

БЫСТРЫЙ ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

С. М. Фролов

Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН,
Москва, Россия

Приведен обзор теоретических и экспериментальных исследований «быстрого» перехода горения в детонацию (ПГД) в газах и капельных газозвесах.

В наших недавних работах предложен новый способ получения детонации в прямой гладкой трубе. Суть способа заключается в принудительном ускорении относительно слабой ударной волны (УВ), бегущей перед фронтом пламени, до интенсивности, достаточной для возникновения детонационного взрыва. Для этой цели вдоль прямой гладкой трубы устанавливались распределенные источники зажигания. В опытах УВ ускоряли, включая каждый последующий источник зажигания согласованно с ее приходом в соответствующее сечение трубы. Другими словами, УВ ускоряли, обеспечивая быстрое принудительное зажигание взрывчатой смеси в ближайшей окрестности бегущего ударного фронта. Такой прием позволил инициировать детонацию на расстоянии и за время, значительно меньшие по сравнению с классическим ПГД, т. е., обеспечить «быстрый» ПГД. Под «быстрым» ПГД понимается процесс возникновения детонации в топливно-воздушной смеси, при котором турбулентное пламя разгоняется до скорости, значительно меньшей, чем скорость, требуемая для классического ПГД в прямой трубе. Новый способ инициирования детонации назван нами «иницированием детонации бегущим импульсом принудительного зажигания». Отметим, что в опытах с инициированием детонации рассогласование между приходом УВ и зажиганием газа не превышало 100 мкс. При большем рассогласовании момента зажигания с приходом УВ при прочих равных условиях детонация не возникала.

Возможность локального самовоспламенения свежей смеси при отражении УВ от препятствия навела нас на мысль, что при ПГД в трубах с препятствиями принципиально возможен не только классический сценарий, но и сценарий инициирования детонации бегущим импульсом зажигания, но не принудительного, а самопроизвольного. В этом случае зажигание газа в окрестности УВ, бегущей перед фронтом пламени, происходит не за счет внешнего стимулирования химической активности, а благодаря самовоспламенению ударно сжатого вещества при отражении УВ от препятствий. Другими словами, при ПГД в трубах с препятствиями имеется стадия процесса, на которой принципиально возможно быстрое инициирование детонации бегущим импульсом самопроизвольного зажигания («быстрый» ПГД). При этом, как и в опытах с принудительным зажиганием, возможность «быстрого» ПГД определяется тем, насколько согласованы друг с другом момент прихода УВ в то или

иное сечение трубы с моментом самовоспламенения газа в этом сечении.

В связи с принципиальной возможностью «быстрого» ПГД возникают фундаментальные вопросы относительно условий его реализации, а также средств и методов его предотвращения. В данном обзоре приведены экспериментальные и расчетные примеры реализации «быстрого» ПГД в условиях, когда в потоке за бегущей УВ спонтанно возникают распределенные очаги самовоспламенения.

FAST DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION: THEORY AND EXPERIMENT

S. M. Frolov

The review of theoretical and experimental studies of «fast» deflagration-to-detonation transition (DDT) in gases and liquid drop suspensions is presented.

In our recent works, a new method for obtaining detonation in a straight smooth tube was suggested. Its essence is the forced acceleration of a comparatively weak shock wave running ahead of the flame front to intensities sufficient for the formation of a detonation explosion. For this purpose, distributed igniters were mounted along a straight smooth tube. The shock wave was accelerated by switching on each ignition source as the wave arrived at the corresponding tube section. In other words, the shock wave was accelerated by providing fast forced explosive mixture ignition in the nearest vicinity of the running shock front. This technique allowed detonation to be initiated at a distance and in a time much smaller compared with the classic DDT. In experiments with detonation initiation, the mismatch between the arrival of the shock wave and gas ignition did not exceed 100 microsecond. At a larger mismatch, the other conditions being equal, no detonation occurred. It follows that the length and time of the DDT can be reduced substantially by providing the possibility of forced shock wave acceleration before the flame front; that is, we can then obtain a «fast» DDT. Further, the fast DDT will be understood as the appearance of detonation in a fuel-air mixture when a turbulent flame is accelerated to a velocity much lower than the velocity required for the classic DDT in a straight tube. The new technique for initiating detonation we called «detonation initiation by a running forced ignition pulse.»

