

Ю. Х. ПОЛАНДОВ, д-р техн. наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра “Механика жидкости и газа, физика горения”, Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс (Россия, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29; e-mail: polandov@yandex.ru)

С. А. ДОБРИКОВ, стажер-исследователь Научно-образовательного центра “Механика жидкости и газа, физика горения”, Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс (Россия, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29; e-mail: te4nik1@gmail.com)

А. Я. КОРОЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.83;536.463

ВЗРЫВ ГАЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ОТВЕРСТИЕМ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследован взрыв газа в цилиндре диаметром 20 см и длиной 150 см, закрытом с обоих концов и имеющем отверстие на боковой поверхности; размеры и положение отверстия в опытах изменялись. Исследование проведено путем численного моделирования в рамках SFD-моделей с использованием метода крупных частиц — LPM (Large Particle Method) и программного продукта “Вулкан-М”. Показана адекватность математической и компьютерной моделей путем сравнения результатов численного и физического экспериментов, полученных в условиях, близких к рассмотренным. В результате моделирования уточнены известные данные по зависимости давления взрыва от расстояния между местом воспламенения и отверстием, и показано, что эта связь неоднозначна и зависит от размеров отверстия. Выявлены аномалии в виде колебаний с большой амплитудой в определенном диапазоне значений размера отверстия и при его разном положении. Обнаружен эффект, очень похожий на феномен “поющего пламени” Хиггинса. Показано, что колебания давления и площади фронта пламени приводят к повышению давления взрыва.

Ключевые слова: газовый взрыв; цилиндр с отверстием; место воспламенения; CFD-модель; метод крупных частиц; “поющее пламя”; давление взрыва; автоколебания.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26

Введение

Влияние размеров окна на давление газового взрыва в помещении не только представляется достаточно очевидным, но и давно известно. Причем чем больше окно, тем меньше давление взрыва. Это обстоятельство доказано многочисленными экспериментами. Уже первые нормативные документы, направленные на снижение опасности взрыва газа в помещениях, предусматривают использование окон или (и) легко-сбрасываемых панелей в качестве средства предотвращения разрушения несущих элементов конструкции помещения. Среди современных нормативных документов наиболее авторитетными можно считать СНиП II-35–76, разработанные в России [1], а также EN 14994 [2] и NFPA 68 [3].

Сведения о влиянии на давление взрыва взаимного положения окна и места воспламенения газа в помещении появились сравнительно недавно. В этом плане можно сослаться на интересные работы [4–9]. Оказалось, например, что чем ближе источник воспламенения к окну, тем меньше давление взрыва в

помещении. Обнаружение этой зависимости, с одной стороны, развивает наше понимание физических процессов, происходящих при взрыве, а с другой — дискредитирует нормативы, требования которых распространяются только на размеры окна без учета местоположения источника воспламенения. Надо сказать, что во многом такая ситуация сложилась из-за того, что исследования в этом направлении не отличались большой системностью и носили однофакторный характер. Так, например, при изучении влияния размеров окна на давление взрыва источник зажигания находился только на одной позиции, и на основании этих данных были сделаны соответствующие выводы. В то же время влияние места воспламенения исследовалось при неизменных размерах и положении окна. Несомненно, такой подход к исследованию не способствовал росту эффективности предлагаемых рекомендаций по снижению опасности взрыва в помещении.

В настоящей работе была предпринята попытка решить задачу о влиянии двух факторов — размеров

окна и позиции источника зажигания на развитие газового взрыва.

Рабочая гипотеза

Априори можно утверждать, что давление дефлаграционного взрыва в замкнутом (без окон) помещении не зависит от места воспламенения газа. В то же время известно, что в помещении с окном место воспламенения существенно влияет на давление взрыва.

В силу этого зависимости, описывающие процесс дефлаграционного взрыва, представляют собой непрерывные функции, и переход от отсутствия влияния до существенного влияния на этот процесс должен носить также непрерывный характер. Кроме того, функция должна быть равна нулю в случае отсутствия окон, а при их наличии возрастать по мере увеличения их размеров. Задачей настоящей статьи является выяснение зависимости давления взрыва в помещении от возможных изменений размеров окна и места его положения относительно источника воспламенения.

Математическая модель

Общие положения

Проверка рабочей гипотезы осуществлялась численным моделированием газового взрыва в помещении с окном на примере модельной цилиндрической камеры. При этом были приняты следующие допущения, касающиеся моделируемой среды:

- исходная смесь *пропан – воздух* является однородной и стехиометрической;
- различие между составами газов исходной смеси и воздуха и продуктами сгорания незначительно;
- газы и их смесь, участвующие в физическом процессе, являются невязкими и идеальными;
- реакция горения протекает на границе несгоревшей смеси и продуктов сгорания;
- исходная смесь газов и продукты сгорания не смешиваются, а газ, находящийся в помещении, выгорает полностью;
- окно открывается сразу после появления в помещении избыточного давления и остается открытым на протяжении всего эксперимента;
- пренебрегается действием силы тяжести.

С учетом принятых допущений задача сводилась к моделированию динамики среды с использованием одного из методов решения нестационарных многомерных задач механики сплошной среды (CFD). Выбор конкретного метода был ограничен произвольностью геометрии расчетной области, а также возможностью учета наличия особенностей в моделируемых течениях.

