

В. А. ГОРЕВ, д-р физ.-мат. наук, 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)

Е. Ю. САЛЫМОВА, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: kiara_lion@mail.ru)

УДК 614.841.343

О ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ВНУТРЕННИХ ВЗРЫВАХ

Проанализированы условия возбуждения вибрационного горения в помещениях и аппаратах. Установлено, что главной причиной возбуждения является формирование волны разрежения в результате сокращения площади горения при взаимодействии пламени с ограждающими стенками. Показано, что волна разрежения возмущает горение таким образом, что скорость тепловыделения вызывает рост давления. Определено, что в объеме генерируются и усиливаются акустические волны, амплитудное давление в колебаниях которых в разы превышает давление квазистатического взрыва. Установлено также, что необходимыми условиями для вибрационного горения является способность стен отражать колебания и способность зоны горения возбуждаться под действием акустических колебаний, так что горение в углах стабилизируется и пламя не уносится через сбросное отверстие истекающими газами.

Ключевые слова: вибрационное горение; дефлаграционный внутренний взрыв; волна разрежения; истечение газов; стоячие акустические волны.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20

Введение

Для уменьшения ущерба от аварийного взрыва в помещениях или замкнутых аппаратах используют разрядные устройства или предохранительные конструкции (ПК) [1, 2]. Они эффективно снижают давление в случае квазистатического характера взрыва, когда отсутствуют волновые процессы [3]. Это объясняется тем фактом, что воздействие волн на предохранительные и ограждающие конструкции происходит одновременно через определенный промежуток времени $t \approx L/C_0$ (где L — характерный размер объема, м; C_0 — скорость звука в исходном газе, м/с), а для выравнивания давления в результате истечения требуется в несколько раз больше времени. В связи с этим на ограждающие конструкции, а через связи и на несущие конструкции будет воздействовать волновая нагрузка, не искаженная вскрытием ПК.

Квазистатические условия, в частности, реализуются при дефлаграционных газовых взрывах, если скорости горения относительно низки ($W < 30$ м/с) и характерное время их изменения на каком-либо участке размером λ больше времени распространения звуковых возмущений в объеме размером L :

$$\lambda/\Delta W \gg L/C_0, \quad (1)$$

где ΔW — характерное изменение видимой скорости пламени.

Условие (1) означает, что возмущения давления в объеме успевают выравниваться.

Предохранительные конструкции будут эффективными в случае выполнения следующих условий:

- взрыв квазистатический;
- темп нарастания давления, благодаря горению, меньше темпа его сброса в результате истечения газов.

Второе условие эквивалентно двум требованиям:

1) общая площадь истечения газов должна удовлетворять условию:

$$\sum U_{-i} v_i S_{0i} > U_r (\sigma - 1) F_{f \max}, \quad (2)$$

где U_{-i} — скорость истечения газов из i -го отверстия, зависящая от их плотности и допускаемого давления взрыва, определяемого прочностью защищаемого объекта;

v_i — коэффициент расхода;

S_{0i} — площадь i -го открытого отверстия, через которое происходит истечение;

U_r — скорость горения (турбулентная);

σ — степень расширения при горении, зависящая от давления;

$F_{f\max}$ — максимальная площадь пламени во время взрыва;

2) вскрытие разрядных устройств, т. е. открытие площади для истечения газов, должно происходить быстро, и инерционные ПК должны удовлетворять условию [3–5]:

$$\Delta P_1 = \Delta P_B \frac{A}{(A^{1/2} - 1)^2}, \quad (3)$$

где ΔP_1 — максимальное давление взрыва в момент вскрытия ПК, которое должно быть меньше допускаемого давления;

ΔP_B — давление вскрытия ПК;

$$A = \frac{v(a+b)ab\Delta P_B^{3/2}N}{2^{1/2}\pi m_{ПК}\rho_0^{1/2}U_r^3(\sigma-1)\sigma^2};$$

v — коэффициент расхода;

a, b — размеры отверстия;

N — число вскрываемых ПК;

$m_{ПК}$ — масса ПК;

ρ_0 — плотность исходной смеси.

