

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ДИФРАКЦИИ ВОЛН В ГОРЮЧИХ СМЕСЯХ

А. А. Васильев¹, М. С. Дроздов², С. Г. Хидиров³¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru²Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, 142432 Черногловка drozdov@binp.ac.ru

Представлены экспериментальные и расчетные результаты исследований дифракции волн горения и детонации, включая дифракцию нестационарных режимов перехода горения в детонацию.

Ключевые слова: горение, детонация, переход горения в детонацию, дифракция волн, критический диаметр дифракции, критерий дифракционного реинициирования.

ВВЕДЕНИЕ

При распространении детонационной волны (ДВ) в области резкого изменения 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 течение, получившее обобщенное название дифракции. В случае ДВ в горючих газовых смесях дифракция сопровождается разрушением и восстановлением упорядоченной ячеистой структуры многофронтной ДВ.

Предыдущие исследования, начиная с пионерских работ [1–5], выполненные в классической постановке (резкорасширяющийся газовый заряд, угол дифракции $\alpha = 90^\circ$), показали существование двух качественно различных типов распространения волны после дифракции ДВ в зависимости от соотношения характерного размера исходного заряда и физико-химического масштаба взрывчатой смеси: первоначально самоподдерживающаяся ДВ затухает после начала взаимодействия с расширяющимся углом и вырождается в нестационарный комплекс, включающий затухающую ударную волну (УВ) и сопровождающее ее турбулентное пламя; после начала взаимодействия наблюдается реинициирование расширяющейся ДВ (рис. 1). Характерным масштабом газового заряда является, например, диаметр трубы d при трансформации ДВ в квазисферическую волну или ширина канала l при преобразовании ДВ в квазцилиндрическую волну, а характерным

масштабом смеси — размер ячейки a многофронтной ДВ.

На основе первых результатов исследований дифракции ДВ в качестве критерия для оценки критического диаметра d_{**} в работах [3–5] было предложено соотношение

$$d_{**} = 13a = \text{const.} \quad (1)$$

При критическом диаметре d_{**} квазиплоская самоподдерживающаяся ДВ равновероятно затухает или трансформируется в квазисферическую ДВ после выхода из трубы в пространство (угол дифракции $\alpha = 90^\circ$).

Уравнение типа (1) было тщательно проверено в многочисленных экспериментах (см., например, [6–20] в классической постановке ($\alpha = 90^\circ$)). Такая проверка вызвана не только научным интересом к процессу дифракции ДВ (как явлению со сложными ударно-волновыми взаимодействиями), но и практическими соображениями: дифракция является удобным методом инициирования расходящихся волн в горючих смесях, что особенно важно при оценке взрывоопасности смесей. Соотношение типа (1) также важно в связи с гипотезой о ключевой роли ячеистой структуры при инициировании и распространении ДВ и в связи с возможностью оценить через a критические параметры многофронтной ДВ, а именно: энергию инициирования для различных случаев симметрии; геометрические размеры каналов для критического распространения ДВ и ее преобразований в каналах различных конфигураций; размер снаряда, способного к возбуждению детонации в горючей смеси; критический размер неограниченных газообразных зарядов-облаков; критические константы, характеризующие индукционный период, и т. д.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00129), ведущей научной школы «Механика ударных и детонационных процессов» (НШ-858.2006.1) и INTAS (03-51-3332).