The possibility of the local self-ignition of a fresh mixture caused by shock wave reflection from an obstacle brought us to an idea that, in DDT in tubes with obstacles, not only the classic DDT scenario, but also the scenario of detonation initiation by a running ignition pulse, however spontaneous rather than forced, is possible. Gas ignition in the vicinity of the shock wave running in front of the flame then occurs because of the self-ignition of the substance compressed by the shock wave reflected from obstacles rather than because of external stimulation of chemical activity. In other words,

DDT in tubes with obstacles includes a stage at which fast detonation initiation by a running spontaneous ignition pulse (fast DDT) is possible in principle. As with forced ignition experiments, the possibility of fast DDT is then determined by the degree to which the time moments of the arrival of the shock wave at one or another tube cross section and gas self-ignition in the section are properly coherent.

In view of the possibility in principle of fast DDT, fundamental questions concerning the conditions of their occurrence and methods for preventing them arise. In this review, experimental and theoretical examples of fast DDT under conditions when distributed self-ignition zones spontaneously form in a flow behind a running shock wave are given.

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ГОРЯЧИХ ТОЧЕК В ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ

И. И. Карпенко, В. Г. Морозов, В. Б. Титова,
Ю. В. Янилкин, Б. М. Жогов, О. Н. Чернышова
E-MAIL: KARPENKO@VNIIEF.RU

Российский Федеральный Ядерный Центр —
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Концепция горячих точек (ГТ) и очаговый механизм инициирования детонации — базовые представления современной физики взрыва.

Твердые ВВ негомогенны: поры и трещины, границы зерен и границы раздела фаз. Гетерогенность требует рассчитывать переносы массы и энергии в соответствии с принципами механики сплошной среды и термодинамики. В общем случае задача настолько сложна, что единственной альтернативой является численное моделирование, где процессы идентифицируются по степени важности и характерным временам.

Взаимодействие УВ с дефектами структуры твердых гетерогенных ВВ приводит к неоднородности деформации сжатого объема ВВ, локализации и диссипации энергии в отдельных очагах, «горячих точках», в которых начинается процесс реакции разложения ВВ. Развиваясь в дальнейшем, они приводят к макроскопическому взрыву.

Условно картину инициирования гетерогенных ВВ можно представить поэтапно:

1) Формирование горячих точек — стадия от момента сжатия ВВ ударной волной до начала химической реакции в локальных очагах.

2) Рост горячего очага (ГТ) — развитие реакции разложения в окружающем ВВ.

3) Взаимодействие и быстрое слияние очагов — быстрое завершение реакции при высокой температуре и давлении в момент, когда реагирующие области начинают сливаться, что и обеспечивает быстрый переход к самоподдерживающемуся стационарному детонационному процессу (собственно взрыв).

Время индукции детонации определяется характерным временем второго этапа — роста ГТ до их прикосновения. При характерных размерах гранул ВВ ~100 микрон и характерном времени индукции детонации ~1 мкс, скорость роста ГТ должна быть не менее 50...100 м/с. Это гораздо выше скорости обычного послышного горения.

В докладе рассмотрены возможные физические механизмы роста ГТ. Построено квазиавтомодельное решение задачи о горении ГТ в сжатом ВВ после прохождения ударной волны (УВ). Рассмотрена изобарическая газодинамика с горением по закону Аррениуса. Определяющим механизмом переноса энергии является турбулентность, которая возникает из-за многомерности процесса горения и роста ГТ и вследствие газодинамической сдвиговой неустойчивости на фронте горения. Благодаря большой интенсивности турбулентного перемешивания такие течения обладают повышенной способностью к передаче теплоты, ускоренному распространению химических реакций, в частности горения.

В докладе представлены двумерные расчеты роста ГТ с использованием $k-\epsilon$ -модели турбулентности и трехмерные расчеты с прямым численным моделированием развития неустойчивости и эволюции горячего очага с учетом турбулентности и теплопроводности в методике ЭГАЗ-3D. Задача рассмотрена с момента формирования ГТ за счет сильного разогрева сжатого в порах газа под действием ударной волны и его эволюция. Показано, что только одновременное включение в расчеты турбулентности и теплопроводности обеспечивает ожидаемую скорость роста ГТ. Для подтверждения полученной картины проведены расчеты двумерной программе МЕДУЗА с использованием вихревой подсеточной моделью турбулентности.

Полученная в процессе численного моделирования скорость роста ГТ более 100 м/сек подтверждает гипотезу о турбулентном механизме переноса энергии в процессе роста горячих точек при инициировании детонации. Физическая картина выглядит так: под действием ударной волны и в результате вихревого течения крупномасштабные частицы дробятся до мелких размеров и перемешиваются. Основной процесс энергопереноса в пространстве происходит турбулентно, при этом за счет развитой поверхности контакта ВВ и продуктов разложения (ПВ) успевает происходить прогрев ВВ посредством молекулярной теплопроводности (передача энергии от ПВ) и эффективно продолжается реакция разложения (горение с теплопроводностью с поверхности мелких частиц).