Таким образом, в случае когда волновые процессы определяют характер внутреннего взрыва, требования, предъявляемые к сбросным устройствам, не выполняются. Даже при заранее открытых проемах для сброса давления истечение газов не будет описываться уравнением Бернулли. Расход через проем будет следовать за волновым характером изменения давления в месте истечения. За счет процессов отражения от стенок поток через проем будет частично запирается и, как следствие, сброс давления будет тормозиться.

Цель работы — исследовать зарождение частного случая волнового взрыва в замкнутом пространстве, который обусловлен вибрационным горением части газовой смеси. Давление при таком взрыве колеблется с частотой основной моды внутреннего пространства, заполненного продуктами взрыва. Подобный режим горения регулярно наблюдается в камерах сгорания ракетных двигателей при случайных колебаниях подачи горючего. При внутреннем взрыве резкое изменение скорости тепловыделения может произойти при уменьшении площади горения, поэтому ставится **задача** изучить влияние снижения энерговыделения в результате контакта пламени с ограждающими конструкциями. Изменение давления при вибрационном горении носит волновой локальный характер. В момент встречи волнового возмущения давления с зоной горения происходит повышение скорости тепловыделения.

Методы исследования

Экспериментальное изучение процесса взрывного горения проводилось в кубической камере объемом 1 м^3 с квадратным отверстием размером

$0,36 \times 0,36 \text{ м}$ в центре верхней грани. В боковую грань было вставлено стекло размером $0,8 \times 0,8 \text{ м}$ для возможности проведения киносъемки процесса горения кинокамерой СКС-1М. Характер изменения давления внутри камеры измерялся датчиками давления ДМИ-0,3 и ДМИ-1.

Горючая смесь готовилась путем добавления к воздуху необходимого количества пропана с последующим перемешиванием ее посредством вентилятора в течение 5 мин и выдерживанием еще в течение 5 мин. Отверстие при этом было закрыто металлической пластиной толщиной 2 мм.

Зажигание горючей смеси осуществлялось в центре камеры. В ряде опытов перед зажиганием пластину убирала, и горение проходило в разгерметизированном объеме.

Результаты исследования и их обсуждение

Волновые процессы при внутреннем взрыве могут иметь различную природу. В первую очередь, взрывные волны образуются при заметном ускорении горения, вплоть до детонации. Расчет зданий и аппаратов на такие взрывные нагрузки аналогичен расчету на действие взрывных волн при наружном взрыве [6]. В практике защиты от взрывных нагрузок при внутреннем взрыве совершенно не рассматривается взрыв, сопровождающийся вибрационным горением, несмотря на то что это явление было обнаружено уже в работах [7–9].

Срабатывание разрядных устройств вызывает движение потоков газа в их сторону. Причем чем выше давление вскрытия, тем более интенсивные потоки газа генерируются. В начальный момент (во время вскрытия) внутрь объема распространяется волна разрежения, интенсивность которой тем больше, чем выше давление вскрытия. На рис. 1 иллюстрируют-

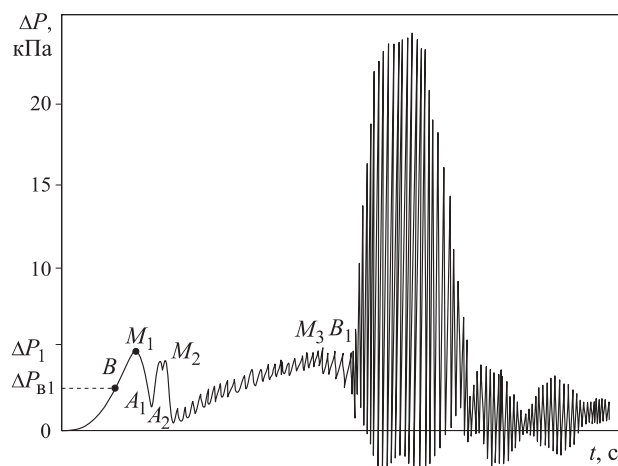


Рис. 1. Индикаторная диаграмма при внутреннем взрыве, показывающая процессы, происходящие при дефлаграционном внутреннем взрыве с учетом истечения газов

ся процессы, происходящие при дефлаграционном внутреннем взрыве с учетом истечения газов.