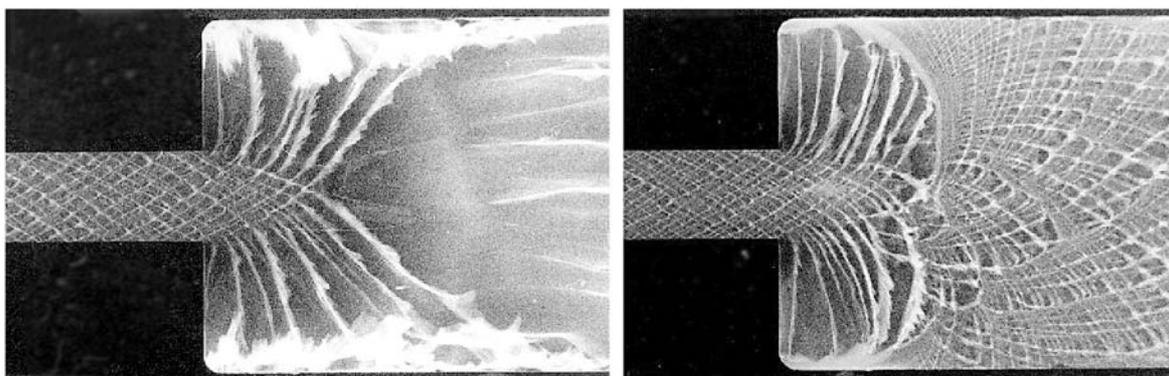


Рис. 1. Фотографии самосвечения дифрагирующей ДВ:

слева — затухание ДВ и последующее сжигание смеси высокоскоростным турбулентным пламенем, справа — реиницирование расходящейся ДВ

Неклассические схемы дифракции волн

Схемы с углами α , отличными от 90° , можно отнести к неклассическим, поскольку количество таких исследований существенно меньше, чем выполненных для классического случая $\alpha = 90^\circ$. К неклассическим относятся и схемы распространения ДВ в каналах сложной геометрии: с разветвлениями, поворотами (плавными или резкими), перфорацией стенок (см., например, [21]). К неклассическим относятся также дифракция пересеченных ДВ, дифракция околорезонансных режимов детонации (спиновой, маргинального, галолирующего), дифракция квазидетонации (квазистационарного процесса распространения волны со скоростью, примерно равной половине скорости нормальной детонации), дифракция ламинарного и турбулентного пламен, дифракция ускоряющихся пламен, включая особый случай перехода горения в детонацию (ПГД).

Некоторые схемы дифракции представлены на рис. 2: схема *a* — выход самоподдерживающейся ДВ в расширяющийся канал с линейной ($y = x \operatorname{tg} \alpha$, $\alpha = 0 \div 90^\circ$) или криволинейной ($y = f(x)$) границей; предварительное создание пересеченной ДВ за счет уменьшения сечения потока и последующий ее выход в широкий канал или в канал конечного размера, когда заметную роль в реиницировании ДВ могут играть соударения дифрагирующей волны с близко расположенными боковыми стенками широкого канала; схемы *б*, *в* — варианты оптимизации дифракционного реиницирования за счет изменения формы дифрагирующей ДВ (круглый, квадратный, линейный,

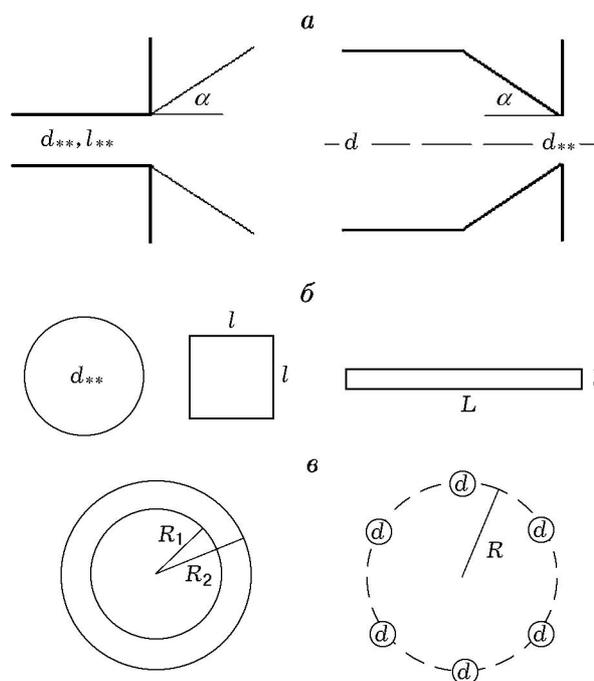


Рис. 2. Схемы дифракции и оптимизации реиницирования ДВ

кольцевой заряды, многозарядная (многоточечная) схема).

