

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПОЖАРАХ В ПОМЕЩЕНИИ

Г. М. Махвиладзе¹, А. В. Шамшин¹, С. Е. Якуш², А. П. Зыков²

¹Университет Центрального Ланкашира, PR1 2HE Престон, Великобритания

²Институт проблем механики РАН, 119526 Москва, yakush@ipmnet.ru

Приведены результаты экспериментов и численных расчетов пожаров в объемах малого и среднего масштаба в условиях недостаточной вентиляции, приводящей к выбросу пламени в атмосферу. В экспериментах для трех видов топлив (метан, пропан, пропилен) при заданной скорости подачи горючего измерены времена задержки от момента зажигания до появления устойчивого пламени вне помещения. Введены характерные масштабы, зависящие от расхода горючего, положения источника топлива, геометрии помещения и параметров вентиляционных отверстий, при помощи которых установлена единая безразмерная зависимость времени выброса пламени от расхода топлива. Для наименьшего и наибольшего объемов, использовавшихся в экспериментах, проведены трехмерные численные расчеты динамики развития пожара на основе метода крупных вихрей. Представлены полученные в расчетах изоповерхности скорости реакции, демонстрирующие эволюцию пламени в помещении и его осцилляции после выброса в атмосферу. Показано, что результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными наблюдениями, а времена выброса пламени хорошо согласуются с установленной в экспериментах корреляцией.

Ключевые слова: пожар, выброс пламени, эксперименты, численное моделирование, метод крупных вихрей.

ВВЕДЕНИЕ

Пожары в помещениях часто носят нестационарный характер. В особенности это касается пожаров в помещениях с недостаточной вентиляцией, когда размеры и положение имеющихся проемов не обеспечивают необходимого притока кислорода. По мере выгорания находящегося в помещении кислорода пламя начинает распространяться по направлению к проему. В некоторых случаях происходит погасание пламени, однако в большом числе случаев наблюдается более опасный сценарий — выброс пламени в атмосферу через вентиляционный проем. Это может привести к распространению пожара на соседние помещения здания, к тому же выброс пламени часто сопровождается так называемой объемной вспышкой, т. е. переходом от локализованного пожара к возгоранию всех находящихся в помещении горючих материалов [1, 2].

Обзор экспериментальных и теоретических исследований выброса пламени из помещения с ограниченной вентиляцией выполнен в работах [3–5]. Анализ имеющейся литературы показывает, что из-за присущей процессу нерегулярности такие характеристики пожара, как время от момента возгорания до выброса пламени из помещения и критический расход топлива, при котором происходят выброс пламени или его погасание, определяются в экспериментах с существенным разбросом. Соответственно вопрос о корректном определении критических условий выброса пламени до сих пор остается открытым.

В работе [3] была поставлена задача определения критического расхода горючего и времени задержки выброса пламени при постоянном расходе газообразного топлива. При таком подходе скорость поступления горючего является контролируемым параметром, в отличие, например, от горения твердых материалов и жидкостей, где скорость газификации, определяемая радиационным потоком от пламени, меняется с течением времени за счет нелинейной обратной связи. Были проведены эксперимен-

¹University of Central Lancashire, PR1 2HE, Preston, UK.

Работа проведена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-32399), INTAS (грант № 03-51-4724) и EPSRC (грант № GR/S69122/01).

тальные исследования выброса пламени при горении пропана в пожарном боксе лабораторных размеров для различной геометрии вентиляционного отверстия. Полученные экспериментальные данные по выбросу пламени выражены в виде безразмерной зависимости времени выброса пламени от приведенного расхода топлива. На основании наблюдений за поведением пламени были выделены пять последовательных стадий процесса, от начального развития пламени при избытке окислителя до собственно выброса через проем.

В последнее время авторами была проведена значительно более представительная серия экспериментов по выбросу пламени, включающая около 400 тестов на мало- и средне-масштабных установках (предварительные результаты этой серии представлены в [4, 5]). Как и в [3], в качестве источника пожара использовалась горелка с заданным расходом горючего. В экспериментах с тремя видами топлива варьировались расход горючего, геометрия помещения и вентиляционного отверстия, а также положение источника топлива, при этом варьирование параметров проводилось в более широком диапазоне, чем в работе [3].

Наряду с экспериментами, представляет интерес численное моделирование пожаров в помещениях с недостаточной вентиляцией. До настоящего времени было выполнено несколько таких расчетов. В работе [3] проведены расчеты для условий экспериментов в пожарном боксе лабораторного масштаба. Вычислительная модель основана на решении системы уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и модели дробления турбулентных вихрей для описания скорости турбулентного горения. Аналогичные уравнения решались в [6], где для расчета скорости турбулентного горения применялась модель диссипации вихрей. Следует заметить, что в обоих случаях полученное в расчетах время выброса пламени было меньше, чем измеренное в соответствующих экспериментах.