На рисунке участок 0–В соответствует взрыву в замкнутом объеме. В момент В происходит вскрытие ПК, при этом открывается проем (площадь) для истечения газов. До момента M_1 этой площади недостаточно, чтобы давление начало снижаться. В точке M_1 реализуется первый пик давления, но проем еще не полностью открылся. По мере его открытия площадь истечения продолжает расти, и к моменту A_1 проем оказывается открытым полностью. В этот момент реализуется локальный минимум давления. До момента M_2 давление повышается из-за роста площади горения. Наконец, в момент M_2 происходит резкое изменение скорости истечения: вместо холодной исходной смеси через отверстие начинают истекать горячие продукты горения. Скорость истечения при этом возрастает в $\sigma^{1/2}$ раз. В это время в плоскости отверстия формируется волна разрежения, которая распространяется внутрь объема и взаимодействует с фронтом пламени. Это взаимодействие приводит к неустойчивости пламени, влияние которой проявляется в появлении пульсаций поверхности пламени и слабых акустических колебаний в объеме. Об этом свидетельствуют пульсации давления малой амплитуды на участке A_2 – M_3 (см. рис. 1). Общее осредненное давление постепенно растет из-за увеличения площади поверхности пламени. После касания пламени стенок его площадь резко сокращается, и среднее давление снижается до полного прекращения горения. Пик в точке M_3 обязан максимальному значению площади фронта пламени. Обычно $F_{f\max} = KV_0^{2/3}$ (где K — коэффициент, зависящий от формы аппарата или помещения). В точке B_1 пламя достигает ребер объема аппарата или помещения.

Пульсации давления на участке A_2 – M_3 обусловлены пульсацией фронта пламени. При таком развитии неустойчивости поверхность фронта пламени не претерпевает инверсий. Возбуждается пульсационная неустойчивость от малых возмущений и всех длин волн более критической длины $\lambda_{кр}$, которая соответствует удвоенной толщине пламени [10].

Вследствие этого происходит резкое уменьшение площади горения и скорости образования горячих газов. Из мест истечения к стенкам устремляется волна разрежения, интенсивность которой пропорциональна скорости снижения тепловыделения или в нашем случае скорости сокращения площади горения.

Эта волна оттягивает зону горения назад, тем самым снова увеличивая площадь горения, что приводит к росту давления и реализации критерия Рэлея [11, 12], когда рост давления и рост тепловыделения

имеют совпадение по фазе, несмотря на то что инициирующим событием интенсификации горения являлась волна разрежения. В дальнейшем из-за положительной обратной связи (критерий Рэлея) происходит рост амплитуды колебаний давления в стоячей волне, который ограничен содержанием горючей смеси в углах объема. Подобные явления наблюдаются в вытянутых объемах (трубах), когда пламя касается стенок на сравнительно ранних стадиях взрыва, поэтому вибрационное горение в протяженных объемах более ярко выражено и амплитуды колебаний давления и скорости могут привести даже к прекращению горения [12]. Вибрационное горение наблюдается и при взрывах в замкнутых сосудах [13]. Природа его появления та же — возбуждение волны разрежения из-за уменьшения площади горения при контакте зоны горения с твердыми стенками аппарата или помещения.

Как следует из анализа газодинамических процессов, протекающих внутри объема взрыва в результате касания пламени ограждающих стенок и образования волны разрежения, возможны следующие сценарии развития ситуации:

- волна разрежения оттягивает пламя от стенок, горение не может стабилизироваться, и пламя вытягивается наружу; догорания в углах не происходит. На рис. 1 на участке после B_1 осцилляции отсутствуют и давление плавно падает до нуля;
- волна разрежения оттягивает пламя от стенок, горение стабилизируется в месте истечения, где возникают зоны обратных токов (рис. 2), и в результате возникает вибрационное горение с догоранием смеси в углах (рис. 3, в);
- при реализации критерия Рэлея происходит усиление вибраций среды, пламя при этом теряет устойчивость (проявляется осцилляционная неустойчивость [14]), поверхность фронта пламени претерпевает инверсию (объемы горючей смеси проникают в продукты горения и сгорают там либо фронтально, либо перемешиваясь с продуктами горения [12]).

