

Научная статья

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-73-81

Новые методики измерения характерных размеров ячеистых структур детонационного фронта

Александр Андреевич Борискин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия

boriskin.a.a@hydro.nsc.ru

Аннотация

Разработаны и апробированы методики измерения характерных размеров детонационных ячеек, основанные на поточечной обработке фотоснимков самосвечения областей соударений поперечных волн детонационного фронта. Методики используются при условиях, когда непрерывные траектории становятся трудноразличимыми из-за малого расстояния между ними и сливания границ ячеек с общим фоном. Такие точки с повышенной яркостью в моменты встречных соударений поперечных волн позволяют достроить траектории движения поперечных волн и определить размер детонационных ячеек малого размера. Представлены результаты экспериментальных исследований распространения волн детонации в стехиометрических горючих системах ацетилен/кислород и метан/кислород. Получены данные об области существования устойчивых ячеистых структур в этих смесях, а также поперечных размеров отдельных ячеек. Проведено сравнение данных о размере ячеек, полученных по предложенному методу, с известными традиционно используемыми методиками. Установлено соответствие этих данных на примере стехиометрических горючих смесей ацетилен/кислород и метан/кислород.

Ключевые слова

детонационная ячейка, методы измерения, горение, горючие смеси, экспериментальное исследование, фоторегистрация

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения Программы фундаментальных исследований РФ (проект 2.3.1.2.4. «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий» Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН).

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору Васильеву А. А за полезное обсуждение статьи.

Для цитирования

Борискин А. А. Новые методики измерения характерных размеров ячеистых структур детонационного фронта // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 3. С. 73–81. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-73-81

New Methods for Measuring the Characteristic Dimensions of the Cellular Structures of the Detonation Front

Alexander A. Boriskin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

boriskin.a.a@hydro.nsc.ru

Abstract

Methods for measuring the characteristic sizes of detonation cells based on point-by-point processing of photographs of self-illumination of areas of impacts of transverse detonation front waves have been developed and tested. The techniques are used under conditions where continuous trajectories become difficult to distinguish due to the small distance between them and the merging of cell boundaries with the general background. Such points with increased brightness at the moments of oncoming collisions of transverse waves make it possible to complete the trajectories of transverse waves and determine the size of small detonation cells. The results of experimental studies of detonation wave propagation in stoichiometric combustible acetylene/oxygen and methane/oxygen systems are presented. Data on the area of existence of stable cellular structures in these mixtures, as well as the transverse dimensions of individual cells, have been obtained. The data on the size of cells obtained by the proposed method is compared with known traditionally used methods. The correspondence of these data was established using the example of stoichiometric combustible mixtures acetylene/oxygen and methane/oxygen.

Keywords

detonation cell, measurement methods, combustion, combustible mixtures, experimental research, photoregistration

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to Professor Vasiliev A. A. for a useful discussion of the article.

Funding

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the Fundamental Research Program of the Russian Federation (project 2.3.1.2.4. "Nonclassical combustion and detonation processes as the basis of new fundamental knowledge and technologies" Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS).

For citation

Boriskin A. A. New methods for measuring the characteristic dimensions of the cellular structures of the detonation front. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 3, p. 73–81. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-73-81

Введение

В силу неустойчивости газодинамических течений с химическими реакциями [1–2] детонационная волна в газообразных горючих смесях представляет собой сложную неоднородную многофронтную структуру. Данная структура состоит не только из распространяющегося головного фронта, но и многочисленных поперечных волн, движение и столкновение которых (друг с другом и стенками канала) вычерчивает характерную ромбовидную ячеистую сетку. Отдельный элемент сетки получил название детонационной ячейки [2]. Впоследствии была обнаружена и объяснена взаимосвязь энергии инициирования детонации с размером детонационной ячейки [3].

