

# ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ И ВИБРАЦИЙ КАМЕРЫ НЕПРЕРЫВНОГО СПИНОВОГО ДЕТОНАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников, С. В. Полозов\*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovs@hydro.nsc.ru

\*Институт геофизики СО РАН, 630090 Новосибирск

Измерены уровни вибраций стенки детонационной камеры кольцевой цилиндрической геометрии проточного типа в области вращения детонационной волны и шумов на расстоянии 1 м. Выяснено, что при непрерывной спиновой детонации смеси водород — воздух они не превышают значений, присущих обычному турбулентному сжиганию в этой камере тех же расходов топлива.

Ключевые слова: камера сгорания, топливо, детонация, горение, шум, вибрация.

## ВВЕДЕНИЕ

Определение уровня вибраций конструкции детонационной камеры и уровня шумов в ее окрестности имеет принципиальное значение при практическом использовании детонационного горения в двигателях и энергетических установках. Вибрации конструкции определяют массу и ресурс двигателя, а шумы — его экологическую безопасность.

Существует мнение, что детонационное горение, сопровождающееся повышенным давлением в волнах детонации, влечет за собой повышенную вибрацию стенок камеры и увеличение шума в ее окрестности. При сжигании топлива в продольных пульсирующих детонационных волнах это предположение оправдывается [1]. Проведенное нами детальное изучение процесса непрерывного детонационного спинового сжигания топлива позволяет устранить эти опасения.

Целью исследования было сопоставление интенсивностей вибраций камеры и шума в ее окрестности при непрерывном спиновом детонационном и обычном турбулентном горении.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КАМЕРА

Камера представляла собой кольцевой цилиндрический канал с наружным диаметром  $d_c = 30.6$  см, длиной  $L_c = 66.5$  см и шириной  $\Delta = 2.3$  см (рис. 1). В ряде опытов по

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00298) и фонда Президента РФ (НИИ 2073.2003.1).

всей длине кольцевого канала устанавливались четыре радиальные перегородки, делящие его на четыре равные части. В нескольких опытах выходное сечение канала дополнительно поджималось до величины  $\delta^1 = 10$  мм (см. рис. 1). Толщина боковых стенок камеры была 1 см, а закрытый торец представлял собой массивную конструкцию с расположенными внутри кольцевыми коллекторами воздуха и водорода. Камера сгорания со стороны выходной части жестко крепилась к емкости для сброса продуктов (бочке) объемом  $60 \text{ м}^3$ .

В качестве топливных компонентов использовались воздух и водород. Газы подавались в соответствующие коллекторы из ресиверов объемом  $79.8$  л для воздуха и  $13.3$  л для водорода через быстродействующие клапаны с электрическим управлением. Воздух поступал в камеру из кольцевого коллектора с осевым сечением  $29.6 \text{ см}^2$  через кольцевую щель шириной  $\delta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.6$  или  $1.0$  см, а горючее (водород) — через форсунку с равномер-

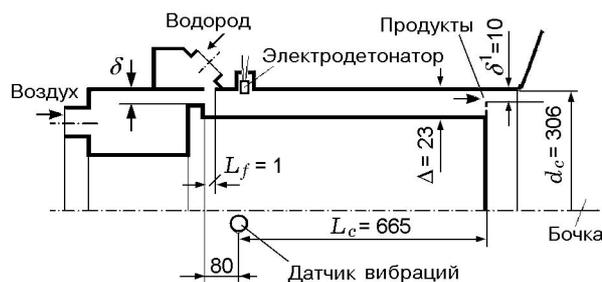


Рис. 1. Схема камеры сгорания

но расположенными по окружности камеры попарно встречными каналами общей площадью сечения  $S_{\delta f} = 2.0$  или  $0.4 \text{ см}^2$  на расстоянии  $L_f = 0.1 \text{ см}$  вниз по потоку от щели подачи воздуха под углом  $45^\circ$ . В смеси, образующейся в камере, электродетонатором с массой взрывчатых веществ  $\approx 0.2 \text{ г}$  инициировалась непрерывная спиновая детонация с поперечными детонационными волнами (ПДВ) или турбулентное горение. Длительность процесса задавалась системой управления в диапазоне  $0.35 \div 0.4 \text{ с}$ . Продукты реакции вытекали в бочку, воздух в которой находился при атмосферном давлении.

Расходы газовых топливных компонентов в течение эксперимента определялись по методике, изложенной в работе [2]. Начальный расход воздуха варьировался в пределах  $G_{A0} = 3.87 \div 2.12 \text{ кг/с}$ , водорода —  $G_{f0} = 0.29 \div 0.07 \text{ кг/с}$ , а коэффициент избытка горючего — в диапазоне  $\phi_0 = 3.34 \div 1.45$ . В течение эксперимента текущие значения этих параметров уменьшались: расход воздуха  $G_A$  — в  $2 \div 2.5$  раза, расход водорода  $G_f$  — в  $3.7 \div 8.4$  раза, значение  $\phi$  — в  $1.54 \div 4.65$  раза. Большие изменения  $G_f$  и  $\phi$  соответствовали истечению водорода из форсунки с площадью сечения  $S_{\delta f} = 2.0 \text{ см}^2$ . Расход воздуха определялся сечением подводящего трубопровода и при одном том же давлении в ресивере был одинаковым при всех значениях  $\delta$ .

## 2. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Для выполнения поставленной задачи использовался прибор «Измеритель шума и вибрации ВШВ-003», соответствующий классу 1 точности по свободному полю и классу 2 точности по диффузионному полю по ГОСТ 17187-81 «Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний», классу 10 по ГОСТ 25865-83 «Средства измерений вибраций с пьезоэлектрическими виброизмерительными преобразователями. Основные параметры и технические требования».

Для регистрации виброускорения использовался входящий в комплект прибора вибропреобразователь ДН-4-М1, работающий в диапазоне частот  $10 \div 10\,000 \text{ Гц}$ , а для регистрации уровня шумов — также входящий в комплект прибора капсуль-микрофон М101, работающий в диапазоне частот  $10 \div 20\,000 \text{ Гц}$ . Вибропреобразователь устанавливался на наружной стенке камеры сгорания в  $8.0 \text{ см}$  от

кольцевой щели подачи воздуха в области распространения фронта ПДВ, а микрофон — на расстоянии  $1 \text{ м}$  от камеры в направлении, перпендикулярном ее оси (см. рис. 1). Поскольку прибор имел один входной канал, измерения вибраций и шумов выполнялись в разных опытах.

