

О ДВУРАЗМЕРНОЙ ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРЕ КИНЕТИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА

А. Н. Дрёмин

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

На основании результатов опубликованных ранее исследований детонации газообразных и жидких взрывчатых веществ дано объяснение возникновения двумерной ячеистой структуры фронта детонации отдельных газовых смесей, претерпевающих во фронте волны двухстадийное экзотермическое превращение, и высказаны соображения о механизме проявления двумерной ячеистой структуры в случае детонационного превращения газовых смесей по законам одностадийной химической кинетики.

Ключевые слова: детонация, ячеистая структура, период индукции, химическая кинетика, срыв реакции.

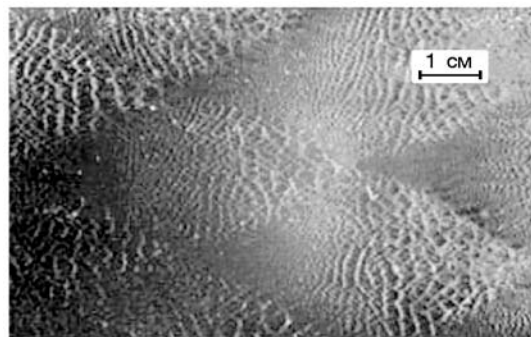
ВВЕДЕНИЕ

Известно, что практически во всех газовых смесях [1, 2] и у некоторых жидких взрывчатых веществ (ВВ) [3] фронт детонационных волн кинетически неустойчивый [4]. Наблюдения с помощью следовых отпечатков [1, 2] показывают, что детонация каждой газовой смеси характеризуется своей, присущей ей ячеистой структурой. Впервые сообщение об экспериментальном наблюдении тонкой структуры ячеек появилось в работе [5], в которой утверждается, что в некоторых смесях газов внутри ячеек видна сетка более мелких следов, оставляемых волнами тонкой структуры переднего фронта. Никаких фотографий следовых отпечатков в работе [5] не приводится, однако отмечается, что волны тонкой структуры заметны также на тепловых фотографиях в плоском канале [6].

Автором работы [5] проведены опыты с рядом газовых смесей в трубе диаметром 27 мм. При этом волны тонкой структуры обнаружены в смесях $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$, $3\text{NH}_3 + 3\text{O}_2$ и $\text{C}_6\text{H}_{14} + 11\text{O}_2$. В смесях $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ и $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ такие волны отсутствуют, но при разбавлении этих смесей кислородом ($\text{H}_2 + 3\text{O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2 + 15\text{O}_2$ и $\text{C}_2\text{H}_2 + 24\text{O}_2$) волны тонкой структуры появляются. Отдельными экспериментами показано, что добавка 70 % Ag в смесь $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ не приводит к исчезновению тонкой структуры, а уже при небольшом пересжатии смеси

$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ag}$ тонкая структура исчезает.

Волны тонкой структуры были независимо обнаружены французскими коллегами в работе [7] при исследовании детонации газообразного нитрометана и смеси газообразного нитрометана с кислородом, а также в работе [8] при исследовании смесей $\text{H}_2\text{—NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$. На приведенных снимках следовых отпечатков отчетливо различаются два размера ячеек — крупные, а внутри каждой крупной ячейки еще и мелкие (см., например, фотографию ниже). При этом заметно, что размеры мелких ячеек по длине каждой крупной ячейки непрерывно увеличиваются. Авторы работ [7–10] объясняют появление двумерной ячеистой структу-



Снимок ячеистой структуры детонационного фронта в смеси $\text{H}_2\text{—NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$:

начальное давление $p_0 = 0.5$ бар; соотношение компонентов $\Phi = 1.1$; стрелкой показано направление распространения детонации

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект № 3394).

ры двухстадийным выделением энергии смесей в процессе их превращения в продукты детонации за счет двух последовательных экзотермических реакций с участием оксидов азота: $\text{NO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$ и $\text{NO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$, которые характеризуются разными временами индукции.

