

УДК 662.612

**Исследование зависимости скорости фронта пламени от параметра неоднородности, при горении частично перемешанной смеси с нормальным законом распределения отклонения концентрации от стехиометрического значения**

*Сарафанов К.А., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Иванов М.Ф., д.ф.-м. н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Физика»  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

Задача горения частично перемешанных газовых сред является исследованием одной из мало изученных областей физики. В общем случае получение идеально перемешанной газовой смеси является физически невыполнимой задачей. Более того, поле концентраций может быть существенно неоднородным, например, при утечке водорода в аварийной ситуации. Таким образом, исследование особенностей протекания процессов горения и взрыва в гетерогенных средах с неравномерными полями концентраций компонентов приобретает актуальность и может служить фундаментальной основой при моделировании аварий на АЭС и в других энергопроизводящих технических системах [1].

В настоящей работе рассматривалось распространение пламени в закрытом канале при горении частично перемешанной водород – воздушной смеси с заданием в начальный момент времени случайного поля концентрации водорода с нормальным законом распределения отклонения концентрации от среднего (стехиометрического) значения. Длина канала – 50 мм, ширина – 5 мм. Численное моделирование процессов горения проводилось на основе двумерной математической модели горения сжимаемой, вязкой, теплопроводной, гетерогенной газовой среды [2]. Для описания кинетики горения водорода использовалась схема, состоящая из девятнадцати уравнений. Система уравнений газовой динамики горения решалась численно, методом крупных частиц, шаг по времени – 50 нс. Счетные ячейки имели размер 0.2 × 0.2 мм. На границах расчетной области задавались адиабатические условия. Нормальная и касательная составляющие

скорости на границах расчетной области задавались равными нулю, что позволило учесть непроницаемость стенок и наличие пограничного слоя. В начальный момент времени для горючей смеси задавались условия:  $p_0 = 10^5$  Па,  $T_0 = 300$  К. Плотность в начальный момент времени вычислялась на основе уравнения состояния (уравнение состояния идеального газа).

Поджиг газовой смеси инициировался «горячей стенкой» - заданием постоянной температуры  $T_{x=0} = 3000$  К на левом торце расчетной области.

При решении задачи горения смеси с неравномерным полем концентраций в настоящей работе была предложена модель нормально распределенного отклонения молярной концентраций водорода от среднего значения:  $\langle C_{H_2} \rangle = 0.295$ , которое было взято равным стехиометрического значению для реакции горения водорода при постоянной молярной концентрации азота в смеси  $C_{N_2} = 0.557$ . Среднее значение молярно концентрации кислорода:  $\langle C_{O_2} \rangle = 0.148$ . Тогда, нормальное распределение случайной величины, определяющей молярную концентрацию водорода, можно представить в виде:

$$C_{H_2} = \langle C_{H_2} \rangle (1 + \sqrt{\sigma^2} * \xi) = \langle C_{H_2} \rangle * \xi'$$

Где  $\xi$  – случайная величина, имеющая стандартное нормальное распределение ( $\mu_\xi = 0$ ,  $\sigma_\xi = 1$ ),  $\xi'$  – случайная величина, имеющая нормальное распределение с математическим ожиданием  $\mu_{\xi'} = 1$ ,  $\sigma_{\xi'} = \sqrt{\sigma^2}$ .

В настоящей работе случайная величина  $\xi$  моделировалась с использованием алгоритма Бокса-Мюллера[3], причем использовались только значения  $\xi$  удовлетворяющие условию:

$$C_{H_2} \in [0,147; 0,443].$$

Чтобы не допустить слишком больших или слишком маленьких концентраций водорода. Таким образом, дисперсия распределения концентраций выражается через  $\sigma^2$ , как:

$$\sigma_{C_{H_2}}^2 = \langle C_{H_2} \rangle^2 * \sigma^2 . \quad (1)$$

Если концентрация водорода в каждой расчетной ячейке в начальный момент времени известна, то концентрация кислорода можно вычислить из равенства единице суммы концентраций всех компонентов смеси:

$$C_{O_2} = 1 - C_{N_2} - C_{H_2}$$

Целью настоящей работы являлось исследовать скорость фронта пламени в зависимости от параметра (масштаба) неоднородности смеси  $H$ . Численное значение  $H$  соответствует минимальному линейному размеру области, содержащей все компоненты смеси в количестве равном среднему по исследуемому объему [4].

