

Ю. Х. ПОЛАНДОВ, д-р техн. наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра “Механика жидкости и газа, физика горения”, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Россия, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95; e-mail: polandov@yandex.ru)

А. Д. КОРОЛЬЧЕНКО, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

УДК 614.83:536.46

ОБ УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ГАЗОВОМ ВЗРЫВЕ В НЕЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Получено, что при газовых взрывах в камерах, имеющих легкобрасываемую панель, возможно развитие вибрационного горения после сброса панели. Замечено, что начало развития вибрационного горения совпадает с моментом приближения фронта пламени к стенкам камеры. Выявлено, что место зажигания смеси сильно влияет на интенсивность колебаний: в случае приближения устройства зажигания к центру камеры размах колебаний возрастает и может достичь значений, в несколько раз (от 5 до 10 раз) превышающих давление сброса панели, что обозначает вибрационное горение как очень опасный фактор.

Ключевые слова: газовые взрывы; вибрационное горение; опасность; физический эксперимент; место зажигания.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.9-23

Введение.

Актуальность исследования

Согласно статистике [1] более 95 % газовых взрывов происходит в быту. Это обстоятельство отмечаем потому, что взрыв в бытовом помещении имеет свои, характерные для этого случая, условия развития, и прежде всего потому, что взрыв происходит в сравнительно небольших по размеру помещениях, имеющих ограниченное разнообразие форм. Сведения, содержащиеся в нормативах (в том числе в таких основополагающих, как ГОСТ Р 12.3.047–2012, BS EN 14994:2007, NFPA 68) и публикациях о средствах снижения рисков при возможных газовых взрывах в таких помещениях, сводятся к рекомендации использовать окна в качестве легкобрасываемых конструкций (ЛСК), которые способны разрушаться при повышении давления внутри помещения, обеспечивая тем самым соединение объема помещения с атмосферой. Рекомендации, которые содержатся в данных стандартах, основаны на результатах исследований взрывов с зажиганием смеси газ – воздух в середине помещений, близких по своей форме к кубу. В них же даются поправки на “турбулизацию пламени” и на случай взрыва в помещениях, имеющих форму, отличную от кубической и др. [2–9]. О возможном влиянии такого явления, как вибрационное горение, упоминается только в ГОСТ Р 12.3.047, да и то в самых общих чертах. При этом развитие данного варианта взрыва связывается со

скоростью сброса легкобрасываемой конструкции: “мгновенное” вскрытие сбросного сечения повышает вероятность возникновения вибрационного горения внутри аппарата. Амплитуда в акустической волне вибрационного горения может достигать значений $\pm 0,1$ МПа. Перемешивание смеси, например, вентилятором в процессе развития взрыва приводит к уменьшению амплитуды колебаний давления...”. Следует обратить внимание на то, что значение давления, упомянутое в цитате, более чем на порядок превышает нормативы на допустимое давление в помещениях, да и то только тех, которые относятся к категории по пожаровзрывобезопасности А или Б. О других факторах, кроме “мгновенного вскрытия” и “перемешивания смеси”, влияющих на возникновение и развитие вибрационного горения, в документе не упоминается. Тем не менее это утверждение ставит под сомнение эффективность мер взрывобезопасности, не рассчитанных на развитие этого опасного типа горения.

Отвечая на вопрос о возможности существования вибрационного горения при газовых взрывах в бытовых помещениях, обратим внимание на то, что зарегистрированные в экспериментах случаи вибрационного горения относятся к объемам, близким по форме к бытовым помещениям [10, 11]. Это дает основание утверждать, что не исключено, что это явление имеет место и в реальности.

