

## 03 Спектральный анализ высокоскоростного течения при горении предварительно неподготовленной топливо-воздушной смеси

© М.А. Гольдфельд

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: gold@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2024 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2024 г.

Принято к публикации 29 ноября 2024 г.

Приведены результаты исследования спектральных характеристик высокоскоростного течения в условиях самовоспламенения предварительно неподготовленной топливо-воздушной смеси при интенсивном взаимодействии внешней акустики и горения. В результате термоакустического взаимодействия происходит увеличение мощности пульсаций по сравнению со случаем „холодного“ течения на порядок и более, вследствие чего улучшается смешение, происходит интенсификация горения и увеличение тепловыделения. При высоких уровнях тепловыделения возникает неустойчивость течения и вероятность перехода к вибрационному горению.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое течение, горение, пульсации давления, спектр.

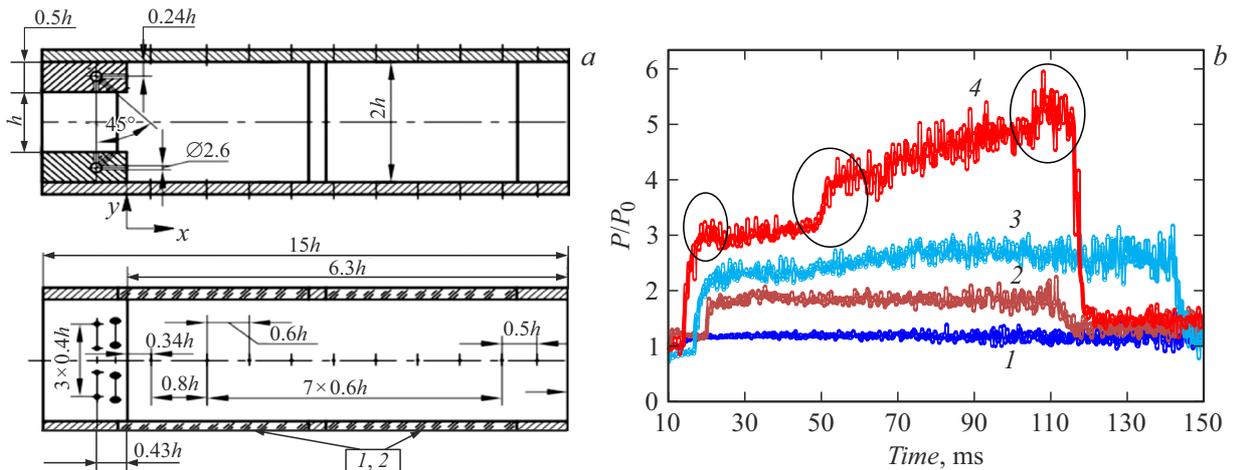
DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60069.20148

Колебания потока, вызванные горением, широко известны как неустойчивость горения, вызывают повышение давления и тепловых потоков, вибрации конструкции большой амплитуды и срыв горения. В результате возможны катастрофические последствия при работе камер сгорания и энергетических устройств. Несмотря на то что эти явления исследуются давно и широко, сверхзвуковые реагирующие течения до последнего времени оставались практически неизученными. Для дозвуковых и трансзвуковых течений механизм обратной связи выглядит очевидным просто в силу возможности распространения возмущений вверх по потоку по обширным отрывным областям. При локальных скоростях потока, соответствующих числам Маха 2 и тем более 3 и 4, предполагалось, что такой механизм не реализуется. В последнее время выяснилось, что передача возмущений вверх по потоку возможна при высоких скоростях потока [1]. Этот процесс возможен, если воспламенение реализуется вблизи стенки канала, при интенсивном горении и увеличении размера областей отрыва и толщины дозвуковой части потока. Доминирующими факторами, которые определяют термоакустические осцилляции реагирующего течения, являются условия на входе в канал (пульсации основного потока воздуха и высоконапорной струи топлива). С другой стороны, это неустойчивость процесса воспламенения, взаимодействие аэроакустики потока с акустикой, генерируемой пламенем, и возрастание неустойчивости при обратном распространении пламени. Когда акустические волны начинают взаимодействовать с акустическими волнами, генерируемыми горением, возникает акустическая нестабильность. При повышении давления в зоне горения увеличиваются отрыв пограничного слоя и интенсивность ударных волн,

в результате чего изменяется волновая структура потока в канале и происходит улучшение смешения.