При этом горение интенсифицируется и происходит его стабилизация в углах [15, 16], пламя не увлекается истекающими газами. Стабилизация горения в углах достигается также из-за затрудненного истечения газов наружу при внутренних колебаниях среды. При более слабых начальных возмущениях или менее чувствительных смесях вибрационное горение может не возбуждаться.

При положительной обратной связи происходит нарастание амплитуды колебаний, ламинарный фронт пламени разрушается, и горение продолжается по объемному механизму, как в реакторе идеального смешения. Так происходит в условиях нашего эксперимента; методика описана в [17, 18]. В дополне-

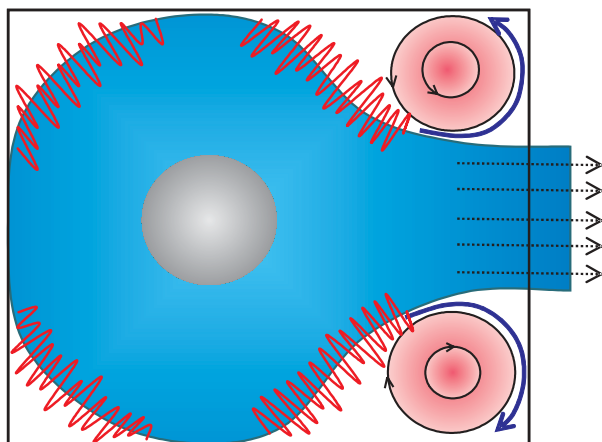


Рис. 2. Возникновение вибрационного горения с догоранием смеси в углах: синий цвет — зона продуктов горения; красный — вибрационное горение; серый — отсутствие горения

ние к измерениям давления и фотосъемке в камерах устанавливались ионизационные датчики. Особое значение придавалось показаниям датчиков, расположенных в углах камеры. На рис. 3,в представлены результаты опытов в камере объемом $0,1 \text{ м}^3$. Синий цвет соответствует первоначальному пламени, красный — горению в углах в вибрационном режиме, темный в середине кадра — площади, где горение прекратилось из-за контакта пламени со стенками.

На рис. 3,а видно, как в правом верхнем углу зарождаются очаги горения, обозначенные красным цветом. Это уже результат реакции между исходной смесью и продуктами реакции после их смешения. На рис. 3,б в этом углу произошла окончательная стабилизация горения, а на рис. 3,в площадь горения расширилась. При этом в объеме наблюдается усиление колебаний стоячих волн.

Таким образом, горение и колебание газа усиливают друг друга. Следует отметить еще одну особенность: истечение газа из объема происходит прерывисто, в соответствии с колебаниями внутри объема,

и при больших амплитудах колебаний холодный газ может проникать внутрь его, а истечение будет затрудняться вследствие запираания потока при отражении фазы сжатия на стенке с отверстием. Впервые на запираание потока при вибрациях внутри объема указано в [14]. В наших опытах отверстие для истечения газов являлось источником звуковых сигналов высокой частоты. В работах [8, 17, 18] описаны опыты, в которых внутренние стенки покрывались звукопоглощающим материалом (войлок, асбест). Вибрационного горения в этих случаях не наблюдалось. При этом смеси, в которых возбуждалось вибрационное горение, не догорали в условиях отсутствия вибрационного горения, т. е. горение этих смесей не стабилизировалось. С другой стороны, когда углы объема были заполнены вставками, горение в углах отсутствовало, так как гореть было нечему, и вибрационное горение не наблюдалось.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что вибрационное горение возбуждается в момент формирования волны разрежения в результате сокращения зоны горения из-за взаимодействия пламени с ограждающими стенками объема. Чем выше интенсивность волны разрежения, тем легче возбуждается вибрационное горение. Вибрационное горение в объемах развивается в основном в углах, так как после касания пламени стенок горячая смесь остается только там. В удлиненных объемах вибрационное горение может длиться гораздо дольше. К вибрационному горению наиболее склонны смеси, в которых развивается диффузионно-тепловая неустойчивость, когда легкий компонент имеется в недостатке [8]. Вибрационное горение труднее возбуждается при высоких частотах возмущений, т. е. в малых объемах [12].