В настоящей работе выполнен анализ экспериментальных результатов, полученных авторами в серии тестов на установках малого и среднего масштаба. Построена критериальная зависимость для времени выброса пламени, более точно учитывающая геометрические характеристики помещения и параметры источника горючего по сравнению с корреляцией [3]. Для наибольшего и наименьшего объе-

мов, использовавшихся в экспериментах, методом крупных вихрей выполнено численное моделирование развития пожара и выброса пламени. Проведено качественное и количественное сопоставление результатов расчетов с экспериментальными наблюдениями и предыдущими расчетами на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений [3].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Эксперименты на установке малого масштаба проводились в Центре по изучению пожаров и взрывов Университета Центрального Ланкашира (Великобритания). Использовались объемы следующих размеров: 1) $0.72 \times 0.48 \times 0.48$ м, что в точности воспроизводит стандартное помещение ISO 9705 в масштабе 1 : 5; 2) $0.590 \times 0.30 \times 0.275$ м, что примерно соответствует помещению ISO в масштабе 1 : 7; 3) $0.430 \times 0.30 \times 0.275$ м, что примерно моделирует помещение ISO в масштабе 1 : 8. Стенки экспериментальных объемов толщиной 2.5 см были выполнены из материала Monolux.

Эксперименты среднего масштаба проводились в Университете г. Лунд (Швеция). Использовались объемы с толщиной стенок 1.5 см, выполненные из материала Monolux и имеющие следующие внутренние размеры: 1) $1.025 \times 0.72 \times 0.70$ м, что соответствует стандартному помещению ISO в масштабе примерно 1 : 3; 2) $0.655 \times 0.72 \times 0.70$ м — то же помещение в масштабе примерно 1 : 4. Геометрия объема (длина помещения L , его ширина W , высота H) и размеры вентиляционного отверстия (высота h , ширина w) для всех проведенных экспериментов приведены в таблице.

Во всех случаях горелка, обеспечивающая постоянную и контролируемую скорость подачи топлива, располагалась на уровне пола на центральной линии вентиляционного проема, расстояние l между проемом и горелкой указано в таблице. Скорость подачи топлива поддерживалась постоянной в течение эксперимента с точностью $\pm 4\%$. В маломасштабных экспериментах в качестве топлива использовался пропан, его расход варьировался в диапазоне $0.1 \div 0.8$ г/с. В среднемасштабных экспериментах использовались пропан, метан (эксперименты M11C и M12B) и пропилен (N12B), расход топлива составлял $1 \div 4$ г/с. Таким образом, параметры экспериментов менялись в значительно более широком диапазоне, чем в работе [3], где использовался один пожарный

Геометрия помещения, вентиляционного отверстия
и положение источника топлива для различных экспериментов

Вариант	Помещение			Отверстие		Источник
	H , м	W , м	L , м	h , м	w , м	l , м
P1A	0.275	0.300	0.590	0.090	0.075	0.190
P1B	0.275	0.300	0.590	0.090	0.075	0.400
P2A	0.275	0.300	0.590	0.090	0.115	0.190
P2B	0.275	0.300	0.590	0.090	0.115	0.400
P3A	0.275	0.300	0.590	0.130	0.095	0.190
P3B	0.275	0.300	0.590	0.130	0.095	0.400
P4B	0.275	0.300	0.430	0.090	0.075	0.400
P5B	0.275	0.300	0.430	0.090	0.115	0.400
P6B	0.275	0.300	0.430	0.130	0.095	0.400
P7C	0.480	0.480	0.720	0.150	0.125	0.360
P8C	0.480	0.480	0.720	0.140	0.160	0.360
P9C	0.480	0.480	0.720	0.180	0.080	0.360
P10C	0.700	0.720	1.025	0.300	0.250	0.513
P11C	0.700	0.720	1.025	0.285	0.320	0.513
M11C	0.700	0.720	1.025	0.285	0.320	0.513
P12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505
M12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505
N12B	0.700	0.720	0.655	0.160	0.160	0.505

бокс размером $0.615 \times 0.30 \times 0.275$ м, а расход топлива (пропана) составлял $0.1 \div 0.25$ г/с.

Данные 180 маломасштабных и 120 среднemasштабных экспериментов представлены на рис. 1, а в виде зависимости времени выброса пламени через проем t_{ex} от расхода топлива \dot{m}_f (нумерация точек соответствует данным таблицы, для ясности рисунка в каждой серии экспериментов показано несколько представительных точек). Для получения соответствующей безразмерной зависимости введем величины

$$\tilde{m}_f = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_a}{(\dot{m}_f / \dot{m}_a)_{st}}, \quad (1)$$

$$\tau_{ex} = \frac{t_{ex}}{t_*}, \quad t_* = \frac{l}{L} t_v, \quad t_v = \frac{\rho_0 V}{\dot{m}_a}, \quad (2)$$

где \dot{m}_a — расход воздуха через проем, $(\dot{m}_f / \dot{m}_a)_{st}$ — стехиометрическое отношение расходов топлива и воздуха (для пропана

$(\dot{m}_f / \dot{m}_a)_{st} = 0.064$), t_v — характерное время вентиляции, ρ_0 — плотность воздуха, V — объем помещения. Расход воздуха \dot{m}_a определяется по соотношению