© Поландов Ю. Х., Корольченко А. Д., 2018

Коротко о вибрационном горении

Первые сведения о вибрационном горении как лабораторном эффекте восходят ко временам Хиггинса и Рийке (XIX век) [12]. Наличие этого эффекта на практике известно по публикациям, в которых рассматривалось сжигание углеводородных топлив в промышленных топках и камерах сгорания авиационных и ракетных двигателей. В одних случаях вибрационное горение обозначено как проблема [12, 13], так как оно приводит к разрушению конструкции, а в других — как способ форсирования процесса горения [14]. Заметим, что в этих случаях имеет место горение, характер которого должен быть стационарным или квазистационарным. Другое дело рассматриваемый объект — газовый взрыв, который длится обычно не более 1 с и имеет выраженный нестационарный характер. Оказывается, что во время этого быстротекущего процесса при определенных условиях также может развиваться вибрационное горение, что показано в экспериментах, проведенных у нас, в России [10], и за рубежом [11]. Согласно результатам этих экспериментов при вибрационном горении не только амплитуда колебаний, но и среднее давление взрыва резко (иногда кратно) возрастало по сравнению с обычным взрывом, что не только согласуется с приведенной цитатой, но и расширяет границы опасности. Применительно к реалиям это означает, что, с одной стороны, опасность разрушения помещений и риски, оцениваемые людскими и материальными потерями, намного выше тех, на что рассчитаны нормативы, а с другой — исследование вибрационного горения при газовых взрывах должно быть возведено в ранг проблемы.

О возможности прогнозирования вибрационного горения

Есть ли на самом деле режим вибрационного горения при реальных газовых взрывах в быту или нет? Этот тезис невозможно ни опровергнуть, ни подтвердить, так как бытовые помещения не оснащены современными средствами измерения и регистрации.

Прогнозировать возникновение и развитие вибрационного горения на основе математических моделей, составленных в “дочисловое, докомпьютерное” время и основанных на описании “механизмов обратной связи” [12–14], практически невозможно. Это связано прежде всего с тем, что колебания, развивающиеся при вибрационном горении, носят нелинейный характер, и механизмы, их возбуждающие, также сугубо нелинейны. Короче говоря, это автоколебания. А уравнения, которыми описывали процесс в те годы, могли быть только линейными или, в крайнем случае, должны были иметь малые нелинейности. И не только поэтому. Дело в том, что акустические колебания, имеющие место при ви-

брационном горении, представляют собой процесс с распределенными параметрами и могут быть описаны уравнениями в частных производных, решение которых возможно только численными методами. В настоящее время большие надежды возлагаются на численные методы *CFD* (Computational Fluid Dynamics), однако эти надежды пока не оправдываются, так как до сих пор с их помощью одним авторам не удалось описать эти автоколебания [15–17], а другим удалось лишь обозначить колебательные контуры [18, 19].

Тем не менее нам [8] удалось смоделировать возбуждение акустических колебаний, используя отечественный метод “крупных частиц” [21] при описании газового взрыва в цилиндрической трубе. При этом в системе уравнений, описывающей процесс развития взрыва, не были заложены никакие “обратные связи”: они всплыли сами в результате эволюции решения. К сожалению, в объемах, геометрически подобных бытовым помещениям, описать автоколебания пока не удалось.

Естественно, для исследования процесса вибрационного горения остается избрать затратный и малопродуктивный метод — экспериментальный, при реализации которого исследуется поочередно влияние каждого из факторов на развитие вибрационного горения при газовом взрыве.

В настоящей работе исследовано влияние места воспламенения стехиометрической газовой смеси на развитие вибрационного горения в незамкнутом объеме, размер и форма которого приближены к реальным бытовым помещениям.

Средства экспериментального исследования

Испытательный стенд. Эксперимент проводился на базе Института комплексной безопасности в строительстве при НИУ МГСУ с использованием взрывной камеры кубической формы объемом 10 м^3 , соответствующей ГОСТ Р 56289–2014, со сбросным окном площадью 2 м^2 (рис. 1) [20]. В камеру подавался пропан для получения смеси с воздухом, близкой к стехиометрическому составу. Внутри камеры установлены вентилятор для перемешивания смеси и устройство для ее воспламенения. Устройство зажигания в ходе эксперимента перемещалось вдоль оси камеры от клапана до задней стенки. Согласно плану эксперимента зажигание производилось в пяти точках: в плоскости окна, по центру камеры, у задней стенки и в промежутках между ними.