Двумерная схема движения фронта детонации с периодической структурой показана на рис. 1. Передняя поверхность детонационного фронта представляет собой фронт первичного ударного сжатия, который состоит из выпуклых участков, сопрягающихся друг с другом в точках излома. Окрестность каждой из точек излома представляет собой маховскую трехударную волновую конфигурацию. В этой конфигурации третья отраженная волна движется по зоне индукции и сопрягается с поперечной волной, распространяющейся по продуктам реакции. Траектории движения точек излома (ввиду высокой интенсивности их светоизлучения) при регистрации на неподвижную фотопленку образуют характерную ромбовидную структуру. На рис. 1 показана ситуация с одной ячейкой (две поперечные волны). В силу периодич-

ности структуры по времени и пространству изучение процессов в одной ячейке дает полную картину явления. В трехмерном случае ячейка образуется траекториями поперечных волн, движущихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

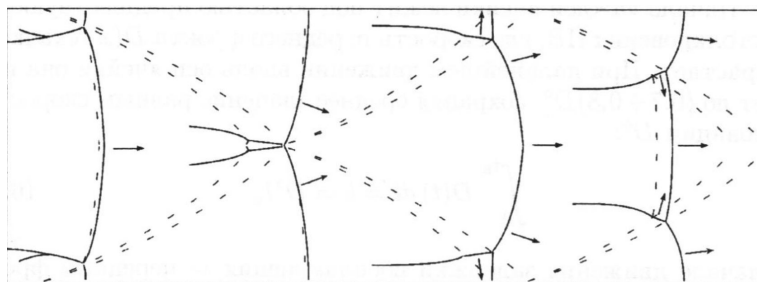


Рис. 1. Схема движения двумерной многофронтной детонационной волны и образования ромбовидной ячеистой структуры [4]

Fig. 1. Scheme of the motion of a two-dimensional multifront detonation wave and the formation of a diamond-shaped cellular structure [4]

Традиционно для газообразных горючих смесей информация о структуре детонационных волн извлекается из снимков траекторий поперечных волн многофронтной детонации при их распространении вдоль детонационного фронта. Эти траектории регистрируются на закопченных поверхностях (следовой метод (рис. 2, а) – воздействие повышенных давлений в зонах соединения поперечных волн с головным фронтом) или на фотоснимках распространения волн на неподвижную пленку (метод открытого затвора (рис. 2, б и рис. 2, в) – воздействие повышенных температур и яркостей). Эти методы широко используются при пониженных начальных давлениях P_0 смеси, когда детонационные ячейки имеют достаточно большой размер и траектории поперечных волн хорошо различимы. С повышением P_0 размер ячеек уменьшается и траектории поперечных волн становятся трудноразличимыми.

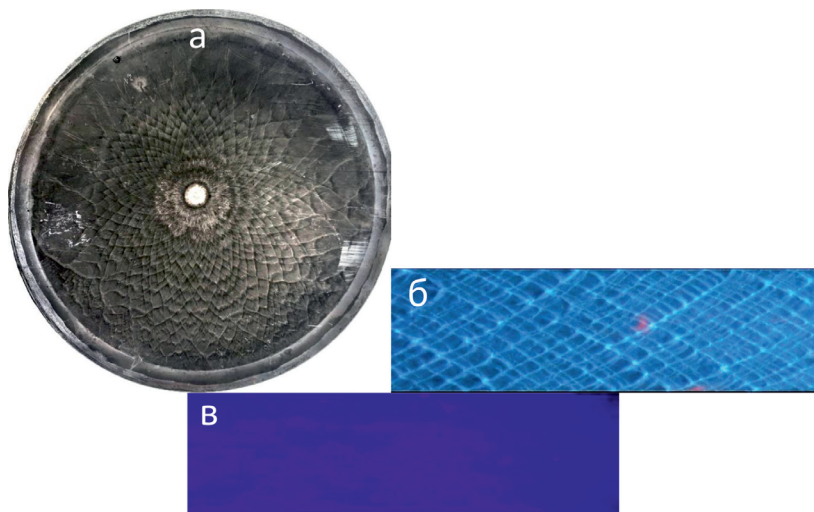


Рис. 2. Следовой отпечаток, оставленный на закопченной пластине при дифракционном натекании детонационной волны из центра в плоский зазор (а) и снимки детонационных ячеек, полученных цифровым фотоаппаратом методом открытого затвора, смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$ с начальным давлением $P_0 = 0,032$ атм. (б) и $CH_4 + 2O_2$ $P_0=0,32$ атм. (в)