Объяснение появления двуразмерных ячеистых структур, данное французскими коллегами в [7, 8], отвергается сибирскими учеными, которые предлагают свою интерпретацию этого явления, основанную на неустойчивости детонационного фронта к возмущениям, обусловленным немонотонным (двухстадийным) энерговыделением [11, 12]. В противовес выводам о главенствующей роли оксидов азота, сибирские коллеги считают, что подобные двуразмерные ячеистые структуры могут наблюдаться при определенных условиях во всех системах, где присутствуют компоненты, разлагающиеся с экзотермическим эффектом на первой стадии энерговыделения. Эта гипотеза получила у них экспериментальное подтверждение на двух веществах — ацетилене и перекиси водорода, разлагающихся с положительным энерговыделением.

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА

Следует отметить, что в работах обеих групп исследователей, так же как и в работе [5], ничего не говорится о механизме возникновения пульсирующего детонационного фронта вообще и о механизме появления волн тонкой структуры в частности. Сказано только, что при численном моделировании двуразмерной ячеистой структуры используется модель детонации Гриба — Зельдовича — фон Неймана — Дёринга (ГЗНД) [13–16]. Согласно модели детонации ГЗНД вещество сначала сжимается в ударном скачке детонационной волны и затем, спустя период индукции, самовоспламеняется и горит, так что «видимая» скорость фронта горения ударно-сжатого вещества оказывается в точности равной скорости ударного фронта детонационной волны. По существу, это означает, что тем самым авторы рассматривают кинетическую неустойчивость детонационного фронта (пульсирующую детонацию) всего лишь в качестве третьего приближения. Классическая теория детонации Михельсона — Чепмена — Жуге (МЧЖ) [17–20] трактует

детонационную волну в первом приближении как поверхность разрыва между исходным веществом и продуктами детонации. Одномерный детонационный комплекс ГЗНД — это второе приближение. По мнению К. И. Щёлкина [1, 4, 21] и его последователей, пульсирующая детонация является третьим приближением, а пульсации детонационного фронта представляются тонкой структурой химпика одномерного комплекса ГЗНД. На самом деле пульсирующая детонация не имеет ничего общего с моделью детонации ГЗНД, так как химпик одномерного детонационного комплекса ГЗНД в форме буквы «П» в природе не существует. И вообще, химпик может проявиться только в том случае, если самовоспламенение вещества происходит сразу за ударным скачком детонационной волны, на самой его вершине (безиндукционное самовоспламенение), когда начальная скорость выделения энергии вещества максимальна [22]. Что же касается химпика с периодом индукции одномерного комплекса ГЗНД, то он срывается еще в процессе инициирования детонации.

Явление срыва химической реакции во фронте ударных волн может иметь место только тогда, когда кинетика энерговыделения вещества медленная. Такая кинетика характеризуется периодом индукции с последующим самовоспламенением. Период индукции является сильной экспоненциальной функцией состояния вещества. Поэтому если вещество окажется под действием волны разрежения и его температура будет так падать, что «время жизни» вещества в каждом промежуточном состоянии будет меньше периода индукции, соответствующего этому состоянию, то самовоспламенение не произойдет или может прекратиться, если под действие волны разрежения попадет ударно-сжатое состояние, в котором оно до этого происходило. Такое действие волны разрежения названо срывом самовоспламенения [3, 22]. Явление срыва определяет все пределы детонации физически однородных газообразных и жидких ВВ: инициирования детонации ударными волнами, кинетическую устойчивость детонационного фронта, предел распространения (критический диаметр детонации) и предел детонации их смесей в зависимости от концентрации с невзрывчатыми разбавителями [23]. Ниже будет показано, каким образом срыв определяет механизм возникновения кинетически неустойчивого детонацион-

ного фронта, и на этой основе обоснована несостоятельность представлений о пульсирующей детонации как о тонкой структуре модели детонации ГЗНД.