Для обеспечения замкнутости объема малой камеры в процессе приготовления смеси сбросное окно камеры закрывалось клапаном многоходового действия, изготовленным из многослойной фанеры

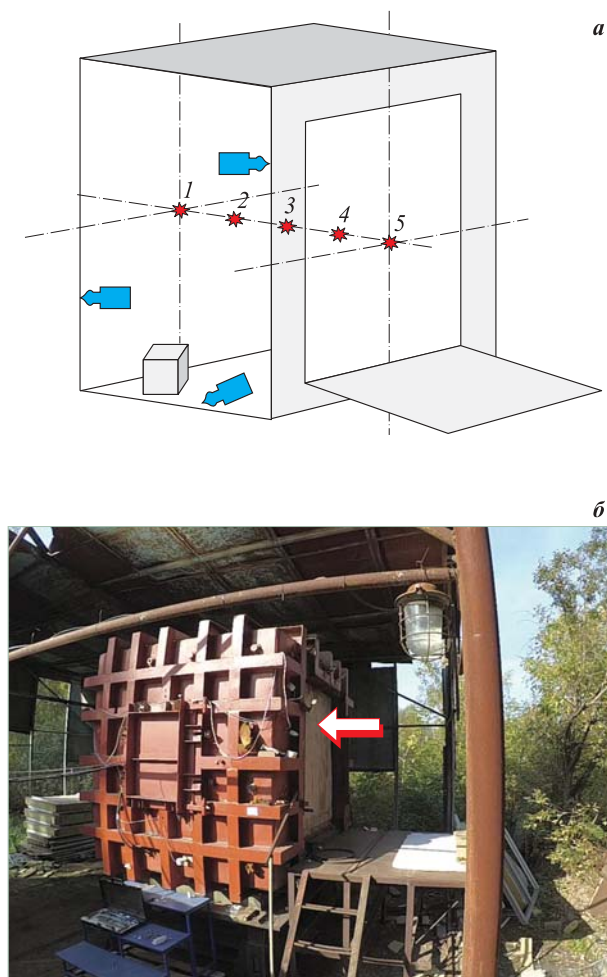



Рис. 1. Схема взрывной камеры (а) и ее исходное состояние (б):  — датчики давления; 1–5 — позиции источника зажигания смеси; стрелкой указано на клапан

с поверхностной плотностью 5 кг/м^2 . При взрыве клапан открывался, и газы сбрасывались в атмосферу. Клапан прижимался к корпусу с помощью двух калиброванных проволок диаметром $1,2 \text{ мм}$, размещенных в верхней части клапана и разрушающихся при нарастании давления в емкости. Нижняя часть клапана прижималась четырьмя проволоками того же диаметра, что обеспечивало вначале разрушение верхних проволок, а затем и нижних. Такая последовательность срабатывания разрушающихся элементов позволяла воспроизводить первые пики давления при взрывах в камере достаточно уверенно.

Средства измерения. В состав системы измерения давления входили следующие устройства: три пьезометрических датчика давления МРХ5050GP (на задней стенке, на боковой стенке по центру и на передней стенке рядом с окном); блок питания датчиков БП04Б-42; аналогово-цифровой преобразователь ЛА-20 USB (производство ЗАО “Руднев-Шиляев”) и персональный компьютер. При обработке базы данных и построения графиков использовалась стандартная программа Excel 2010.

Концентрация газа в емкости определялась измерением его объемного расхода с помощью бытового счетчика газа ВК G4T диафрагменного типа (изготовитель — “Elster-Gmbh”, Германия). Счетчик снабжен устройством термокомпенсации для снижения влияния температуры наружного воздуха, что обеспечивает приемлемую погрешность измерения во всем рабочем диапазоне — не более $1,5 \%$.

Однако есть и другая погрешность, которая формируется в процессе заполнения камеры газом. Дело в том, что при этом в камере нарастает давление, что приводит к истечению из нее газозвушной смеси через всякого рода неплотности и отверстия, которые чаще всего образуются в местах стыка клапана и корпуса. Эта утечка снижает реальное значение концентрации газа в емкости; погрешность при этом может составлять до $2,5 \%$. За счет точного решения задачи о величине утечки газа удалось разработать инженерную методику ее расчета [8]. Методика позволяет рассчитать потребный объем газа, который необходимо подать в камеру, чтобы получить заданную концентрацию:

$$V_r = V(1 - \sqrt{1 - 2c}),$$

где V_r — объем подаваемого газа, м^3 ;

V — объема камеры, м^3 ;

c — ожидаемая концентрация.

Например, в используемую в эксперименте камеру объемом $V = 10 \text{ м}^3$ для достижения концентрации 5% необходимо направить $513,3 \text{ л}$ газа.

