

А. А. Васильев

ОКОЛОПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ С ПОРИСТЫМИ СТЕНКАМИ

Исследовано распространение детонации в каналах со стенками из материалов с различным акустическим сопротивлением в диапазоне его 4000-кратного изменения. В области околокритических режимов установлено заметное ослабление детонационной волны. Определены оптимальные для гашения околопредельной детонации размеры пористых материалов.

Пределы стационарного распространения детонационной волны (ДВ) традиционно связываются с конечной величиной допустимых потерь энергии и импульса из зоны химической реакции. Потери обусловлены комплексным воздействием на ДВ как внешних факторов — трение о стенки канала, образование погранслоя, теплопроводность и т. д., так и внутренних — недовыделение химического тепла, автотурбулизация потока и т. д. Степень влияния конкретных механизмов потерь определяется амплитудой и временными характеристиками воздействия: скоростью нарастания и продолжительностью. С этой точки зрения трение и теплопроводность следует отнести к медленно действующим на ДВ процессам.

В свою очередь, поперечные волны (ПВ), как основной элемент пульсирующей структуры многофронтной газовой детонации, из-за высокой скорости распространения являются максимально быстрыми передатчиками воздействия и именно на фронт ДВ, поэтому ослабление ПВ может занять равноправную роль среди традиционных механизмов потерь. Это особенно важно в околопредельных условиях, когда ДВ представляет собой неоднородную структуру с малым количеством ПВ и высоким уровнем пространственной неоднородности параметров, максимум которой приходится на предельные режимы детонации с единственной ПВ на фронте: спиновый для круглой трубы или marginal для прямоугольного канала. Напомним, что средняя скорость ПВ по фронту $\approx 0,6\bar{D}$, где $\bar{D} \approx \text{const}$ — усредненная по периоду пульсации скорость распространения ДВ вдоль канала. В течение пульсации участки фронта ДВ движутся в нестационарном режиме, скорость отдельного элемента меняется в диапазоне примерно $(e^{1/2} \div e^{-1/2}) \bar{D}$. Интегральное влияние на ДВ большинства «медленных» процессов достаточно подробно проанализировано многими исследователями (см., например, [1—3] и библиографию в них).

Достаточно подробно исследована также роль ПВ в распространении околопредельной детонации на примере дифракции ДВ на выпуклом угле: постепенное исчезновение ПВ с фронта детонации и отсутствие реиницирующих центров приводят к затуханию ДВ (обзор многочисленных работ по дифракции ДВ можно найти, например, в [4]).

Вывод об исключительной роли ПВ в распространении околопредельной ДВ продемонстрирован в [5]: самоподдерживающаяся в гладкой трубе ДВ затухала при переходе в секцию того же диаметра, на внутренней поверхности которой располагалась свернутая в многослойный рулон металлическая сетка (скорость волны на длине примерно трех диаметров падала от детонационной D до $(0,4 \div 0,6) D$). По оценкам авторов [5], традиционные потери энергии и импульса в секции с металлической сеткой были незначительны, поэтому срыв ДВ объяснялся новым эффектом — «акустической абсорбцией» сеткой поперечных волн ДВ. К сожалению, авторы [5], введя термин «acoustic absorbing walls», не расшифровали суть физического механизма поглощения ПВ металлической сеткой, его новизну и универсальность.

Можно предположить, что за этим термином скрывается уже известный механизм поглощения волн пористой средой, когда ПВ, свободно проникая

сквозь сеточные ячейки, «запутываются» и разрушаются на многослойном сеточном каркасе и не возвращаются к фронту детонации (либо сильно запаздывают в его поддержке), что и приводит к разрушению ДВ. Восстановление детонации в этом случае может произойти за счет реинициирования непрореагировавшей смеси при взаимодействии ее с сеточной структурой (как микропрепятствиями) и последующего быстрого перехода от многоочагового периферийного воспламенения к детонационному режиму. Если условия эксперимента не оптимальны для перехода горения в детонацию (ПГД), то микроочаги воспламенения сливаясь формируют лишь фронт высокоскоростного турбулентного горения. В такой трактовке секция с многослойной сеткой эквивалентна перфорированному каналу.