Fig. 2. A trace print left on a sooty plate when a detonation wave diffracts from the center into a flat gap (a) and images of detonation cells obtained with an open-shutter digital camera, a mixture of $C_2H_2 + 2,5O_2$ with an initial pressure of $P_0 = 0.032$ atm. (b) and $CH_4 + 2O_2$ $P_0=0.32$ atm. (c)

Метод «открытого затвора» наиболее прост, доступен и информативен для анализа детонации, поэтому в данной работе используется именно он. Его суть заключается в том, чтобы установить выдержку фотоаппарата больше, чем время протекания детонационного процесса. В данный момент все большее распространение получило использование цифровых фотоаппаратов для этих целей. Полученные с помощью цифровой камеры фотографии показаны на рис. 2, б и рис. 2, в. Одной из проблем данного метода для большинства топливных смесей является нечеткость границ отдельных ячеек ввиду слабой интенсивности их свечения по сравнению с общим свечением процесса. Как результат, не всегда удается по полученным снимкам измерить ячейку «напрямую».

Как видно из рис. 2, в, ячеистая структура, зафиксированная с помощью цифрового фотоаппарата, не всегда четко видна. На рисунке заметны лишь точки соударения трехволновых конфигураций от различных поперечных волн, в то время как сами траектории точек излома (от столкновения до столкновения) плохо видны или сливаются с засветкой, вызванной химической реакцией в детонационной волне. В этом случае, особенно учитывая нерегулярность ячейки, не удастся получить достоверные данные при измерении ячейки «напрямую», необходимы методики, с помощью которых можно более точно измерить ячейку и «восстановить» детонационную структуру.

Цель данной работы состоит в том, чтобы предложить и апробировать новые методики, которые позволят по имеющимся на фотоснимке локальным наиболее ярким элементам детонационного фронта восстановить ячеистую структуру во всей области распространения детонации и получить данные о размерах ячеек.

Методики регистрации и измерения детонационных ячеек

Один из таких способов определения размера детонационной ячейки связан с построением «поточечной сетки». Суть этого способа заключается в идентификации и отметки точек с повышенной яркостью как локальных мест соударения поперечных волн на их траекториях. Через точки соударения можно провести прямые линии, соответствующие траекториям движения поперечных волн при распространении по детонационному фронту. Эти линии в совокупности образуют традиционную ромбовидную сетку (см. рис. 2, б). Таким образом, данная методика «поточечной сетки» позволяет доопределить ячеистую структуру в областях, где не видно даже точек соударений. В дальнейшем измерение поперечного размера ячейки проходило так, как это показано на рис. 3, а. Вдоль канала проводилось несколько прямых линий (на рис. 3, а – вертикальные белые линии на определенном расстоянии друг от друга) и высчитывалось количество наклонных траекторий поперечных волн одного направления, пересекающих отдельную вертикаль. Размер локальной ячейки вычислялся как отношение ширины канала к количеству пересечений наклонных линий с вертикалью. Усреднение по всем локальным ячейкам на всех вертикальных линиях принималось за средний размер ячеек.

Разновидностью вышеописанного способа является методика «поточечного измерения». Суть заключается в том, чтобы измерять расстояние между двумя соседними точками соударения поперечных волн, лежащих на одной траектории, полученной в рамках построения «поточечной сетки». Через значение расстояния $l/2$ и угла φ – между линией, проходящей через эти точки, и горизонтальной стенкой или осью плоского канала (рис. 3, б) – можно вычислить значение половины поперечного размера детонационной ячейки. Проведя подобную операцию со всеми видимыми точками соударения и усреднив результат (не забыв умножить на 2), получаем среднее значение поперечного размера ячейки. В данной методике предполагается, что мы однозначно идентифицируем ближайшие точки повышенной яркости, принадлежащие единой траектории.