Перед опытами проводилась калибровка компьютерной системы измерения сигналами по частоте и амплитуде. Для этого использовался сигнал частотой  $1000 \text{ Гц}$  и напряжением  $50 \text{ мВ}$ , задаваемый калибратором, встроенным в прибор. Дополнительно производилась калибровка по амплитуде с помощью сирены, звуковые возмущения которой воспринимались микрофоном и фиксировались по индикатору данного прибора. При измерении виброускорений чувствительность канала возрастала в  $1.17$  раза.

Давление регистрировалось тензометрическими датчиками с чувствительным элементом, наклеенным на цилиндрическую или плоскую мембрану. Собственная частота колебаний мембраны была не ниже  $10 \text{ кГц}$ . Для предотвращения температурных воздействий во время измерений внутренняя поверхность корпуса датчика заполнялась водой или слоем солидола. Вследствие инерционности эти датчики позволяли измерять только средние давления в камере. Проводилась также одновременная динамическая тарировка датчиков путем резкой (в течение  $0.01 \text{ с}$ ) подачи давления воздуха. Такой способ тарировки давал возможность более надежно в процессе измерений выявлять соотношение давлений для разных участков камеры сгорания и системы подачи.

Весь процесс фотографировался через продольные окна в камере на пленку фоторегистратора с падающим барабаном [3] методом компенсации скорости, когда скорости пленки и изображения волны совпадали по направлению и были близки по величине. В этом случае структура волн и течение в их окрестности соответствовали течению в системе волн. Для подсветки структуры волн и продуктов детонации напротив окна в начале камеры впрыскивалась струйка ацетиленового газа и коаксиально с ней струйка кислорода. Кроме этого, свечение в первом окне камеры регистрировалось с помощью фотодатчика. Скорости детонационных волн определялись по фоторегистрограммам с помощью методики, изложенной в работе [4], и сверялись со скоростями, вычисленными по

сигналам фотодатчика.

Компьютерная система регистрировала сигналы с датчиков шума или вибрации, фотодатчика, а также давление газов в ресиверах, коллекторах и камере. Частота дискретизации сигналов компьютерной системой с датчиков шума, вибрации и фотодатчика составляла 160 кГц, а с датчиков давления — 0.625 кГц. Для анализа частот шумов и вибраций была разработана компьютерная программа по разложению сигналов в ряд Фурье, которая апробировалась калиброванными по частоте сигналами.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Место установки микрофона выбирали произвольно, исходя из предположения, что в направлении, перпендикулярном оси камеры, распространяются максимальные звуковые возмущения. Полную информацию о шумовом поле может дать только построение диаграмм направленности как для режима детонации, так и для горения и их сопоставление, что является трудоемкой задачей, требующей большого количества опытов при определенных стандартных условиях измерений [5]. Поэтому наши исследования шумов, сопровождающих детонацию и горение, несут некоторый оценочный характер. Выбор места установки вибродатчика достаточно обоснован: он установлен в месте максимальных нагрузок, вызванных воздействием области повышенного давления во фронте вращающейся детонационной волны.

Сравнение уровней вибраций камеры и шума в ее окрестности при непрерывном спиновом детонационном и обычном турбулентном горении проводилось при одних и тех же расходах топливных компонентов и их соотношениях. Для того чтобы исключить спиновую детонацию и осуществить режим турбулентного горения топлива, кольцевой канал камеры сгорания перегораживался четырьмя радиальными перегородками, а в некоторых случаях дополнительно заужался на выходе примерно вдвое. С целью определения влияния структуры и количества ПДВ на измеряемые величины варьировали ширину кольцевой щели подачи воздуха и площадь сечения форсунки горючего, значения которых приведены выше. Увеличение зазора  $\delta$  и размеров отверстий форсунки горючего приводило к более грубому смесеобразованию, следовательно, к увеличению кри-

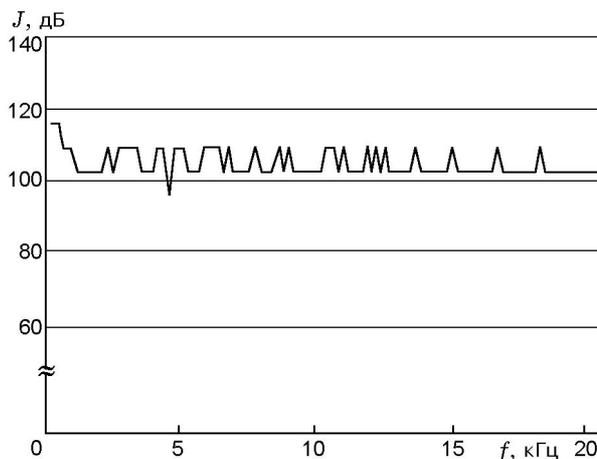


Рис. 2. Сплошной частотный спектр вибраций камеры и шумов в ее окрестности при непрерывной спиновой детонации и турбулентном горении (один из фрагментов)

тической для детонации ширины слоя смеси  $h_*$  и уменьшению числа ПДВ [4]. Для более полного сжигания топлива в режиме дефлаграции использовалась щель шириной  $\delta = 0.2$  см, что обеспечивало в режиме детонации реализацию наиболее стабильных ПДВ [6]. Часто при более грубом перемешивании топливных компонентов (особенно при использовании форсунки горючего площадью  $S_{\delta f} = 2.0$  см<sup>2</sup> и/или широкой щели подачи воздуха) в конце эксперимента не выполнялись условия для детонации по критической ширине слоя  $h_*$ . В результате происходил переход от детонации к дефлаграции, что позволяло более наглядно проводить соответствующие сравнения.

Применение преобразования Фурье к сигналам, записанным во всех опытах, как при детонации, так и при горении, фиксировало сплошной частотный спектр в течение всего процесса (рис. 2). Поэтому частотный анализ шума выполнялся по гармоникам, наиболее выделяющимся из общего фона.