Анализ типичного опыта

На рис. 2 приведены видеок кадры взрыва при зажигании в точке 2, на которых видно начало раскрытия клапана, его положение и форма раскрытия истекающей из камеры струи в разные моменты времени от начала взрыва. Неотфильтрованные записи показаний трех каналов регистрации давления приведены на рис. 3. На рисунке можно выделить три стадии развития взрыва. Точка “0” означает подачу сигнала на взрыв, далее в течение первых $0,25 \text{ с}$ давление в камере нарастает до 1500 Па , а затем в результате открытия клапана резко снижается, образуя тем самым первый пик давления. Резкий спад давления вызывает его колебания, которые постепенно затухают. Эти колебания известны и носят имя Гельмгольца. Основанием для такого утверждения служит факт практического совпадения амплитуд и частот колебаний между всеми датчиками давления, т. е. объем камеры ведет себя как единое целое. Этот эффект хорошо известен и описан. Говоря о практическом совпадении амплитуд, тем не менее заметим, что начальное давление у задней стенки в точке А и, соответственно, амплитуда колебаний в этом месте несколько больше, чем в других точках каме-



Рис. 2. Видеокadres взрыва при зажигании смеси в точке 2 в разные моменты времени от начала взрыва: а — 0,12 с; б — 0,20 с; в — 0,30 с; з — 0,70 с

ры. Но это и понятно, поскольку перепад давления то с избытком, то с дефицитом является движущей силой колебания потоков газа при его движении из камеры и в нее.

Колебания затухают по мере снижения среднего давления в камере практически до нуля, но процесс взрыва на этом не заканчивается. Как заметили авторы публикаций В. А. Горев и др. [10] и С. Regis Bauwens, Sergey V. Dorofeev [18], при приближении фронта пламени к углам камеры в ней начинают развиваться акустические колебания (участок БВ). В том, что это акустические колебания, сомнений нет, так как их частота, во-первых, намного выше по сравнению с частотой Гельмгольца и, во-вторых, несмотря на одинаковую частоту колебаний в разных точках камеры, у них и амплитуды разные (но одного порядка). С догоранием смеси затухают акустические колебания в камере, на чем процесс взрыва завершается. Одинаковая частота колебаний (что фиксируется датчиками, расположенными в различных местах камеры) свидетельствует о едином колебательном процессе внутри камеры, что возможно при радиальном типе колебаний с узлами стоячей волны на стенках камеры.

Анализ результатов эксперимента

На рис. 4 приведены результаты обработки 20 опытных взрывов при 4 %-ной объемной концентрации газа при пяти положениях устройства зажигания (см. рис. 1). Обращает на себя внимание слабая воспроизводимость опытов, несмотря на повторение исходных условий при подготовке каждого из них. Это обстоятельство подтверждает сложность изучения такого явления, как акустические колебания при взрывах. Некоторым оправданием может служить то, что другие исследователи обходят этот вопрос, поэтому сравнивать этот важный фактор не с чем.

Единый колебательный процесс колебаний и возможность значительного роста их размаха при центральном положении устройства зажигания (точка 3 на рис. 1) позволяют полагать, что эти колебания носят радиальный характер. Эта гипотеза не противоречит расчету частоты колебаний, если положить, что, с одной стороны, скорость распространения звука в продуктах сгорания $a = \sqrt{kRT} = \sqrt{1,4 \cdot 290 \cdot 1660} \approx 800$ м/с (где k — постоянная Больцмана, $k = 1,4$; R — газовая постоянная, для воздуха можно принять $R = 290$ Дж/(кг·К); T — температура газа, К), а с другой — в камере устанавливается стоячая волна, четверть длины которой равна половине длины камеры (радиусу). В этом случае длина волны L (м) составляет 4 м, и потому частота колебаний $f = L/a = 4/800 = 200$ с⁻¹, что практически совпадает с результатами опытов. Скорост-