Угол дифракции, соотношение размеров узкого и широкого каналов, степень пересечения волны и многие другие факторы могут при определенных условиях заметно влиять на условия реиницирования ДВ. Часть результатов подобных исследований изложена в [21], обзор современного состояния дифракционных задач и результатов — в [22]. Исследования последних лет показали, что соотношение (1)

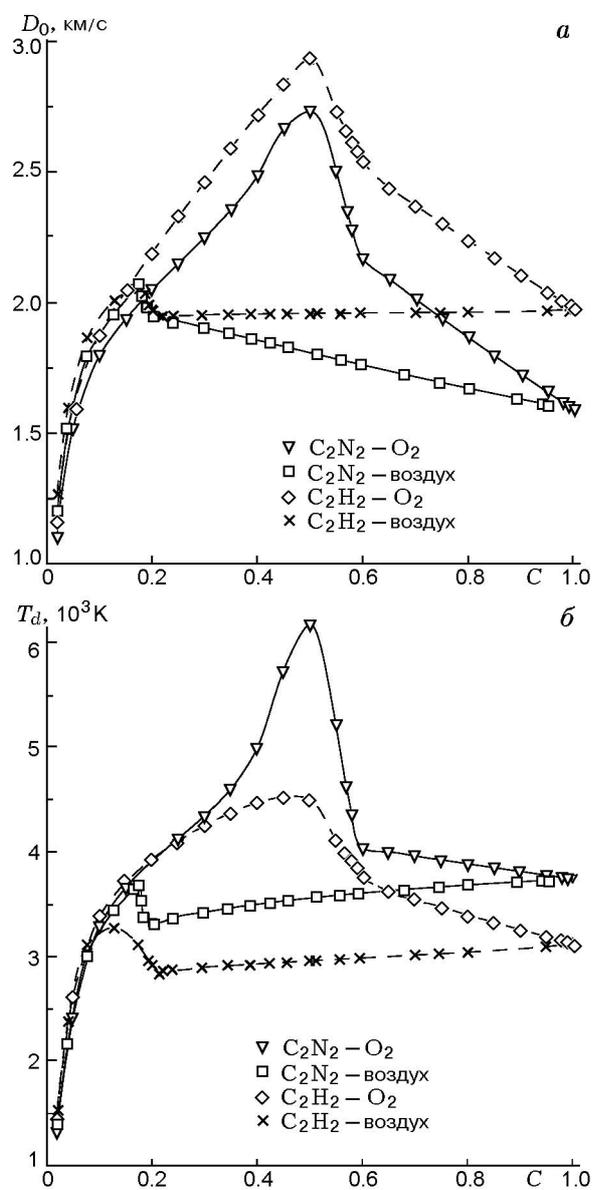


Рис. 3. Скорость ДВ (а) и температура в продуктах детонации (б) в зависимости от относительной мольной концентрации топлива для топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей (расчет с учетом конденсации углерода в продуктах детонации)

с постоянным значением коэффициента может использоваться только для приблизительной оценки критического диаметра дифракции, в действительности значение d_{**}/a для различных смесей непостоянно и изменяется, как минимум, вдвое в обе стороны.

Численное моделирование дифракции многофронтной ДВ в строгой неоднородной формулировке — чрезвычайно сложная задача. Из-

вестны лишь некоторые программы расчета дифракции ДВ (см. [23–25]), но, например, критическое значение параметра d_{**}/a , согласующееся с экспериментальными данными, до сих пор не вычислено.

В данной статье представлены некоторые результаты новых исследований дифракции, когда характерные скорости распространения фронта химической реакции в горючей смеси изменяются от сантиметров в секунду (ламинарное пламя) до километров в секунду (детонация, включая сильноперешагнутую).

