D. H., Hooper G., Morgan I. M.** An experimental investigation of the direct initiation of spherical detonation // *Acta Astronaut.* 1975. V. 3. P. 117–130.
11. **Манжалеу В. И., Митрофанов В. В., Субботин В. А.** Измерение неоднородностей детонационного фронта в газовых смесях при повышенных давлениях // *Физика горения и взрыва.* 1974. Т. 10, № 1. С. 102–110.
12. **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.
13. **Elsworth J. E., Shuff P. J., Ungut A.** «Gallopings» gas detonations in the spherical mode // *Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations* / I. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). N.-Y., 1984. P. 130–150. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 94).
14. **Benedick W. B.** Review of large scale fuel-air explosion tests and techniques // *Fuel-Air Explosions: Proc. Intern. Conf. on Fuel-Air Explosions.* McGill University, Montreal, Canada / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). University of Waterloo Press, 1982. P. 507–532.
15. **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.
16. **Auffret Ya.** Etude de la détonation de mélanges gazeux á temperature initiale élevée: Thèse Ph. D, Université de Poitiers, France, 1998.

*Поступила в редакцию 20/II 2007 г.*