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_w \sqrt{2g\rho_0(\rho_0 - \rho)} h_0^{3/2} w, \quad (3)$$

где $C_w \approx 0.7$ — коэффициент расхода, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность горячих продуктов горения в боксе (можно считать $\rho \ll \rho_0$), $h_0 \approx 0.4h$ — высота нейтральной плоскости. Масштабы величин, используемые в (1)–(3) для обезразмеривания, совпадают с масштабами, введенными в [3], за исключением того, что время выброса t_{ex} нормируется не на время вентиляции всего помещения t_v , а на время газообмена t_* в объеме, заключенном между источником топлива и вентиляционным отверстием. Как показали эксперименты, приближение источника к вентиляционному отверстию уменьшает время выброса при прочих равных

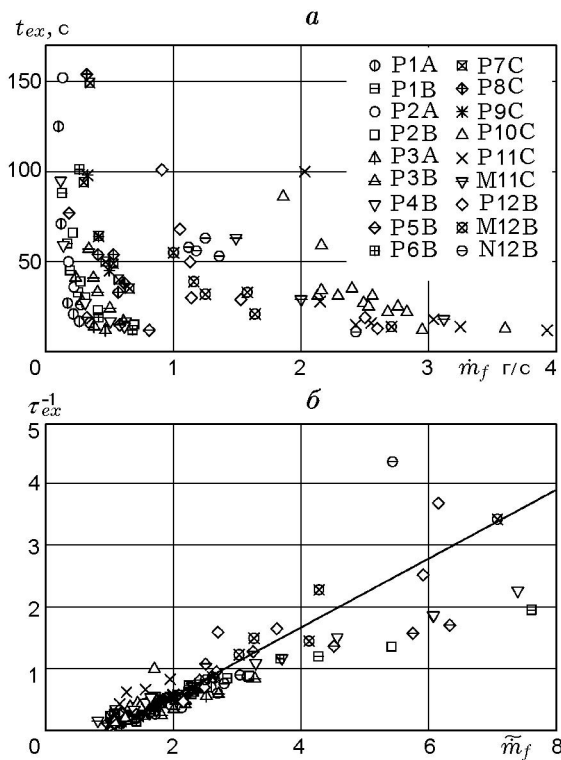


Рис. 1. Экспериментальные данные по времени выброса пламени:
 а — в размерном виде; б — в безразмерных переменных (1)–(3), прямая линия соответствует аппроксимации (4)

условиях, т. е. именно эта часть объема играет главную роль в развитии пламени [4, 5].

В работе [3] было предложено соотношение для времени выброса $t_{ex}/t_v = 1 + 0.5/(\dot{m}_f - 1)$, полученное по результатам небольшого числа экспериментов. Однако тесты в более широком диапазоне параметров показали, что при больших расходах топлива времена выброса становятся меньше t_v , что противоречит данной корреляции. Обработка результатов мало- и среднемасштабных экспериментов, представленных на рис. 1, а в безразмерных переменных (1) и (2), позволила установить следующую аппроксимацию для безразмерного времени выброса пламени: $\tau_{ex} = 1.8/(\dot{m}_f - 1)$. Как и корреляция [3], это соотношение имеет вертикальную асимптоту $\tau_{ex} \rightarrow \infty$ при $\dot{m}_f \rightarrow 1$, определяющую критический расход топлива, ниже которого горение происходит внутри помещения без выброса пламени. Горизонтальная же асимптота $\tau_{ex} \rightarrow 0$ при $\dot{m}_f \rightarrow \infty$ соответствует быстрому вытеснению газа из помещения при возгорании топлива.

На рис. 1, б полученные в экспериментах времена выброса представлены в виде зависимости величины τ_{ex}^{-1} , обратной времени выброса пламени, от безразмерного расхода топлива \dot{m}_f . Прямая линия соответствует найденной в данной работе корреляции

$$\tau_{ex}^{-1} = 0.56(\dot{m}_f - 1). \quad (4)$$

Как видно из рис. 1, аппроксимация (4) удовлетворительно описывает экспериментальные данные в диапазоне расходов топлива $1 < \dot{m}_f < 5$, при больших расходах наблюдается значительный разброс экспериментальных точек, которые тем не менее располагаются симметрично относительно аппроксимирующей прямой.

Качественная картина развития пожара, наблюдавшаяся в экспериментах на установке среднего масштаба, в целом совпадает с описанной в [3], где установлены основные стадии эволюции пламени. Эти стадии включают начальный рост пламени при избытке окислителя, прерывистое пламя при избытке горючего, пульсирующее пламя с нарастающей амплитудой, «блуждающее» пламя, выброс и внешнее горение. Выброс пламени сопровождается колебаниями, из которых особенно интенсивными являются несколько первых осцилляций. При этих колебаниях пламя попеременно выбрасывается наружу и возвращается в объем. В ряде случаев на этой стадии наблюдались срыв горения и погасание пламени, наиболее часто происходившие при горении пропилена (54 % случаев в эксперименте N8B), в то время как для метана срыва горения не наблюдалось. Было установлено, что при низких и умеренных скоростях подачи горючего, соответствующих в безразмерных переменных условию $\dot{m}_f < 3$, на этапе выброса пламени горение устанавливалось и внутри объема, и вне его [4]. При более высоких скоростях подачи топлива после нескольких колебаний устанавливалось только внешнее горение, когда вентиляционное отверстие служило своего рода источником топлива, сгорающего в атмосфере.