#### 3.1. Исследование звуковых возмущений на расстоянии 1 м от камеры

##### Режим спиновой непрерывной детонации

Фрагмент типичной фоторегистрограммы непрерывного спинового детонационного режима сжигания смеси при  $\delta = 0.2$  см представлен

Рис. 3. Фоторегистрограммы (фрагменты) процессов сжигания топлива:

*a* — устойчивая непрерывная спиновая детонация, опыт № 2 в таблице, *b* — переход детонации в горение, опыт № 1 в таблице, *в* — горение в камере с перегородками, опыт № 3 в таблице, *г* — горение в камере с перегородками и добавочным сужением выходного сечения канала ( $P_c = (4.3 \div 2) \cdot 10^5$  Па)

Параметры	Номер опыта			
	1	2	3	4
	Дет. → горение	Детонация	Горение	Дет. → горение
$\delta$ , см	0.1	0.2	0.2	0.6
$\delta/\Delta$	0.043	0.087	0.087	0.26
$S_{\delta f}$ , см <sup>2</sup>	2	0.4	0.4	2
$G_A$ , кг/с	2.04 ÷ 1.95	2.61 ÷ 1.17	2.61 ÷ 1.17	1.78 ÷ 1.71
$G_f$ , кг/с	0.05 ÷ 0.045	0.15 ÷ 0.03	0.15 ÷ 0.03	0.0316 ÷ 0.027
$\phi$	0.85 ÷ 0.8	2 ÷ 0.89	2 ÷ 0.89	0.62 ÷ 0.55
$n$	1 → горение	3 → 1	—	1 → горение
$D$ , км/с	1.0 → горение	1.48 ÷ 1.13	—	1.0 → горение
$P_m$ , 10 <sup>5</sup> Па	9.2 ÷ 8.4	6 ÷ 2	6 ÷ 2	1.5
$P_c$ , 10 <sup>5</sup> Па	1.12 ÷ 1.06	1.8 ÷ 1.1	1.7 ÷ 1.14	1.2
$P_m/P_c$	8.2 ÷ 7.9	3.33 ÷ 1.82	3.53 ÷ 1.75	1.25

на рис. 3,а (1/8 часть фотопленки). ПДВ фиксировались по спиральной дорожке, образующейся в результате падения вращающегося барабана фоторегистратора. Структура ПДВ достаточно подробно описана в работе [6]. Данные по этому опыту (№ 2) за период существования детонации приведены в таблице, а изменение давления в камере  $P_c$  и коллекторе подачи воздуха  $P_m$  — на рис. 4. Режим интересен тем, что по мере уменьшения расхода топливной смеси изменялось количество ПДВ от  $n = 3$  до  $n = 1$ .

Зона повышенного давления за фронтом

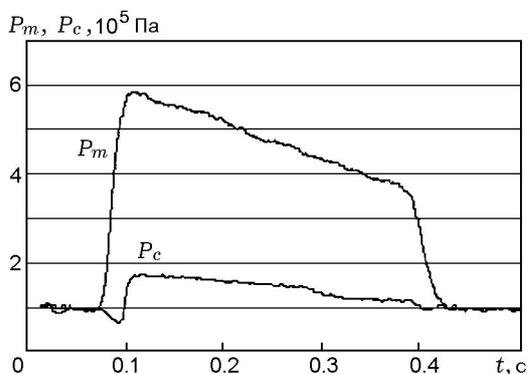


Рис. 4. Изменение давления в коллекторе воздуха и камере сгорания в течение эксперимента при непрерывной спиновой детонации ( $\delta = 0.2$  см)

детонационной волны занимает узкую область между волнами (не более 10 %). Перемещаясь по окружности, эта зона создает бегущую периодическую нагрузку на стенки камеры. Течение исходной смеси и продуктов происходит в основном в волнах разрежения, занимающих остальную (наибольшую) часть камеры и находящихся в большей части под давлением меньшим, чем среднее давление в камере [7].

На рис. 5,а приведен фрагмент звукового сигнала, соответствующий началу процесса и записанный с помощью микрофона на расстоянии 1 м от камеры. До момента инициирования детонации зафиксирован шум работающего фоторегистратора, находившегося на расстоянии  $\approx 2$  м от микрофона. Во время съемки в стационарном режиме работы (линейная скорость барабана 50 м/с) он создавал небольшой шум на уровне  $\approx 10$  дБ. После подачи напряжения на электромагнит клапана-тиратрона воздуха и выброса порции газа из-под поршня клапана в окружающую среду появляется первый пик шума. Через некоторое время, определяемое инерцией срабатывания клапана (около 0.01 с), возникает шум истекающего в камеру воздуха (до 20 дБ) и вслед за ним водорода (вместе 30 ÷ 40 дБ). Поступление в камеру водорода приводит к взрыву детонатора (70 дБ), в результате которого в камере реализуется детонация и развивается сопутствующее ей звуковое поле.