Система уравнений

В исходной системе уравнений используется известная в газовой динамике система дифференциальных уравнений в эйлеровой форме, выражающая основные законы сохранения (уравнение непрерывности, импульса и энергии) в идеальной сжимаемой среде. Уравнение сохранения импульса приводится в виде скалярных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{U}) = 0; \\ \frac{\partial \rho U_x}{\partial t} + \operatorname{div}(U_x \rho \bar{U}) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial \rho U_y}{\partial t} + \operatorname{div}(U_y \rho \bar{U}) + \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \rho U_z}{\partial t} + \operatorname{div}(U_z \rho \bar{U}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(E \rho \bar{U}) + \operatorname{div}(p \bar{U}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ — плотность, кг/м³;

$\bar{U}$ — вектор скорости, м/с;

U_x, U_y, U_z — компоненты вектора скорости по осям x, y и z , м/с;

p — давление, Па;

E — удельная общая (полная) энергия, Дж/кг.

Закрывается система уравнением состояния газа

$$p = \rho I (\gamma - 1), \quad (2)$$

где I — удельная внутренняя энергия, Дж/кг;

γ — показатель адиабаты среды.

Начальные и граничные условия

Предполагается, что все пространство комнаты заполнено стехиометрической смесью *пропан – воздух*; начальные давление и температура смеси имеют нормальные значения. Границы помещения непроницаемы; при взрыве газ выбрасывается в окно. Состав газа в процессе взрыва не меняется; окно не имеет веса и разрушается в момент зажигания газа.

Принципы решения системы уравнений

Общий принцип решения системы уравнений

Численное решение системы осуществляется методом крупных частиц LPM (*Large Particle Method*) [10], разработанным Ю. М. Давыдовым и О. М. Белоцерковским. Основу LPM составляет идея Харлоу о n частицах в ячейке, согласно которой система уравнений допускает “расщепление” по физическим процессам. Однако в LPM твердые частицы заменены одной жидкой, заполняющей весь объем ячейки. Отсюда и название метода. Метод крупных частиц (как и другие современные методы, например ме-

тод Годунова [11], FLACS [6] и др.) позволяет исследовать газодинамические течения без априорной информации о структуре решения.

На область интегрирования накладывается эйлерова (фиксированная) сетка, состоящая из прямоугольных ячеек со сторонами x , y и z . Расчет состоит из многократного повторения шагов по времени. В свою очередь, каждый такой шаг включает в себя три этапа:

1) “эйлеров”, на котором пренебрегается всеми эффектами, связанными с перемещением жидкости (переноса массы через границы ячеек нет); на фиксированной эйлеровой сетке определяются промежуточные значения искомых параметров потока;

2) “лагранжев”, на котором моделируется движение потока массы через границы эйлеровых ячеек, происходит ее перераспределение в пространстве. При этом полагается, что вся масса переносится только за счет нормальной к границе составляющей скорости;

3) заключительный, на котором определяются окончательные значения параметров потока на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки и всей системы в целом.

В структуру системы включены процессы тепло- и массообмена с окружающей средой и распространения пламени. Процессы охлаждения на стенках камеры оцениваются исходя из полученных в физических опытах данных по спаду давления при взрыве в замкнутой камере. Для расчета истечения через открытую границу давление в пограничной ячейке принимается равным среднему из значений давления в ячейках со стороны камеры и атмосферного.

Учет процесса распространения фронта пламени

Для описания процесса распространения пламени использован подход, органично вписывающийся в аппроксимационную модель системы, согласно которому введен дополнительный параметр состояния ячейки — массовая доля продуктов сгорания в ней f [9]. Этот параметр для каждой ячейки можно выразить следующим отношением:

$$f = m_b / m, \quad (3)$$

где m_b — масса продуктов сгорания в ячейке, кг;

m — общая масса газовой смеси в ячейке, кг.

При этом расчетные ячейки можно разделить на три группы (при погрешности расчетов ε):

- с исходной смесью, для которых выполняется условие $f < \varepsilon$;
- “сгоревшие” — $f > 1 - \varepsilon$;
- “горящие” — $\varepsilon < f < 1 - \varepsilon$.

Полное описание модели и используемых различных схем представлено в [9].

Моделирование процесса распространения пламени

Моделирование процесса горения проводится в три шага.

На первом шаге рассматривается горение газа в ячейках. Для всех “горящих” ячеек определяется доля газа Δf , сгоревшего за время Δt , и рассчитывается выделившаяся энергия ΔE :

$$\Delta f = \frac{\Delta t}{\Delta l} U_b; \quad (4)$$

$$f_n = f + \Delta f; \quad (5)$$

$$\Delta m = \Delta f m; \quad (6)$$

$$\Delta E = \Delta m_b H; \quad (7)$$

$$E_n = E + \frac{\Delta E}{m} = E + \Delta m H, \quad (8)$$

где Δl — длина ребра ячейки, м;

U_b — нормальная скорость распространения пламени в неподвижной среде, м/с;

f_n , E_n — доля продуктов сгорания и полная удельная энергия, Дж/кг, после стадии горения в ячейке;

ΔE — абсолютная выделившаяся энергия, Дж;

H — теплотворная способность смеси, Дж/кг;

E — удельная полная энергия смеси в ячейке, Дж/кг.

Для пространственных ячеек регулярной сетки характерным линейным размером является длина ребра куба $\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z$. Существует несколько подходов к определению значения U_b как функции параметров смеси. В настоящей работе авторами принимается степенная зависимость нормальной скорости горения от относительного изменения температуры смеси [4]:

$$U_b = U_{bN} \left(\frac{T}{T_N} \right)^\beta, \quad (9)$$

где U_{bN} — нормальная скорость распространения пламени в неподвижной смеси при нормальных условиях, м/с;

T , T_N — текущая температура смеси и температура смеси при нормальных условиях соответственно, К;

β — показатель степенной зависимости.