Таким образом, анализ проведенной серии экспериментов позволил установить подобие процессов развития пожара в объемах разного масштаба и описать зависимость времени выброса от характеристик помещения, параметров вентиляции и скорости подачи топлива в виде единой критериальной зависимости.

РАСЧЕТЫ ПОЖАРА МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

Численное моделирование пожаров в объемах малого масштаба, проведенное в работах [3, 6] на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, замкнутых при помощи k - ε -модели турбулентности, позволило воспроизвести основные качественные черты эволюции пламени и его выброса через проем. При этом, однако, оказалось, что получаемые в расчетах времена выброса примерно вдвое меньше, чем наблюдаемые в экспериментах. В качестве возможной причины этого в [3] указано, что для объемов малого масштаба течение может быть не полностью турбулентным. Поэтому представляет интерес проведение расчетов для объемов большего масштаба и сравнение результатов с экспериментом.

В настоящей работе для моделирования пожаров в помещениях с недостаточной вентиляцией использован метод крупных вихрей, в последнее время успешно применяющийся для расчетов турбулентного горения [7, 8]. В этом методе вместо осреднения используется процедура фильтрации: осреднение проводится лишь для турбулентных флуктуаций с масштабом меньше ширины фильтра (как правило, порядка размера ячейки сетки), для замыкания возникающих двойных корреляций применяется подсеточная модель турбулентности. В то же время вихри с характерным размером больше ширины фильтра рассчитываются непосредственно из уравнений. В результате оказывается возможным учесть влияние на процессы перемешивания «когерентных» структур, которые особенно ярко проявляются в виде крупномасштабных вихревых образований в пламенах с доминирующей ролью сил плавучести. Следует отметить, что метод крупных вихрей требует значительных вычислительных затрат, поскольку расчет необходимо вести на мелких сетках и с малым шагом по времени.

Для расчетов методом крупных вихрей использовался разработанный в Институте стандартов (NIST) программный код FDS (Fire Dynamics Simulator) [9, 10], точнее, MPI-версия FDS, позволяющая проводить параллельные вычисления (версия 4). Применялась сетка, состоящая из 16 блоков, шесть из которых соответствуют области внутри исследуемого помещения. Каждый блок содержал $100 \times 24 \times 30$ ячеек, таким образом, общее количество ячеек составило более 10^6 (для сравнения от-

метим, что в работе [3] расчеты на основе осредненных уравнений проводились на сетке с $6.4 \cdot 10^4$ ячейками). Вычисления выполнялись на кластерной платформе МВС-15000ВМ Межведомственного суперкомпьютерного центра. Визуализация полученных данных осуществлялась на персональном компьютере посредством поставляющейся вместе с FDS программы Smokeview.

Во всех расчетах использовалась модель горения, основанная на решении уравнения переноса для функции смешения топлива и окислителя (определенной так, что значение 1 соответствует топливу, 0 — окислителю). По известной функции смешения и стехиометрическому соотношению для смеси пропан — воздух определяются концентрации всех компонентов газовой смеси и вычисляется объемная скорость горения. Считается, что реакция протекает с бесконечной скоростью, поэтому топливо и окислитель могут присутствовать лишь по разные стороны поверхности фронта пламени, на котором функция смешения соответствует стехиометрическим условиям. Следует заметить, что в соответствии с этой моделью топливо загорается мгновенно после контакта с атмосферой, т. е. специальный источник зажигания в расчетах не требуется. Кроме того, данная модель не учитывает кинетику реакций горения и не позволяет изучать погасание пламени.

Расчеты методом крупных вихрей проводились для условий экспериментов, в которых топливом служил пропан. Были использованы две геометрии помещения, соответствующие наименьшему и наибольшему экспериментальным объемам. Для маломасштабного объема выбраны экспериментальные конфигурации с положением источника вблизи проема (P2A) и около дальней стенки (P2B). Для среднемасштабного объема использовалась конфигурация с положением горелки в центре (P10C). Проводились также расчеты для того же помещения, но с уменьшенной длиной (P12B). Обозначения конфигураций соответствуют обозначениям экспериментов в таблице.

Рассмотрим сначала результаты, полученные для варианта P2A. На рис. 2 и 3 показано развитие пожара в интервале времени до 33.8 с после зажигания при $\dot{m}_f = 0.34$ г/с (для этих параметров $\dot{m}_a = 0.34$ г/с, $\bar{m}_f = 0.34/(0.064 \cdot 2) = 2.65$, $t_* = 9.7$ с, см. соотношения (1)–(3)).