Известно, что нормальная детонация МЧЖ возникает всегда из пересжатого режима [22]. Будет ли при этом детонационный фронт инициируемой детонации в нормальном режиме кинетически устойчивым или неустойчивым (пульсирующим), решается именно в процессе перехода пересжатого режима к нормальному. При инициировании детонации ударными волнами в физически однородных ВВ пересжатие всегда очень сильное, так как пересжатые детонационные волны, как правило, возникают в исходном ВВ под действием детонации слоя ударно-сжатого ВВ [24], образующегося за время индукции его самовоспламенения. Детонация ударно-сжатого ВВ возникает вследствие чрезвычайно быстрого выделения энергии в процессе его самовоспламенения. Давление этой детонации существенно выше давления нормальной детонации (в основном за счет увеличения плотности ВВ при его сжатии инициирующей ударной волной). Поэтому, когда детонация в ударно-сжатом ВВ догоняет фронт инициирующей ударной волны, она вызывает в исходном ВВ сильно пересжатую детонацию.

Из-за ограниченной толщины слоя ударно-сжатого ВВ возникающая пересжатая детонационная волна в исходном ВВ должна быстро затухать под действием сильной тыльной волны разрежения. В этих условиях срыв реакции превращения ВВ во фронте пересжатой волны не возникает только в том случае, если превращение протекает по закономерностям быстрой кинетики, при которой самовоспламенение происходит без задержки, сразу за ударным скачком детонационной волны. С другой стороны, действие тыльной волны разрежения приводит к немедленному срыву реакции во фронте пересжатой детонационной волны, если выделение энергии ВВ в ее фронте изначально (или позднее, в процессе затухания) следует закономерностям медленной кинетики. Срыв реакции означает ликвидацию химпика. После этого под действием высокого давления продуктов уже сдетонировавшей части ВВ во фронте волны нарастает слой ударно-сжатого ВВ, параметры состояния которого (давление и его градиент) изменяются так, что по про-

шествии характерного для него периода индукции на границе раздела «продукты детонации — ударно-сжатое ВВ» срыв преодолевается, ударно-сжатое ВВ самовоспламеняется и возникает его детонация, которая, в свою очередь, снова порождает в исходном ВВ сильно пересжатую детонацию, и т. д.

Указанная последовательность: слой ударно-сжатого ВВ, его самовоспламенение и детонация, пересжатая детонация исходного ВВ, срыв реакции в ее фронте и снова образование слоя ударно-сжатого ВВ в силу случайных причин — происходит не одновременно по всей поверхности детонационного фронта, а в его отдельных местах. Детонации ударно-сжатого ВВ, возникшие из отдельных локальных очагов, распространяются полусферическими волнами, которые догоняют передний край слоя этого ВВ и вызывают в исходном ВВ очаги расходящейся пересжатой детонации. Волны разрежения за фронтом таких расходящихся детонаций, естественно, сильнее, чем за плоской одномерной волной, и поэтому срыв химической реакции здесь осуществляется еще легче. После срыва реакции за фронтом каждой расходящейся пересжатой детонационной волны детонация в слое ударно-сжатого ВВ распространяется в виде кольца, в центре которого растет диск ударно-сжатого ВВ. При благоприятных условиях в центре этого диска на границе раздела «продукты детонации — ударно-сжатое ВВ» срыв самовоспламенения преодолевается и опять возникает детонация ударно-сжатого ВВ.

Поперечное сечение кольцевых детонаций имеет вид трехударных конфигураций (ТУК), состоящих из прямой ударной волны, поперечной детонационной волны и косой волны. Давление прямой ударной волны ТУК в нормальной пульсирующей детонации близко к давлению МЧЖ [3, 22]. Поперечная волна — это детонация ударно-сжатого ВВ за прямой ударной волной; ее давление в газовой детонации может в несколько раз превышать давление детонации исходного ВВ [2]. (Давление поперечной детонационной волны в жидких ВВ может достигать удвоенного значения давления МЧЖ [3, 22].) Косая волна вблизи тройной точки является пересжатой детонацией исходного ВВ, возникающей под действием высоких давлений поперечной детонационной волны ударно-сжатого ВВ. Интенсивность косой волны по мере удаления от тройной точки падает, на неко-

тором удалении от тройной точки химическая реакция в ее фронте срывается, и косая волна переходит в прямую ударную. Известно, что косая детонационная волна может быть тоже неустойчивой [1, 22, 25].

