

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ТРУБЕ
СО СПИРАЛЬЮ ЩЁЛКИНА И ФОКУСИРУЮЩИМ
УСТРОЙСТВОМ

В. С. Иванов, С. М. Фролов

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Детонация — самый эффективный из всех возможных способов превращения химической энергии топлива в полезную работу расширения. Именно поэтому в настоящее время активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в новых системах реактивного движения — воздушно-реактивных импульсных детонационных двигателях (ИДД). Идеальную термодинамическую эффективность ИДД оценивают, исходя из предположения о мгновенном инициировании детонации с помощью сильного источника энергии. На самом деле, рабочий процесс в таких двигателях будет основан на быстром переходе горения в детонацию (ПГД) при зажигании реакционной смеси слабым источником. В этом случае показатели эффективности камер сгорания ИДД могут отличаться от идеальных, и для расчета эффективности рабочего процесса необходимо уметь моделировать ПГД. Расчет ПГД в газовых взрывчатых смесях — сложная фундаментальная проблема, которая до сих пор не решена.

Цель данной работы — создание эффективного алгоритма многомерного численного моделирования ПГД, позволяющего одновременное рассмотрение фронтальных и объемных химических реакций в сжимаемом турбулентном газовом потоке, и проверка этого алгоритма на примере ПГД в трубе со спиралью Щёлкина и профилированным пересжатием сечения, заполненной пропановоздушной смесью.

Для моделирования гомогенного горения газов нами разработан алгоритм явного выделения поверхности пламени в турбулентном потоке. Суть алгоритма заключается в следующем [1]. При заданной начальной геометрической форме очага зажигания поверхность, отделяющая свежую смесь от продуктов горения, представляется в виде набора элементарных площадок турбулентного или ламинарного пламени. В турбулентном потоке каждая площадка фронта пламени движется со скоростью, равной сумме нормальной скорости горения и локальной скорости течения. Нормальная скорость горения определяется по одной из известных моделей турбулентного пламени и зависит от локальной скорости ламинарного горения и локальных параметров турбулентности. Локальная скорость течения и параметры турбулентности определяются из решения системы осредненных уравнений течения методом контрольных объемов с использованием специальной процедуры интерполяции. Вследствие того, что поле течения нестационарное и неоднородное, очаг зажигания деформируется. Непрерывность фронта горения обеспечивается системой эвристических правил, исключающих из рассмотрения невероятные конфигурации пламени. Важную роль в реализации алгоритма играют электронные таблицы скорости ламинарного горения как функции начальных температуры, давления и состава смеси. Такие таблицы составляются на основе решения задачи о структуре плоского ламинарного пламени с использованием как детальных, так и полуэмпирических кинетических механизмов [2]. Кроме того, таблицы содержат информацию о концентрационных пределах распространения пламени. Описанная выше «подсеточная» модель выделения фронта пламени впервые апробирована в [3], а затем в [4, 5].

Метод частиц был разработан для моделирования самовоспламенения свежей смеси перед фронтом пламени. Как известно, при ПГД в свежей смеси перед фронтом пламени протекают реакции окисления топлива, что может приводить к самовоспламенению смеси и смене режима распространения реакции с фронтального (пламя) к объемному (детонация). Существует два подхода к моделированию таких процессов. Наиболее простой подход — расчет реакций окисления топлива перед фронтом пламени в каждой вычислительной ячейке. Однако такой подход требует создания очень тонких сеток и, как следствие, больших вычислительных ресурсов. Для

уменьшения времени расчета и для вероятностного описания процесса самовоспламенения нами предложен метод, основанный на лагранжевом представлении течения, подобный методу [6]. В таком методе предпламенная зона представляется в виде набора лагранжевых элементов или «частиц». Каждая «частица» имеет собственную температуру, плотность и химический состав и перемещается в пространстве со скоростью, равной сумме локальной средней скорости потока и локальной пульсационной составляющей поля скорости. Пульсационная составляющая скорости определяется из решения уравнения Ланжевена с применением генераторов случайных чисел. Кроме того, для каждой частицы решаются кинетические уравнения окисления горючего с использованием глобальной кинетической схемы [7].

Для проверки алгоритма выделения фронта пламени проведены проверочные двумерные расчеты горения стехиометрической пропановоздушной смеси в трубах с регулярными препятствиями. Алгоритм внедрен в вычислительную программу AVL FIRE [8]. Для определения локальной мгновенной скорости ламинарного пламени u_n использовались специальные электронные таблицы. Локальную мгновенную скорость турбулентного пламени u_T определяли по формуле Щёлкина:

$$u_T = u_n \left(1 + \frac{u'^2}{u_n^2} \right)^{0,5},$$

где u' — интенсивность турбулентности. Параметры турбулентности, включая u' , рассчитывали по стандартной k - ε -модели.

Расчеты проведены для условий экспериментальной работы [9]. В [9] исследовалось распространение пропановоздушного пламени в цилиндрической трубе круглого сечения диаметром 15,2 см и длиной 3,1 м с регулярными препятствиями с одним открытым и другим закрытым концом. В качестве препятствий в экспериментах использовались кольца со степенью затенения сечения 0,43, 0,6 и 0,75. Смесь в опытах [9] в начальный момент времени покоилась и находилась при нормальных условиях.