Текущая температура газовой смеси может быть определена из уравнения состояния идеального газа:

$$T = pM / (\rho R), \quad (10)$$

где M — молярная масса смеси, кг/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль).

Второй шаг моделирования заключается в распространении горения на соседние ячейки. Первый и второй шаги предполагают неподвижность среды,

что характерно для эйлера этапа вычислительного цикла метода крупных частиц [10].

Третий шаг заключается в учете переноса массы сгоревшего газа через границы ячеек (заключительный этап метода крупных частиц). Перенос моделируется аналогично переносу остальных параметров. Однако ввиду специфического характера параметра f применение тех же выражений для определения переносимых значений является неадекватным. В связи с этим авторами предлагаются специальные формулы для расчета переносимых значений параметра f , основанные на его физической интерпретации:

$$f_{i+1/2,j,k} = \begin{cases} 1, (f_{i,j,k} > 1 - \varepsilon) \vee (f_{i+1,j,k} > 1 - \varepsilon); \\ 0, (f_{i,j,k} < \varepsilon) \vee (f_{i+1,j,k} < \varepsilon); \\ \frac{f_{i,j,k} + f_{i+1,j,k}}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

Использование формулы (11) для определения переносимых значений параметра f обеспечивает адекватность применения общей формулы переноса для данного параметра. Выражение (11) позволяет также определить условия распространения горения на соседние ячейки (второй шаг моделирования горения). Условия “воспламенения” клеток можно записать в виде

$$f_{i+1/2,j,k} > \varepsilon. \quad (12)$$

Учет условий распространения фронта пламени при решении системы уравнений серьезно снижает устойчивость решения, поэтому приходится брать шаг по времени, удовлетворяющий условию устойчивости Куранта – Фридрихса – Леви с большим (более чем 10-кратным) запасом.

Адекватность модели

Адекватность численной модели подтверждается сравнением результатов физического и численного экспериментов. Физическая и расчетная модели помещения сходны и представлены цилиндрической камерой диаметром 200 мм и длиной 1500 мм, которая имеет на боковой поверхности: 5 отверстий — у численной модели (рис. 1) и 3 отверстия — у физической (рис. 2).

Исходное состояние отверстий закрытое, кроме одного: для численной модели — из множества $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, для физической — из множества $\{1, 3, 5\}$. Диаметр отверстия изменялся от 20 до 70 мм. Камера заполнялась стехиометрической смесью газов *пропан – воздух*. Воспламенение газа осуществлялось всегда у левого торца [9]. В численной модели размеры ребер ячеек принимались $x = y = z = 0,01$ м; общее число ячеек составляло около 70000; шаг по времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-7}$ с.

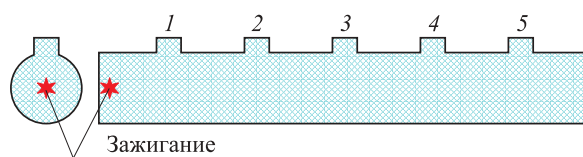


Рис. 1. Расчетная камера: 1–5 — позиции (местоположение) отверстий

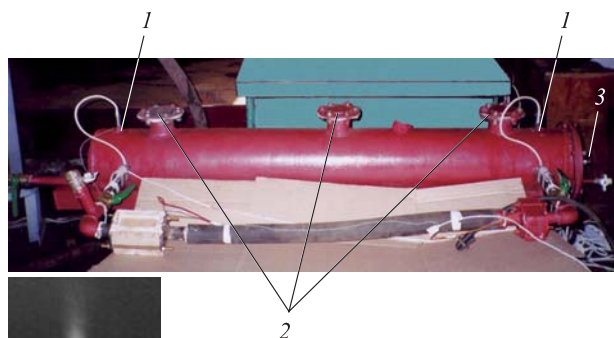


Рис. 2. Общий вид установки “Сержант” и экспериментальный взрыв: 1 — датчики давления; 2 — отверстия; 3 — устройства зажигания

Для демонстрации достаточно высокой воспроизводимости физических опытов на один график наложено 10 результатов, полученных в опытах, проведенных в камере с отверстием диаметром 40 мм в поз. 3 (рис. 3). Для сравнения с результатом численного моделирования (рис. 4) были выбраны именно эти опыты, так как форма кривой давления в них была достаточно сложной и имела два пика давления, а сам процесс взрыва сопровождался акустическими колебаниями (в других случаях второй пик был выражен слабо или вообще отсутствовал).