Цель настоящей работы состоит в изучении спектральных характеристик течения с горением при высокой скорости потока и интенсивности акустики на входе в канал. Опыты проводились в импульсной установке на модели прямоугольного канала с поперечным сечением  $100 \times 100$  мм, состоящей из сверхзвукового сопла, изолятора и канала постоянного поперечного сечения со стабилизатором пламени в виде уступа (рис. 1, а). Модель была оснащена оптическими стеклами для визуализации потока. Топливо подавалось перед уступом на верхней и нижней стенке через восемь круглых отверстий под углом  $90^\circ$ . Описание установки, модели и техника эксперимента приведены в [2,3]. Испытания проводились при статическом давлении 0.08–0.12 МПа, температуре торможения  $1760 \pm 35$  К и общем коэффициенте избытка топлива  $\beta = 0.5–0.985 \pm 0.016$ . Здесь коэффициент избытка топлива определялся по условиям на входе в канал в течение всего времени режима работы импульсной установки как отношение массы топлива к массе воздуха, деленное на стехиометрическое отношение массы топлива и воздуха, т. е.  $\beta = (m_f/m_a)/M_{0st}$ .

Данные рис. 1, б демонстрируют изменение давления в канале при увеличении коэффициента избытка топлива и одновременно рост амплитуды пульсаций. Здесь  $X$  — относительное расстояние измерительной точки от уступа стабилизатора пламени, обезразмеренное высотой уступа. Кривая 1 соответствует течению без горения, но с подачей топлива в атмосферу азота. В этом случае уровень пульсаций минимален и обусловлен только возмущениями на входе в канал. Эти данные показывают исходный уровень пульсаций и используются для количественной оценки пульсаций при горении. Кривые



**Рис. 1.** Схема модели (а) и пульсации давления при увеличении теплоподвода (б). 1 —  $\beta = 0$ ,  $X = 2.94h$ ; 2 —  $\beta = 0.62$ ,  $X = 2.94h$ ; 3 —  $\beta = 0.68$ ,  $X = 5.34h$ ; 4 —  $\beta = 0.98$ ,  $X = 5.34h$ .

2–4 иллюстрируют рост пульсаций при интенсификации горения. При  $\beta = 0.62$  пульсации давления остаются практически неизменными, и величина давления остается постоянной. Сравнение кривых 2 и 3 свидетельствует о том, что даже при небольшом увеличении  $\beta$  происходит рост давления вследствие увеличения пульсаций перед подъемом давления [2]. Дальнейшее увеличение коэффициента избытка топлива сопровождается существенным изменением давления и пульсаций (кривая 4). На рисунке овалами выделены три характерные области роста пульсаций давления: воспламенение (10–18 ms), скачкообразный подъем давления (48–55 ms) и переход к дозвуковому горению (105–115 ms). Каждая из этих областей предшествует повышению среднего интегрального тепловыделения в соответствующем временном интервале в квазистационарных условиях с учетом полноты сгорания топлива.

Для того чтобы исследовать амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в условиях существенной нестационарности средних значений, пульсационная составляющая выделялась путем вычитания сглаженной функции из исходного сигнала. Осредненное значение получено с помощью сглаживающих сплайнов. Для этого исходный сигнал аппроксимировался кубическим сплайном с использованием подхода, апробированного в [3].

Количественное изменение амплитуды пульсаций давления без горения и с горением при  $\beta = 0.98$  иллюстрирует результаты измерений, которые приведены на рис. 2. Здесь сравниваются амплитуды пульсаций давления для течения без горения, но в присутствии водородной струи (кривая 1 на рис. 1) и течения с интенсивным горением при  $\beta = 0.98$ , когда реализовался переход к дозвуковому горению (кривая 4 на рис. 1). Сравнение приведенных данных прежде всего демонстрирует их качественное различие. „Холодное“ течение (рис. 2, а) характеризуется монотонным широкополосным спек-

тром пульсаций в течение рабочего режима установки без выраженных дискретных значений амплитуды. Такой характер пульсаций давления сохраняется неизменным по всей длине канала с незначительными отклонениями, как это следует из данных рис. 2, а.