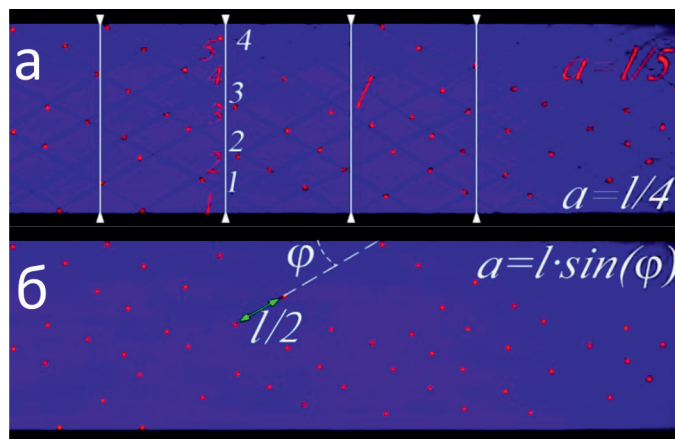


Рис. 3. Применение методики «поточечного измерения» (а) и «поточечной сетки» (б) к смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ $P_0 = 0,32$ атм. (см. рис. 2, в) с плохо детектируемой ячеистой структурой
 Fig. 3. Application of the “point measurement” (a) and “point grid” (b) techniques to a mixture of $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ $P_0 = 0.32$ atm. (Fig. 2, в) with poorly detectable cellular structure

Эффективность и точность описанных выше методик «поточечного измерения» и «поточечной сетки» исследуется в данной работе на монотопливных газовых смесях. Ниже приведены схема экспериментальной установки и полученные результаты.

Экспериментальная установка

Эксперименты по изучению размеров детонационной ячейки проводились в плоском канале толщиной 3 мм, шириной 60 мм и длиной 900 мм. Сам канал был выфрезерован в дюралюминиевой пластине D16T толщиной 16 мм, которая сверху закрывалась толстым оптическим оргстеклом толщиной 25 мм с вакуумным уплотнением по всему контуру. Наличие прозрачного оргстекла позволяет визуально наблюдать процесс распространения детонационных волн в рабочей камере. Данную рабочую камеру с плоским каналом подключали к системе газопитания и форвакуумному насосу, вакуумметру (250 делений/атм.) и высоковольтному генератору подрыва. Иницирование смеси в канале производилось за счет разрядки конденсатора генератора на свече зажигания, которая и создавала иницирующую искру в начале канала.

В зависимости от энергии E^* , передаваемой от инициатора к смеси, возможно наблюдение различных характерных стационарных и нестационарных процессов как горения, так и детонации. Поскольку E^* – экспериментально трудно измеряемая величина, вместо нее варьировали начальное давление смеси P_0 в рабочей камере.

В область фотографирования попадал весь экспериментальный канал целиком, однако так как созданной инициатором волне горения (или пересжатой детонации) требуется некоторое время и расстояние для возникновения характерного стационарного (или нестационарного) режима, то измерение ячейки проводится на некотором отдалении от инициатора. Это расстояние зависит от энергии, передаваемой от инициатора и параметров рабочего газа. Поскольку в данной работе варьировалось начальное давление в канале, именно его изменение приводило к увеличению (при уменьшении P_0) или уменьшению (при увеличении P_0) расстояния от инициатора до перехода в характерный режим. Поперечные размеры отдельных детонационных ячеек измерялись описанными выше методиками «поточечного измерения» и «поточечной сетки».

В качестве рабочих смесей использовались поочередно две смеси: стехиометрия ацетилена с кислородом и стехиометрия метана с кислородом. Первая из них использовалась для апробирования методик измерения поперечных размеров ячейки, поскольку в ацетилене отчетливо

видны траектории поперечных волн (а значит и границы каждой отдельной ячейки). Полученные используемыми методиками результаты легко проверяются «визуально». Вторая смесь непосредственно представляет интерес в данной работе, поскольку в ней большинство траекторий поперечных волн не удалось зафиксировать фотоаппаратурой, видны в основном лишь наиболее яркие места соударений этих волн (см. рис. 2, в).

Результаты и обсуждения

Стационарная (и квазистационарная) детонация наблюдалась в смеси ацетилена с кислородом при начальных давлениях $P_0 = 0,028$ атм. и выше, а в стехиометрии метан – кислород – при $P_0 = 0,18$ атм. и выше. Поскольку поперечный размер детонационной ячейки обратно пропорционален начальному давлению, то при достаточно большом P_0 ячеистая структура будет слабо различима ввиду ограниченной разрешающей способности цифрового фотоаппарата и дополнительной засветки, вызванной догоранием смеси за детонационной волной. В связи с этим измерение поперечных размеров детонационной ячейки проводилось в диапазоне начальных давлений $P_0 = 0,028 \div 0,06$ атм. для стехиометрии ацетилена с кислородом и $P_0 = 0,18 \div 0,4$ атм. для стехиометрической смеси метан – кислород.

