

ТУРБУЛЕНТНОЕ ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ: ВЫБРОС ПЛАМЕНИ ЧЕРЕЗ ПРОЕМ

А. Ю. Снегирев, Г. М. Махвиладзе, В. А. Талалов*, А. В. Шамшин

Centre for Research in Fire and Explosion Studies, University of Central Lancashire, Preston, PR1 2HE, UK
asnegirev1@uclan.ac.uk

*Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251 Санкт-Петербург

Экспериментально и численно исследовано развитие турбулентного диффузионного пламени в помещении с вертикальным проемом. Рассмотрен выброс пламени через проем, наблюдавшийся в условиях ограниченной естественно-конвективной вентиляции. Измерения проведены в лабораторном боксе, предназначенном для имитации пожара в помещении. Определен критический (минимальный) расход горючего, вызывающий выброс пламени, а также время задержки между зажиганием горючего и выбросом пламени с последующим установлением режима внешнего горения. Предложены безразмерные переменные для обработки экспериментальных данных. Для разных размеров проема, расположения горелки и размеров бокса получена обобщающая эмпирическая зависимость безразмерного времени выброса от безразмерного расхода горючего. Полученное значение безразмерного критического расхода горючего согласуется с ранее опубликованными результатами измерений, выполненных для газообразных и конденсированных горючих. Идентифицированы и проанализированы нестационарные стадии развития пламени до выброса и сценарии выброса пламени через проем. Разработана трехмерная численная модель для расчета турбулентного диффузионного горения в помещении с проемом, учитывающая сопряженный радиационно-конвективный теплообмен на твердых поверхностях и теплопроводность материала стен и перекрытий. Наблюдавшиеся в экспериментах стадии развития пламени, его выброс через проем и установление внешнего горения воспроизведены в численных расчетах. Расчетные значения времени выброса пламени удовлетворительно согласуются с результатами измерений и с предложенным эмпирическим соотношением.

Ключевые слова: турбулентное диффузионное горение, моделирование пожара.

ВВЕДЕНИЕ

При турбулентном диффузионном горении в ограниченном объеме наблюдаются критические явления, в частности автоколебания пламени и его выброс через проем. Появление внешнего пламени резко увеличивает скорость распространения пожара в помещениях [1, 2], а продукты неполного сгорания в этом режиме содержат значительное количество токсичных компонентов. Нестационарное горение, сопровождающееся выбросом пламени, обусловлено недостатком окислителя в зоне пламени, что, в свою очередь, определяется режимом естественно-конвективного газообмена через проем. Интенсивность турбулентного смешения реагентов и сложный теплообмен в зоне пламени также играют существенную роль.

Возможность выброса пламени и установления внешнего горения определяется скоростью подвода горючего в зону горения. В условиях естественного пожара скорость подвода горючего есть скорость газификации конденса-

рованного (твердого или жидкого) топлива, которая, в свою очередь, определяется падающим на поверхность топлива тепловым (в основном, радиационным) потоком из зоны пламени. Формирующаяся таким образом положительная обратная связь между скоростью выгорания топлива и температурой пламени над его поверхностью сильно усложняет задачу и до сих пор не проанализирована должным образом. Существенное упрощение достигается путем решения двух последовательных и взаимосвязанных задач. В первой из них следует рассмотреть горение с фиксированным расходом горючего и установить влияние заданного расхода горючего на развитие пламени и его выброс через проем. Полученные результаты позволят перейти к анализу более сложной ситуации, когда скорость газификации топлива (и, соответственно, скорость подвода горючего в зону горения) зависит от теплового потока, падающего из зоны горения на поверхность топлива.