Отсутствие в [5] расшифровки механизма «акустической абсорбции» вызывает определенные сомнения в корректности его использования для объяснения затухания ДВ в случае, когда многослойная сетка заменяется на однослойную, поскольку последняя представляет собой скорее шероховатую поверхность, нежели пористый слой. Каков механизм поглощения ПВ однослойным покрытием? Почему воздействие «акустической абсорбции» носит не монотонный, а ступенчатый характер (резкая граница смены режима детонации на высокоскоростное горение)? Почему периодическая сеточная структура вызывает «акустическую абсорбцию» ПВ, а не менее периодическая структура в виде спирали Щелкина поглощения ПВ и затухания ДВ не дает? Следует признать, что выдвигаемая в [5] гипотеза об «акустической абсорбции» ПВ требует четкой трактовки и дальнейшего углубления применительно к наблюдаемым явлениям.

Особая роль ПВ в распространении детонации заставляет рассматривать любые «новые» механизмы ослабления поперечных волн (и фронта детонации в целом) и анализировать их воздействия, сколь малыми бы они ни казались. Одним из таких механизмов ослабления ПВ в каналах постоянного сечения может служить неупругое соударение ПВ с боковыми стенками канала. При идеально упругом соударении (условие остановки потока на стенке при нормальном падении волны) вся энергия остается в газе, происходит лишь ее преобразование из кинетической формы в тепловую. При неупругом соударении часть энергии передается стенке главным образом в виде деформационной энергии стенки, вследствие чего уменьшается амплитуда отраженной волны. Количественной характеристикой неидеальности служит коэффициент отражения η , наиболее просто определяемый лишь для случая малых амплитуд (акустическое приближение [6, 7]):

$$\eta = (\mathcal{R}_1 - \mathcal{R}_2) / (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2),$$

где \mathcal{R} — акустический импеданс, равный произведению плотности среды ρ и скорости звука c . Для ударных и, тем более, детонационных волн η зависит не столько от соотношения \mathcal{R} соприкасающихся сред, сколько от амплитуды падающей волны. Отражение УВ — одна из классических задач о распаде произвольного разрыва, наглядно решаемых с помощью метода (p, u) -диаграмм [6].

Акустический импеданс газовых смесей и их продуктов для типичных условий эксперимента (стенки из металла или стекла и далеких от предельных режимов распространения) оказывается значительно более низким: $\mathcal{R}_1 \ll \mathcal{R}_2$, потому $\eta \approx -1$. Логически правилен потому общепринятый вывод о слабом влиянии акустических свойств стенок при прямом их воздействии на многофронтную детонацию; влияние на ДВ проявляется опосредованно через продукты детонации совместно с другими медленными процессами воздействия (трение, теплоотвод в стенки и т. д.).

Тем не менее простой перенос подобного вывода на окологривические условия эксперимента не кажется столь очевидным по нескольким причинам. Во-первых, в газовой детонационной волне амплитуда ПВ существенно выше акустической, именно за ПВ существуют локальные области, где параметры газа многократно превышают усредненные величины. Например, при нормальном отражении идеальной ДВ в смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$ \mathcal{R} газа увеличивается примерно в 150 раз: при $p_0 = 1$ атм $\mathcal{R} = 6 \cdot 10^4$ кг/(м²·с). При соударении ПВ

детонационная волна пересжата, и тогда эта величина еще может возрасти в несколько раз и стать соизмеримой с \mathcal{R} стенок (10^6 кг/(м²·с)). Во-вторых, при приближении к пределам заметно укрупняются основные элементы структуры ДВ и их интенсивность и, как следствие, увеличиваются время воздействия ПВ на стенки и обратное влияние стенок на зону реакции и фронт детонации. В-третьих, на параметры отражения существенно влияет характер протекания химической реакции за фронтом падающей и отраженной волн: отличие в амплитуде отраженной волны может составлять не проценты, а десятки раз [8].

В экспериментах, как правило, трудно обеспечить какой-то один механизм потерь, исключив при этом остальные. Это, с одной стороны, предъявляет повышенные требования к условиям проведения экспериментов по воздействию на ДВ, особенно если такое воздействие мало, а с другой — создает трудности в интерпретации результатов в силу комплексности воздействия на изучаемый объект.