В процессе детонации можно выделить

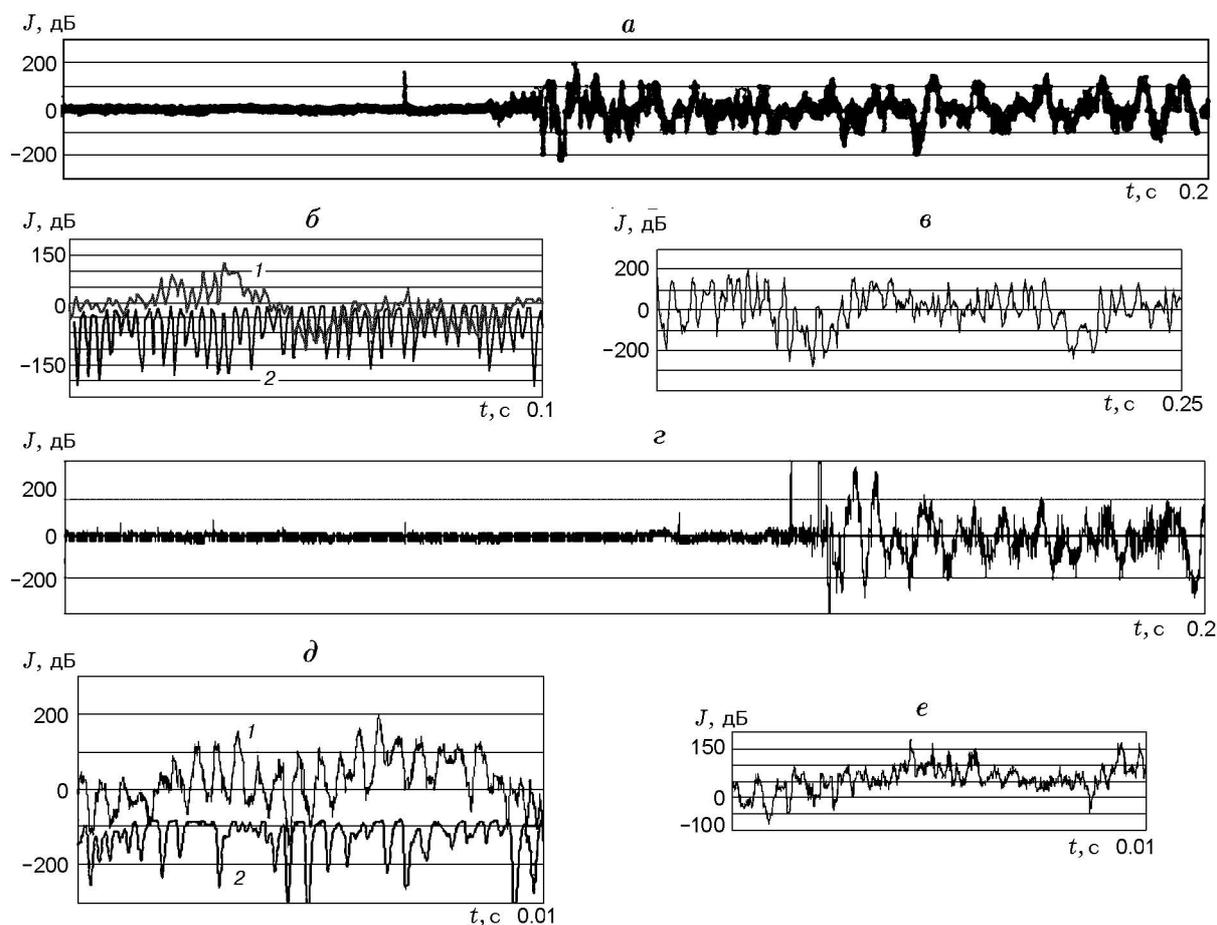


Рис. 5. Шумы (фрагменты) при непрерывной спиновой детонации (а–в) и турбулентном горении (г–е):

а — в течение первых 0.2 с после запуска системы регистрации, б — трехволновый режим, в — переход детонации в горение ( $n = 1 \rightarrow$  горение), г — в течение первых 0.2 с после запуска системы регистрации (камера с перегородками), д — растянутый по времени фрагмент для камеры с перегородками, е — камера с дополнительным сужением выходного сечения; 1 — шум, 2 — импульсы свечения

явно выраженную низкочастотную составляющую шума  $f \approx 100$  Гц и затухающую к концу процесса до 10 дБ. Начальные амплитуды этой волны лежат в области слабых ударных волн. Это следует из известного выражения, по которому определяется уровень звукового возмущения:  $J = 20 \log(P/P_{\text{отн}})$  [дБ], где  $P$  — звуковое давление,  $P_{\text{отн}} = 2 \cdot 10^{-5}$  Па — некоторое общепринятое стандартное значение давления, находящееся на пределе слышимости [8]. Возмущение, вызванное слабой ударной волной ( $2 \cdot 10^9$  Па), оценивается в 200 дБ. В самом начале процесса в результате взрыва накопившейся в бочке смеси за время между открытием клапанов и срабатыванием детонатора не исключено появление таких слабых ударных волн в области микрофона. Волны этой частоты со-

провожаются значительными областями разрежения, не превышающими порога слышимости. Эти звуковые колебания могут возникать в продуктах детонации, выбрасываемых в бочку, диаметр которой 3.5 м, длина 6 м. Скорость двойного пробега волны от торца до торца или боковых сторон бочки, оцениваемая по формуле  $v = 2L(d)f$ , составляет 1200 или 700 м/с. Ближе к реальной последнее значение, так как скорость продуктов детонации, перемешанных с находящимся в бочке воздухом, не может быть равной 1200 м/с. Возможны и продольные волны, вызванные торможением струи потока продуктов от противоположного конца бочки. Тогда в вышеприведенную формулу можно подставить величину одного пробега волны и получить реальные скорости продольных звуко-

вых волн. Не исключено, что в бочке могут поддерживаться как радиальные, так и продольные звуковые колебания, затухающие со временем до определенной величины. Во всех опытах не выявлено влияния рассмотренной составляющей шума на режим детонационного горения, в частности на структуру детонационной волны. По-видимому, она должна оказывать некоторое влияние на процесс в предельных режимах детонации при входе в канал скачка уплотнения, возникающего в результате торможения сверхзвукового потока продуктов за ПДВ при дозвуковом истечении продуктов из камеры [4]. Поэтому с точки зрения шумов, свойственных детонационному двигателю в стационарном режиме работы, эта низкочастотная составляющая шума интереса не представляет. Как мы покажем ниже, она свойственна и режиму обычного турбулентного горения после его инициирования.

Частота следующей по интенсивности составляющей шумов напрямую относится к детонационному режиму сжигания топлива и точно коррелирует с частотой прохождения волн против окна камеры, которая фиксируется как фоторегистратором (см. рис. 3,а), так и фотодатчиком (рис. 5,б). С начала процесса для трех ПДВ она меняется по мере их затухания от  $f \approx 5$  до 4.2 кГц (амплитуды  $100 \div 10$  дБ и менее). После перестройки процесса на двухволновой частота колебаний резко уменьшается до 3.3 кГц, а затем до 2.7 кГц (максимальные амплитуды увеличиваются до 120 дБ). Наконец, при одноволновом режиме происходит резкая смена частоты — до 1.6 кГц, которая снижается к концу процесса до 1.4 кГц. Максимальный уровень шума существенно возрастает — до 150 дБ, а минимальный остается примерно таким же, что и при трехволновом режиме. Причем с уменьшением числа волн протяженность областей с повышенными и пониженными амплитудами увеличивается. Окончание процесса сопровождается характерным свистом. По-видимому, это проявление свойства органов слуха выделять частоты в области 1 кГц. Отметим, что уровень шумов не меняется как в волне сжатия, так и в волне разрежения, несмотря на то, что звуковое давление по абсолютной величине изменяется на порядки.