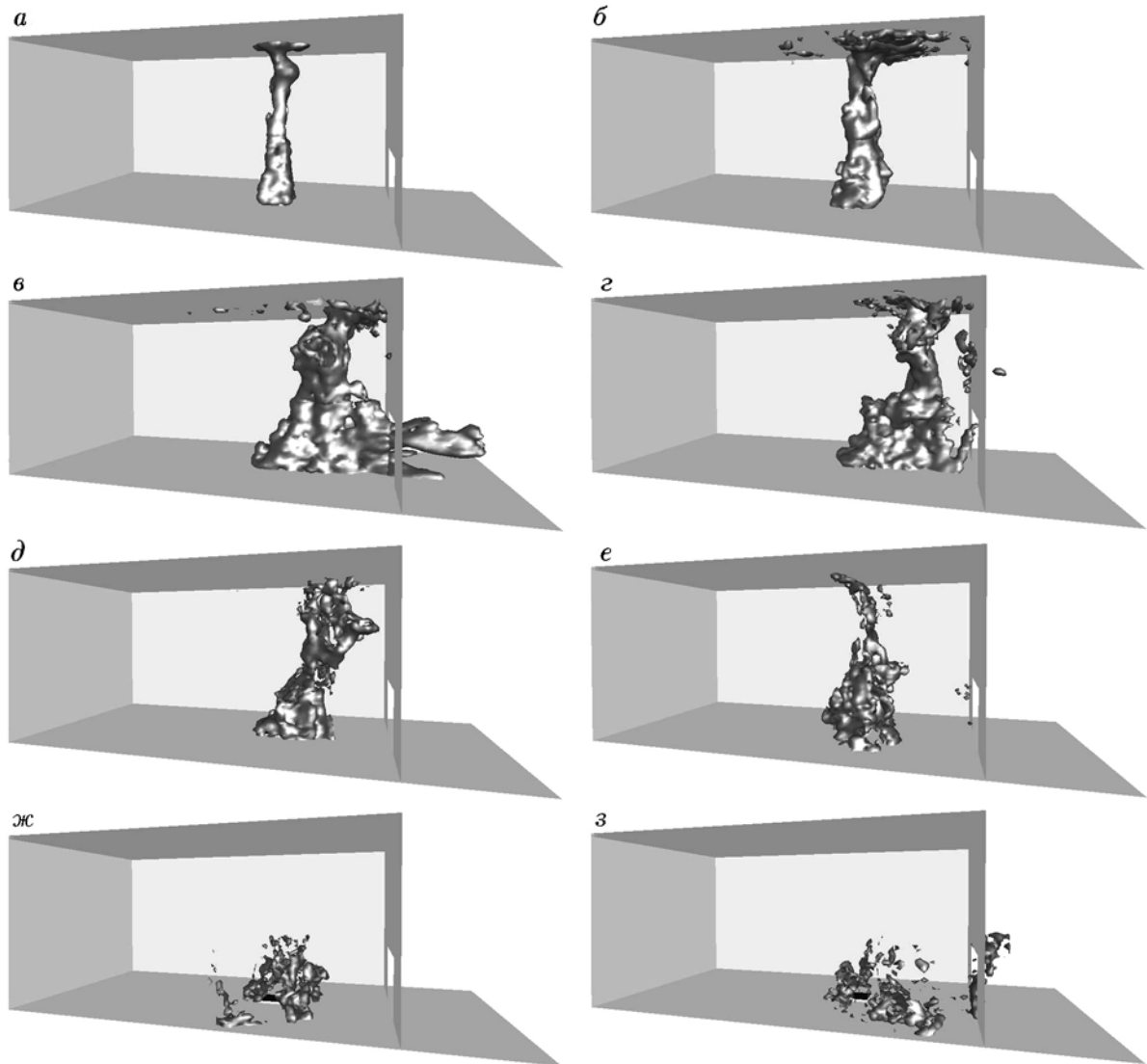


Рис. 2. Развитие пожара для случая P2A до выброса пламени через вентиляционное отверстие при $\dot{m}_f = 0.34$ г/с в различные моменты времени после зажигания:

a — 0.6 с; *б* — 1.3 с; *в* — 2.6 с; *г* — 3.1 с; *д* — 4.0 с; *е* — 5.0 с; *ж* — 6.9 с; *з* — 8.5 с

Развитие пламени до его выброса через проем показано на рис. 2 в последовательные моменты времени. Полученная в расчетах последовательность событий хорошо соответствует экспериментальным наблюдениям (см. [3] и описание экспериментов в данной работе). На ранних стадиях, когда в объеме имеется достаточное количество кислорода, пламя вытянуто в вертикальном направлении (см. рис. 2, *a, б*). Как только концентрация кислорода в объеме заметно уменьшается, пламя начинает растягиваться в горизонтальном направлении, постепенно растекаясь по потолку (см. рис. 2, *в-е*), на этой стадии наблюдается осцил-