Начальное распределение концентраций задавалось согласно описанному выше алгоритму, причем таким образом, чтобы среднее значение концентрации водорода в исследуемой области было равным:  $\langle C_{H_2} \rangle_V = 0.295 \pm 0.005$ . Тогда, если определить  $H$  как минимальный линейный размер области  $V_1$  содержащей, так же  $\langle C_{H_2} \rangle_{V_1} = 0.295 \pm 0.005$  с доверительной вероятностью  $P = 0.95$ , то:

$$H \approx 4h'\sigma^2. \quad (2)$$

Где  $h'$  - минимальный размер области, содержащей в начальный момент времени одинаковое количество водорода (например,  $h' = h_x$  - шаг по пространству),  $\sigma^2$  - дисперсия распределения величины  $\xi'$ , используемой для моделирования распределения концентраций водорода (см. (1)). Для полностью перемешанной смеси  $H = 0$ .

Численное решение поставленной задачи получено с помощью программного кода, реализующего счет методом крупных частиц [5], который широко используется при решении задач газодинамики горения и позволяет получать результаты, хорошо согласующиеся с результатами реальных физических экспериментах (например, в работах [6-8]).

В рамках настоящей работы, помимо расчета горения полностью перемешанной смеси, было проведено два вычислительных эксперимента для значений  $H_1 = 0,2$  мм,  $H_2 = 0,8$  мм.

Как известно [8], при распространении ламинарного пламени в закрытом канале, от начала поджига вблизи одного из торцов, до достижения пламенем противоположного конца, фронт пламени проходит через три стадии развития. На первой стадии фронт приобретает вытянутую форму, на второй выпрямляется под действием акустических волн, на третьей стадии, по мере приближения к противоположному торцу канала фронт теряет связность и приобретает ячеистую структуру.