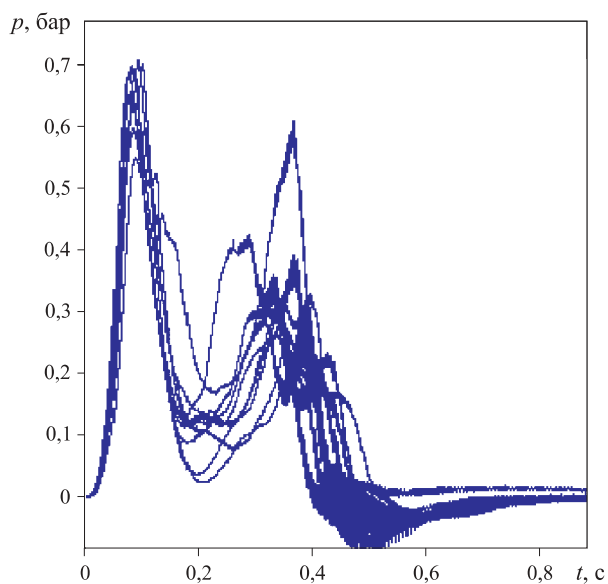


Рис. 3. Результаты 10 физических экспериментов в камере с отверстием диаметром 40 мм в поз. 3

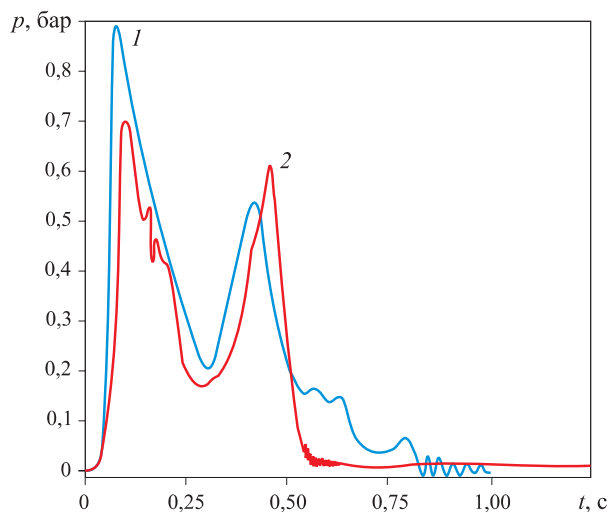


Рис. 4. Сравнение результатов численного (1) и физического (2) экспериментов (отверстие диаметром 40 мм в поз. 3)

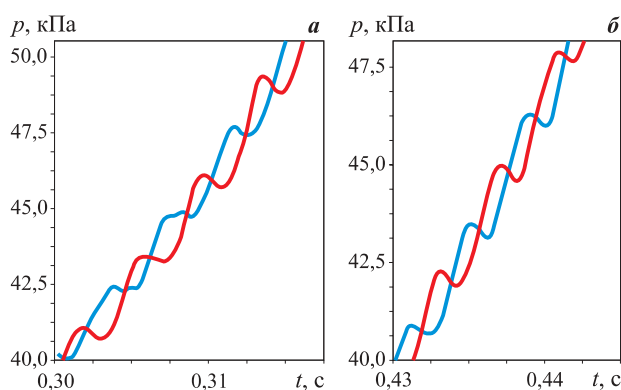


Рис. 5. Колебания давления в результате взрыва в физическом опыте (а) и при численном моделировании (б)

Другим подтверждением адекватности численной модели является наличие колебаний давления как при численном моделировании, так и при физическом опыте, которые имели близкие частоты и амплитуды (рис. 5). В опытах с другими размерами и положением окон таких заметных колебаний не наблюдалось. Объяснить причины их возникновения затруднительно, так как в системе уравнений, описывающей процесс газового взрыва, не заложен в явном виде механизм развития колебаний.

Результаты эксперимента

Влияние размера отверстия на развитие взрыва

На рис. 6 в качестве примера показаны кадры визуализированной картины развития взрыва при положении отверстия диаметром 40 мм в поз. 2. Вначале форма фронта пламени развивается из полушеры в полуэллипсоид, принимая известную форму тюльпана. Коснувшись боковой поверхности, фронт становится похожим на осьминога, после чего несколько спрямляется, а его площадь уменьшается. После прохождения отверстия в поз. 2 фронт вновь увеличивается по площади, а достигнув дальней стенки, затухает.

Для анализа более 100 численных опытов было использовано понятие максимального давления при взрыве $p_{\max}$. Результаты опытов показаны на графике рис. 7. Характеристики $p_{\max} = p(f)$ получены путем аппроксимации соответствующих дискретных значений с помощью соответствующих кодов. Такие характеристики построены для каждой пози-

