

УДК 534.222.2

ИНИЦИИРОВАНИЕ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И СРЫВ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗАХ

© 2011 г.

В.А. Левин

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

levin@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Представлены некоторые результаты исследования фундаментальных и прикладных проблем газовой детонации, проводившихся в основных научных центрах России. Главное внимание уделено достижениям ученых московской школы, основоположником которой является академик Г.Г. Черный, и новосибирских исследователей, среди которых Р.И. Солоухин и его коллеги, последователи и ученики. Рассматриваются такие важные для теории и практики проблемы, как критические условия прямого инициирования детонации за счет ударной волны, возникающей при концентрированном подводе энергии взрывом взрывчатого вещества или электрическим разрядом, при движении поршня, вращении или деформации стенок, ограничивающих объем горючей смеси. Как важная проблема, выделен вопрос о минимизации энергетических затрат для обеспечения формирования детонации. Обсуждаются методы инициирования детонации за счет кумулятивных эффектов, в частности при коллапсе ударных волн, вызванных торoidalным электрическим разрядом. Описано распространение нестационарных волн детонации и моделирование двухмерной ячеистой структуры. Приводятся данные экспериментов и расчетов, демонстрирующие хорошее совпадение ячеистых структур. Особое место занимают исследования инициирования, распространения и стабилизации детонации в сверхзвуковом потоке горючей газовой смеси, имеющие непосредственное отношение к реализации эффективного детонационного горения в перспективных энергоустановках. Интересной с точки зрения приложений является реализованная в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН схема энергетической установки, в которой сжигание смеси происходит в поперечной волне детонации.

Ключевые слова: детонация, инициирование, распространение, стабилизация.

Изучение детонационных волн в газах продиктовано, главным образом, стремлением использовать их потенциал для практических целей в оригинальных импульсных установках и специальных энергетических системах для летательных аппаратов и ракет. Большие величины газодинамических параметров и сложная картина течения за фронтом детонационной волны серьезно затрудняют как экспериментальное, так и теоретическое изучение детонации. Основным источником информации о волнах детонации являются эксперименты. Среди ученых-экспериментаторов особое место по праву занимает Р.И. Солоухин. Его работы стали настольными книгами для поколений исследователей. Огромный вклад в исследования детонации внесли его коллеги, последователи и ученики. По мере накопления экспериментальных данных совершенствовались и теоретические модели детонации. Так, двухстадийная модель, учитывающая задержку воспламенения и конечное время последующего тепловыделения, позволяет описать нестационарную нелинейную волновую структуру детонации.

В первых теоретических работах аналитическим методом получены законы затухания одномерных слабо пересжатых бесконечно-тонких детонационных волн, которые позднее подтвердились численными расчетами. Был установлен асимптотический характер перехода плоской волны на режим Чепмена – Жуге, а цилиндрической и сферической волн – на конечном расстоянии от места возникновения.

В рамках двухстадийной модели аналитически была исследована начальная стадия течения при точечном взрыве и обнаружен эффект расщепления детонационной волны. Численно с использованием модельной и реальной кинетики был установлен механизм возникновения и распространения самоподдерживающейся детонационной волны при взрыве, в частности, показано, что такая волна всегда нестационарная, а параметры на ее головном фронте изменяются периодически под воздействием ударных волн, формирующихся в зоне индукции перед ускоряющимся фронтом пламени. Автоколебательный процесс развивается лишь в том случае, если величина энергии

взрыва превосходит определенное критическое значение. Иначе детонационная волна затухает, распадаясь на ударную волну и волну медленного горения. Были определены значения критической энергии при инициировании детонации поршнем, электрическим разрядом, взрывающейся проволокой, зарядом тротила и определена ее зависимость от параметров горючей смеси и пространственно-временных характеристик источников энергии, а также дано объяснение аномальной экспериментальной зависимости критической энергии от продолжительности электрического разряда. Согласно расчетам, это связано с существованием характерного времени подвода энергии, в течение которого практически вся масса газа, участвующая в формировании мощной ударной волны, распространяющейся по горючей смеси, вытекает из зоны разряда, вызывая в ней сильное падение плотности. В результате большая часть подводимой затем энергии расходуется «впустую», т.е. идет на нагревание оставшейся массы газа. Исследовано инициирование детонации зарядом тротила в неоднородной водородно-воздушной смеси, образующейся при диффузии водорода в воздух или при наличии экранирующего слоя воздуха.