Уровень шума меняется не только при смене числа волн, но и при их постоянном количестве, напоминая известные «бие-

ния» (рис. 5,б). При этом структура волн на фоторегистрограммах и сигналы фотодатчика не претерпевают видимых изменений. Известно, что биения вызываются источниками колебаний с близкими частотами. Когда их фазы совпадают, амплитуды суммируются, а когда фазы противоположны, результирующая амплитуда минимальна. В начале опыта существует три звуковые волны от источника, затем — две, и наконец — одна волна. В течение опыта волны периодически ослабевают и уменьшают частоту вращения. Поэтому скорость вращения последующей волны лишь незначительно меньше скорости предыдущей и той же самой волны на предыдущем обороте. Плавно меняющаяся частота группы волн — звуковых источников и может вызвать биения, а также сплошной спектр при частотном преобразовании Фурье.

Однако изменение интенсивности возмущений наблюдается и при вращении в камере одного источника колебаний — одной ПДВ. При этом структура волны не меняется (см. рис. 3,а). Не исключено, что в данном случае играет роль нелинейная акустика: малые возмущения потока, развиваясь по экспоненте, возрастают до таких величин, что становятся существенными нелинейные взаимодействия [9]. Возможен и обратный процесс — подавление усилившихся возмущений.

С ухудшением перемешивания топливных компонентов, которое имело место как при увеличении сечения отверстий форсунки водорода ( $S_{\delta f} = 2.0 \text{ см}^2$ ), так и при уменьшении щели подачи воздуха ( $\delta = 0.1 \text{ см}$ ) или, наоборот, ее увеличении ( $\delta = 0.3 \div 10 \text{ см}$ ), число ПДВ в начале процесса уменьшалось до двух ( $\delta = 0.1, 0.3 \text{ см}$ ) и даже до одной ( $\delta = 0.6, 1.0 \text{ см}$ ). Характер поведения и уровень шумов от этих волн близок описанным выше для  $\delta = 0.2 \text{ см}$ : при прочих равных условиях с уменьшением числа волн интенсивность шума повышалась. Поэтому камеры большего диаметра предпочтительнее в отношении уровня шума, так как в них размещается большее количество ПДВ.

Во всех экспериментах частота низкочастотной составляющей шума повышалась к концу эксперимента от 100 до 330 Гц. Это еще раз подтверждает наше предположение, что источник шума — колебания газа в бочке. К концу процесса большая часть бочки заполнялась продуктами (воздух вытеснялся) и скорость звука газовой смеси воздуха и продуктов

повышалась.

При перестройке числа волн и особенно при затухании режима детонации (обычно при одноволновом режиме) наблюдаются шумовые выбросы, превышающие установившийся шум. Часто такие переходные процессы сопровождаются появлением продольных детонационных волн, которые приходят на смену поперечным детонационным волнам за пределами их существования [2].

На рис. 5,6 приведена запись шумов при переходе детонации в горение. На рис. 3,6 изображен фрагмент фоторегистрограммы этого режима, а его параметры для данного промежутка времени приведены в таблице (опыт № 1). По записи сигналов видно, что уровни шумов при детонации и горении практически одинаковы и мало отличаются по частоте. Однако при детонации в данном и других опытах частоты более упорядочены.

Фиксируется широкий набор частот примерно одинаковой интенсивности — до 20 дБ, переходящих в ультразвуковую область и имеющих характерный размер излучателя в сантиметровом диапазоне (см. рис. 5,6,в). Они могут порождаться вихрями в процессе смесеобразования, а также движением неоднородностей в детонационном фронте, которые всегда присутствуют при многофронтной детонации смесей в трубах [10]. В силу специфики фоторегистрации (компенсации только тангенциальной составляющей скорости ПДВ), волны, которые могут двигаться вдоль фронта, размыты на пленке, хотя эти неоднородности иногда и фиксируются по локальным искривлениям детонационного фронта. Размер зоны реакции, как видно из рис. 3,а, составляет около 1 см — близок к ширине ячейки. Гарантированные возможности микрофона ограничены частотой 20 кГц. Поэтому зафиксированные ультразвуковые колебания имеют погрешности по амплитуде и, возможно, частоте. Но в данном случае важно не это, а то, что такие колебания существуют и имеют вполне реальные источники возмущений.

Гармоники  $f = 7 \div 10$  кГц с интенсивностью  $25 \div 40$  дБ наблюдаются в опытах в конце режима, когда реализуются ПДВ так называемого типа II [6], в которых фронт горения отделяется от лидирующего ударного и является нестационарным, пульсирующим. Частота его пульсаций вполне может соответствовать наблюдаемому диапазону частот.

### Режим горения

Режим горения поступающей в камеру смеси осуществлялся с помощью установки четырех радиальных перегородок. Этот способ подавления высокочастотной неустойчивости эффективно используется в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) [11]. Все опыты проводились при  $\delta = 0.2$  см,  $S_{\delta f} = 0.4$  см<sup>2</sup> и тех же расходах компонентов. Данные типичного опыта (№ 3) представлены в таблице. Поскольку степень сгорания топлива в камере с перегородками была ниже, чем при детонационном сгорании, что проявлялось по меньшему давлению торможения продуктов (статические давления у торца камеры были примерно одинаковы), ряд опытов проводился с частичным сужением выходного сечения канала камеры сгорания до  $\delta^1 = 1$  см (см. рис. 1). Начальное давление в камере при этом повышалось до  $4.3 \cdot 10^5$  Па.