В первой серии экспериментов данной работы проверена чувствительность околопредельной ДВ, когда воздействие на ПВ оказывается за счет изменения материала стенок. Слабость подобного воздействия потребовала особой тщательности при подготовке и проведении таких исследований. Для уменьшения количества экспериментов и связанной с этим статистической ошибки взрывная камера выполнена многоканальной: 5 соосных каналов сечением 4×4 мм (длина $L = 400$ мм) фрезеровались с чистотой $\nabla 6$ в предварительно собранном пакете пластин сечением 20×20 мм из материалов с различными \mathcal{R} (сталь, бронза, дюраль, оргстекло, эбонит; $\mathcal{R} = (39,9 \div 1,8) \cdot 10^6$ кг/(м²·с), т. е. примерно 20-кратное различие). Одинаковостью сечения и чистоты обработки каналов ставилась цель добиться равенства потерь, обусловленных трением, пограничным слоем и т. д. Входы каналов соединялись с секцией инициирования через генератор плоской волны, обеспечивающий одинаковые условия на входе. Инициирование осуществлялось разрядом конденсатора с энергией $CU^2/2 \approx 40$ Дж на межэлектродный промежуток ~ 1 мм. Использовались смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$, $C_2H_2 + 2,5O_2 + 10,5Ag$, $2H_2 + O_2$. Перед каждым напуском камера предварительно вакуумировалась. Фотосъемка процессов в каналах осуществлялась барабанным фоторегистратором через оптическое стекло, которое одновременно было общей стенкой всех каналов. Эксперименты проводились при различных начальных давлениях смеси p_0 .

Исследования показали, что вдали от предельного давления (режим многофронтной детонации) какого-либо заметного воздействия на ДВ не наблюдается. При уменьшении p_0 и приближении к пределу возникают некоторые различия в поведении ДВ, проявляющиеся в основном через скорость детонации и размер ячейки для данного канала, но эти отклонения не превышают статистического разброса. В этом смысле многофронтная ДВ не чувствительна к материалу стенок окружающего канала. И лишь в узкой области давлений вблизи предела при одинаковом давлении смеси в одинаковых по размеру каналах детонационная волна ведет себя заметно по-разному.

На рис. 1 приведена фоторазвертка самосвечения наблюдаемых режимов распространения, условия соответствуют *marginal* — режиму в стальном канале. Оказывается, что при данном p_0 детонация фиксируется лишь в отдельных каналах, в остальных наблюдается срыв ДВ и переход к режиму турбулентного горения со скоростью $\sim 0,5D$. Параметрами корреляции в данном случае (постоянство давления и состава смеси, одинаковость размера каналов, равенство потерь на трение) могут выступать акустический импеданс и теплопроводность стенок.

Анализ результатов показывают, что эффекты ослабления и гашения ДВ коррелируют с величиной \mathcal{R} , теплопроводность давала бы противоположный эффект. Таким образом, данные эксперименты указывают на чрезвычайно высокую чувствительность поперечных волн, а через них и детонационной волны в целом, к столь малым, как изменение \mathcal{R} воздействиям. Еще раз



Рис. 1

подчеркнем, что этот вывод характерен лишь для околопредельных (marginal) режимов распространения детонации.

Идеальное гашение слабой УВ при отражении ($\eta = 0$ при равенстве акустических импедансов сред) для газовых взрывчатых смесей представляет труд-

нореализуемую задачу. Уменьшение η по сравнению с единицей для ударных и детонационных волн может быть достигнуто по аналогии с акустическими волнами за счет дальнейшего снижения \mathcal{R} стенок и сближения с величиной ρc газовых смесей ($\sim 10^3 - 10^4$ кг/(м²·с)). Для этого можно использовать покрытия из материалов с низким значением акустического импеданса. Наиболее доступны для этой цели пористые материалы, в которых \mathcal{R} снижается за счет как плотности, так и скорости звука. Вновь следует подчеркнуть, что однозначно связать эффект ослабления ПВ только с влиянием акустических свойств стенки по крайней мере было бы некорректно. Безусловно, пористый характер материала меняет не только \mathcal{R} , но и коэффициенты сопротивления, теплопередачи, прочностные и деформационные характеристики и т. д., и в данном случае эффект проявляется в результате совместного воздействия всех факторов. Ослабление ПВ при быстром взаимодействии их с пористыми стенками дополняется продолжительным возмущением фронта ДВ, связанным со взаимодействием стенок и продуктов детонации. Неочевидность слабого влияния акустических свойств стенки можно опосредованно подтвердить экспериментами [9], где обнаружено заметное отличие амплитуды отраженной УВ при замене материала отражающей поверхности (на примере металла и пенополиуретана).

Во второй серии опытов исследования проводились по схеме рис. 2. Взрывная камера создавалась между стеклом 1 и шлифованной стальной пластиной 5, удаленными на 4 мм (для сравнения с предыдущими результатами) друг от друга. В пространстве между стеклом и пластиной с помощью стальных шлифованных линеек 2 толщиной 4 мм формировалась система соосных прямолинейных каналов 4 различной ширины. К боковым стенкам линеек приклеивались полоски 3 материалов с низким ρc . Использовались вакуумная резина ($\mathcal{R} \approx 2 \cdot 10^5$), войлок и синтепон ($\mathcal{R} \approx (2 + 6) \cdot 10^4$), мелкоячеистый поролон ($\mathcal{R} \approx 10^4$ кг/(м²·с)), что уже вполне сравнимо с \mathcal{R} газовой смеси во фронте ДВ). Полоски нарезались из листового материала толщиной 4 мм электроножом, плоскопараллельность обеспечивалась на уровне не хуже $\pm 0,1$ мм. Длина каналов 4—400, ширина 4, 6, 8 и 12 мм.