Задачу решали в осесимметричной постановке с применением однородной структурированной сетки с размером расчетных ячеек 2 мм. На рис. 1 представлено сравнение экспериментальных и рас-

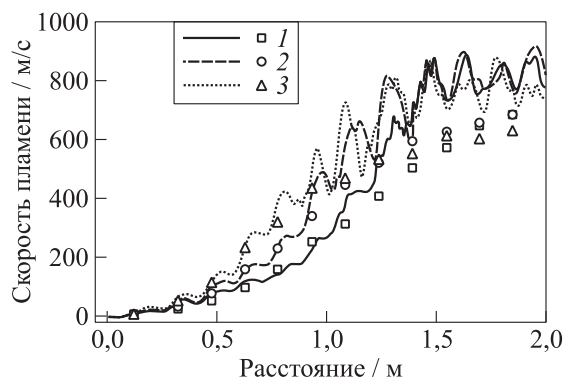


Рис. 1 Сравнение расчетных (кривые) и экспериментальных (точки [9]) зависимостей видимой скорости фронта пламени от пройденного расстояния: 1 — 0,43; 2 — 0,6; 3 — 0,74

четных зависимостей скорости фронта пламени от пройденного расстояния для трех значений степени затенения сечения препятствиями при шаге установки препятствий, равном диаметру трубы.

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными наблюдениями. Очень хорошее согласие наблюдается на начальном участке ускорения пламени до 300–400 м/с. Пламя ускоряется до скорости 800–900 м/с, что соответствует скорости звука в продуктах горения (около 890 м/с). Колебания скорости распространения фронта пламени связаны с сужением (увеличение скорости) потока около препятствий и его расширением (уменьшение скорости) между препятствиями. Отметим, что расчетную скорость пламени определяли по скорости лидирующей точки на его поверхности.

Новый алгоритм позволил впервые оценить термодинамическую эффективность ИДД с инициированием детонации в результате переходных процессов. Для демонстрации возможностей алгоритма провели расчет ПГД в трубе с регулярными кольцевыми препятствиями и профилированным пересжатием сечения. Рассматривали трубу длиной 3 м и диаметром 52 мм, заполненную неподвижной стехиометрической пропановоздушной смесью при нор-

мальных условиях. Кольцевые препятствия высотой 6 мм и шагом установки 20 мм находились на начальном участке трубы длиной 1,5 м. Конец трубы, у которого производилось зажигание смеси, был закрыт. За участком трубы с регулярными препятствиями размещалось специальное фокусирующее устройство в виде суживающе-расширяющегося сопла [10, 11], предназначенное для преобразования ударной волны в детонацию. К расширяющейся части сопла присоединялся участок гладкой трубы диаметром 52 мм с концом, открытым в атмосферу.

На рис. 2 показаны расчетные поля температуры и давления за 25 мкс до отражения ударной волны от суживающейся части сопла (*a*), в момент отражения (*b*), в момент вторичного взрыва (*в*) и в момент формирования волн детонации и ретонации (*г*). На кадре (*a*) к фокусирующему устройству подходит ударная волна с отстающим от нее сильно вытянутым фронтом пламени. При отражении ударной волны от суживающейся части сопла свежая смесь перед фронтом пламени самовоспламеняется (*b*), приводя к возникновению сначала пересжатой (*в*) и (*г*), а затем и стационарной детонации в расширяющейся части сопла.

В течение всего расчета проводили мониторинг давления на закрытой торцевой стенке трубы. По кривой давления на стенке рассчитали удельный импульс тягового усилия I_{sp} . Он оказался равным 2580 с в расчете на единицу массы горючего, что приблизительно на 280 с больше, чем при мгновенном инициировании детонации в прямой гладкой трубе при прочих равных условиях. Отличие в I_{sp} , по-видимому, обусловлено препятствиями и соплом [10, 11]. Следует иметь в виду, что при взаимодействии течения с этими элементами возникают дополнительные разнонаправленные усилия, которые не учитываются при таком определении I_{sp} . Этот эффект требует дальнейших исследований.

Таким образом, нами разработан эффективный вычислительный алгоритм многомерного моделирования процесса ПГД в газах. Алгоритм основан на методе явного выделения фронта пламени и методе частиц. Проведены двумерные расчеты ускорения пламени в стехиометрической пропановоздушной смеси в трубах с регулярными препятствиями. Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов с известными экспериментальными данными по зависимостям скорости пламени от пройденного расстояния. Про-