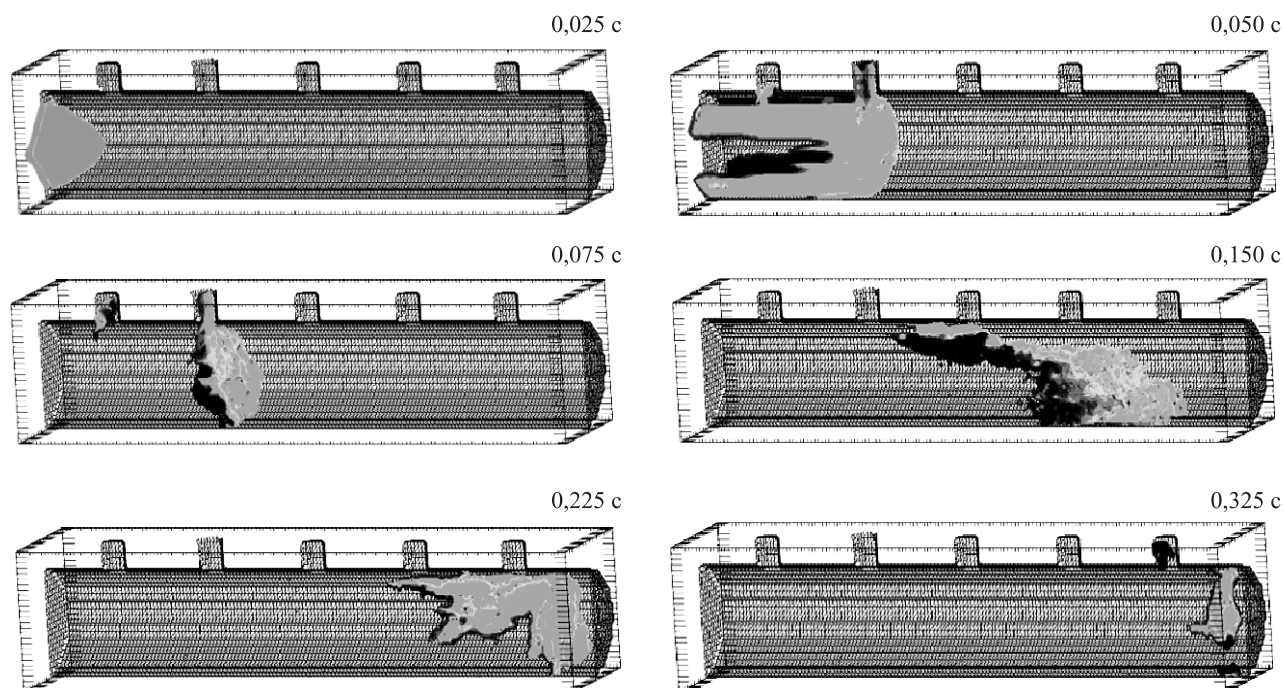


Рис. 6. Расчетное положение фронта пламени в различные моменты времени (отверстие диаметром 40 мм в поз. 2)

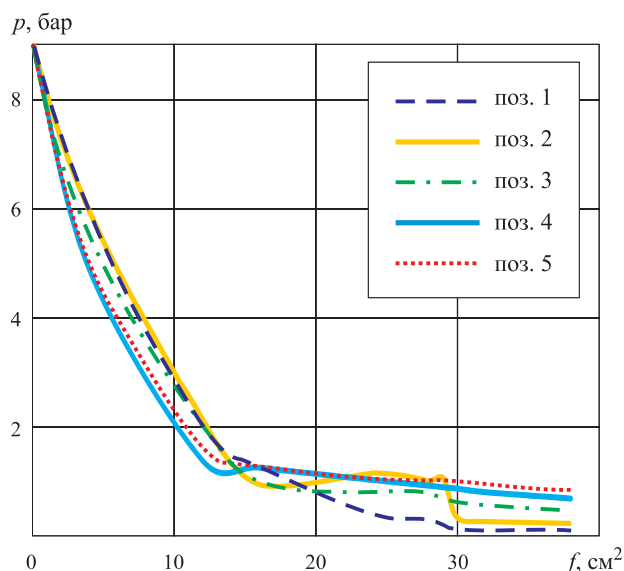


Рис. 7. Влияние размера и положения отверстия (поз. 1–5) на максимальное давление взрыва

ции отверстия. Приведенные результаты подтверждают уже известное сильное влияние размеров отверстия (окна) на давление взрыва независимо от его положения. Это влияние однозначно и может быть сформулировано так: чем больше размер отверстия, тем меньше давление взрыва, т. е. всегда $dp_{\max}/df < 0$. Как можно заметить (см. рис. 7), модуль этой производной значителен в начале графика и убывает с увеличением площади.

Влияние места отверстия на процесс взрыва

Влияние другого параметра — положения отверстия на давление взрыва неоднозначно. Так, судя по графику на рис. 7, при малых размерах отверстия (в нашем случае при его диаметре менее 40 мм) увеличение расстояния между отверстием и местом воспламенения приводит к снижению давления взрыва, т. е. $dp_{\max}/dl < 0$, где l — расстояние от левого торца. При диаметре отверстия 40 мм его положение на боковой поверхности камеры практически не оказывает никакого влияния на величину $p_{\max}$. Можно назвать эту точку “точкой обращения”, так как при диаметрах отверстия более 40 мм влияние этого расстояния меняет знак, т. е. $dp_{\max}/dl > 0$. При диаметре отверстия 70 мм изменение его положения в нашем опыте приводит к снижению давления взрыва более чем на порядок.

Феномен акустических колебаний

В ходе численных опытов обнаружен акустический феномен. Для выделения области его существования введено понятие относительного давления $\bar{p}$, которое определяется как $\bar{p} = p_{\max}/p_{\max 1}$ (где $p_{\max 1}$ — давление при положении отверстия в поз. 1). Используя этот показатель, мы построили график за-