Параметры горения и детонации

Основные эксперименты проведены со смесями ацетилена и дициана с кислородом (топлива $H-C\equiv C-H$ и $N\equiv C-C\equiv N$ с тройными химическими связями). Эти топлива имеют удобную для регистрации спектральную характеристику — люминесценция радикала CH в синей спектральной области. Кроме этого, ацетилен известен как весьма интересное топливо из-за возможности конденсации углерода в продуктах реакции с формированием наночастиц, фуллеренов, нанотрубок и т. д. Дициану также свойственны аналогичные особенности. Регистрация наблюдаемых явлений в различных трубах и каналах проводилась с помощью шпирен-фоторазверток, фотографий самосвечения и датчиков давления.

Параметры горения и детонации этих смесей в широкой области концентраций были рассчитаны с помощью компьютерной программы «БЕЗОПАСНОСТЬ» [26]. Некоторые результаты представлены на рис. 3–5.

При начальном давлении 1.0 атм и температуре 298 К получены следующие результаты. Для топливно-кислородных смесей температура продуктов детонации (T_d) максимальна при эквимолярном соотношении: ацетилен — 4507 К, дициан — 6178 К (самое высокое значение среди газообразных топлив). При этом скорости детонации равны $D = 2934$ и 2732 м/с соответственно (что близко к наблюдаемым в экспериментах [27]), относительное давление продуктов — $p_d/p_0 = 46.1$ и 59.1 , размеры ячеек — 0.08 и 0.15 мм, критические диаметры дифракционного реинициирования детонации (диаметр «выхода» d_{**}) — 1.0 и 1.9 мм.

Конденсация углерода начинается при концентрациях ацетилена и дициана $\approx 60\%$ в смесях с кислородом и $\approx 20\%$ в смесях с возду-

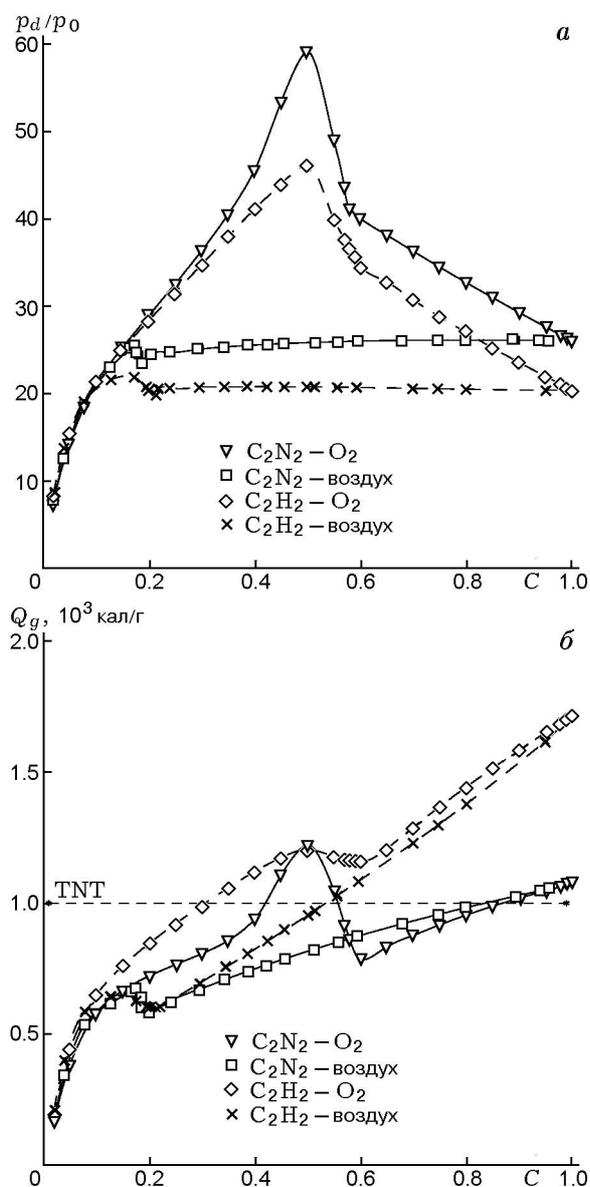


Рис. 4. Давление продуктов детонации (а) и энергосодержание ДВ (б) в зависимости от относительной мольной концентрации топлива для топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей (расчет с учетом конденсации углерода в продуктах детонации):