На рис. 4 показаны данные о поперечных размерах ячеек в ацетилен-кислородной стехиометрической смеси. График на рис. 4, а демонстрирует известные экспериментальные данные, полученные из научной литературы для более широкого спектра начальных давлений, чем в текущей работе. Из данного графика виден сильный разброс по размерам ячеек, однако большинство значений находятся между линией min и линией max (обозначены штриховкой), а наибольшая плотность данных наблюдается вдоль оптимальной линии opt (сплошная линия). В области начальных давлений $P_0 = 0,028 \div 0,06$ атм. наибольшая плотность данных, как это видно из рис. 4, а, наблюдается между линиями opt и min, причем ближе к последней.

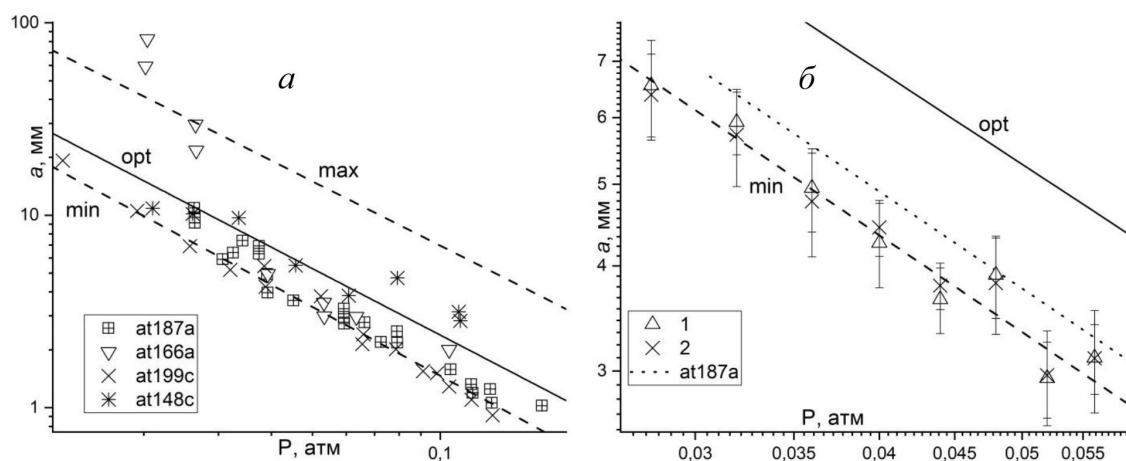


Рис. 4. Зависимость размера детонационной ячейки от начального давления смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$: а – справочные значения и усреднения по ним: at187a – [5], at166a – [6], at199c – [7], at148c – [8];

б – сравнение полученных в данной работе значений со справочными. Данные получены 1 – методикой «поточечного измерения» и 2 – «поточечной сетки»

Fig. 4. Dependence of the detonation cell size on the initial pressure of the $C_2H_2 + 2.5 O_2$ mixture: а – are the reference values and their averages: at187a – [5], at166a – [6], at199c – [7], at148c – [8]; б – is a comparison of the values obtained in this work with the reference values. The data were obtained using 1 – “point-by-point measurement” and 2 – “point grid” techniques

На рис. 4, б показаны экспериментальные данные, полученные методиками «поточечного измерения» и «поточечной сетки». Кроме того, на график для наглядности добавлены линии

min и орт, взятые из графика рис. 4, а, а также поточечная линия, полученная усреднением одной из серий экспериментальных данных (например, at187a). Как видно на рис. 4, б, данные, полученные методиками «поточечного измерения» и «поточечной сетки», соответствуют аналогичным данным из статей. Кроме того, расхождения в результатах, полученных этими двумя методиками, минимальны и составляют величину меньше порядка погрешности измерений. Аппроксимационная линия, построенная по полученным обеими методиками данным, сливается с линией min, а поэтому не отображена на рис. 4, б. Таким образом, обе методики показали достаточно точный и хороший результат для стехиометрии ацетилена с кислородом.