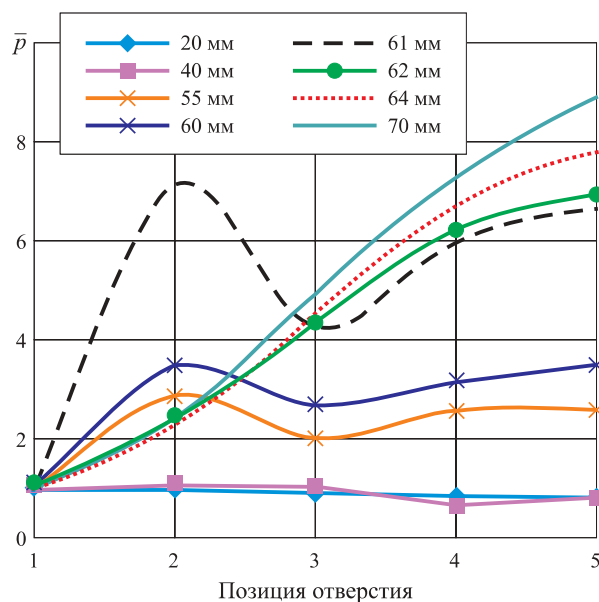


Рис. 8. Зависимость $\bar{p}$ от положения и диаметра отверстия

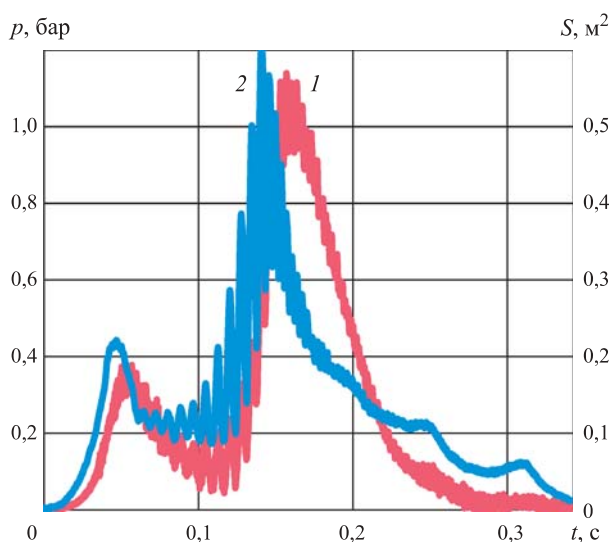


Рис. 9. Динамика изменения давления в камере с отверстием диаметром 60 мм в поз. 2: 1 — давление в камере; 2 — площадь фронта пламени

висимости $\bar{p} = \bar{p}(l_i)$ (l_i — номер позиции) при фиксированных значениях диаметра отверстия (рис. 8). На рис. 8 приведены результаты расчета данных в численном эксперименте по определению влияния положения отверстия и его диаметра на относительное давление взрыва. На зависимости видна аномалия, которая имеет место при диаметрах окна более 55 мм и только при взрывах при положении отверстия в позиции, близкой к поз. 2.

Обратим внимание на то, что в этих случаях в камере развивались интенсивные колебания давления (рис. 9), частота которых менялась по мере продвижения фронта пламени от 100 до 200 Гц. Амплитуда колебаний при этом составляла 20 кПа.

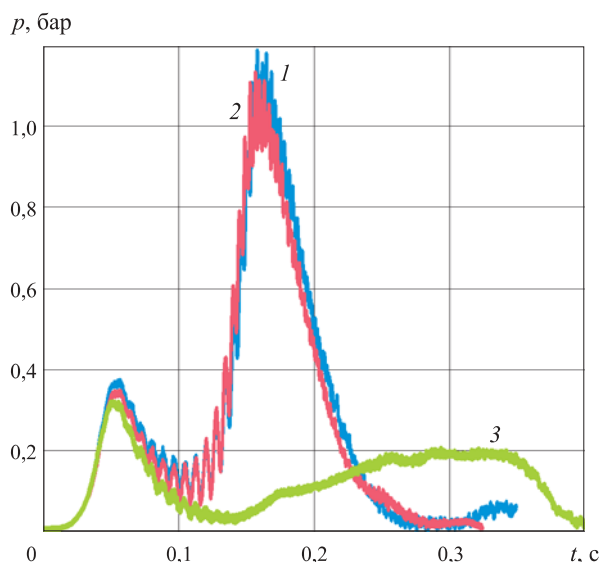


Рис. 10. Граница существования феномена “поющего пламени” при диаметре отверстия: 1 — 60 мм; 2 — 61 мм; 3 — 62 мм

Максимальных значений амплитуда достигала при частоте 200 Гц. Синхронно (синфазно) с колебаниями давления менялась площадь фронта пламени, причем эти изменения имели тот же порядок, что и изменения давления.

Величина давления во втором пике значительно превышала значение, которое могло бы быть в случае отсутствия колебаний, что видно на рис. 10. При незначительном увеличении размеров отверстия (всего на 2 %) колебания прекращаются и давление взрыва в пике снижается в 5 раз, из чего следует вывод, что причиной роста давления являются колебания. Принимая во внимание и тот факт, что наличие колебаний приводит к сокращению времени горения, можно утверждать, что они интенсифицируют процесс горения и способствуют быстрому выгоранию газа.

Можно заметить, что в нашем эксперименте колебания возникают только при определенном месте положения отверстия (на расстоянии от левого торца, равном приблизительно $1/3$ длины камеры) и при ее размерах более 55 мм.

Из истории вопроса о колебаниях, вызванных взрывом

Говоря о природе возникающих при горении колебаний, можно сослаться на известные исследования, проведенные Хиггинсом, Рийке [12] и другими авторами на цилиндрических “поющих” трубах при наличии внутри них тепловых источников. Полученные нами результаты логично укладываются в данное Б. В. Раушенбахом [13] толкование эффекта самовозбуждения таких колебаний. Хотя нужно отметить, что во всех известных случаях исследователи имели дело с неподвижным устройством нагрева

(охлаждения), а в нашем случае положение фронта пламени в камере в течение опыта меняется. Что касается частоты колебаний, то это, скорее всего, собственная частота колебаний трубы (естественно, первая). В самом деле, если это полуволна, то волна имеет длину 3 м, а при частоте 120 Гц скорость распространения волны (скорость звука) составляет около 360 м/с, что вполне соответствует началу процесса, когда газ в трубе не прогрет. Нарастание частоты колебаний также вполне объяснимо: средняя температура по длине трубы с продвижением фронта пламени повышается, вследствие чего увеличивается и скорость звука.