горизонтальная штриховая линия соответствует стандартному значению тротилового эквивалента 1000 кал/г

хом (вплоть до 100 %). В этом диапазоне концентраций энергия конденсации углерода играет важнейшую роль для стационарного распространения волны детонации: без конденсации углерода интенсивность ДВ существенно ниже. Для чистых ацетилена и дициана (верхний концентрационный предел, без кислорода

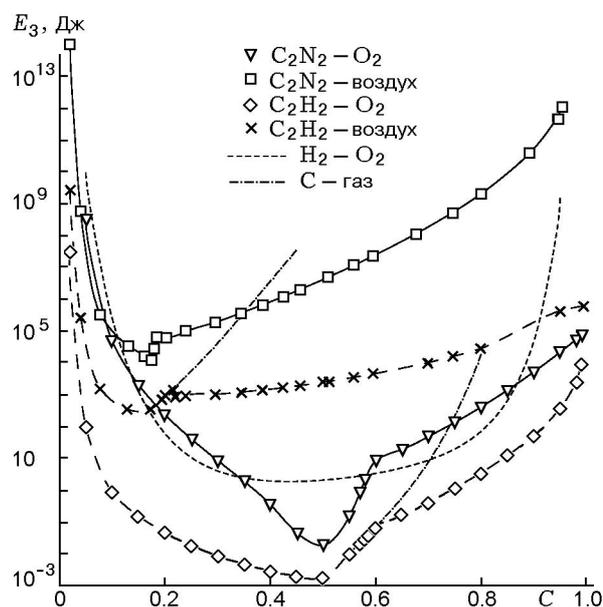


Рис. 5. Зависимость критической энергии инициирования сферической ДВ от мольной концентрации топлива для топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей (расчет с учетом конденсации углерода в продуктах детонации)

или воздуха) скорости детонации равны 1977 и 1591 м/с, температуры — 3130 и 3746 К, отношение давлений — 20.4 и 26.0, доля конденсированного углерода в продуктах — приблизительно 87.5 и 89.4 % от начального количества.

Критические энергии инициирования для сферической детонации представлены на рис. 5. Такой график иллюстрирует сравнительную эффективность инициирования различных смесей (проблема безопасности). Для топливно-кислородных смесей при эквимолярной концентрации критические энергии инициирования следующие: ацетилен — 0.0018 Дж, дициан — 0.018 Дж. Для топливно-воздушных смесей минимальные энергии 350 и 12 500 Дж (размеры ячейки 4.7 и 13.5 мм), для стехиометрической ацетиленовоздушной смеси размер ячейки равняется 8 мм, критический диаметр 144 мм, критическая энергия инициирования 1 600 Дж. Данные для неэквимолярных смесей дициан — кислород подобны примерно водородно-кислородной системе (см. рис. 5).

Основные результаты экспериментов

При экспериментальных исследованиях наблюдалось большое многообразие режимов распространения волн горения и детонации как