При защите от взрыва достаточно прочных аппаратов применяют разрывные мембраны с высоким уровнем давления вскрытия. При этом вскрытие мембран происходит настолько быстро, что формируется волна разрежения высокой интенсивности.



Рис. 3. Процесс вибрационного горения газа внутри камеры с прерывистым истечением газов

Взаимодействие ее с фронтом пламени может привести к переходу горения в детонацию [19].

Вибрационное горение может развиваться от многоочагового воспламенения при продолжительном периоде индукции [10–23], а также при повторном воспламенении смеси, состоящей из продуктов горения и исходной горючей смеси [24, 25].

При взрыве внутри помещений вскрытие ПК происходит при низких давлениях и в течение конечного времени, так что волна разрежения не образуется. Вибрационное горение может возбудиться также в объеме, в котором проемы были открыты еще до начала взрыва [18]. Вибрационное горение может вызвать резонансные явления при отклике некоторых конструкций, если их собственная частота соответствует частоте колебаний в стоячей волне: $f = C/(2L)$ (где C — скорость звука в газовой среде), ведь амплитуда давлений в стоячей волне может в

десять раз превышать давление, на фоне которого развивается вибрационное горение.

В заключение отметим, что давление при вибрационном горении по природе волновое и его рост обусловлен как колебаниями тепловыделения, так и уменьшением скорости истечения газов по сравнению со стационарным режимом. Попытки описать изменение давления при вибрационном горении с помощью подбора коэффициентов турбулизации методологически не обоснованы. Так, в [26] для описания результатов экспериментов, в ходе которых возникли волновые процессы, в рамках квазистатического подхода автор вынужден был использовать фактор турбулизации $\chi > 20$. Очевидно, что в случае детонации [19, 22] описать динамику изменения давления с помощью аппарата, соответствующего квазистатическому режиму, еще труднее, а с учетом явления отражения волн — тем более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилюгин Л. П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. — М. : Асс. “Пожнаука”, 2000. — 224 с.
2. СП 56.13330.2011. Производственные здания. — Введ. 20.05.2011. — М. : Минрегион России, 2011.
3. Салымова Е. Ю. Динамика развития опасных факторов в зданиях с ограждающими конструкциями из трехслойных сэндвич-панелей при пожарах и взрывах : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МГСУ, 2014. — 110 с.
4. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions // 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”. — 2016. — Vol. 86. — № 04025. — 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025.
5. Горев В. А., Салымова Е. Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легко-сбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т. 19, № 2. — С. 41–44.
6. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С., Забегаев А. В. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки. — М. : Высшая школа, 1992. — 319 с.
7. Solberg D. M., Pappas J. A., Skramstad E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // Symposium (International) on Combustion. — 1981. — Vol. 18, issue 1. — P. 1607–1614. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80164-6.
8. Van Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination // Combustion and Flame. — 1983. — Vol. 51. — P. 109–111. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90088-3.
9. Zalosh R. G. Gas explosion tests in room-size vented enclosures // AIChE Loss Prevention. — New York : American Institute of Chemical Engineers, 1980. — Vol. 13. — P. 98–108.
10. Маркштейн Дж. Г. Явления неустойчивости фронта пламени // Вопросы горения и детонационных волн : сборник докладов конференции. — М. : Оборонизд, 1958. — С. 436–438.
11. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. — М. : Физматгиз, 1961. — 500 с.
12. Нестационарное распространение пламени / Под ред. Маркштейна Дж. Г.; пер. с англ. — М. : Мир, 1968. — 437 с.
13. Карпов В. П. Ячеистая структура пламени в условиях бомбы постоянного объема и связь ее с вибрационным горением // Физика горения и взрыва. — 1965. — № 3. — С. 68–74.
14. McCann D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Gazdynamics of vented explosions. Part II: One-dimensional wave interaction model // Combustion and Flame. — 1985. — Vol. 60, issue 1. — P. 63–70. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90118-x.
15. Фурлетов В. И. Колебания скорости тепловыделения при вибрационном горении // Горение гетерогенных и газовых систем : материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка, 1986. — С. 32–35.