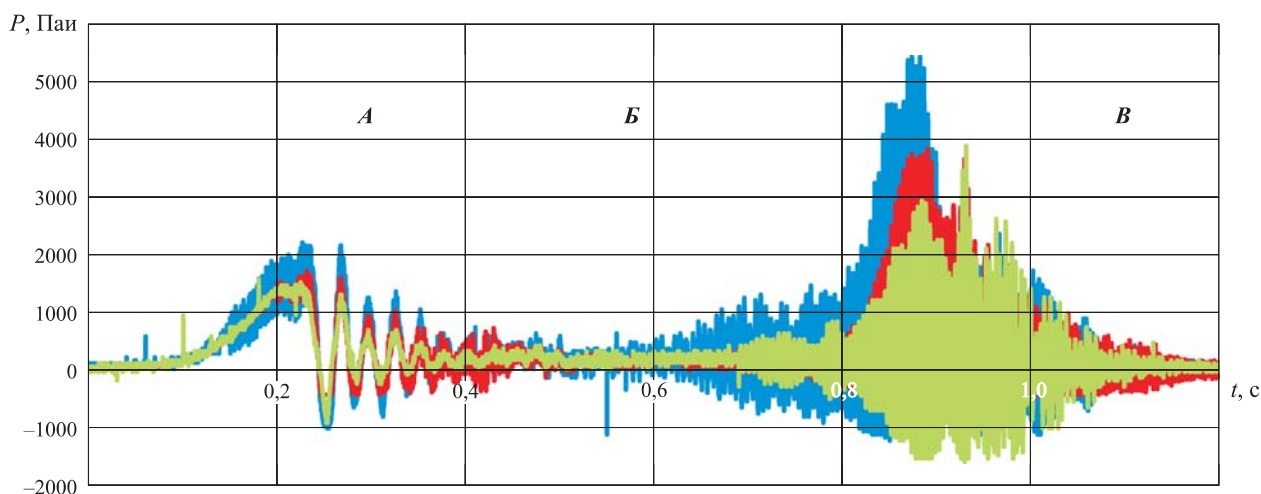


Рис. 3. Развитие давления в камере при зажигании газа в точке 2: — давление у задней стенки; — на боковой стенке; — на передней стенке

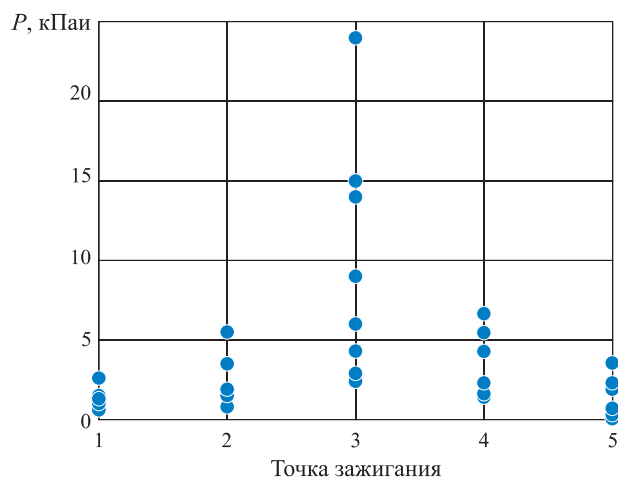


Рис. 4. Зависимость максимальных значений размахов колебаний от позиции зажигания

ной съемкой внутри камеры зафиксировано [10, 11], что колебания возникают тогда, когда фронт пламени приближается к стенкам камеры.

На рис. 4 видна отчетливая тенденция увеличения размаха колебаний с приближением устройства зажигания к центру камеры. Несмотря на большой разброс результатов, особенно при зажигании в центре камеры, можно ожидать, что именно при этом варианте зажигания возможно наиболее опасное развитие взрыва.

Смещение места зажигания от центра камеры делает несимметричным распространение фронта пламени относительно центра, что приводит к “несогласованности” воздействия его на колебательный процесс фронта пламени, невозможности развития резонанса на частоте радиальных колебаний. Этот факт подтверждается также результатами других исследователей [10, 11].

При замене легкого фанерного клапана на ЛСК типа панели с поверхностной плотностью 30 кг/м² [8]

не наблюдалось сколько-нибудь значительных колебаний Гельмгольца и не было даже признаков акустических колебаний (рис. 5). Эти результаты хорошо воспроизводились.

Известно, что в замкнутых (без сброса газов) камерах вибрационное горение не развивается [5]. Что касается “мгновенного вскрытия сбросного сечения” и “перемешивания смеси”, упомянутых в ГОСТ Р 12.3.047, то, во-первых, очевидно, что авторы приняли колебания Гельмгольца за акустические колебания, а во-вторых, факт влияния качества “перемешивания смеси” на вибрационное горение нуждается в экспериментальной проверке.