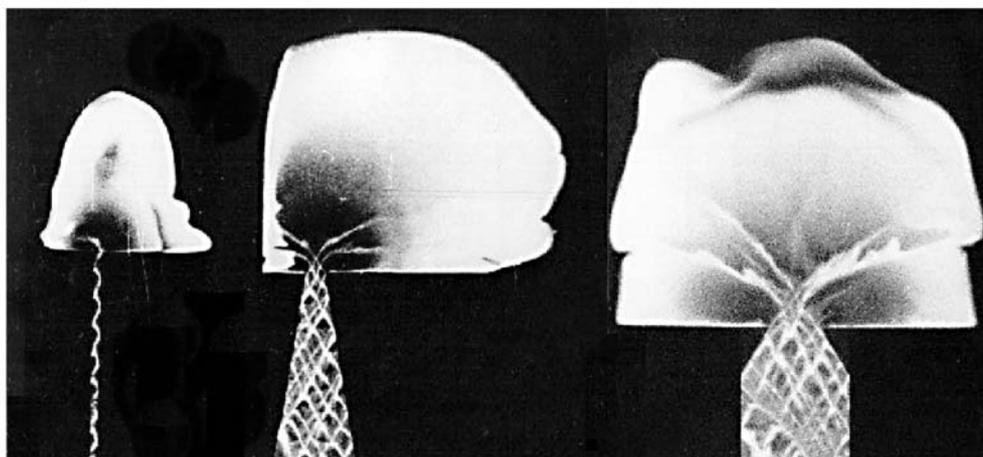


Рис. 6. Эффект полного разрушения волн детонации и горения при дифракции для околопредельной детонации (слева) и даже пересжатой ДВ (середина и справа)

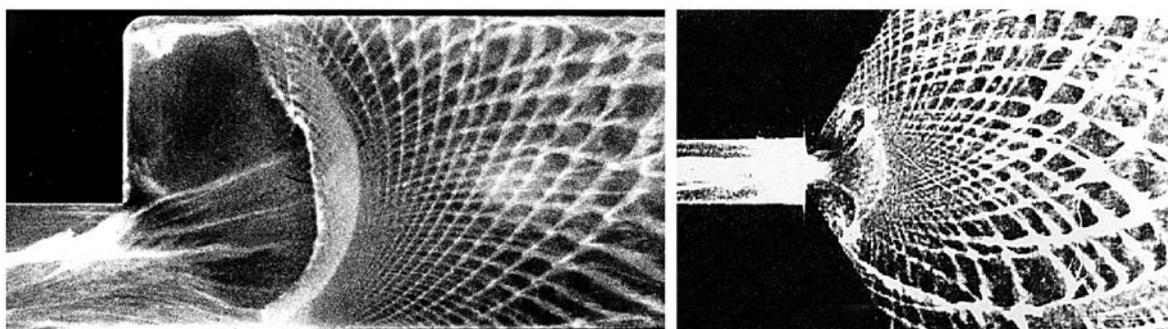


Рис. 7. ПГД при дифракции пламени $\alpha = 90^\circ$ (слева) и при переходе пламени в расширяющийся канал (справа)

в канале (трубе) постоянного сечения, так и после дифракции. Отметим лишь некоторые.

Например, вместе с предсказуемым поведением ДВ после дифракции (реиницирование ДВ или преобразование к режиму сгорания) наблюдались режимы полного затухания не только детонации, но и горения (при определенных условиях), проявляющиеся в полном исчезновении свечения продуктов. Подобный эффект обнаружен не только для самоподдерживающейся, но и для пересжатой ДВ (несколько фотографий представлено на рис. 6). Природа этого эффекта требует дополнительных исследований.

Нетрадиционное поведение волны при дифракции пламени демонстрируют фотографии на рис. 7: возникновение детонации в широком канале после расширения пламени. Такая ситуация реализуется в случае, когда точка ПГД расположена вблизи дифракционного се-

чения. Последнее можно обеспечить варьированием энергии инициатора (критическая энергия воспламенения смеси всегда намного ниже (несколько порядков) критической энергии иницирования ДВ), состава смеси, начального давления, длины секции иницирования и т. д. Иницирование ДВ при дифракции пламени представляет особый интерес, поскольку при ПГД реализуются максимально высокие давления (за счет сильного пересжатия ДВ), намного превышающие давления продуктов самоподдерживающейся ДВ. Около полувека назад в [28] процесс ПГД вблизи закрытого торца трубы (за счет варьирования состава смеси) вызвал разрушение металлической стенки толщиной 10 мм! Это очень опасная ситуация, которую нельзя не учитывать при моделировании возникновения и развития аварийного очага пламени в пространстве с различного рода препятствиями. С другой точки зрения, на-