Из вышеизложенного следует, что представление Щёлкина [1, 4, 21] о модели пульсирующей детонации как о тонкой структуре модели детонации ГЗНД не соответствует действительности. С позиции явления срыва стала очевидной несостоятельность вообще модели детонации ГЗНД с ее П-образным профилем химика, так как детонационные волны с такой закономерностью выделения энергии являются пульсирующими. Модель же пульсирующей детонации не имеет ничего общего с моделью детонации ГЗНД, потому что ТУК в ее фронте возникают и перемещаются в слое ударно-сжатого ВВ с давлением, примерно равным давлению МЧЖ, а не химика, как полагал Щёлкин.

Срыв реакции во фронте косой детонационной волны и распространение кольцевых детонаций ударно-сжатого ВВ по детонационному фронту сопровождается увеличением в их центре размеров островков ударно-сжатого ВВ. Новые адиабатические тепловые взрывы (АТВ) появляются в центре островков, если время их жизни превышает соответствующий им период индукции. В противном случае островки ударно-сжатого ВВ соседних кольцевых детонаций сливаются вместе, образуя на поверхности детонационного фронта новый слой ударно-сжатого ВВ, так как в процессе перехода пересжатой детонации в нормальный режим трехударные конфигурации существуют, естественно, только до встречи друг с другом. Однако, так как локальные АТВ возникают вначале хаотически и в случайных местах, слой ударно-сжатого ВВ появляется во фронте детонационной волны и его толщина различна по фронту. Поэтому новые АТВ возникают снова неодновременно.

Следует отметить, что в кинетически неустойчивом детонационном фронте возмущения из тыла волны (из области продуктов детонации) могут проникать на прямые участки трехударных конфигураций и изменять их интенсивность. По этой причине пересжатая детонация в процессе перехода в нормальный режим затухает так, что средний период индукции локальных АТВ в каждом последующем слое ударно-сжатого ВВ увеличивается

по сравнению с предыдущим. Поэтому кольцевые детонации ударно-сжатого ВВ от АТВ, возникших раньше других, распространяются по слою ударно-сжатого ВВ в детонационном фронте и поглощают соседние участки раньше, чем там могли бы возникнуть самостоятельные АТВ, которые в новых условиях уже не могут появиться вообще, так как ударно-сжатое ВВ в том месте, где они должны были бы появиться, уже поглощено соседней кольцевой детонацией от АТВ, возникшего раньше. По этой причине количество локальных АТВ во фронте затухающей пересжатой детонации уменьшается до некоторого числа, характерного для стационарного режима детонации.

Как уже говорилось выше, косая детонационная волна может быть также неустойчивой (пульсирующей). Это означает, что превращение ударно-сжатого вещества в ее фронте осуществляется в этом случае также в виде локальных АТВ, которые приводят к возникновению соответствующих им ТУК. Однако обычно период индукции самовоспламенения указанных АТВ стремится в бесконечность (т. е. имеет место срыв самовоспламенения) уже на небольшом расстоянии от тройной точки основных ТУК из-за того, что интенсивность косой волны основных ТУК с удалением от тройной точки падает. Возникновение двуразмерной ячеистой структуры, по существу, означает, что срыва этих АТВ нет не только во фронте косой волны, но и по всему фронту расходящихся детонационных волн, возникающих от столкновения основных ТУК, порождаемых АТВ в слое ударно-сжатого вещества с давлением продуктов детонации МЧЖ. Покажем на основе вышеизложенного механизма возникновения пульсирующего детонационного фронта, что для случая двустадийной кинетики химических реакций это не только возможно, но и неизбежно.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДВУРАЗМЕРНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР ПРИ ДВУСТАДИЙНОЙ КИНЕТИКЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Допустим, что пересжатие при инициировании детонации было настолько сильным, что кинетика реакции в ее фронте была быстрой, т. е. обе реакции возникали сразу за ударным скачком детонационной волны без какой-либо задержки. Естественно, что по мере затухания пересжатой детонации медленная кинетика