Картина изменения временной зависимости пульсаций в реагирующем течении разительно отличается как количественно, так и качественно. Можно видеть значительный рост амплитуды пульсаций по времени и по пространству в 4–5 раз, а в экстремальных зонах (воспламенение и интенсификация горения,  $\tau \approx 50$  и 110 ms) даже в 8–10 раз. Увеличение пульсаций в выделенной области является следствием роста тепловыделения на начальном участке горения при воспламенении и интенсификации термоакустического взаимодействия. Сравнение повышения давления в канале для  $\beta = 0.68$  и 0.98 (кривые 3 и 4 на рис. 1) демонстрирует их качественное соответствие в интервале времени 0–50 ms. Однако в последнем случае среднее давление несколько выше, примерно на 10–15%. Это локальное повышение давления являлось достаточным для того, чтобы при взаимодействии внешней турбулентности течения и акустических волн, генерируемых в процессе горения, происходило улучшение смешения и распространения пламени вверх по потоку. В результате этих процессов повышается давление в зоне воспламенения, возрастает тепловыделение и реализуется повышение давления по всему каналу при соответствующем скачкообразном увеличении давления. Эти результаты свидетельствуют о том, что колебания давления в сложных условиях термоакустического взаимодействия сильно отличаются от таковых без горения или при локальном горении.

Для количественной оценки спектральной плотности мощности (PSD) выделенных пульсаций в зависимости от частоты ( $f$ ) использовалось быстрое преобразование Фурье. Обработывалась выборка из 1024 отсчетов (204 ms), что позволяло определять частотный диапазон

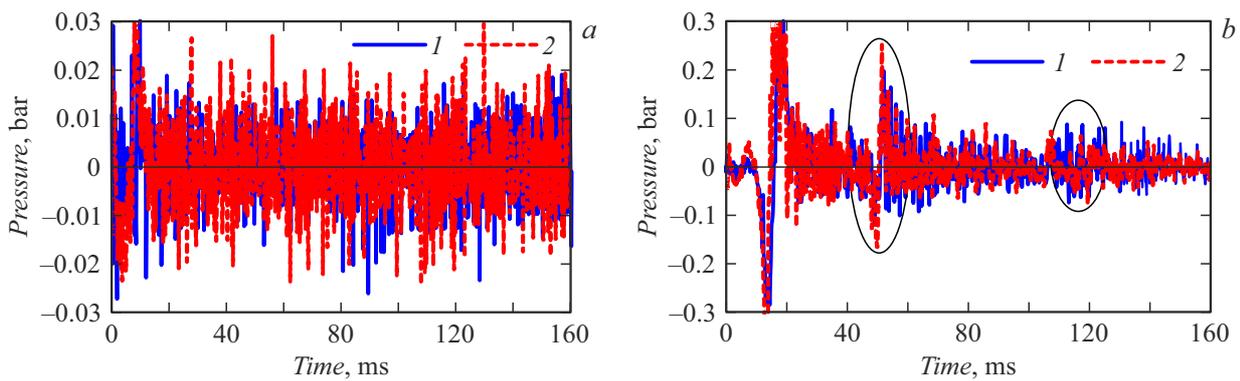


Рис. 2. Пульсации давления в потоке без горения (а) и с горением (b).  $X = 0.34h$  (1) и  $5.34h$  (2).

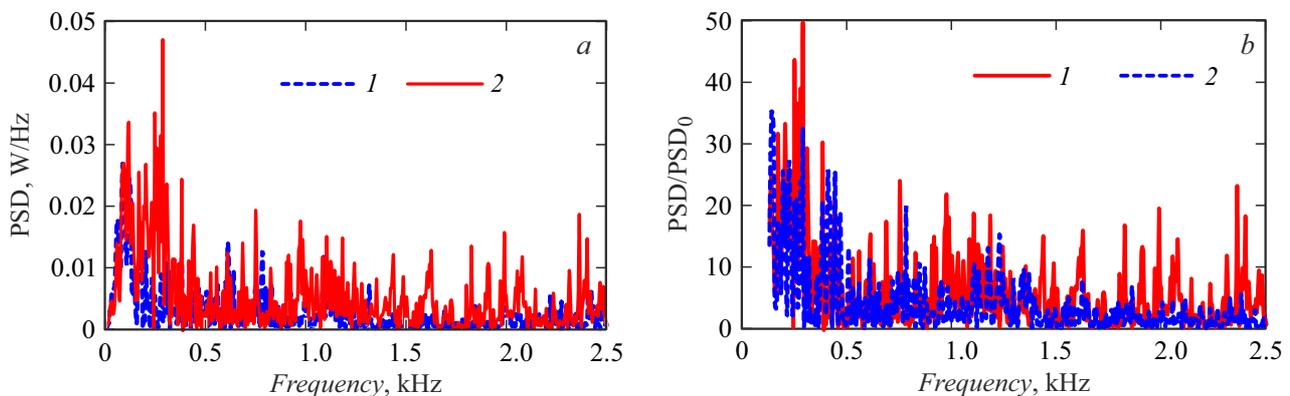


Рис. 3. Плотность спектральной мощности для течения с теплоподводом при различной интенсивности горения.  $\beta = 0.68$  (1) и  $0.98$  (2).