Фрагменты фоторегистрограмм процессов горения в камере с перегородками и добавочным сужением канала на выходе, снятые через продольные окна, приведены на рис. 3,в,г. Видно, что в камере с перегородками ПДВ подавлены (см. рис. 3,в), а при добавочном сужении канала существует тангенциальная волна, периодически отражающаяся от радиальных перегородок (см. рис. 3,г). Двигаясь в одном направлении, она фиксируется с частичной компенсацией скорости изображения, поэтому более отчетлива. Отразившись от перегородки, волна движется в противоположном направлении, поэтому фиксируется размытой. Поскольку временной промежуток между волнами сохраняется и происходит устойчивое чередование отчетливых и размытых волн, можно утверждать, что между соседними перегородками движется одна волна. Это подтверждает и значение средней скорости волны за два пробега между перегородками — около 1000 м/с, т. е. соответствует скорости звука в продуктах горения. Звуковая волна вносит некоторый вклад в шумы и колебания конструкции камеры, однако ее трудно устранить, разве что увеличением числа радиальных перегородок, что в наших опытах не проводилось. Отметим, что эту звуковую волну не следует путать с детонационной волной, распространяющейся с той же скоростью. Если звуковая волна — это волна без химической реакции, то детонационная, даже и низкоскоростная, распространяется по свежей холодной смеси, сжигая ее в своем фронте. Степень сгора-

ния топлива в камере с добавочным зауужением сечения на выходе была достаточно полной и оценивалась при сравнении опытного значения давления торможения продуктов в камере с расчетным значением  $P_c = [D_{С-Л}/\gamma]G/S_c^1$  [1], где  $D_{С-Л}$  — скорость идеальной детонации Чепмена — Жуге для данного состава смеси [12],  $\gamma = 1.3$  — отношение удельных теплоемкостей продуктов,  $G$  — полный расход топлива,  $S_c^1 = 93 \text{ см}^2$  — площадь выходного сечения камеры.

Характерный фрагмент записи шумов для камеры с перегородками представлен на рис. 5,г. Иницирование процесса запоздало на 45 мс, за это время в бочке скопилось много смеси, после детонации которой появилась мощная ударная волна, «раскачавшая» амплитуду низкочастотной составляющей шума. Как и в случае непрерывной детонации, при разложении шума с помощью преобразования Фурье фиксируется сплошной спектр.

Первые выбросы уровня шума явно нерезальны и связаны, по-видимому, с погрешностью измерения. Как и при детонации, низкочастотная составляющая лежит в диапазоне  $100 \div 300 \text{ Гц}$  и монотонно затухает к концу процесса. Влияние ее на процесс горения по фотодатчикам не прослеживается. Высокочастотные пульсации достаточно разнообразны по частоте (рис. 5,д). Среди них выделяется гармоника с частотой  $f \approx 2.5 \text{ кГц}$  и уровнем от 150 до нескольких десятков децибел. Вполне вероятно, что эти частоты обусловлены продольной неустойчивостью фронта горения, вызванной звуковой волной в продуктах реакции, совершающей двойной пробег вдоль камеры со средней скоростью 890 м/с. Продольные колебания не зафиксированы на пленке, но пики яркости свечения, зарегистрированные более чувствительным фотодатчиком, достаточно хорошо коррелируют с этой частотой. Наличие более высокочастотных составляющих шума (до нескольких десятков децибел) пока не находит обоснованного объяснения.

В камере с перегородками и зауужением выходного сечения низкочастотная составляющая ведет себя обычным образом. К высокочастотной составляющей 2.5 кГц добавляется еще одна, примерно вдвое большей частоты (рис. 5,е). Ее частота точно коррелирует с частотой звукового тангенциального возмущения, периодически отражающегося от радиальных перегородок (см. рис. 3,г). Появление

высокочастотной составляющей 2.5 кГц может найти объяснение при рассмотрении камеры как модели резонатора Гельмгольца [13]. Резонансные колебания продуктов в камере можно оценить по формуле  $f = c[S_c^1/(Vl)]^{1/2}/2\pi$ , где  $c \approx 1200 \text{ м/с}$  — скорость звука в продуктах реакции,  $V = 13.6 \text{ л}$  — объем камеры,  $l = 3 \text{ мм}$  — длина наиболее узкого участка вставки. Оценки дают резонансную частоту  $\approx 2.5 \text{ кГц}$ .

Природа более высокочастотных колебаний осталась невыясненной.

Сравнение записей уровней шумов, помещенных на рис. 5, показывает, что при непрерывной спиновой детонации они не выше, чем при обычном турбулентном горении. Уровни шумов примерно равны в одноволновом режиме детонации (см. рис. 5,в,е), но при большем числе волн они значительно снижаются — примерно пропорционально количеству волн (см. рис. 5,б,д). Сужение выходного сечения камеры снижает уровни шумов и смещает спектр звуковых колебаний в более высокочастотную область. Низкочастотная составляющая шума, создаваемая возмущениями в бочке, здесь не принимается во внимание, так как не связана непосредственно со способом сжигания топлива.

### 3.2. Исследование вибраций стенки камеры

#### Режим спиновой непрерывной детонации

Исходные данные были такие же, как и в приведенном выше опыте со щелью подачи воздуха  $\delta = 0.2 \text{ см}$  (см. таблицу, опыт № 2). Однако с самого начала реализовалось две волны вместо трех, скорость вращения которых больше — 1575 м/с вместо 1440 м/с. Это вполне объяснимо, так как волны начинают распространяться по более широкому и лучше перемешанному слою. В первом случае слой свежей смеси был близок к критическому для распространения детонации ( $h_* \approx 8 \text{ см}$ ), а в данном случае — больше критического ( $h \geq 12 \text{ см} > h_*$ ). Следует отметить, что режимы с двумя или тремя волнами при одинаковых расходах смеси наблюдались неоднократно. По-видимому, в результате переходного процесса после иницирования возникают ситуации, способствующие реализации того или другого детонационного режима.