Кстати говоря, такие колебания были получены Дорофеевым с соавт. [5] при изучении взрывов в камерах с размерами, схожими с реальными помещениями. Реализованные в их опытах колебания при газовых взрывах вызвали наличие дополнительного пика давления взрыва. К сожалению, моделирование этих взрывов, проведенное Е. Педерсен и другими авторами с помощью известного программного продукта FLACS [6], не позволило описать процесс самовозбуждения колебаний давления.

Принимая во внимание достаточно высокие тепловые мощности, реализуемые во время взрыва газа, полученный эффект можно назвать “поющим взрывом”.

Заключение

Давление газового взрыва в помещении, которое в большой мере зависит от размеров окна, может корректироваться в значительной степени взаимным расположением окна и источника воспламенения. Влияние места положения источников воспламенения двоякое. При малых размерах окна увеличение расстояния между окном и источником воспламенения приводит к небольшому снижению давления. При больших размерах, сравнимых с обычным для помещений соотношением размеров окон и защищаемого объема, увеличение расстояния приводит к значительному росту давления взрыва, иногда на порядок.

При определенных размерах окон и месте положения источника воспламенения в помещении могут развиваться колебания, приводящие к значительному росту давления.

Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки России за финансовую поддержку государственной задачи научно-образовательного центра: тема № 20 “Исследование механики взрыва газа в бытовых помещениях и обоснование мер по снижению опасности”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-35-76*. Котельные установки. Раздел 3. Объектно-планировочные и конструктивные решения. — Введ. 01.01.1978. — М.: Стройиздат, 1977. URL: <http://снип.рф/snip/view/35> (дата обращения: 01.07.2016).
2. EN 14994:2007. Gas explosion venting protective systems. URL: https://webshop.ds.dk/Files/Files/Products/56150_attachPV.pdf (дата обращения: 01.07.2016).
3. NFPA 68. Standard on explosion protection by deflagration venting. 2007 Edition. — Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2007. URL: <http://gazkhodro.ir/wp-content/uploads/2015/11/NFPA-68-2007-Standard-on-Explosion-Protection-by-Deflagration-Venting.pdf> (дата обращения: 01.07.2016).
4. Molkov V. V., Eber R. M., Grigorash A. V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2003. — Vol. 16, No. 5. — P. 395–402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4.
5. Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B. Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures // International Journal of Hydrogen Energy. — 2011. — Vol. 36, Issue 3. — P. 2329–2336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.005.
6. Helene H. Pedersen, Prankul Middha. Modelling of vented gas explosions in the CFD tool FLACS // Chemical Engineering Transaction. — 2012. — Vol. 26. — P. 357–362. DOI: 10.3303/CET1226060.
7. Robert Zalosh. Explosion venting data and modeling. Literature review. — Quincy, MA: Fire Protection Research Foundation, 2008. URL: https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/68/Firexplo_Explosion_Venting_Report.pdf (дата обращения: 25.06.2016).
8. Bradley Derek, Mitcheson Alan. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels // Combustion and Flame. — 1976. — Vol. 26. — P. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
9. Polandov Yu. Kh., Barg M. A., Vlasenko C. F. Modeling a combustion propagation in air-gas mixtures using the large-particle method // 6th GRACM International Congress on Computational Mechanics. Greece, Aristotle University of Thessaloniki, 19–21 June 2008: Book of Abstracts. — Sofia Publications, 2008. — P. 79.
10. Davydov Yu. M. Large-particle method // Encyclopaedia of Mathematics. Vol. 5. — London: Kluwer Academic Publishers, 1990. URL: http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Large-particle_method&oldid=14385 (дата обращения: 25.06.2016).
11. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Математический сборник. — 1959. — Т. 47, № 8-9. — С. 271–306.
11. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. — М.: Физматгиз, 1961. — 500 с.
12. Higgins B. On the sound produced by a current of hydrogen gas passing through a tube // Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts. — 1802. — Vol. 1. — P. 129.
13. Rijke P. L. Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen // Annalen der Physik und Chemie. — 1859. — Vol. 183, Issue 6. — P. 339–343. DOI: 10.1002/andp.18591830616.
14. Hermann von Helmholtz. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music. Alexander John Ellis. — Longmans, Green, 1885. — 576 p.

Материал поступил в редакцию 7 июля 2016 г.

Для цитирования: Поландов Ю. Х., Добриков С. А., Корольченко А. Я. Взрыв газа в цилиндрической трубе с отверстием на боковой поверхности // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26.

English

GAS EXPLOSION IN A CYLINDRICAL TUBE WITH A HOLE ON THE LATERAL SURFACE

POLANDOV Yu. Kh., Doctor of Technical Sciences, Professor, Supervisor of Scientific and Educational Center "Fluid and Gas Mechanics, Physics of Combustion", the State University — Education Science Production Complex (Naugorskoye Shosse, 29, Orel, 302020, Russian Federation; e-mail address: polandov@yandex.ru)

DOBRIKOV S. A., Trainee Researcher, Scientific and Educational Center "Fluid and Gas Mechanics, Physics of Combustion", the State University – Education Science Production Complex (Nauhorskiye Shosse, 29, Orel, 302020, Russian Federation; e-mail address: te4nik1@gmail.com)

KOROLCHENKO A. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the explosion of propane-air mixture in a cylindrical tube with 20 cm in diameter and 150 cm in length, closed at both ends and having hole on the lateral surface, dimensions and position of which were varied according to conditions of experiments.

