

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ДИАГНОСТИКА

Жданок С.А., Пенязьков О.Г., Фомин Н.А.

Горение — один из важнейших природных процессов и, наверное, является первым предметом наблюдений, исследований и технологических применений в истории человечества. Одним из наиболее сложных ее проявлений является детонация, которая представляет собой процесс сверхзвукового распространения волны химической реакции по исходной смеси горючих газов или газозвесей со скоростью 1,5–3,0 км/с. Взрывная волна сопровождается резким скачком давления, в 15–30 раз превышающим его начальный уровень, и за миллионные доли секунды превращает исходное вещество в продукты химической реакции. Особый интерес к исследованиям детонации появился после открытия эффектов пространственной самоорганизации течения в детонационном фронте, приводящих к образованию сложной трехмерной ячеистой структуры детонационной волны, а также явления спиновой детонации. В научной литературе часто проводятся аналогии между структурой детонации и другими периодическими механизмами самоорганизации течения в смежных областях физико-химической газодинамики и магнитоплазмотоники.

Характерные элементы структуры течения в детонационном фронте, образующиеся по мере его эволюции в пространстве, — детонационные ячейки — наиболее просто регистрировать и измерять следовым методом, покрыв перед опытом стенки трубы тонким полупрозрачным слоем сажи. Проходящая детонация оставляет на сажевом слое сетку следов, вычерчиваемую точками пересечения ударных разрывов и напоминающую рыбацкую сеть. При переходе к спиновой детонации сетка на стенке трубы превращается в винтовую линию или полосу с некоторой внутренней структурой, представляющую собой след

единственной поперечной волны, движущейся вдоль окружности трубы (рис. 1). При этом движение очага воспламенения происходит строго по винтовой линии с шагом, равным примерно трем калибрам канала, с направлением движения очага под углом 45° к поперечному сечению трубы. Развертка собственного свечения при спиновой детонации в смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$, сделанная методом компенсации полной скорости поперечной волны, приведена на рис. 2, а. Ячеистые и спиновые структуры регистрируются также оптическими и другими экспериментальными методами, обладающими необходимым пространственно-временным разрешением. Одна из классических фотографий, фиксирующая траектории движения наиболее ярких точек детонационного фронта при переходе детонации из трубы в цилиндрический объем, показана на рис. 2, б.

Законченной теоретической модели, позволяющей предсказывать поведение и свойства трехмерной детонации для произвольных граничных условий, еще не создано, хотя в некоторых работах сделаны попытки такого описания. В этой связи развитие трехмерных представлений о структуре