вначале проявится в той реакции, период индукции которой меньше. При этом неустойчивость детонационного фронта будет развиваться по вышеизложенному механизму, согласно которому появляющиеся вначале очень мелкие пульсации фронта увеличиваются по мере перехода пересжатой детонации в нормальный режим. Такая же участь настанет и для второй стадии реакции с большим периодом индукции. Различить пульсации, вызываемые разными стадиями реакции, в это время, по видимому, невозможно. Однако очевидно, что по мере дальнейшего затухания пересжатой детонационной волны размер неоднородностей ее фронта, обусловленных второй стадией реакции, быстро станет больше размера неоднородностей от первой стадии реакции. Как только это произойдет, главными, определяющими само существование детонации в нормальном режиме станут крупные ячеистые структуры, зависящие от второй стадии реакции. Что же касается мелких ячеек, определяемых первой стадией реакции, то их зарождение и динамика развития будут с этого момента подчиняться взаимодействиям ТУК₂, порождаемых локальными АТВ₂ ударно-сжатого вещества, вызванными второй стадией реакции.

Правильные крупные ячеистые структуры в нормальном режиме детонации МЧЖ поддерживаются регулярными столкновениями ТУК, возникающих либо от регулярных локальных АТВ ударно-сжатого вещества с давлением МЧЖ, либо за счет их столкновений [25]. В любом случае столкновение ТУК₂, порождаемых АТВ₂, обусловленных второй стадией реакции, ведет к появлению во фронте волны очагов повышенных давлений, представляющих собой при рождении очаги расходящихся пересжатых детонаций. В процессе затухания на их фронте появляются пульсации, обусловленные АТВ₁ от первой стадии реакции (тонкая структура основных крупных ячеек). При этом, естественно, размер ячеек, обусловленных первой стадией реакции, увеличивается по длине основных ячеек, обусловленных второй стадией реакции.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДВУХУРОВНЕВЫХ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР ПРИ ОДНОСТАДИЙНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКЕ

Возникновение двуразмерной ячеистой структуры детонационного фронта при одностадийной кинетике химической реакции,

очевидно, также должно иметь место, если выделение энергии смеси по каким-либо причинам нехимического свойства станет также двустадийным. Чтобы показать такую возможность, напомним, что столкновения ТУК₂ приводят к возникновению на основном детонационном фронте локальных расходящихся детонационных волн. В большинстве случаев срыв АТВ₁ ударно-сжатого вещества во фронте таких локальных детонаций происходит почти сразу с их зарождением (что и приводит к появлению островков ударно-сжатого вещества с давлением, близким давлению продуктов детонации МЧЖ). Для того же, чтобы реализовалась двуразмерная ячеистая структура (волны тонкой структуры основных ячеек [5, 7–9]) в случае одностадийной кинетики химической реакции, необходимо, во-первых, чтобы срыва АТВ₁ вообще не было по всей поверхности локальных расходящихся детонационных волн. Второе условие, без которого первое невозможно в принципе, заключается в том, чтобы АТВ₁ во фронте локальных расходящихся детонационных волн развивались по законам настолько вырожденного теплового взрыва [26], что детонация ударно-сжатого вещества становилась бы невозможной. В этом случае характеристики, несущие возмущения из области самовоспламенения зоны АТВ₁, по очереди догоняют фронт расходящихся детонационных волн и создают на их поверхности локальные области повышенных давлений, сечение которых дает ТУК₁. При этом, естественно, поперечные волны ТУК₁ оказываются недетонационными; частичное выделение энергии смеси происходит за счет реакций в косых волнах ТУК₁, а большая часть смеси проходит без химических изменений через прямые ударные волны ТУК₁ и самовоспламеняется позднее с образованием ТУК₂.

В работе [5] сообщается, что незначительное пересжатие смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$, нормальная детонация которой характеризуется двухуровневой ячеистой структурой, приводит к исчезновению тонкой структуры. Этот результат легко объясним на основе вышеизложенного механизма возникновения двухуровневых ячеистых структур при одностадийной кинетике химической реакции. Известно, что пересжатием неустойчивый детонационный фронт можно сделать устойчивым [24]. При пересжатии температура на ударном фронте детона-

ционной волны увеличивается. Рост начальной скорости реакции приводит к тому, что при некотором пересжатии срыв химической реакции на ударном фронте детонационной волны преодолевается и фронт становится устойчивым. Очевидно, что тонкая структура основных ячеек детонационного фронта исходной смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 2\text{Ar}$ определяется такими АТВ₁ во фронте локальных расходящихся детонационных волн, возникающих от столкновений основных ТУК₂, которые развиваются по законам вырожденного теплового взрыва, а поперечные волны ТУК₁, порождаемые ими, не являются детонационными. Чтобы сделать фронт таких локальных расходящихся детонационных волн устойчивым (что равносильно исчезновению волн тонкой структуры), естественно, требуется существенно меньшее пересжатие, чем потребовалось бы для достижения устойчивости фронта детонационной волны в целом.