Апробировав методики на более простой смеси, перейдем к исследованию плохо регистрируемой ячеистой структуры в стехиометрической смеси метана с кислородом. На графике рис. 5, а демонстрируются известные экспериментальные поперечные размеры ячеек в этой смеси. По аналогии со стехиометрией ацетилена с кислородом показаны различные экспериментальные данные из опубликованных источников. Видно, что большинство значений выстраиваются вдоль линии, которая является для них аппроксимационной (штриховая линия).

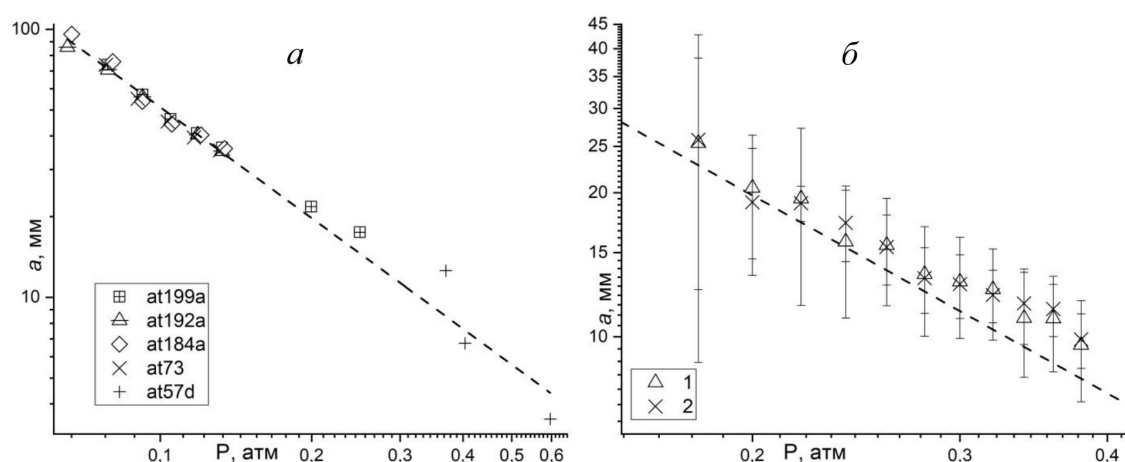


Рис. 5. Зависимость размера детонационной ячейки от начального давления смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$:
а – справочные значения и усреднения по ним: at199a – [7], at192a – [9], at184a – [10], at73 – [11], at57d – [12];
б – сравнение полученных в данной работе значений со справочными. Данные получены

1 – методикой «поточечного измерения» и 2 – «поточечной сетки»

Fig. 5. Dependence of the detonation cell size on the initial pressure of the $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ mixture:
а – are the reference values and their averages: at199a – [7], at192a – [9], at184a – [10], at73 – [11], at57d – [12];
б – is a comparison of the values obtained in this work with the reference values. The data were obtained using
1 – "point-by-point measurement" and 2 – "point grid" techniques

На рис. 5, б показаны результаты измерений поперечных размеров ячеек, полученные из экспериментальных снимков детонационных процессов. Замеры, как и в случае ацетиленовой смеси, проводились методиками «поточечного измерения» и «поточечной сетки». Для сравнения с аналогичными данными из других работ, на график (см. рис. 5, б) добавлена аппроксимационная штриховая линия. Экспериментальные данные, как видно из рисунка, находятся несколько выше линии аппроксимации, однако отклонения находятся в основном в пределах погрешностей. Разница между результатами, полученными предлагаемыми методиками, как и в случае предыдущей смеси, составляет достаточно малую величину. Таким образом, используемые методики показывают хороший результат и в случае стехиометрии метана с кислородом.

Выводы

Предложены методики поточечной обработки местоположения точек соударения поперечных волн с повышенной яркостью и последующего восстановления непрерывных траекторий

поперечных волн. На примере стехиометрических смесей ацетилена с кислородом и метана с кислородом проведено сравнение новых экспериментальных данных о размерах детонационных ячеек, измеренных с помощью новых методик, с известными литературными данными. Сравнение свидетельствует о соответствии этих данных в пределах традиционных погрешностей измерения ячеек. Сделан вывод о правомочности использования «поточечных» методик для измерения детонационных ячеек на фотографиях с трудноразрешимыми траекториями поперечных волн. «Поточечные» методики могут быть рекомендованы для практического использования на новых горючих смесях, в том числе многотопливных.