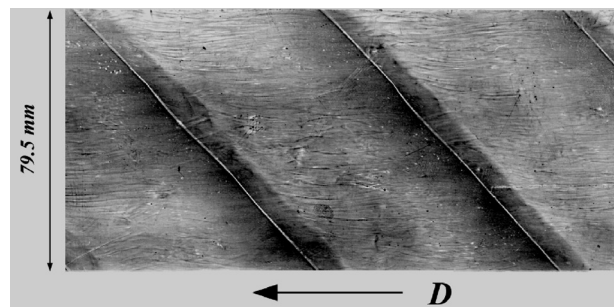


Рис. 1. Следовой отпечаток движения волны спиновой детонации вдоль круглой трубы

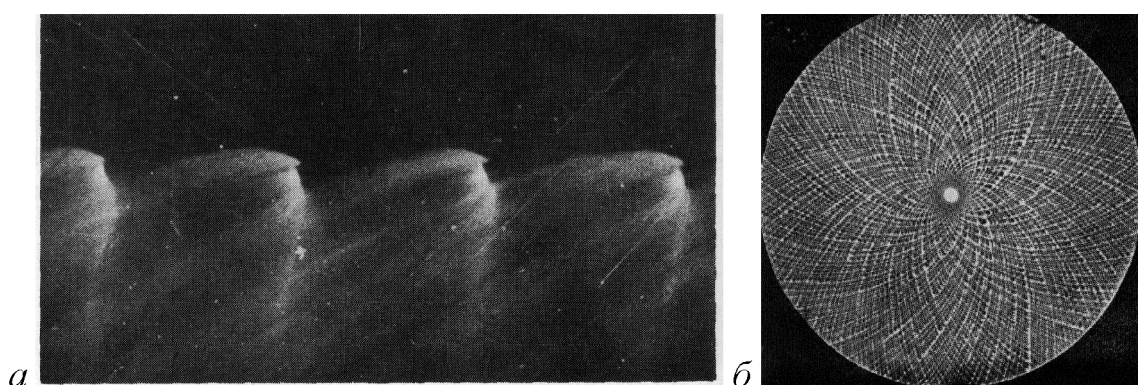


Рис. 2. Развертка собственного свечения волны спиновой детонации (Войцеховский Б.В. и др., 1958) и свечение незатухающей детонации, распространяющейся в цилиндрическом объеме (Солоухин Р.И., 1963)

течения и энерговыделения во фронте детонационной волны весьма актуально с точки зрения теории и многих практических приложений, которые стали развиваться в последнее время. Стоит отметить, что учет фактора трехмерности чрезвычайно важен и при описании многих реагирующих течений с ударными волнами, происходящих в сложных неоднородных условиях.

Работы по изучению высокотемпературного воспламенения и горения газов и газовзвесей в динамических условиях за проходящими и отраженными ударными волнами (УВ), которые обеспечивают режимы распространения и пределы детонации, интенсивно ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Такие исследования всегда определялись насущными практическими проблемами. Связано это с прикладными задачами создания высокоэффективных камер сгорания, новых видов боеприпасов, разработкой ракетных и авиационных двигателей следующего поколения, усовершенствованием двигателей внутреннего сгорания (ДВС), подавления процессов детонации, пожаро- и взрывобезопасностью и многими другими фундаментальными проблемами в механике, теплофизике, физики горения и взрыва.

По сравнению с существующими схемами организации горения в воздушно-реактивных и ракетных двигателях детонационное сжигание топлива имеет ряд принципиальных преимуществ, главное из которых — высокий термодинамический коэффициент полезного. Этот режим позволяет поддерживать чрезвычайно высокий массовый расход рабочей смеси через фронт детонационной волны и в этом отношении является весьма перспективным для использования в двигательных установках ввиду высокого удельной мощности, эффективности и простоты. Существует несколько принципиальных схем организации рабочего

процесса для двигателей, работающих в режиме детонационного горения. Одна из них основана на сгорании топлива во вращающейся поперечной детонационной волне, распространяющейся в кольцевых цилиндрических камерах. В этом случае непрерывная работа двигателя обеспечивается за счет движения фронта волны вдоль замкнутой траектории. При этом продукты реакции постепенно выталкиваются к выходному сечению камеры сгорания и замещаются свежей смесью. Вторая схема базируется на концепции сжигания топлива в стоячей детонационной волне. Это означает, что скорость набегающего потока должна быть очень высокой, т. е. больше либо равной скорости детонации для топливной смеси, используемой в силовой установке. Для проточных систем такая организация рабочего процесса рассматривается, прежде всего, применительно к использованию на гиперзвуковых летательных аппаратах. Третья схема основана на концепции взрывного горения рабочей смеси в периодически возникающих детонационных волнах, которые распространяются вдоль камеры сгорания. Этот режим силовой установки импульсного детонационного двигателя (ИДД) обладает способностью работать в достаточно широком диапазоне скоростей полета, вплоть до дозвуковых. На рис. 3 представлены расчетные КПД циклов сжигания топлива при постоянном давлении — $p = \text{const}$ (цикл Брайтона), постоянном объеме $V = \text{const}$ (цикл Хампри) и цикла ИДД в зависимости от числа Маха полета. Видно, что КПД цикла с детонационным сжиганием топлива значительно выше КПД цикла Брайтона, используемого в современных реактивных двигателях летательных аппаратов, особенно при низких степенях сжатия. Это связано с тем, что при одинаковых начальных условиях продукты детонации горячей