Изучалась проблема уменьшения критической энергии инициирования и было установлено ее понижение на порядок за счет жесткой оболочки определенного радиуса, разрушающейся через некоторое время после взаимодействия с головной ударной волной. Проводились исследования оригинальных механизмов возбуждения детонации. Так, была установлена возможность инициирования детонации в смеси водорода с воздухом в результате коллапса сферической или цилиндрической области с пониженным давлением без дополнительного подвода энергии извне и получена зависимость минимального радиуса области, при котором реализуется детонация, от величины давления внутри нее. В рамках исследования неоднородной структуры детонации первоначально с использованием двухстадийной кинетики было рассмотрено развитие возмущения плоской волны, приводящее к формированию ячеистой структуры детонации, а также установлено существование минимального и максимального размеров ячеек и выявлена определяющая роль поперечных волн при инициировании и распространении детонации, в частности, при переходе волны в расширяющийся канал. Была сформулирована используемая многими исследователями двумерная модель спина и расчи-

тана структура двухголовой спиновой детонационной волны.

Исследовались волновые процессы при детонации водородно-воздушной смеси в плоских каналах сложной формы с учетом реальной кинетики. Изучено влияние на распространение ячеистой детонации расположенного поперек канала препятствия. Установлено существование критической высоты препятствия, при превышении которой происходит срыв детонации, которая может быть восстановлена посредством дополнительной поперечной стенки. В случае, когда препятствие сверхкритической высоты может разрушиться спустя определенное время, исследовано влияние времени существования препятствия и получено, что детонация сохраняется, если оно меньше определенного критического. Определены также условия сохранения ячеистой детонационной волны в канале с разрушающейся поперечной стенкой, полностью перекрывающей канал, и при переходе детонации из канала постоянного сечения в резко расширяющийся канал. Установлено, что при выходе детонации из канала, ширина которого меньше половины критической ширины канала для выхода детонационной волны в открытое пространство, детонация сохраняется, если величина расширения канала не превосходит некоторое критическое значение.

Исследовалось с практической точки зрения инициирование детонации в сверхзвуковом потоке водородно-воздушной смеси электрическим разрядом с однородным и неоднородным по пространству энерговыделением. Изучено влияние времени разряда и скорости сверхзвукового потока на процесс формирования детонации. Определены критические энергии при инициировании детонации электрическим разрядом в форме плоского слоя и исследована ее зависимость от его толщины. Установлено, что в рассмотренных случаях имеет место монотонное уменьшение энергии инициирования при уменьшении толщины слоя. При мгновенном разряде и неравномерном распределении энергии поперек канала по синусоидальному закону установлено уменьшение критической энергии инициирования за счет отражения от стенок канала мощных поперечных ударных волн, формирующихся при энергоподводе. При неравномерном распределении энергии электрического разряда по пространству исследовано влияние времени энергоподвода и скорости сверхзвукового потока на процесс формирования детонации. В частности, установлен эффект роста энергии инициирования с увеличением продолжительности разряда и скорости потока. Рассмотрена также проблема стабилизации детонации в сверхзву-

ковом потоке в каналах и трубах. В двухмерной постановке показано, что нестационарная волна детонации, распространяющаяся вверх по потоку, может быть стабилизирована за счет подвода энергии электрическими разрядами малой интенсивности в определенные моменты времени. В рамках квазидномерного подхода установлены закономерности поведения волны и показана возможность ее стабилизации за счет специальной формы канала.

Особое внимание в последнее десятилетие уделяется проблемам иницирования и стабилизации детонации в ограниченных объемах камер сгорания энергетических установок, реализующих высокоскоростное сжигание топлива. В этой связи особое значение приобретают методы математического моделирования, которые, благодаря бурному развитию высокопроизводительной техники, открывают практически безграничные возможности исследования разнообразных яв-

лений в природе и технике с учетом сложных быстроепротекающих физико-химических процессов. Важно отметить необходимость тесного сотрудничества теоретиков и экспериментаторов. Как показывают последние результаты по иницированию детонации, полученные новосибирскими и московскими учеными, вычислительный эксперимент позволяет найти новые схемы течений, гарантирующих формирование самоподдерживающегося детонационного горения, связанные с использованием механической энергии горючей смеси. Важные результаты получены и по ячеистой структуре детонации, которые вносят весомый вклад в решение фундаментальных проблем детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-01-00068, 11-08-00288, 10-08-90039-Бел), Федерального агентства по науке и инновациям (ИШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН и ОЭММПУ РАН.

INITIATION, PROPAGATION AND BREAKDOWN OF THE DETONATION IN GASES

V.A. Levin

The report presents the results of studies of fundamental and applied problems of gas detonation, done in the major research centers in Russia. It covers such important for theory and practice issues as critical conditions for direct initiation of detonation by shock waves, arising due to concentrated energy supply by the explosion or by the electrical discharge, by the action of the piston, by the rotation or deformation of the walls that limit the amount of combustible mixture. Special attention in the report is given to the research of the initiation, propagation and stabilization of the detonation in a supersonic flow of a combustible gas mixture.

Keywords: detonation, initiation, propagation, stabilization.