16. Горбатко А. А., Кузнецов В. Р., Лунатов П. А. Применение фронтальной модели горения к анализу стабилизации пламени плохообтекаемыми телами // Горение гетерогенных и газовых систем : материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка, 1986. — С. 35–39.
17. Горев В. А., Беляев В. В., Федотов В. Н. Условие начала вибрационного горения газа в разгерметизированном сосуде прямоугольной формы // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 36–39.
18. Горев В. А., Федотов В. Н. О роли акустических колебаний при взрывном горении газов в разгерметизированном сосуде // Структура газовых пламен : материалы Международного семинара по структуре газовых пламен. — Новосибирск, июль 1986. — С. 202–208.
19. Dorofeev S. B., Bezmelnitsin A. V., Sidorov V. P. Transition to detonation in vented hydrogen-air explosions // Combustion and Flame. — 1995. — Vol. 103, issue 3. — P. 243–246. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00148-y.
20. Medvedev S. P., Agafonov G. L., Khomik S. V. Low-temperature ignition delay for hydrogen-air mixtures in light of a reaction mechanism with quantum correction // Acta Astronautica. — 2016. — Vol. 126. — P. 150–153. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.019.
21. Urzay J., Kseib N., Davidson D. F., Iaccarino G., Hanson R. K. Uncertainty-quantification analysis of the effects of residual impurities on hydrogen-oxygen ignition in shock tubes // Combustion and Flame. — 2014. — Vol. 161, issue 1. — P. 1–15. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.012.
22. Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Gelfand B. E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion // Symposium (International) on Combustion. — 1994. — Vol. 25, issue 1. — P. 73–78. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80630-2.
23. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. — М. : Физматлит, 2008. — 288 с.
24. Горев В. А., Мирошников С. Н. Ускоряющееся горение в газовых объемах // Химическая физика. — 1982. — № 6. — С. 854–858.
25. Phylaktou H., Andrews G. E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // Combustion and Flame. — 1991. — Vol. 85, issue 3-4. — P. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7.
26. Molkov V. V. Theoretical generalization of international experimental data on vented gas explosion dynamics // Physics of Combustion and Explosions. — 1995. — No. 25. — P. 165–181.

Материал поступил в редакцию 20 апреля 2017 г.

Для цитирования: Горев В. А., Салымова Е. Ю. О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.

English

ABOUT THE POSSIBILITY OF VIBRATION COMBUSTION AT INTERNAL EXPLOSIONS

GOREV V. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, 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: ICA_kbs@mgsu.ru)

SALIMOVA E. Yu., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: kiara_lion@mail.ru)

ABSTRACT

Vibration combustion is wave process. It is excited in result of interaction of the flame front with a depression wave which is formed as a result of sharp decrease of speed of a thermal emission, because of decrease of burning area at contact of a flame with the walls limiting volume. The flame