до 2.5 kHz. На рис. 3 приведено сравнение результатов определения PSD для двух значений коэффициентов избытка топлива в точке, которая соответствует координате  $X = 4.74h$ , где достигалось максимальное повышение давления. Можно видеть, что увеличение  $\beta$  на 40% приводит к увеличению спектральной мощности в 3–4 раза и изменению положения максимума пульсаций в зависимости от интенсивности горения. При увеличении интенсивности горения максимальные значения PSD смещаются в область пониженных значений частоты 150–470 Hz, как это следует из данных рис. 3, а. При пониженном значении  $\beta$ , т.е. при снижении тепловыделения, максимальные значения PSD достигаются на частотах 620–800 Hz. Этот уровень частот остается практически неизменным в течение всего процесса горения. Для понимания степени изменения уровня пульсаций на рис. 3, б приведено нормализованное значение плотности спектральной мощности для тех же значений PSD, которые приведены на рис. 3, а.

В качестве референсного значения для нормализации зависимости  $PSD(f)$  принята соответствующая величина PSD для течения без горения перед входом в канал, обозначенная как  $PSD_0$ . Приведенные данные свидетельствуют о том, что в результате взаимодействия

акустики внешнего течения с акустикой, реализуемой при горении, происходит значительное усиление пульсаций давления, увеличение спектральной плотности мощности может составлять 40–50 раз при стехиометрическом составе смеси и достигать 10–20 раз при умеренном тепловыделении. Полученные данные согласуются с результатами для реагирующих течений при сверхзвуковых скоростях потока [4].

Приведенные выше данные относятся к точкам, в которых достигалось максимальное тепловыделение в течение режима работы установки. Такие зависимости были получены по всей длине канала в различных точках и являются типичными для течения с горением. Однако количественные изменения зависят от общего коэффициента избытка топлива и начальных параметров потока на входе в канал. Поэтому приведенные результаты следует рассматривать как близкие к максимальным значениям, которые получены при различных условиях на входе в измерительный канал, но которые оставались постоянными в течение одного опыта.

Проведенные исследования спектральных характеристик высокоскоростного реагирующего течения позволяют сделать следующее заключение. Несмотря на то что процессы интенсификации пульсаций рассматриваются

в основном с точки зрения неустойчивости потока и появления опасных резонансных режимов, тем не менее нельзя исключать возможности их использования для улучшения смешения и эффективного повышения энтальпии высокоскоростного потока.

Процесс перехода к интенсивному горению имеет двухступенчатый характер и обусловлен ростом пульсаций в области иницирования горения. Скачкообразное повышение давления является следствием усиления пульсаций давления при локальной интенсификации горения. Спектральный анализ течения свидетельствует о том, что увеличение тепловыделения при горении, например при увеличении коэффициента избытка топлива, давления подачи топлива или полноты сгорания, приводит к усилению термоакустического взаимодействия и, как следствие, к экстремальному усилению пульсаций давления вплоть до перехода к вибрационному горению.

### Благодарности

Эксперименты проведены на базе Центра коллективного пользования „Механика“ (ИТПМ СО РАН).

### Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гранта 1240215000-0).

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H.T. Luong, Y. Wang, H.S. Han, C.H. Sohn, *Aerospace Sci. Technol.*, **118**, 106994 (2021). DOI: 10.1016/j.ast.2021.106994
- [2] M.A. Goldfeld, *Int. J. Hydrogen Energy*, **48** (53), 20483 (2023). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.114
- [3] Н.Н. Федорова, М.А. Гольдфельд, В.В. Пикалов, *Физика горения и взрыва*, **58** (5), 33 (2022). DOI: 10.15372/FGV20220505 [N.N. Fedorova, M.A. Goldfeld, V.V. Pickalov, *Combustion, Explosion, Shock Waves*, **58** (5), 536 (2022). DOI: 10.1134/S0010508222050057].
- [4] M. Sun, H. Wang, Z. Cai, J. Zhu, *Unsteady supersonic combustion* (Springer, Singapore, 2020). DOI: 10.1007/978-981-15-3595-6