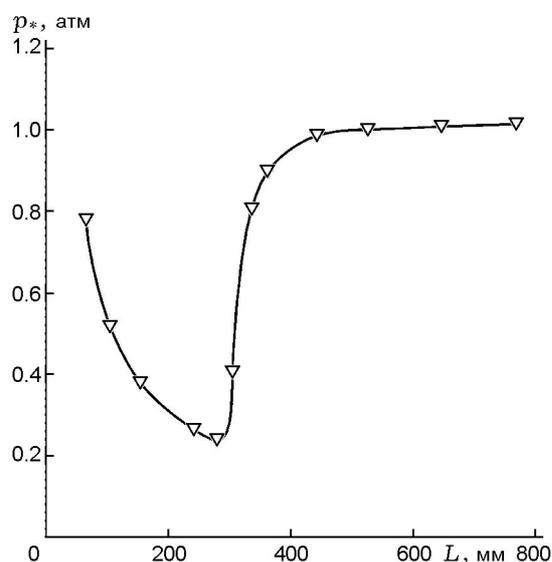


Рис. 8. Критическое давление смеси 48 % C_2N_2 + 52 % O_2 в зависимости от длины инициирующей секции трубы

учившись управлять положением точки ПГД, мы получаем высокоэффективный метод оптимизации процессов инициирования.

О нетрадиционном влиянии перехода горения в детонацию вблизи дифракционного сечения свидетельствует рис. 8, где представлено критическое давление смеси 48 % C_2N_2 + 52 % O_2 для успешного реиницирования ДВ при дифракции (переход из трубы диаметром $d = 6$ мм в трубу с $d = 44$ мм) в зависимости от длины L инициирующей секции трубы. Можно видеть, что при $L > 400$ мм условия дифракционного реиницирования не зависят от длины начальной секции. Это объясняется тем, что точка ПГД локализована в инициирующей секции до дифракционного сечения и в этом случае дифрагирует обычная ДВ. Но при $L < 400$ мм наблюдается необычное поведение — успешное дифракционное реиницирование ДВ при более низком давлении, с некоторым оптимальным значением p_* . Природа этого эффекта связана с приближением дифракционного сечения (варьирование длины) непосредственно к точке ПГД, а мощная волна от ПГД заведомо обеспечивает реиницирование ДВ не только при данном давлении, но и при более низком. Когда же точка ПГД «заходит» далеко вглубь от дифракционного сечения и удаляется от оптимального положения, то для реиницирования ДВ необходимо вновь повышать давление от p_* .

Следует особо подчеркнуть, что нетрадиционные режимы дифракции, исследованные в данной работе, представляют хороший тестовый материал для будущего численного моделирования. Такое моделирование не осуществлено до сегодняшнего дня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено большое многообразие режимов распространения волн горения и детонации при дифракции. Управление положением точки перехода горения в детонацию представляет собой высокоэффективный метод оптимизации процессов инициирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Campbell C. The propagation of explosion waves in gases contained in tubes of varying cross-section // J. Chem. Soc. 1922. P. 2483–2498.
2. Laffitte P. On the propagation of a spherical explosion wave // Com. Rend. Acad. Sci. 1923. V. 177. P. 178–180.
3. Зельдович Я. Б., Когарко С. М., Симон Н. Н. Экспериментальное исследование сферической газовой детонации // Журн. техн. физики. 1956. Т. 26, № 8. С. 1744–1768.
4. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
5. Митрофанов В. В., Солоухин Р. И. О дифракции многофронтной детонационной волны // Докл. АН СССР. 1964. Т. 159, № 5. С. 1003–1006.
6. Когарко С. М. О возможности детонации газовых смесей в конусных трубках // Изв. АН СССР. ОХН. 1956. № 4. С. 419–426.
7. Strehlow R. A., Adamczyk A. A., Stiles R. J. Transient studies of detonation waves // Astronaut. Acta. 1972. V. 17, N 4–5. P. 509–527.
8. Strehlow R. A., Salm R. J. The failure of marginal detonations in expanding channels // Acta Astronaut. 1976. V. 3, N 11. P. 983–994.
9. Edwards D. H., Thomas G. O., Nettleton M. A. The diffraction of a planar detonation wave at an abrupt area change // J. Fluid Mech. 1979. V. 95, N 1. P. 79–96.
10. Васильев А. А., Григорьев В. В. Критические условия распространения газовой детонации в резкорасширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 117–125.
11. 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.