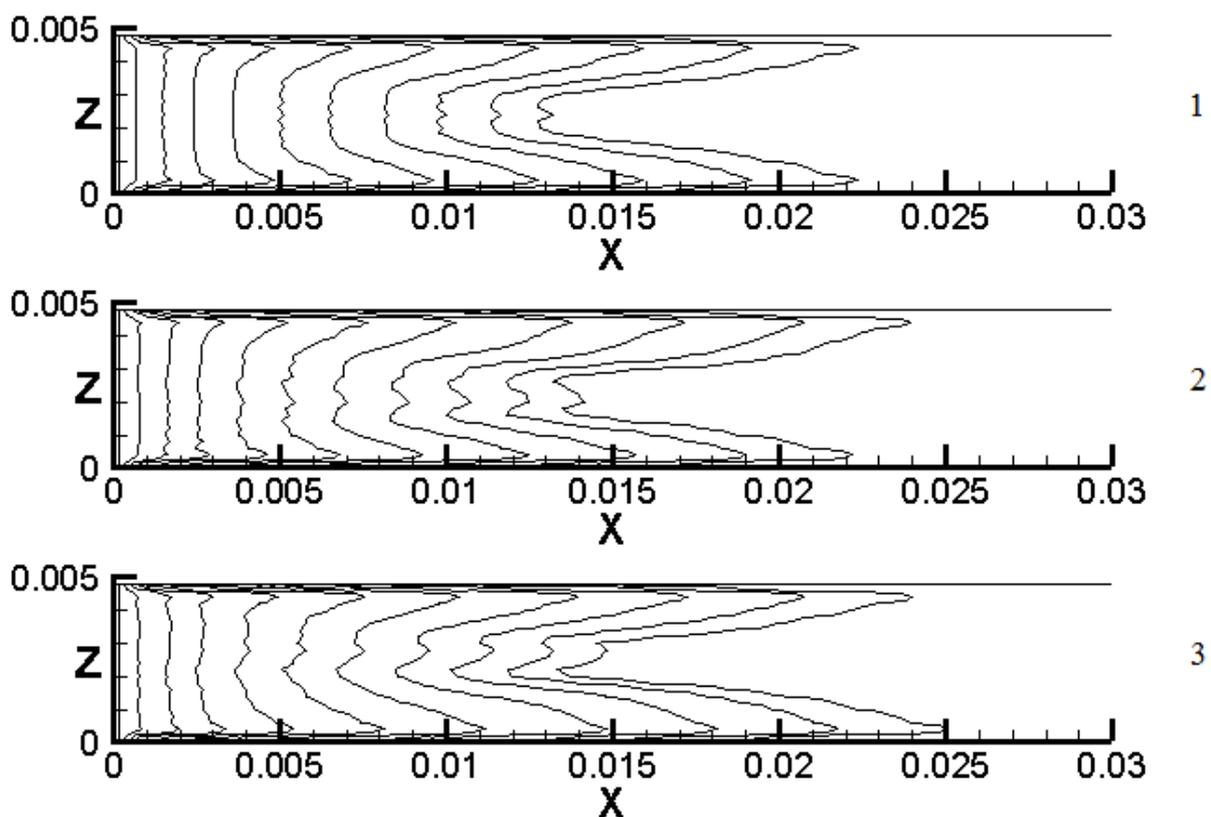


Рис. 1. Эволюция водородно-воздушного пламени в канале. Полностью перемешанная смесь (1). Частично перемешанная смесь,  $H_1 = 0,2$  мм (2). Частично перемешанная смесь,  $H_2 = 0,8$  мм (3). Изолинии концентрации соответствуют временным интервалам 100 мкс

На рис. 1 представлена первая стадия эволюция фронта водородно-воздушного пламени для трех вычислительных экспериментов с различными значениями параметров неоднородности. Видно, что во всех трех случаях фронт принимает так называемую тюльпанообразную форму, которая характерна для водородно-воздушного пламени в каналах средней ширины [8]. Тем не менее, в случае горения частично перемешанной смеси картина эволюции фронта не симметрична относительно оси канала. Один из «лепестков» заметно увеличивается по сравнению с другим.

В случае горения полностью перемешанной смеси, доминирующим фактором смеси на этом этапе является неустойчивость Дарье-Ландау [2,8], картина развития которой определяет форму и скорость распространения фронта пламени. Однако, начальную стадию горения частично перемешанной смеси в закрытом канале можно дополнительно разделить на два этапа в зависимости от состояния свежей смеси перед фронтом пламени.

На первом этапе, который наступает сразу после поджига смеси, поле концентрации топлива перед фронтом пламени остается существенно неоднородным. На фронте пламени начинают возникать дополнительные малые возмущения, обусловленные наличием неоднородности полей концентрации топлива и окислителя. В дальнейшем, благодаря влиянию неустойчивости Дарье-Ландау, происходит нарастание амплитуд таких возмущений, что приводит к увеличению периметра фронта пламени (рис. 2), а следовательно и пропорциональной ему [9] интегральной скорости фронта. Увеличивается поток топлива через фронт пламени, что приводит к увеличению скорости фронта (Рис. 3) и дальнейшему нарастанию амплитуд возмущений.

На втором этапе, вследствие газодинамического переноса, инициированного и поддерживаемого расширением сгорающего вещества, поле концентрации топлива непосредственно перед фронтом существенно выравнивается, становится близким к однородному, масштаб новых возникающих возмущений значительно уменьшается. Под действием акустических волн, переотражающихся от стенок расчетной области фронт пламени выравнивается и в дальнейшем процесс продолжает развиваться аналогично горению полностью перемешанной смеси.