Поскольку табличные данные \mathcal{R} для используемых веществ автору не известны, то для оценки скорости звука в данной работе использовалась следующая методика: плоский лист пористого материала толщиной δ закреплялся в поле шлирен-системы совместно с точечным разрядником, удаленным от листа на некоторое расстояние. При слабом электроразряде в воздухе образовалась сферическая УВ, которая быстро трансформировалась в акустическую. После падения на пористый материал и прохождения по всей его толщине волна вновь выходила в воздух. По теневым фоторазверткам определялось время t_0 прохождения волны по материалу и оценивалась скорость звука $c = \delta/t_0$. Остальные размеры листа (не δ) выбирались достаточно большими, чтобы заметно разделить прошедшую сквозь пористый образец волну сжатия и УВ, огибавшую образец с краев.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов для каналов 4×8 мм для смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$ (а), $2H_2 + O_2$ (б). Линия 1 соответствует нижнему пределу распространения ДВ в данном канале (стенки с $\mathcal{R} = \infty$), определяемому выражением [10]:

$$l \geq a(n + 1)/2\pi,$$

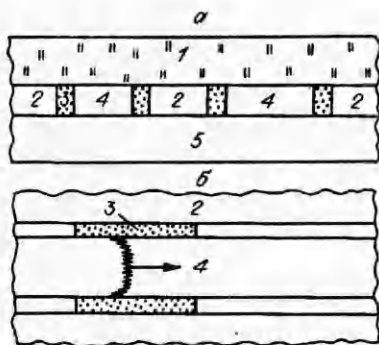


Рис. 2.

где $n = l/\delta$ — соотношение ширины и глубины прямоугольного канала; a — размер ячейки. Линия II характеризует верхнюю границу влияния геометрии канала на распространение ДВ (определяется критической шириной l_{**} выхода детонации из узкого канала в широкий; при $l = 4$ мм экспериментальные точки помечены цифрой 4). Между I и II расположена область околокритических режимов детонации. Линия III — зависимость размера ячейки $a(p_0)$ для данной смеси (измерения при условиях, далеких от околопредельных); I — вакуумная резина; 2 — войлок; 3 — синтепон; c, d — области горения и детонации соответственно. Эксперименты показывают, что наибольшим эффектом в гашении ПВ обладают материалы с пористой структурой — поролон, войлок, синтепон. По-существу, пористые материалы увеличивают нижнюю границу предельного давления детонации (линия I), сдвигая ее вплотную к верхней границе, характеризующейся тем, что стенки канала перестают влиять на распространение ДВ (см. рис. 3, II). Подобное поведение характерно и для резины, но выражено не столь эффективно; из-за отсутствия пор воздействие резины на ДВ проявляется через ослабление ПВ при отражении и последующее трение продуктов.

С этой же точки зрения может быть объяснен обнаруженный ранее автором результат при исследованиях концентрационных пределов детонации топливно-воздушных смесей. В ацетилено-воздушной смеси с удалением от стехиометрического состава к богатому пределу в продуктах детонации увеличивается выход сажи. При коэффициенте стехиометрии $\varphi = 2,6$ на стенках детонационной трубы диаметром 100 мм после прохождения ДВ образуется однородный сажевый слой толщиной ~ 3 мм. Повторный опыт для этого же состава приводил к срыву детонации. И только после очистки стенок детонационной трубы от сажевого слоя вновь формировалась нормальная ДВ. Аналогичный эффект наблюдался и при $\varphi = 3$. Объяснение и здесь может заключаться в легкой деформируемости сажевого слоя и эффективном поглощении ПВ, подобно поглощению УВ в пенополиуретане [9]. Такой высокопористый сажевый слой характеризуется, естественно, низким акустическим сопротивлением. Возможно, что толстослойное сажевое покрытие оказывает также негативное воздействие на протекание химической реакции в ДВ подобно пылевым ингибиторам.