12. **Desbordes D., Vachon M.** Critical diameter of diffraction for strong plane detonations // *Dynamics of Explosion* / J. R. Bowen, J.-C. Leyer, R. I. Soloukhin (Eds). N. Y., 1986. P. 131–143. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 106).
13. **Benedick W. B., Knystautas R., Lee J. H.** Large-scale experiments on the transmission of fuel-air detonations from two-dimensional channels // *Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations* / I. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). N. Y., 1983. P. 546–556. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 94).
14. **Liu Y. K., Lee J. H., Knystautas R.** Effect of geometry on the transmission of detonation through an orifice // *Combust. Flame*. 1984. V. 56. P. 215–225.
15. **Moen J. O., Sulmistras A., Thomas G. O., et al.** The influence of cellular regularity on the behaviour of gaseous detonations // *Dynamics of Explosion* / J. R. Bowen, J.-C. Leyer, R. I. Soloukhin (Eds). N. Y., 1986. P. 220–243. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 106).
16. **Васильев А. А.** Иницирование газовой детонации при пространственном распределении источников // *Физика горения и взрыва*. 1988. Т. 24, № 2. С. 118–124.
17. **Васильев А. А.** Пространственное возбуждение многофронтной детонации // *Физика горения и взрыва*. 1989. Т. 25, № 1. С. 113–119.
18. **Васильев А. А.** Распространение газовой детонации при одновременном изменении сечения трубы и состава смеси // *Физика горения и взрыва*. 1985. Т. 21, № 2. С. 142–147.
19. **Банников Н. В., Васильев А. А.** Плоское иницирование детонации // *Физика горения и взрыва*. 1993. Т. 29, № 3. С. 164–170.
20. **Васильев А. А.** Околокритические режимы газовой детонации: Дис. ... д-ра физ.-мат. Новосибирск, 1995.
21. **Vasil'ev A. A.** Modes of a detonation and high-speed burning in channels with perforated walls // *Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations: Proc. of the Second Intern. Seminar* / V. Molkov (Ed.). Moscow: All-Russian Research Inst. for Fire Protection, 1998. P. 582–592.
22. **Vasil'ev A. A. et al.** The basic results of reinitiation processes in diffracting multifront detonations. Part I // *Eurasian Chem.-Technol. J.* 2003. V. 5, N 4.
23. **Hiramatsu K., Fujiwara T., Taki S.** A computational study of transmission of gaseous detonation to unconfined space // *20th Symp. (Intern.) on Combustion*. Pittsburgh, 1984.
24. **Fisher M., Pantow E., Kratzel T.** Propagation, decay and re-ignition of detonations in technical structures // *Gaseous and Heterogeneous Detonations. Science to Applications* / G. Roy, S. Frolov, K. Kailasanath, N. Smirnov (Eds). M.: ENAS Publ., 1999. P. 197–212.
25. **Khasainov B., Priault C., Presles H.-N., Desbordes D.** On the mechanism of transition of self-sustained detonation from a tube to a half-space through an annular orifice with central obstacle // *18th Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. July 29 — August 03, 2001, Seattle, USA. Univ. Washington. CD ISBN 0-9711740-0-8. N 096.
26. **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.
27. **Munday G., Ubbelohde A. R., Wood I. F.** Marginal detonation in cyanogen/oxygen mixtures // *Proc. Roy. Soc. A*. 1968. V. 306, N 1485. P. 179–184.
28. **Когарко С. М.** Исследование давления в горле трубы при нестационарном быстром горении // *Журн. техн. физики*. 1958. Т. 28, № 9. С. 2041–2045.

Поступила в редакцию 26/1 2006 г.