На рис. 6,а приведена запись сигнала от вибропреобразователя на расстоянии 8 см от

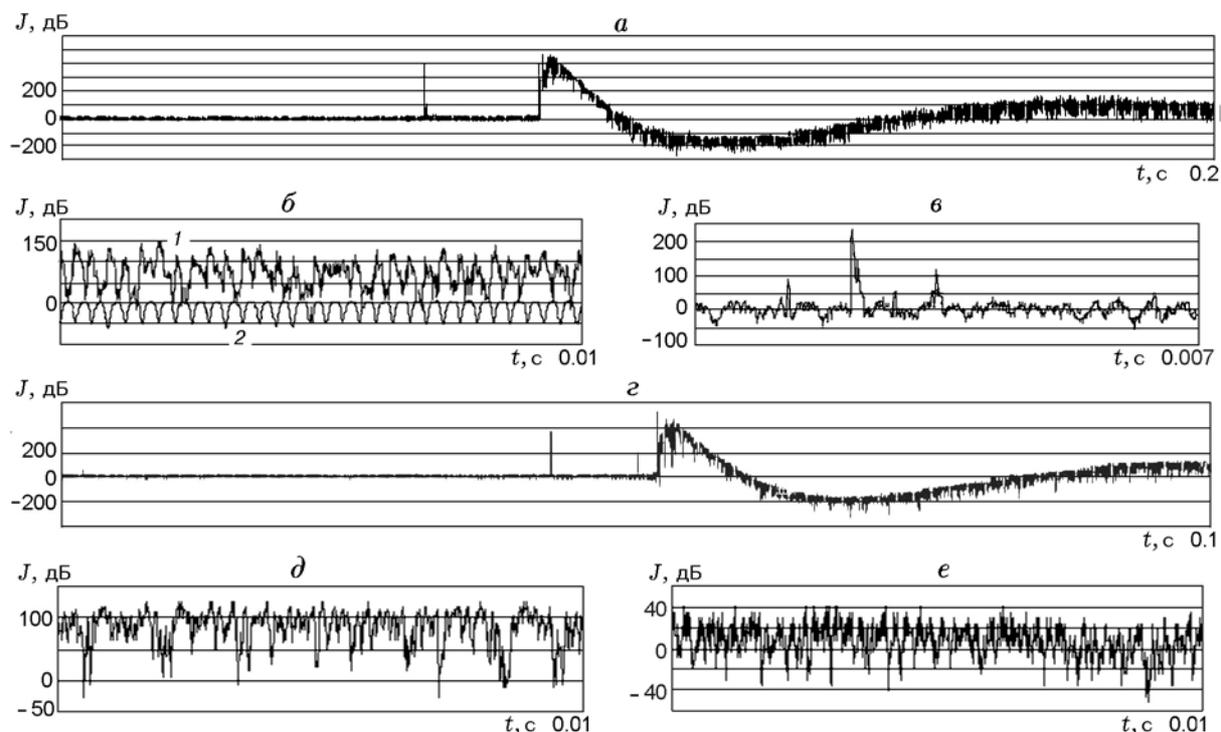


Рис. 6. Уровни вибраций наружной стенки камеры (фрагменты) при непрерывной спиновой детонации (а–в) и турбулентном горении (з–е):

а — в течение первых 0.2 с после запуска системы регистрации, б — двухволновый режим, в — переход детонации в горение ( $n = 1 \rightarrow$  горение), з — в течение первых 0.2 с после запуска системы регистрации (камера с перегородками), д — растянутый по времени фрагмент для камеры с перегородками, е — камера с дополнительным сужением выходного сечения; 1 — шум, 2 — импульсы свечения

торца камеры. Внешне сигнал идентичен для всех проведенных экспериментов. Явно выделяется затухающая низкочастотная волна с частотой  $f \approx 8$  Гц и начальной амплитудой 430 дБ. Она быстро затухает, принимая последовательно через половину длины волны значения 50, 10 дБ и приближаясь к концу процесса к полному затуханию. Эта волна обусловлена колебаниями торцевой стенки бочки (как мембраны), к которой жестко крепится камера. Оценка собственных колебаний торцевой стенки бочки дает примерно такую же частоту. Колебания вызваны детонацией начальной порции смеси, накопившейся до срабатывания детонатора. Их начальный уровень, по видимому, не соответствует зарегистрированному значению, так как обусловлен воздействием ударной волны на камеру и датчик.

Следующая по величине характерная частота радиальных колебаний стенки камеры вызвана непосредственным воздействием вращающихся ПДВ. Это подтверждает рис. 6, б, где частота колебаний стенки камеры совпада-

ет с частотой появления спина, зафиксированного как фоторегистратором, так и фотодатчиком. Отметим, что интенсивность вибраций в начале процесса находится на уровне шумов и для  $n = 2$  составляет  $(100 \pm 50)$  дБ. В отличие от шумов, при переходе к режиму с одной ПДВ наблюдается примерно двойное снижение уровня вибраций.

Ухудшение смесеобразования путем увеличения сечения проходных каналов форсунки водорода и щели подачи воздуха приводило к снижению числа волн и, как в рассмотренном выше случае, к снижению уровня вибраций до 50 дБ и ниже. Однако при дозвуковом истечении из щели подачи воздуха ( $\delta = 0.6$  см) сразу после инициирования развивались вибрации, более чем вдвое превышающие максимальные при звуковом истечении из щели. Затем они резко прекращались и режим выходил на минимальный уровень вибраций. По фоторегистрограммам и записям давлений в камере особых изменений в режиме не обнаружено, поэтому причина появления аномальных пуль-

саций осталась невыясненной. При  $\delta = 1.0$  см также существовало дозвуковое истечение воздуха в камеру, однако колебания не превышали 50 дБ. Волны типа II, возникающие на пределе детонации, как и при шумах, сопровождались, как правило, двойными пиками интенсивностей с частотой  $7 \div 10$  кГц. Имеются и более высокие по частоте колебания, но они лежат за пределами границы достоверной разрешимости данного вибродатчика.

Переход детонации в горение не выявил существенных изменений в уровне вибраций в камере (рис. 6, в). Численные значения параметров переходного периода помещены в таблицу (опыт № 4). Как и в случае исследования шумов, во время перехода детонации в горение часто наблюдаются выбросы уровня вибраций, появление которых объясняется возникновением продольных детонационных волн.