Явление выброса пламени и установления

внешнего горения изучалось, в основном, экспериментально. В работах [3–6] измерялась длина видимого пламени, простирающегося из окна. В работе [3] определялась длина пламени в помещении размеров $3,05 \times 3,66 \times 3,05$ м со штабелем древесины в качестве очага пожара. Получены данные о длине внешнего пламени в зависимости от размеров проема и площади очага, однако интенсивность газообмена через проем и массовая скорость выгорания горючего не измерялись. Данные представлены в безразмерном виде с использованием критерия, который содержит размеры проема и очага горения. Маломасштабное ($0,4 \times 0,4 \times 0,4$ м) и полномасштабное ($5,95 \times 4,4 \times 2,75$ м) помещения использовались в экспериментах [6] с несколькими видами горючего (древесина, ПММА и пропан). Безразмерный критерий в работе [6] учитывает как размеры проема, так и массовую скорость выгорания горючего. Пожары в двух полномасштабных помещениях ($2,4 \times 3,6 \times 2,4$ м и $5,95 \times 4,4 \times 2,75$ м) были исследованы в [5] с целью измерения тепловых потоков от внешних пламен, образующихся при горении штабелей древесины и пропана. В работах [7, 8] воспроизводились полностью развитые пожары в помещении размеров $5,31 \times 3,6 \times 2,4$ м с сильно выраженным установившимся внешним горением.

В работе [9] установлена связь между фактом появления внешнего пламени и численным значением коэффициента избытка горючего (отношение расхода горючего к расходу окислителя, деленное на то же отношение в стехиометрической смеси). Эти данные получены в маломасштабном боксе размеров $1,2 \times 0,8 \times 0,8$ м с регулируемой подачей как горючего, так и воздуха. Неполное сгорание горючего внутри бокса и внешнее пламя наблюдалось при коэффициентах избытка горючего выше 0,36. В работе [10] при горении гексана в помещении размеров $1,2 \times 1,5 \times 1,2$ м также получена корреляция частоты появления внешнего горения, концентраций СО и сажи в уходящих продуктах сгорания с коэффициентом избытка горючего. Отдельные вспышки внешнего пламени наблюдались, когда указанный коэффициент достигал значения 1,3, а устойчивое внешнее горение имело место при коэффициенте 1,8. Отметим, что в работе [6] данные о параметрах внешнего пламени приведены лишь для коэффициента избытка горючего больше единицы, что, по видимому, соответствует пределу, ниже кото-

рого внешнее пламя не формировалось. Отметим также, что расход воздуха, необходимый для расчета коэффициента избытка горючего, в работах [9, 10] измерялся непосредственно, а в работе [6] оценивался приближенно с учетом размеров проема.

Таким образом, результаты измерений критического расхода горючего, выше которого наблюдается внешнее горение, имеют значительный разброс. Кроме того, отсутствуют экспериментальные данные о времени задержки выброса пламени.

Примеры численного исследования данного явления немногочисленны. В частности, в работе [11] в двумерной постановке проведено численное исследование режимов горения в помещении из двух комнат, сообщающихся через проем. Выделены три режима горения, реализующиеся при разных соотношениях потоков горючего и окислителя: пламя целиком внутри помещения (малый расход горючего; пожар, регулируемый горючим); пламя расщеплено и существует как внутри, так и вне помещения (умеренный избыток горючего); внешнее горение, пламя находится вне помещения (большой избыток горючего; пожар, регулируемый вентиляцией). Был использован безразмерный критерий, учитывающий расход горючего и интенсивность потока входящего через проем воздуха, который позволил определить границу между режимами. Этот же критерий использован ниже в данной работе при обработке экспериментальных данных и результатов трехмерного численного моделирования. Отметим также, что пример двумерного расчета внешнего горения имеется в работе [12], однако условия, необходимые для выброса пламени через проем, и временные характеристики процесса в этой работе не исследовались.

Приведенный обзор экспериментальных и численных исследований показывает, что требуется дальнейшее экспериментальное и численное изучение режимов горения в ограниченном объеме. Во-первых, следует определить критическое условие, необходимое для выброса пламени через проем. Во-вторых, представляет интерес длительность промежутка времени между моментом подачи и зажигания горючего и моментом выброса пламени (если критическое условие выполнено). Результаты измерений и расчетов необходимо обобщить с помощью безразмерных критериев.