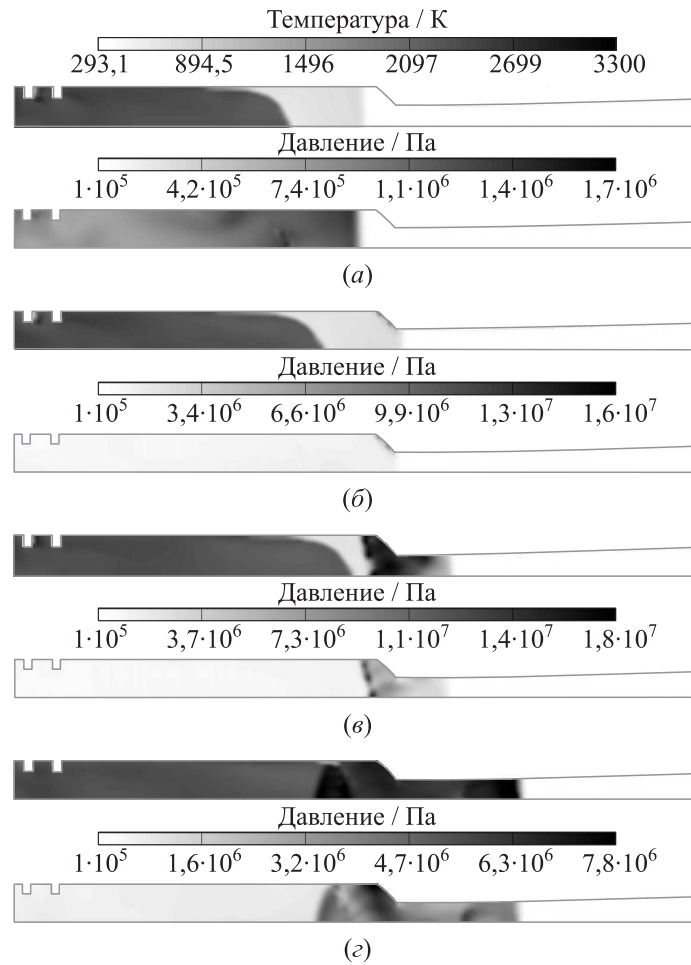


Рис. 2 Распределения температуры (сверху) и давления (снизу) при ПГД в несколько моментов времени по отношению к моменту отражения ударной волны от суживающейся части сопла: (а) -25 мкс; (б) 0 ; (в) $+25$; (г) $+50$ мкс

ведены расчеты ПГД в трубе с регулярными кольцевыми препятствиями и с профилированным соплом. Показано, что удельный импульс тягового усилия на закрытую стенку трубы при ПГД значительно (на 12%) превышает удельный импульс при мгновенном инициировании детонации в прямой гладкой трубе при прочих равных условиях. Этот результат требует уточнения: при расчете I_{sp} следует учесть разнонаправленные усилия на препятствия и сопло в процессе ПГД и истечения продуктов горения.

Работа выполнена в рамках Государственных контрактов № П502 и № П1085 по Федеральной целевой программе (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и № 02.516.12.6026 по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2012 гг., а также при частичной поддержке РФФИ (проект 08-08-00068).

Литература

1. Иванов В. С., Сметанюк В. А., Фролов С. М. Математическое моделирование начальной стадии перехода горения в детонацию в трубе с гомогенной газовой смесью // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. Вып. 2. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. С. 18–21.
2. Беляев А. А., Басевич В. Я., Фролов Ф. С., Фролов С. М., Басара Б., Суффа М. База данных для характеристик ламинарного горения н-гептана // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. Вып. 3. С. 30–37.
3. Иванов В. С., Басевич В. Я., Фролов С. М. Модель горения газов с выделением фронта пламени // XIV Симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2008. С. 73.
4. Frolov, S. M., V. S. Ivanov, V. A. Smetanyuk, and B. Basara. 2009. Tracking of propagating turbulent flames and autoignition in enclosure. *22nd YUMV Automotive Conference (International) with Exhibition "Science and Motor Vehicles" Proceedings*. Belgrade. 1–9.
5. Frolov, S. M., V. S. Ivanov, V. A. Smetanyuk, B. Basara, and M. Suffa. 2009. Numerical simulation of propane-air turbulent flame acceleration in straight tubes of different length. In: *Nonequilibrium phenomena: Plasma, combustion, atmosphere*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and A. M. Starik. Moscow: TORUS PRESS. 356–65.

6. Rose, M., P. Roth, S. Frolov, and M. G. Neuhaus. 1999. Modelling of turbulent gas/particle combustion by a Lagrangian PDF method. *Combust. Sci. Tech.* 149:95–113.
7. Басевич В. Я., Фролов С. М. Глобальные кинетические механизмы для моделирования многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // *Химическая физика*, 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.
8. FIRE Users Manual Version v2008 AVL List GmbH Graz, Austria. 2008.
9. Ciccarelli, G., C. J. Fowler, and M. Bardon. 2003. Effects of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in an obstacle laden tube. *19th ICDEERS*. CD-ROM.
10. Фролов С. М., Аксёнов В. С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным пересжатием сечения // *Горение и взрыв* / Под общ. ред. С. М. Фролова. — Москва: ТОРУС ПРЕСС, 2009. Вып. 2. С. 26–30.
11. Фролов С. М., Аксёнов В. С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием // *ДАН*, 2009. Т. 427. № 3. С. 344–347.