Повышенные уровни шумов и вибраций в режимах с продольными детонационными волнами вполне объяснимы. Во-первых, детонирует вся масса топливной смеси, скопившаяся в камере и вне ее (как это видно на наших осциллограммах после инициирования детонатором). При спиновой детонации непрерывно детонирует только достаточно узкий слой смеси в области смесеобразования. Во-вторых, продольная детонационная волна, если она зародилась у закрытого конца камеры, выходя из камеры, создает воздействие на окружающую среду в виде ослабленной ударной волны, а также звуковыми колебаниями, генерируемыми истекающими продуктами. Известно [14], что уровень испускаемых шумов пропорционален скорости истечения продуктов в степени 8. При выходе из камеры детонационной волны в результате ее разгрузки скорость продуктов будет выше тех скоростей, которые развиваются при непрерывной спиновой детонации или обычном горении, так как непосредственно за передним фронтом детонации скорость течения в неподвижной системе координат выше критической. Если продольная детонационная волна зарождается вне камеры и заходит в нее, то дополнительно будет отражение волны от закрытого конца камеры и выход из открытого конца в виде ударной волны, сопровождающийся эффектами, отмеченными выше. Заметим, что при непрерывной спиновой детонации также имеет место выход шлейфа за пределы камеры, но эта часть ударной волны находится далеко от фронта и значительно ослаблена [15].

Кроме того, вращающаяся область повышенного давления занимает малую часть (несколько процентов) выходного сечения камеры. Поэтому настолько существенно различие шумов и вибраций при спиновом и пульсирующем режимах сжигания топлива.

### Режим горения

Характерный фрагмент записи колебаний стенки камеры с перегородками представлен на рис. 6, г. Низкочастотная составляющая колебаний ( $f \approx 8$  Гц) не отличается по амплитуде и частоте от значений, наблюдавшихся при спиновой непрерывной детонации (см. рис. 6, а), а также в камере с дополнительным сужением канала. Это еще раз подтверждает предположение о том, что низкочастотные колебания вызваны взрывом скопившейся в бочке смеси после подрыва детонатора и не зависят от дальнейшего способа сжигания топлива.

Высокочастотные колебания стенки камеры с перегородками характеризуются широким спектром частот, из которого можно выделить частоту  $\approx 5$  кГц, соответствующую пробегу звуковой волны по окружности стенки камеры. Ее максимальный уровень составляет  $\approx 100$  дБ (рис. 6, д). Поскольку истечение компонентов топлива в камеру звуковое, генерация таких колебаний может быть вызвана вихреобразованием в потоке, а также неустойчивостью турбулентного фронта пламени. С уменьшением расхода топлива амплитуда колебаний уменьшается и в конце процесса составляет  $\approx 20$  дБ.

Высокочастотные колебания стенки камеры с дополнительным сужением также разнообразны по частоте, но имеют меньшую амплитуду. Кроме этого проявляются колебания, соответствующие тангенциальным звуковым возмущениям в канале и имеющие максимальную амплитуду  $\approx 50$  дБ (рис. 6, е).

Сравнение уровней колебаний, отображенных на рис. 6, показывает, что они достаточно близки по амплитуде, но отличаются по частоте — для режима горения свойственны более высокочастотные колебания.

### ВЫВОДЫ

1. Измерены уровни шумов, обусловленных процессами в камере непрерывного спинового детонационного сжигания топлива водород — воздух на расстоянии 1 м от камеры.

2. Измерены уровни вибраций стенки камеры непрерывного спиновое детонационного режима сжигания топлива водород — воздух в области вращения детонационной волны.

3. Измерены уровни шумов и вибраций в тех же точках и при тех же расходах топлива для режимов обычного турбулентного горения, организованного в той же камере детонационного сжигания путем установки радиальных перегородок, а также дополнительным сужением выходного сечения.

4. Обнаружено, что уровни шумов и вибраций в режимах непрерывного детонационного сжигания топлива не превышают уровни шумов и вибраций в режимах обычного турбулентного горения. Этот вывод следует как при сравнении шумов и вибраций в течение одного опыта при переходе детонации в горение, так и при сравнении этих уровней в разных опытах.

5. Выяснено, что в режимах детонации основным возмущающим фактором являются вращающиеся спиновые детонационные волны. Все остальные пульсации шумов и вибраций — их производные. Уровни шумов возрастают с уменьшением количества детонационных волн, а уровни вибраций, наоборот, уменьшаются.

6. Выяснено, что вследствие биений звуковых сигналов, вызванных изменением частоты вращения детонационных волн, уровень шумов периодически меняется и может уменьшаться до нескольких десятков децибел. Управлением числом волн и их фазой можно усилить или ослабить уровни испускаемых шумов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Келли Дж. После сгорания — детонация // Что нового в науке и технике. 2003. № 11 (13). С. 98–108.
2. Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация дозвукового потока топлива // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 3. С. 93–104.
3. Быковский Ф. А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. 1981. № 2. С. 85–89.
4. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. О непрерывной спиновой детонации топлив в кольцевых камерах сгорания // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 4. С. 99–109.
5. Дрейзен И. Г. Электроакустика и звуковое вещание. М.: Связьиздат, 1961.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Спиновая детонация топливно-воздушной смеси в цилиндрической камере // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 3. С. 338–340.
7. Ждан С. А., Мардашев А. М., Митрофанов В. В. Расчет течения спиновой детонации в кольцевой камере // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 91–95.
8. Проблемы современной акустики: Сб. ст. / Под ред. Н. Н. Андреева, Л. М. Лямшева. М.: Изд-во АН СССР, ВИНТИ, 1963.
9. Жигулев В. Н. Динамика неустойчивостей (династика). М.: МФТИ, 1996.
10. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
11. Неустойчивость горения в ЖРД / Под ред. Д. Т. Харье, Ф. Г. Рирдона. М.: Мир, 1975.
12. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
13. Подавление акустических колебаний в камерах сгорания резонансными звукопоглотителями / В. Ф. Ахмадеев, В. И. Корляков, Л. И. Козлов, В. Б. Курзин, С. В. Сухинин, В. А. Юдин. М.: Изд-во НПО «Информ ТЭИ», 1991.
14. Римский-Корсаков А. В., Баженов Д. В., Баженова Л. А. Физические основы образования звука в воздуходушных машинах. М.: Наука, 1988.
15. Быковский Ф. А. О некоторых свойствах потока при непрерывной детонации в кольцевой цилиндрической камере // Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Ташкент, 1986. С. 16–19.

Поступила в редакцию 9/IX 2005 г.