лирующее поведение пламени, которое тем не менее остается связанным с источником топлива. Заметим, что при $t = 2.6$ с пламя выходит из проема наружу, но это событие еще нельзя интерпретировать как выброс пламени, поскольку в большей степени оно происходит в результате вытеснения пламени расширяющимся горячим газом, а не отражает какие-либо фундаментальные изменения в поведении пламени. Далее, после того как в помещении остаются лишь отдельные локальные области, содержащие кислород, пламя отделяется от источника топлива, отдельные вспышки происходят в разных местах внутри помещения, до тех

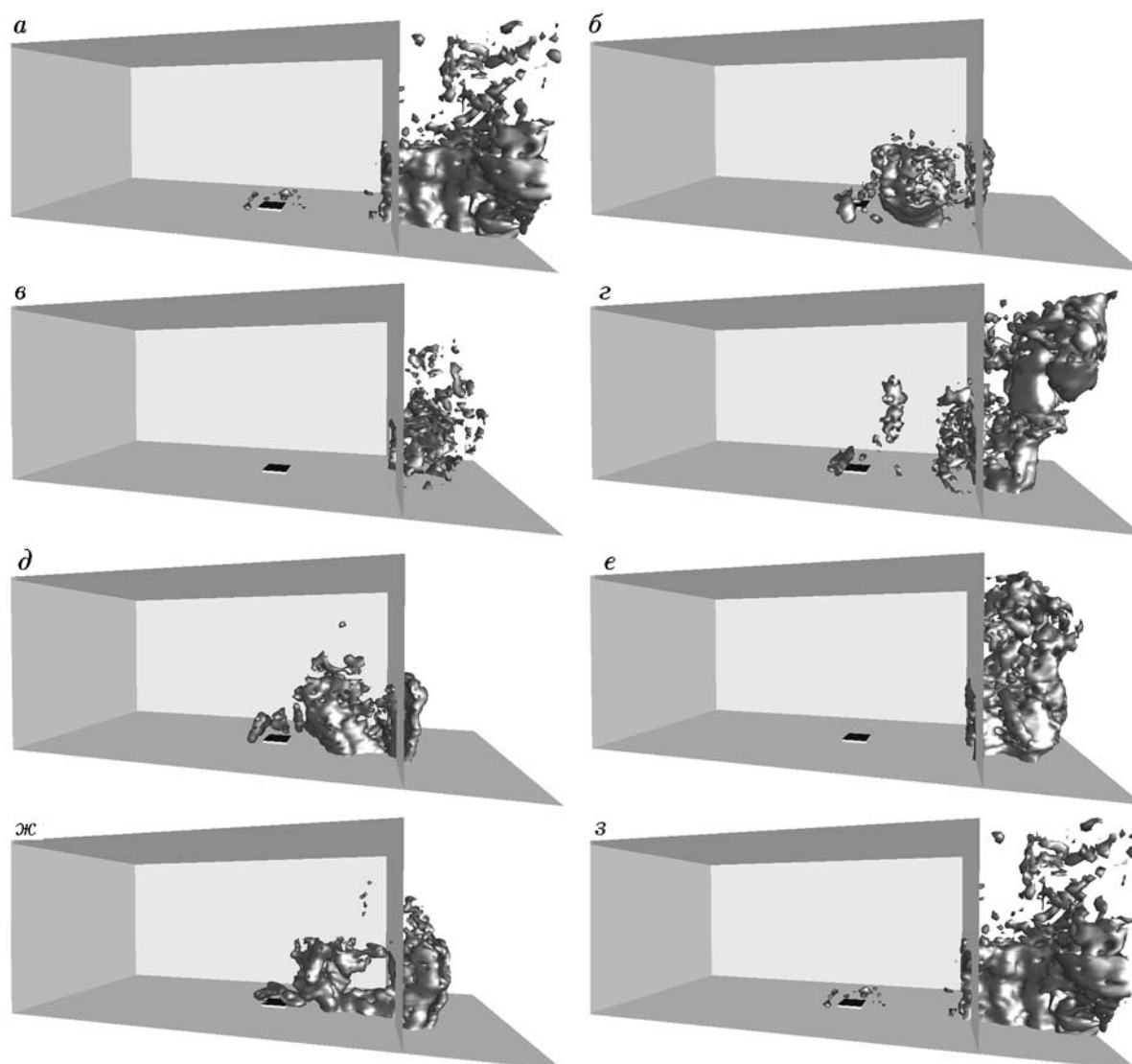


Рис. 3. Развитие пожара для случая P2A после выброса пламени через вентиляционное отверстие при $\dot{m}_f = 0.34$ г/с в различные моменты времени после зажигания:

a — 14.8 с; *б* — 15.0 с; *в* — 15.2 с; *г* — 18.4 с; *д* — 23.9 с; *e* — 24.2 с; *ж* — 24.6 с; *з* — 33.8 с

пор пока не будет поглощен последний кислород («блуждающее пламя»). На завершающей стадии накопившиеся в объеме горячие газы, содержащие несгоревшее топливо, перемешиваются с воздухом вблизи проема, что приводит к повторному возгоранию топлива и выбросу пламени в окружающую атмосферу.