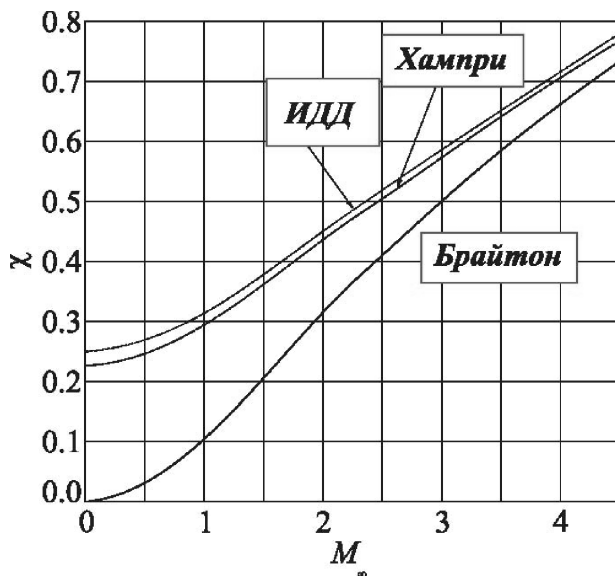


Рис. 3. Термический КПД детонационного цикла сжигания топлива (кривая ИДД) по сравнению со сгоранием при $p = \text{const}$ (цикл Брайтона) и при $V = \text{const}$ (цикл Хампри) в зависимости от скорости полета летательного аппарата с прямоточным бескомпрессорным двигателем (Фролов С.М., 2005)

смеси обладают меньшей энтропией, чем продукты горения в замкнутом объеме, и при постоянном давлении, и при изэнтропическом расширении продуктов в атмосферу большая часть химической энергии топлива превращается в полезную работу. Такое повышение КПД, если оно технически достижимо, привело бы к значительному повышению экономичности двигателя.

Особый интерес к исследованиям детонации горючих газовзвесей также связан с их широким распространением в промышленности, где подобные газовзвеси используются в качестве рабочих тел в химической, аэрокосмической, горной и других видах промышленности. В частности, здесь возможна реализация нежелательных ситуаций, когда под воздействием какого-либо волнового воздействия неустойчивые отложения реагирующей пыли (частицы металла регулярного и наноразмера, угля и др.) образуют взрыво-пожароопасную смесь и способны к воспроизводству детонационно-подобных режимов сгорания. Для предотвращения подобных нежелательных явлений и оценки последствий катастрофических взрывов в промышленности необходимо создание научных основ безопасной работы различных технических устройств в условиях запыленной атмосферы, а также и в пористых средах. Это

необходимо также для выработки научно обоснованных критериев взрыво-пожаробезопасности.

Для создания научных предпосылок решения прикладных проблем использования детонации в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (ИТПМ) и Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси (ИТМО) в течение многих лет проводились многоплановые исследования детонационных явлений, инициированные академиком Н.Н. Яненко и чл.-корр. Р.И. Солоухиным. В их основе лежит комплексный подход, основанный на использовании методов физического и математического моделирования процессов механики гетерогенных сред, высокотемпературной теплофизики, газовой динамики, химической кинетики и теории тепло- и массопереноса, а также новых методов оптической и контактной диагностики высокоскоростных высокотемпературных потоков.

Теоретические и экспериментальные работы, проводимые в ИТПМ СО РАН с начала семидесятых годов по настоящее время, посвящены проблемам механики течений реагирующих смесей газов и дисперсной фазы. В ИТМО НАН Беларуси исследования горения и детонации ведутся также с начала семидесятых годов до настоящего времени. Белорусские авторы разработали научные основы сверхадиабатического горения в пористых средах, теорию воспламенения и детонационного горения различных углеродо- и водородо-воздушных топлив в широком диапазоне условий, распространения и пределов детонации в сложных трехмерных средах с учетом эффектов фокусировки. Работы Сибирской и Белорусской школ проводились в рамках совместных проектов и сотрудничества, взаимно дополняя друг друга, ежегодно докладывались и обсуждались на международных научных форумах и получили высокую оценку научной общественности.

За эти годы на основе экспериментальных и теоретических исследований создана иерархия физико-математических моделей, соответствующие экспериментальная и математическая технологии для моделирования, описания и прогнозирования воспламенения и горения топливно-воздушных рабочих сред, включая газовзвеси с твердыми частицами, распространения горения и детонации в таких средах, в совокупности позволившие создать научные основы предотвращения катастрофических взрывов, а также использования процессов нестационарного горения и детонации в новых технологических процессах и вновь развивающихся аэрокосмических приложениях.