ВЫВОДЫ

- Из представлений о механизме возникновения кинетически неустойчивого пульсирующего детонационного фронта [25] следует, что нормальный режим детонации МЧЖ всегда реализуется из пересжатого режима. Пульсирующая детонация возникает, когда в химике затухающей пересжатой волны появляется задержка самовоспламенения ударно-сжатого вещества. В этом случае под действием тыльной волны разрежения (еще в процессе перехода пересжатой детонации в нормальный режим) реакция в химике, а потому и сам химик срываются, что приводит в конечном счете к образованию во фронте детонационной волны слоя ударно-сжатого вещества, нарастающего по толщине с давлением, равным давлению продуктов детонации МЧЖ. При некоторой толщине слоя ударно-сжатого вещества срыв его самовоспламенения на границе раздела с продуктами детонации уже сдетонировавшей части преодолевается. В силу случайных причин это происходит не одновременно по всей указанной границе раздела, а в отдельных локальных местах. Локальные АТВ приводят к возникновению во фронте детонационных волн трехударных конфигураций, взаимодействие которых и определяет ячеистую структуру следовых отпечатков. Таким образом, вопреки общепринятым в настоящее время представлениям [1, 4, 21], согласно которым пуль-

сирующий фронт рассматривается как пульсации давления химика одномерной детонации ГЗНД [13–16] и тем самым пульсирующая детонация видится всего лишь как некое возмущение модели детонации ГЗНД, на самом деле локальные АТВ, определяющие пульсации детонационного фронта, возникают в слое ударно-сжатого вещества во фронте волны с давлением МЧЖ, а не химика.

- Показано, что двухуровневая ячеистая структура для случая двуступенчатой кинетики химической реакции газовой смеси реализуется по вышеизложенному механизму. При инициировании детонации, во время перехода пересжатой детонации в нормальный режим, появляются пульсации детонационного фронта. Оба типа пульсаций, обусловленные реакциями с малым и большим периодами индукции, будучи очень мелкими при возникновении, увеличиваются по мере перехода пересжатой детонационной волны в нормальный режим МЧЖ. При этом, когда размер пульсаций, обусловленных реакцией с большим периодом индукции, станет заметно больше размера пульсаций, обусловленных реакцией с меньшим периодом индукции (а также, естественно, во фронте стационарной детонации), дальнейшая судьба последних будет определяться взаимодействием ТУК₂ на детонационном фронте, создаваемых локальными АТВ₂, вызванными реакцией с большим периодом индукции. Столкновения ТУК₂ приводят к появлению на фронте волны областей повышенных давлений (расходящихся затухающих локальных детонаций). При затухании локальных расходящихся детонаций в их фронте появляются пульсации, обусловленные реакцией с меньшим периодом индукции. При этом, естественно, размер пульсаций увеличивается по мере падения давления в локальных детонациях (по длине ячеек, обусловленных реакцией с большим периодом индукции).

- Показано, что двумерные ячеистые структуры могут возникать и в случае одностадийной химической реакции, если выделение энергии газовой смеси становится также двухступенчатым. Такое возможно в случае, когда поперечные волны ТУК₁, возникающие при АТВ₁ во фронте локальных расходящихся детонационных волн, создаваемых столкновением основных ТУК₂, не являются детонационными. В этом случае смесь, проходящая без химических изменений через прямые участки

ТУК₁, воспламеняется позднее с образованием ТУК₂, взаимодействие которых обуславливает образование основных ячеистых структур.