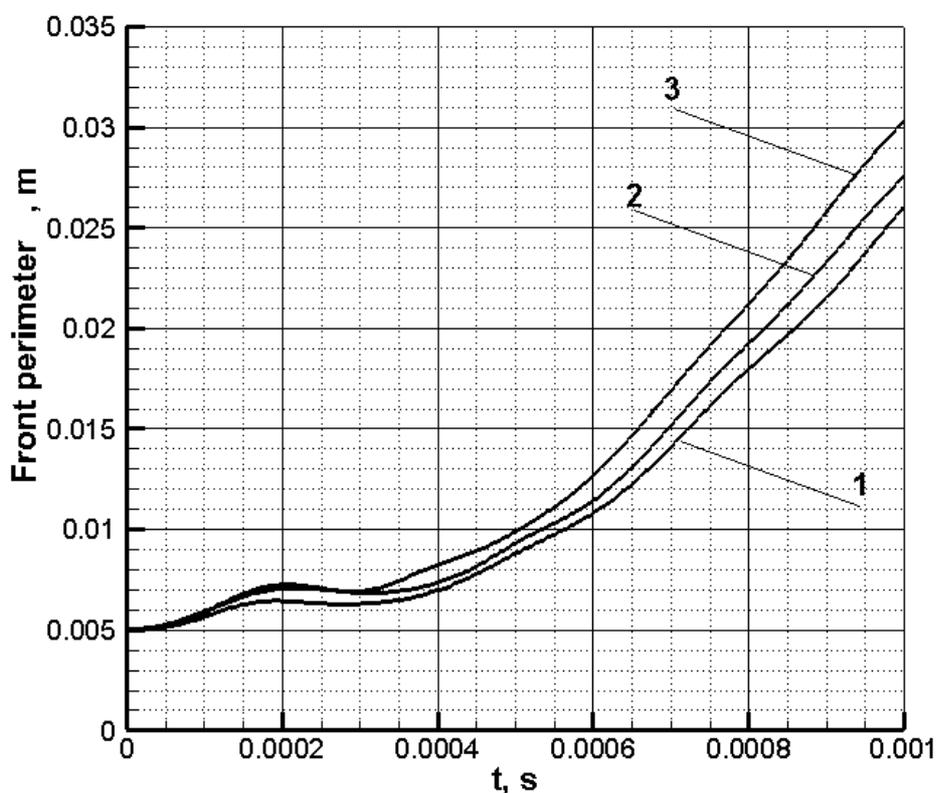


Рис. 2. Изменение периметра фронта пламени во времени. Полностью перемешанная смесь (1). Частично перемешанная смесь,  $H_1 = 0,2$  мм (2). Частично перемешанная смесь,  $H_2 = 0,8$  мм (3)

Анализ и сравнение результатов, полученных при моделировании горения более ( $H = 0,2$  мм) и менее ( $H = 0,8$  мм) однородных смесей приводит к заключению о еще большем возрастании скорости фронта пламени с увеличением параметра неоднородности смеси, что объясняется, во-первых, большим масштабом начальных возмущений, накладываемых на фронт. Во-вторых, увеличивается продолжительность первого этапа горения частично перемешанной смеси, поскольку выравнивание поля концентрации топлива в этом случае достигается позже.