The study was conducted by numerical simulation within 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) models based on a system of fundamental conservation equations applied to problems of gas dynamics, which supplemented by equations describing the propagation of a flame. System of approximating equations was solved by the large-particle method (LPM) developed by Belotserkovskiy O. M. and Davydov Yu. M. This method involves applying the rigid grid, placed in the calculated area and formed from about 90 thousands of the so-called "particles", through which move the gas flows.

Comparison of the results of numerical experiments and previously conducted physical experiments show the adequacy of the mathematical model.

As a result of studies it was confirmed the known dependence between the explosion pressure and the diameter of a hole. Furthermore, it was shown that the dependence of explosion pressure on size and position of a hole on the lateral surface is ambiguous. Decrease of the distance between the hole of a smaller size and the source of ignition leads to rising explosion pressure (while increase of the distance leads to its lowering).

The abnormal development of explosion in the form of self-oscillation with large amplitude in a certain range of size and position values of a hole was revealed during experiment. This effect is very similar to the "singing flame" phenomenon of Higgins. In conditions of pressure oscillations there were observed the fluctuations of position and size of the flame front. Oscillations lead to significant increase in pressure compared to explosions without oscillations. It should be noted that the possibility of appearance of the self-oscillation mode of explosion is known from the data of physical experiments, but such mode was modeled for the first time. It is known that previous attempt to create such mode using FLACS software was unsuccessful.

Keywords: gas explosion; cylindrical tube; CFD models; explosion pressure; large-particle method; "singing flame"; self-oscillation.

REFERENCES

1. *Construction norms and regulations II-35–76*. Boiler installations. Part 3. Object-planning and design solutions.* Moscow, Stroyizdat, 1977 (in Russian). Available at: <http://снп.рф/snп/view/35> (Accessed 1 July 2016).
2. *EN 14994:2007. Gas explosion venting protective systems.* Available at: https://webshop.ds.dk/Files/Files/Products/56150_attachPV.pdf (Accessed 1 July 2016).
3. *NFPA 68. Standard on explosion protection by deflagration venting.* 2007 Edition. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2007. Available at: <http://gazkhodro.ir/wp-content/uploads/2015/11/NFPA-68-2007-Standard-on-Explosion-Protection-by-Deflagration-Venting.pdf> (Accessed 1 July 2016).
4. Molkov V. V., Eber R. M., Grigorash A. V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2003, vol. 16, no. 5, pp. 395–402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4.
5. Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B. Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, issue 3, pp. 2329–2336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.005.

6. Helene H. Pedersen, Prankul Middha. Modelling of vented gas explosions in the CFD tool FLACS. *Chemical Engineering Transaction*, 2012, vol. 26, pp. 357–362. DOI: 10.3303/CET1226060.
7. Robert Zalosh. *Explosion venting data and modeling. Literature review*. Quincy, MA, Fire Protection Research Foundation, 2008. Available at: https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/68/Firexplo_Explosion_Venting_Report.pdf (Accessed 25 June 2016).
8. Bradley Derek, Mitcheson Alan. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels. *Combustion and Flame*, 1976, vol. 26, pp. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
9. Polandov Yu. Kh., Barg M. A., Vlasenko C. F. Modeling a combustion propagation in air-gas mixtures using the large-particle method. In: *6th GRACM International Congress on Computational Mechanics. Greece, Aristotle University of Thessaloniki, 19–21 June 2008. Book of Abstracts*. Sofia Publications, 2008, p. 79.
10. Davydov Yu. M. Large-particle method. In: *Encyclopaedia of Mathematics*. Vol. 5. London, Kluwer Academic Publishers, 1990. Available at: http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Large-particle_method&oldid=14385 (Accessed 25 June 2016).
11. Godunov S. K. A finite difference method for the computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics. *Sbornik: Mathematics*, 1959, vol. 47, no. 8-9, pp. 357–393.
12. Rauschenbach B. V. *Vibration combustion*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 500 p. (in Russian).
13. Higgins B. On the sound produced by a current of hydrogen gas passing through a tube. *Journal Natural Philosophy, Chemistry and the Arts*, 1802, vol. 1, p. 129.
14. Rijke P. L. Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen. *Annalen der Physik und Chemie*, 1859, vol. 183, issue 6, pp. 339–343. DOI: 10.1002/andp.18591830616.
15. Hermann von Helmholtz. *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. Alexander John Ellis. Longmans, Green, 1885. 576 p.

For citation: Polandov Yu. Kh., Dobrikov S. A., Korolchenko A. Ya. Gas explosion in a cylindrical tube with a hole on the lateral surface. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 11, pp. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26.



СИСТЕМА СПАСЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ И ЗАДЫМЛЕНИИ

SAVER EMERGENCY BREATH SYSTEM — гаджет, спасающий жизни при возникновении пожара или задымления. Наряду с красивым внешним видом, отмеченным множеством наград, эта система достаточно эффективна. Внутри гаджета находится специальный фильтр, очищающий воздух от дыма, угарного газа и прочих загрязнений, а также проблесковый маячок, который поможет пожарным найти человека в дыму. Активируется фильтр практически моментально и уже через 5 с готов к применению.

Имеются варианты для одного, двоих и четверых пользователей. Кроме того, существует модификация на четыре персоны с креплением на стену.

Приятно, когда полезные гаджеты, кроме спасительного функционала, имеют и прекрасный внешний вид, который не испортит интерьер вашего офиса, а возможно, даже подчеркнет его.

<http://thetest.me/saver1/>