На рис. 3 представлено развитие пожара после выброса пламени из помещения в последовательные моменты времени. На этой стадии горение сильно нестационарно и сопровождается осцилляциями пламени, хорошо видными на рис. 3 (см., например, рис. 3, *a-в* или рис. 3, *д-ж*). Плавающая струя продуктов горе-

ния вовлекает в движение холодный воздух, что приводит к периодическому захвату и проникновению объемов кислорода через проем в помещение. Как только это происходит, пламя возвращается внутрь помещения, поглощая проникший в объем кислород, после чего поток газа снова выбрасывает его в атмосферу. Заметим, что в данном расчете $\dot{m}_f = 2.65 < 3$, поэтому колебания пламени и горение как в объеме, так и вне его согласуются с экспериментальными данными.

Описанное поведение пламени типично для всех проведенных расчетов и хорошо согласуется с качественным анализом основных

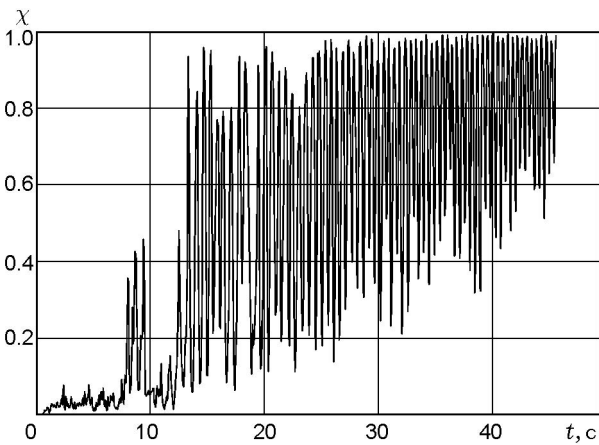


Рис. 4. Зависимость доли тепловыделения вне помещения от времени при расчете в условиях эксперимента P2A

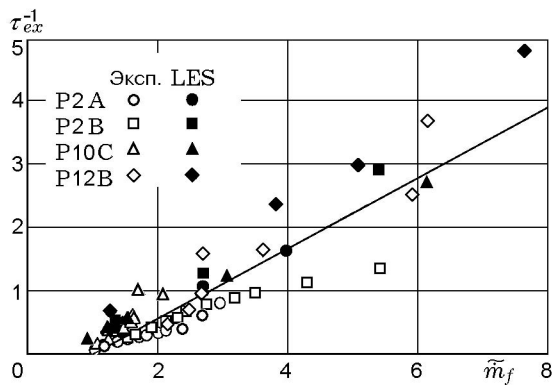


Рис. 5. Зависимость безразмерного обратного времени выброса пламени от приведенного массового расхода топлива:

светлые точки — данные соответствующих экспериментов, темные точки — результаты расчетов методом крупных вихрей (LES), сплошная линия — аппроксимация (4)

стадий, выполненным в [3]. Однако когда источник топлива находится далеко от проема, может наблюдаться кратковременное погасание «блуждающего пламени» в помещении. В этом случае в период времени между вспышками несгоревшее топливо накапливается в объеме помещения, после чего происходит его зажигание и выброс пламени в атмосферу.

Показательной характеристикой является отношение скорости тепловыделения снаружи помещения Q_{out} к общей скорости тепловыделения Q : $\chi(t) = \frac{Q_{out}}{Q}$. На рис. 4 представлена зависимость $\chi(t)$, полученная в расчете в условиях эксперимента P2A методом крупных вихрей. Видно, что величина χ сильно

пульсирует после того, как пламя выбрасывается в атмосферу, при этом размах колебаний уменьшается со временем, что свидетельствует о стабилизации пламени вне помещения. Этот результат качественно соответствует описанным выше экспериментальным наблюдениям. Отметим, что расчеты на основе осредненных уравнений дают быстрое установление квазистационарного пламени после его выброса без выраженных колебаний, так что аналогичные зависимости $\chi(t)$ получаются гладкими (см., например, рис. 5 работы [3]).

Для сопоставления результатов расчетов методом крупных вихрей с данными эксперимента для каждого варианта с использованием зависимости $\chi(t)$ определялся временной интервал между зажиганием и появлением устойчивого пламени снаружи помещения. Принято, что выброс пламени произошел, как только величина χ впервые превысила уровень 50 %, даже если в дальнейшем в процессе осцилляций ее значение будет опускаться ниже указанного уровня (согласно этому критерию время задержки выброса на рис. 4 составляет 13 с). Полученные значения обезразмеривались в соответствии с (1)–(3) и сравнивались с эмпирическим соотношением (4).