Интересен еще один эффект, замеченный при зажигании смеси у задней стенки (рис. 6) и хорошо воспроизводимый. Это — колебания Гельмгольца большой амплитуды, которые представлены на рис. 6 двумя пиками на фоне акустических колебаний (вибрационного горения) с небольшой амплитудой. Возможно, это связано с тем, что в этом случае из камеры выбрасывается подавляющая часть газозвушной смеси, которая затем взрывается сразу за окном (энергия взрывной волны при этом может вызвать разрушение остекления в соседних зданиях). Давление взрывной волны на время взрыва “запирает” сечение окна, что приводит к росту давления в камере и возникновению двух пиков давления с частотой Гельмгольца. Максимальное давление в этих пиках незначительно превышает значение первого пика.

Во всех экспериментах, где наблюдалось вибрационное горение [10, 11], объем помещения и площадь окна имели близкие значения безразмерного критерия $B = \sqrt{F} / \sqrt[3]{V} = 0,53 \div 0,60$ (где F — площадь проема окна, V — объем камеры). При значениях этого критерия менее 0,5 вибрационного горения не наблюдалось [7, 16].

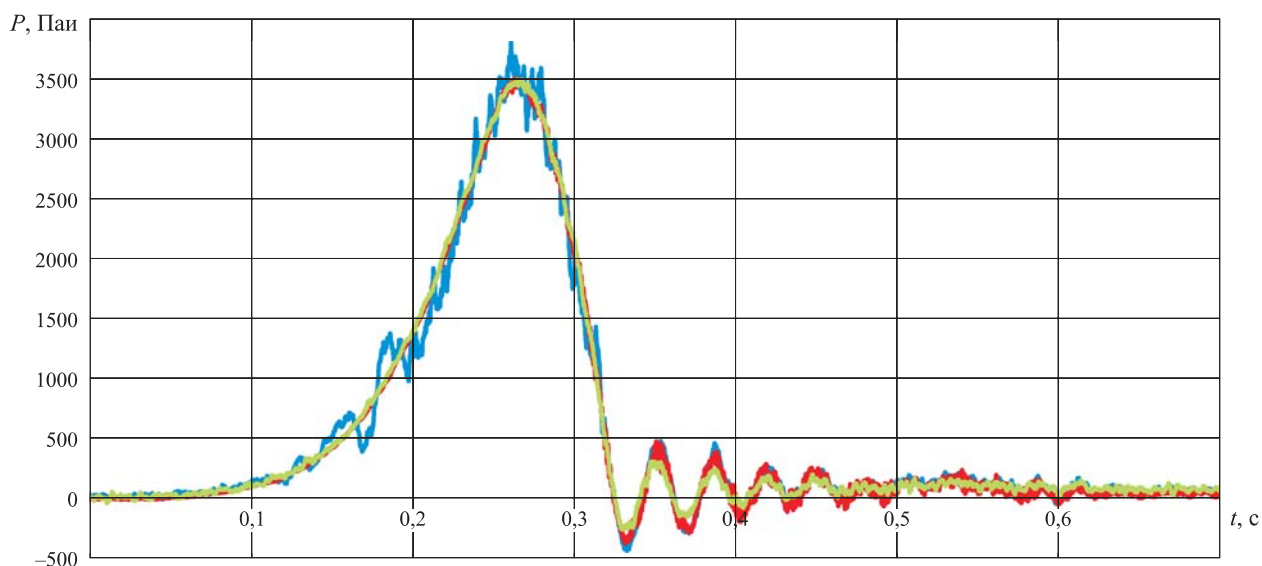


Рис. 5. Развитие давления при сбросе панели массой 60 кг: — давление у задней стенки; — на боковой стенке; — на передней стенке