Автор выражает искреннюю благодарность проф. Н.-Н. Presles (Франция) за предоставление снимка двумерной ячеистой структуры и разрешение опубликовать его в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамическое горение. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Войцеховский В. В., Митрофанов В. В., Топчян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Дремин А. Н., Саров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. Щелкин К. И. Два типа неустойчивого горения // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 600–606.
5. Манжалей В. И. О тонкой структуре переднего фронта газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 470–473.
6. Субботин В. А. Два типа структуры поперечных волн в многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 1. С. 96–102.
7. Presles H. N., Desbordes D., Guirard M., Guirard C. Gaseous nitromethane and nitromethane-oxygen mixture, a new detonation structure // Shock Waves. 1996. V. 6. P. 111–114.
8. Joubert F., Desbordes D., Presles H. N. Structure cellulaire de la detonation des melanges H₂—NO₂/N₂O₄ // Comptes Rendus Acad. Sci. Ser. Mechanique. 2003. V. 331. P. 365–372.
9. Presles H. N., Desbordes D. Non-ideal behaviour of multi-headed self-sustained gaseous detonation // Intern. Conf. on Combustion and Detonation: Zel'dovich Memorial II. Progress in Combustion and Detonation. Moscow, 2004 Aug. 30–Sept. 3. P. 309–310.
10. Guilly V., Khasainov B., Presles H. N., Desbordes D. Simulation numeriquel des detonations a double structure cellule // Comptes Rendus Acad. Sci. Ser. Mechanique. 2006. V. 334. P. 679–685.
11. Васильев А. А., Молетотов А. А., Троцюк А. В. О двухразмерной ячеистой структуре газовой детонации // XIII Симпозиум по горению и взрыву: Тез. докл. Черноголовка, 2005. С. 130; см. также CD: XIII Симпозиум по горению и взрыву. Черноголовка, 2005.
12. Vasil'ev A. A., Trotsyuk A. V. Multi-scaled cellular structure of gaseous detonation // Book of Abstr. of 5th Intern. Seminar on Flame Structure — 5 ISFS. Novosibirsk, Russia, July 11–14 2005. P. 82; See also CD ISBN 5-98901-004-4 «ISFS Proceedings of the 5th Intern. Seminar on Flame Structure» / O. Korobeinichev (Ed.). Parallel Ltd., Novosibirsk-2005, ОР-08.
13. Гриб А. А. Гидродинамическая теория взрывных волн // Прикладная механика и математика. 1944. Т. 8, № 4. С. 273.
14. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газовых системах // ЖЭТФ. 1940. Т. 10, № 5. С. 542–568.
15. Von Neumann J. Theory of detonation waves (OD-02) // Technical Report, National Defense Research Committee of the Office of Scientific Research and Development. 1942. Division B. Section B-1. Serial N 238.
16. Döring W. Über der Detonation verging in Gasen // Ann. Phys. 1943. Bd 43, N 5. S. 421–436.
17. Mikhel'son V. A. Über die normale Entzündungsgeschwindigkeit explosiver Gazgemische // Ann. der Physik und Chemie. 1889. Bd 37, N 5. S. 1–24.
18. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения взрывчатых газовых смесей // Научные труды Императорского Московского университета по математике и физике. 1893. Т. 10. С. 1–93.
19. Chapman D. L. On the rate of explosions in gases // Phil. Mag. 1899. V. 47. P. 90–104.
20. Jouguet E. On the propagation of chemical reaction in gases // J. Appl. 1905. V. 7. P. 347–425; 1906. V. 2. P. 5–86.
21. Щелкин К. И. Детонация. М.: Наука, 1968.
22. Dremin A. N. Toward Detonation Theory. N. Y.: Springer, 1999.
23. Dremin A. N. On the limit of detonation on concentration of liquid explosives' mixtures with nonexplosive diluents // Proc. of the 13th Detonation Sympos. (Intern.). Norfolk, Verginia, USA, July 23–28 2006. P. 720–724.
24. Chaiken R. F. Comments of hypervelocity wave phenomena in condensed Explosives // J. Chem. Phys. 1960. V. 33. P. 760–768.
25. Дремин А. Н. Пульсирующий детонационный фронт // ПМТФ. 1983. № 4. С. 159–169.
26. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.

Поступила в редакцию 4/IX 2007 г.