На рис. 5 представлена зависимость безразмерного обратного времени выброса пламени от приведенного массового расхода топлива. Наряду с результатами численного расчета, здесь же приведены данные соответствующих экспериментов (см. рис. 1), а также аппроксимация (4). В целом получено хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальным данным, особенно для больших объемов (P10C и P12B). Расчетные точки также удовлетворительно согласуются с аппроксимирующей прямой, если принять во внимание, что разброс экспериментальных данных относительно зависимости (4) составляет $\approx 50\%$ (см. рис. 1). Для малых объемов (P2A и P2B) результаты согласуются хуже, экспериментальные точки лежат ниже аппроксимирующей прямой, тогда как расчетные — выше нее (т. е. в расчетах выброс происходит быстрее, чем наблюдается в экспериментах). Повидимому, это подтверждает сделанный в [3] вывод о неполной турбулизации пламени на начальной стадии развития пожара. Отметим также, что точки, соответствующие более глубокому положению источника внутри помещения (P2B), и в расчетах, и в экспериментах

располагаются выше точек, полученных для источника вблизи вентиляционного отверстия (P2A). Возможно, в соотношениях (1)–(4) требуется более точный учет положения источника топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов по выбросу пламени при пожаре в объеме с ограниченной вентиляцией, проведенных в широком диапазоне параметров (масштаб помещения, вид топлива, скорость его подачи и положение горелки), а также результаты численного моделирования таких явлений.

Важным выводом, полученным в результате проведенных экспериментов, является подтверждение предыдущего качественного анализа развития пожара, сделанного в [3] на основании опытов на установке малого масштаба. Показано, что при горении в объемах среднего масштаба наблюдаются все выделенные ранее основные стадии (начальное развитие пламени, «блуждающее» пламя, выброс пламени и его колебания). Вместе с тем, обработка совокупности данных экспериментов различного масштаба позволила уточнить выражения для характерных величин и получить единую аппроксимирующую зависимость, описывающую с приемлемой для практических целей точностью безразмерное время выброса пламени как функцию характеристик помещения, скорости подачи топлива и учитывающую положение источника топлива по отношению к вентиляционному отверстию.

Результаты численных расчетов показывают, что модель крупных вихрей позволяет воспроизвести качественно более реалистичную картину процесса горения, развития пожара и выброса пламени при горении в плохо вентилируемых помещениях, чем традиционные модели с осреднением по Рейнольдсу. В частности, лучше согласуются с экспериментальными наблюдениями интенсивные колебания пламени после выброса в атмосферу. В расчетах на основе осредненных уравнений колебания выражены слабее, они быстро затухают и сменяются квазистационарным горением. Безразмерные времена выброса пламени, полученные методом крупных вихрей, лучше согласуются с экспериментом для больших объемов, тогда как для малых объемов, как и в работе [3], расчет дает более быстрый выброс пламени.

Проведенные исследования нацелены на решение сформулированной в [3] задачи экспериментального и численного определения критических параметров расхода горючего и времени задержки выброса пламени при постоянном расходе топлива. В дальнейшем предполагается изучение пожаров в помещениях при горении жидких и твердых топлив, с учетом нелинейной обратной связи между пламенем и источником пожара, а также исследование пожаров при применении тушащих химических агентов (ингибиторов).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Combustion Fundamentals of Fire** / G. Cox (Ed.). London: Academic Press, 1995.
2. **Quintiere J. G.** Fundamentals of Fire Phenomena. Wiley, 2006.
3. **Снегирев А. Ю., Махвиладзе Г. М., Талалов В. А., Шамшин А. В.** Турбулентное диффузионное горение в условиях ограниченной вентиляции: выброс пламени через проем // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 1. С. 3–14.
4. **Chamchine A. V., Graham T. L., Makhviladze G. M., et al.** Experimental studies of under-ventilated combustion in small and medium-scale enclosures // Proc. 4th Intern. Seminar on Fire and Explosion Hazards, Londonderry, UK, 2003. P. 97–107.
5. **Chamchine A. V., Makhviladze G. M., Snegirev A. Yu., Graham T. L.** Interpretation of small and medium scale experiments with an enclosed burner fire // Proc. 10th Intern. Fire Science and Engineering Conf. INTERFLAM2004, Edinburgh, UK. 2004. V. 1. P. 73–81.
6. **Zykov A. P., Yakush S. E., Makhviladze G. M.** Flame exhaust in compartment fires // European Combustion Meeting ECM2005, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2005. CD-ROM: Paper № 217.
7. **Moin P.** Advances in large eddy simulation methodology for complex flows // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2002. V. 23, N 5. P. 710–720.
8. **Jones W. P.** Large eddy simulation of turbulent combustion processes // Computer Phys. Commun. 2002. V. 147, N 1–2. P. 533–537.
9. **McGrattan K. B., Baum H. R., Rehm G. P., et al.** Fire Dynamics Simulator (Version 4): Technical Reference Guide (2003 Edition). New York: NIST, 2003. (Preprint / NIST IR 6783).
10. **McGrattan K. B., Forney G. P., Floyd J. E., et al.** Fire Dynamics Simulator (Version 4): Users Guide (2003 Edition). New York: NIST, 2003. (Preprint / NIST IR 6784).

*Поступила в редакцию 15/III 2006 г.,
в окончательном варианте — 29/VI 2006 г.*