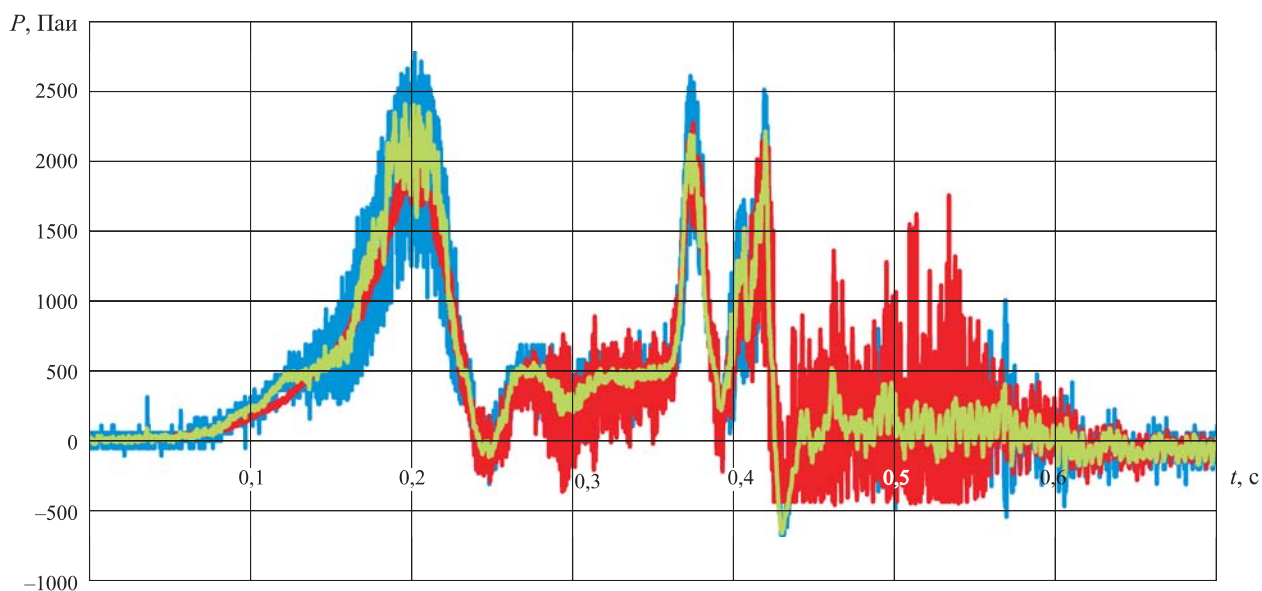


Рис. 6. Развитие давления при зажигании у задней стенки камеры: — давление у задней стенки; — на боковой стенке; — на передней стенке

Условия, при которых возможно вибрационное горение при газовом взрыве

Полученные опытные данные дополнили опубликованные результаты, касающиеся вибрационного горения при взрывах. Это дало возможность выявить условия, при которых возможно вибрационное горение:

- размер камеры не играет роли, во всяком случае этот тип горения наблюдался и при $V = 1 \text{ м}^3$ [10], и при $V = 10 \text{ м}^3$, и при $V = 63 \text{ м}^3$ [11];
- форма камер близка к кубической [10, 11];
- газоздушная смесь по составу близка к стехиометрической [11];

- значение критерия B превышает 0,53;
- клапан (ЛСК) имеет поверхностную плотность менее 5 кг/м^2 ;
- зажигание газовой смеси производится в центре камеры.

Отклонение от этих условий ведет к уменьшению амплитуды колебаний давления при взрыве вплоть до незначительных проявлений признаков такого типа горения. Насколько условия возникновения вибрационного горения могут быть реализованы в бытовом помещении, сказать однозначно сложно.

Наблюдаемые колебания давления Гельмгольца не имеют отношения к вибрационному горению.

Их возникновение обусловлено резким падением давления в камере при раскрытии окна или газодинамическим запираанием проема окна при газовом взрыве вне камеры. Амплитуда этих колебаний в первом случае не превышает первого пика давления, а во втором (при взрывах вне камеры) — превышает его незначительно.

Выводы

Вибрационное горение при газовом взрыве повышает риски. Для их снижения необходимо выявить основные условия, при которых возникает вибрационное горение. Найдено, что наиболее интенсивными колебания давления бывают в камере околосферической формы при зажигании газовой

душной смеси в ее центре. На размах колебаний влияют также размер окна, масса ЛСК, качество смеси и другие факторы. Характерными для такого типа горения являются радиальные акустические колебания с частотой по первой моде. Вибрационное горение возникает в момент приближения фронта пламени к стенкам камеры. При сдвиге источника зажигания от центра камеры, увеличении массы ЛСК, уменьшении площади окна, снижении концентрации газа колебания ослабевают.