В данной работе измерялось время выбро-

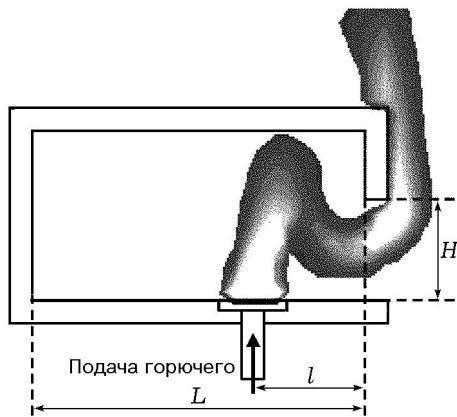


Рис. 1. Вертикальное сечение бокса:

L — длина бокса, l — расстояние от проема до горелки, H — высота проема, W — ширина проема (на рисунке не показана)

са пламени через вертикальный проем в стене лабораторного пожарного бокса и определялся критический расход горючего. Результаты измерений, полученные для разных размеров проема, положений горелки и размеров бокса, обобщены в безразмерном виде. Выделены и проанализированы стадии эволюции пламени, предшествующей выбросу, и рассмотрены различные сценарии выброса и установления внешнего горения. Экспериментальные наблюдения сопоставлены с результатами трехмерного численного моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Использован лабораторный пожарный бокс (рис. 1), внутренние размеры которого $0,615 \times 0,30 \times 0,275$ м, выполненный из плит теплоизолирующего материала Monolux 500 (основные компоненты SiO_2 и CaO) толщиной 2,5 см. Горелка с поперечным сечением сопла 5×5 см, расположенная на уровне пола на одинаковом расстоянии от боковых стен бокса, обеспечивала равномерный по сечению сопла заданный поток горючего. Расход горючего (пропан, содержание примесей не более 0,5 %) измерялся поплавковым расходомером с точностью 4 %. Горючее поджигали в момент начала его подачи. В опытах измеряли время от начала подачи и зажигания горючего до выброса пламени и определяли минимальный (критический) расход горючего, необходимый для выброса пламени и установления внешнего горения.

Использованы проемы двух размеров, и

Конфигурация бокса

Номер серии измерений	H , м	W , м	l , м	L , м
1	0,090	0,075	0,190	0,615
2	0,090	0,115	0,190	0,615
3	0,090	0,075	0,425	0,615
4	0,090	0,115	0,425	0,615
5	0,090	0,075	0,190	0,380
6	0,090	0,115	0,190	0,380

рассмотрены два положения горелки внутри бокса. Кроме того, аналогичные измерения были проведены для боксов разной длины. Всего шесть серий измерений (см. таблицу) было выполнено для разных конфигураций лабораторного помещения, т. е. для разных значений высоты проема, ширины проема, расстояния от проема до горелки и длины бокса (см. рис. 1).

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ КРИТЕРИИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений задержки от начала подачи и зажигания горючего до выброса

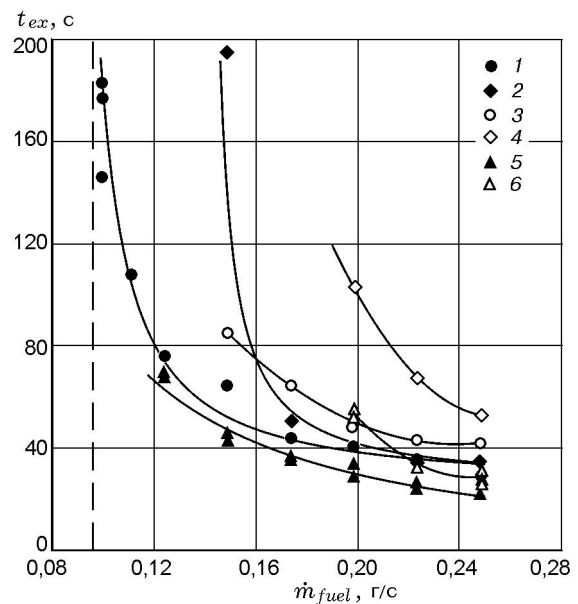


Рис. 2. Измеренное время задержки выброса пламени в зависимости от расхода горючего:

данные для кривых 1–6 приведены в таблице, номера кривых соответствуют номерам серий экспериментов