Ослабление ПВ пористыми стенками может найти практическое применение для уменьшения опасности взрыва на различного рода трубопроводах при возникновении аварийных ситуаций. Пористые стенки по сути являются ловушками детонации для околопредельной области. С целью оптимизации габаритов ловушек проведена дополнительная серия экспериментов по схеме рис. 2, б. Пористый материал крепился не вдоль всей длины канала, а лишь на небольшом участке длиной x . Исследовалась способность ДВ к восстановлению после прохождения ее через такой участок.

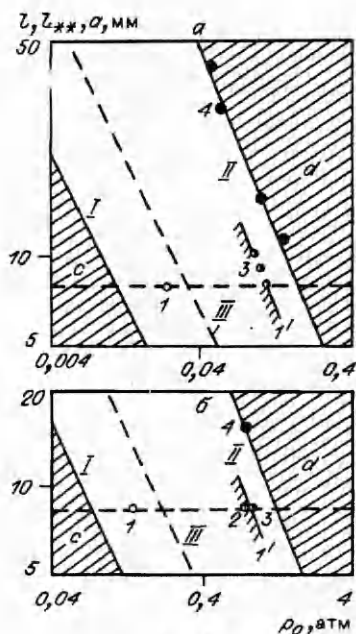


Рис. 3.

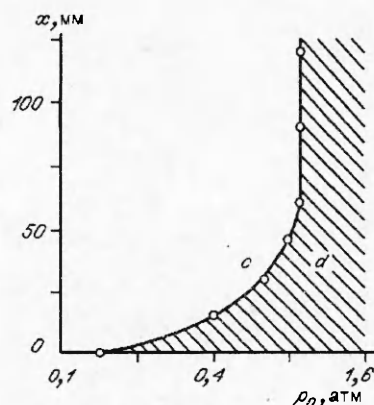


Рис. 4.

Результаты исследований для $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ и войлочного покрытия представлены на рис. 4. Видно, что при фиксированном давлении смеси вероятность восстановления ДВ после прохождения пористого участка уменьшается с увеличением x . Линия на графике проведена по критическим величинам x^* , разделяющим области затухания (выше линии) и восстановления ДВ после прохождения через пористый участок. С увеличением p_0 значение x^* возрастает вплоть до $x^* \approx 15\delta$. Другими словами, ловушка из пористого материала длиной ~ 15 калибров эффективно гасит ДВ в области околоритических режимов распространения. При приближении к околоритическим условиям

протяженность пористой ловушки может быть уменьшена. Аналогичные результаты получены и для смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$.

Таким образом, ослабление поперечных волн при их соударениях с пористыми и акустически слабыми стенками канала оказывает наиболее быстрое влияние на поведение ДВ в целом. Наибольший эффект в затухании ДВ наблюдается в области околоритических режимов. Использование пористых материалов с низким акустическим импедансом позволяет заметно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и тем самым понизить порог взрывоопасности газовых смесей при их технологическом использовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. — М.: Гостехиздат, 1955.
2. Bazhenova T. V., Brossard J. et. al. Influence of the nature on confinement on gaseous detonation // «Gasdynamics of detonation and explosions» edited by Bowen, Manson, Oppenheim and Soloukhin, v. 75 of «Progress in Astronautics and Aeronautics». — N. Y., 1981. — P. 87—107.
3. Gelfand V. E., Frolov S. M., Nettleton M. A. Gaseous detonations — a selective review // Prog. Energy Combust. Science. — 1991. — 17. — P. 327—371.
4. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е. Детонационные волны в газах // ФГВ. — 1987. — 23, № 5. — С. 109—131.
5. Dupre G. et. al. Propagation of detonation waves in an acoustic absorbing walled tube // «Dynamics of Explosion» edited by Kuhl, Bowen, Leyer and Borisov, v. 114 of «Progress in Astronautics and Aeronautics». — Washington. — 1988. — P. 248—263.
6. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. — М.: Наука, 1981.
7. Крауфорд Ф. Волны. — М.: Наука, 1984.
8. Николаев Ю. А., Топчийн М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // ФГВ. — 1977. — 13, № 3. — С. 393—404.
9. Гельфанд Б. Е. и др. Исследование особенностей распространения и отражения волн давления в пористой среде // ПМТФ. — 1975. — № 6. — С. 74—77.
10. Vasiljev A. A. The limits of stationary propagation of gaseous detonation // «Dynamic structure of detonation in gaseous and dispersed media» edited by Borisov, v. 5 of «Fluid mechanics and its applications». — Dordrecht — Boston — London: Kluwer Academic Publishers, 1991.

630090, г. Новосибирск,
Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН

Поступила в редакцию 21/X 1992,
после доработки — 17/V 1993