Благодарность. Экспериментальные данные получены при поддержке и на оборудовании Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взрывы газа с человеческими жертвами в многоквартирных домах в РФ с 2014 по 2017 год. Досье / Информационное агентство России ТАСС. URL: <http://tass.ru/info/4255543> (дата обращения: 05.06.2018).
2. Risto Lautkaski. Modelling of vented gas explosions / Research Report VTT-R-04600-09. — 2009. — 52 p. URL: inf/julkaisut/luut/2009/VTT-R-04600-09.pdf (дата обращения: 05.06.2018).
3. Molkov V., Baratov A., Korolchenko A. Dynamics of gas explosions in vented vessels; review and progress // Dynamic Aspects of Explosion Phenomena, Progress in Astronautics and Aeronautics / Kuhl A. L., Leyer J.-C., Borisov A. A., Sirignano W. A. (eds.). — 1993. — Vol. 154. — P. 117–131. DOI: 10.2514/5.9781600866272.0117.0131.
4. Molkov V. V. Explosions in buildings: modeling and interpretation of real accidents // Fire Safety Journal. — 1999. — Vol. 33, Issue 1. — P. 45–56. DOI: 10.1016/s0379-7112(99)00003-x.
5. Мольков В. В., Некрасов В. П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 17–24.
6. Zalosh R. Explosion venting data and modeling literature review. — Batterymarch Park, Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2008. — 52 p.
7. Поландов Ю. Х., Бабанков В. А., Добриков С. А. Особенности развития газового взрыва в помещении при наличии смежной комнаты // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 38–46. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.38-46.
8. Поландов Ю. Х., Добриков С. А., Кукин Д. А. Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
9. Vauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures // Combustion Science and Technology. — 2010. — Vol. 182, Issue 11–12. — P. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415.
10. Горев В. А., Беляев В. В., Федотов В. Н. Условие начала вибрационного горения в разгерметизированном сосуде прямоугольной формы // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 36–39.
11. Vauwens C. R., Dorofeev S. B. Parameters affecting flame-acoustic flame instabilities in vented explosions // 24th ICDERS (July 28 – August 2, 2013, Taiwan, Taipei). — 6 p. URL: <http://www.icders.org/ICDERS2013/PapersICDERS2013/ICDERS2013-0216.pdf> (дата обращения: 05.06.2018).
12. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. — М. : Физматгиз, 1961. — 500 с.
13. Крокко Л., Синь-и Чжень. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях / Пер. с англ. — М. : Изд-во иностр. лит., 1958. — 351 с.
14. Ларионов В. М., Заритов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением. — Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. — 227 с.
15. Pedersen H. H., Middha P. Modelling of vented gas explosions in the CFD tool FLACS // Chemical Engineering Transactions. — 2012. — Vol. 26. — P. 357–362. DOI: 10.3303/CET1226060.
16. Комаров А. А., Бажина Е. В. Определение параметров динамических нагрузок от аварийных взрывов, действующих на здания и сооружения взрывоопасных производств // Вестник МГСУ. — 2013. — № 12. — С. 14–19.

17. Ping Tang, Juncheng Jiang. Numerical simulation of duct-vented gas explosion // *Procedia Engineering*. — 2011. — Vol. 18. — P. 25–30. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.005.
18. *Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S.* Experimental and numerical study of methane-air deflagrations in a vented enclosure // *Fire Safety Science*. — 2008. — Vol. 9. — P. 1043–1054. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1043.
19. *Bauwens L., Bauwens C. R. L., Wierzba I.* Oscillating flames: multiple-scale analysis // *Proceedings of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 2009. — Vol. 465, Issue 2107. — P. 2089–2110. DOI: 10.1098/rspa.2008.0388.
20. *Поландов Ю. Х., Добриков С. А., Корольченко А. Я.* Взрыв газа в цилиндрической трубе с отверстием на боковой поверхности // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26.
21. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.: Наука, 1982. — 392 с.

Материал поступил в редакцию 15 июня 2018 г.

Для цитирования: *Поландов Ю. Х., Корольченко А. Д.* Об условиях развития вибрационного горения при газовом взрыве в незамкнутом объеме // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 7–8. — С. 9–23. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.9-23.