Список литературы

1. **Ландау Л. Д.** К теории медленного горения // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1944. Т. 14, № 6. С. 240–244.
2. **Щелкин К. И., Трошин Я. К.** Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
3. **Васильев А. А.** Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и иницирование (обзор) // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 1. С. 9–30.
4. **Митрофанов В. В.** Детонация гомогенных и гетерогенных систем. Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2003.
5. **Desbordes D.** Transmission of overdriven plane detonations: critical diameter as a function of cell regularity and size // Dynamics of explosions. 1988. Vol. 114. P. 170–185.
6. **Edwards D. H. et al.** The quasi-steady regime in critically initiated detonation waves // Journal of Physics D: Applied Physics. 1978. Vol. 11. No. 15. P. 2103.
7. **Laberge S.** Propagation and Extinction of Detonation Waves in Tube Bundles // Dynamic Aspects of Detonations. 1993. Vol. 153. P. 381–396.
8. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е.** Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния АН СССР, 1963.
9. **Abid S., Dupré G., Paillard C.** Detonation of UDMH/O₂ Mixtures // Dynamic aspects of detonations. 1993. Vol. 153. P. 162.
10. **Pedley M. D. et al.** Hydrazine vapor detonations // International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Warsaw: Warsaw University Of Technology, The Polish Academy Of Sciences, 1988.
11. **Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M.** The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures // Combustion and Flame. 1982. Vol. 48. P. 63–83.
12. **Manzhalei V. I., Mitrofanov V. V., Subbotin V. A.** Measurement of inhomogeneities of a detonation front in gas mixtures at elevated pressures // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1974. Vol. 10. No. 1. P. 89–95.

References

1. **Landau L. D.** On the theory of slow combustion. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1944, vol. 14, no. 6, pp. 240–244. (in Russ.)
2. **Shchelkin K. I., Troshin Y. K.** Gas dynamics of Combustion. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. (in Russ.)
3. **Vasiliev A. A.** Cellular structures of a multifront detonation wave and initiation (review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 9–30. (in Russ.)
4. **Mitrofanov V. V.** Detonation of homogeneous and heterogeneous systems. Novosibirsk: Publishing House of the Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 2003. (in Russ.)
5. **Desbordes D.** Transmission of overdriven plane detonations: critical diameter as a function of cell regularity and size. *Dynamics of explosions*, 1988, vol. 114, pp. 170–185.
6. **Edwards D. H. et al.** The quasi-steady regime in critically initiated detonation waves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1978, vol. 11, no. 15, 2103 p.

7. **Laberge S.** Propagation and Extinction of Detonation Waves in Tube Bundles. *Dynamic Aspects of Detonation*, 1993, vol. 153, pp. 381–396.
8. **Voytsekhovskiy B. V., Mitrofanov V. V., Topchiyan M. E.** The structure of the detonation front in gases. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963.
9. **Abid S., Dupré G., Paillard C.** Detonation of UDMH/O₂ Mixtures. *Dynamic aspects of detonations*, 1993, vol. 153, 162 p.
10. **Pedley M. D. et al.** Hydrazine vapor detonations. In: *International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive System*. Warsaw: Warsaw University of Technology, The Polish Academy of Sciences, 1988.
11. **Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M.** The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures. *Combustion and Flame*, 1982, vol. 48, pp. 63–83.
12. **Manzhalei V. I., Mitrofanov V. V., Subbotin V. A.** Measurement of inhomogeneities of a detonation front in gas mixtures at elevated pressures. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1974, vol. 10, no. 1, pp. 89–95.

Сведения об авторе

Борискин Александр Андреевич, младший научный сотрудник

Information about the Author

Alexander A. Boriskin, Junior Researcher

*Статья поступила в редакцию 19.09.2025;
одобрена после рецензирования 29.10.2025; принята к публикации 13.11.2025*

*The article was submitted 19.09.2025;
approved after reviewing 29.10.2025; accepted for publication 13.11.2025*