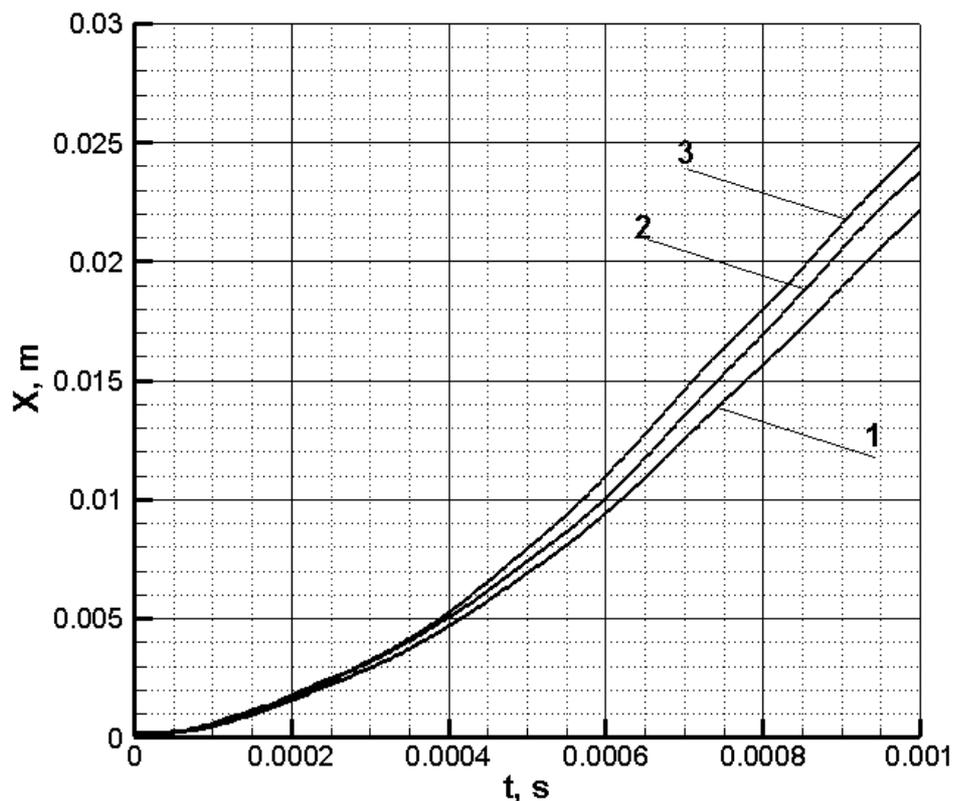


Рис. 3. Зависимость от времени положения ведущей (наиболее удаленной от левого торца канала) точки фронта пламени. Полностью перемешанная смесь (1). Частично перемешанная смесь,  $H_1 = 0,2$  мм (2). Частично перемешанная смесь,  $H_2 = 0,8$  мм (3)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное численное моделирование горения частично перемешанной среды с нормальным законом распределения отклонения концентрации от стехиометрического значения дает результаты, позволяющие сделать вывод об увеличении скорости фронта пламени при горении таких смесей по сравнению с полностью перемешанными водородно-воздушными смесями. Полученным результатам дано объяснение, основанное

на анализе механизма возникновения и развития возмущений, возникающих благодаря неоднородности поля концентраций. Показано, что увеличение параметра неоднородности смеси приводит к еще большему возрастанию скорости горения смеси.

### Список литературы

1. Kyu Tae Kim, Jong Guen Lee, Bryan D. Quay, and Domenic A. Santavicca, Reconstruction of heat release response of partially premixed flames // *Combust. Sci. and Tech.* 2011. № 183. P. 122–137.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. 5-е изд. 2006. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука. гл. ред. физ-мат. лит. 2006. 736 с.
3. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 12-е изд., перераб. М.: Высшее образование. 2006. 479 с.
4. Соколовский Ф.С., Чуйко С.В., Нечай Г.В. Динамический критерий гетерогенности смесевого топлива // *Химическая физика*. 2004. Т. 23, № 7. С. 51-61.
5. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука. гл. ред. физ-мат. лит. 1982. 392 с.
6. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Либерман М. А., Фортов В. Е. Механизм ускорения пламени и переход в детонацию водородно-кислородной смеси в канале // *Доклады Академии Наук*. 2010. Т. 434, № 6. С. 756-759.
7. Иванов М. Ф., Киверин А. Д. Влияние состава горючей смеси на развитие неустойчивости фронта пламени // *Химическая физика*. 2010. Т. 29, № 2. С. 48-54.
8. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Рыков Ю.В. Особенности распространения пламени в замкнутых объемах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2010. № 1. С. 21-38.
9. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука. 1980. 479 с.