under the influence of a wave of expansion tries to return to former situation and again to increase burning area. Fluctuations of gas and fluctuation of the combustion zone are as a result generated. Fluctuations amplify — the flame loses stability, combustion accelerates. The more the camera volume, the easier a flame loses stability. There are especially inclined to vibration combustion of mix, showing diffusion and thermal instability. Mixes with a lack of a mild component belong to such mixes. Speed of heat release and pressure in volume change with oscillation frequency of gas that complicates the expirations from volume. The combustion mode at the strong fluctuations passes from the surface in volume that is followed by change of character of a luminescence of the combustion zone. Amplitude value of pressure in waves can exceed several times pressure against the background of which vibration combustion develops. In squared volumes in the mode of vibration combustion the mix which remained in corners as combustion in this case is stabilized in corners burns down. Experiences in which fluctuation of gas was suppressed with a covering of walls with a felt took place without vibration combustion. In self-contained volumes vibration combustion is also excited in result of interaction of the combustion zone with volume walls in this case stabilization it is not required as the expiration of gases does not happen. When smoothing corners of volume vibration combustion quickly stops. Otherwise combustion in corners does not reach as the flame is extended with the expiring gases. It is apparent that the processes happening at vibration combustion cannot be described by means of quasi-stationary representations.

Building constructions of buildings of explosive productions need to be counted taking into account possible pressure roughness if there is a threat of emergence of vibration combustion.

Keywords: vibration combustion; internal explosion; expansion wave; gases expiration; acoustic waves.

REFERENCES

1. Pilyugin L. P. *Obespecheniye vzryvoustoychivosti zdaniy s pomoshchyu predokhranitelnykh konstruktсий* [Maintenance explosion proof buildings with relief designs]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000. 224 p. (in Russian).
2. *Set of rules 56.13330.2011. Production buildings*. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2011 (in Russian).
3. Salymova E. Yu. *Dynamics of development of dangerous factors in buildings with enclosing structures made of sandwich panels in fires and explosions*. Cand. tech. sci. diss. 2014. 110 p. (in Russian).
4. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions. In: *5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education"*, 2016, vol. 86, no. 04025. 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025.
5. Gorev V. A., Salymova E. Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in industrial buildings. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 41–44 (in Russian).
6. Popov N. N., Rastorguev B. S., Zabegaev A. V. *Raschet konstruktсий na dinamicheskiye i spetsialnyye nagruzki* [Calculation of designs on inertial express reaction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992. 319 p. (in Russian).
7. Solberg D. M., Pappas J. A., Skramstad E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. In: *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, issue 1, pp. 1607–1614. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80164-6.
8. Van Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination. *Combustion and Flame*, 1983, vol. 51, pp. 109–111. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90088-3.
9. Zalosh R. G. Gas explosion tests in room-size vented enclosures. In: *AIChE Loss Prevention*. New York, American Institute of Chemical Engineers, 1980, vol. 13, pp. 98–108.
10. Markstein G. H. Phenomena of instability of the flame front. In: *Voprosy goreniya i detonatsionnykh voln: sbornik dokladov konferentsii* [Questions of Combustion and Detonation Waves. Proceedings of Conference]. Moscow, Oboronizd, 1958, pp. 436–438 (in Russian).
11. *Raushenbakh B. V. Vibratsionnoye gorenije* [Vibration combustion]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 500 p. (in Russian).
12. Markshtein G. H. *Nonsteady flame propagation*. Oxford, Pergamon Press, 1964. (Russ. ed.: Markstein G. H. (ed.). *Nestatsionarnoye rasprostraneniye plameni*. Moscow, Mir Publ., 1968. 437 p.).

13. Karpov V. P. Cellular flame structure under conditions of a constant-volume bomb and its relationship with vibratory combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1965, vol. 1, issue 3, pp. 39–42. DOI: 10.1007/bf00760215.
14. McCann D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Gazdynamics of vented explosions. Part II: One-dimensional wave interaction model. *Combustion and Flame*, 1985, vol. 60, issue 1, pp. 63–70. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90118-x.
15. Furletov V. I. Fluctuations of speed of a thermal emission at vibration combustion. In: *Goreniye geterogennykh i gazovykh sistem: materialy VIII Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu* [Combustion of heterogeneous and gas systems. Proceedings of VIII All-Union Symposium on Combustion and Explosion]. Chernogolovka, 1986, pp. 32–35 (in Russian).
16. Gorbatko A. A., Kuznetsov V. R., Lipatov P. A. Application of the frontal model of combustion to the analysis of stabilization of a flame bodies. In: *Goreniye geterogennykh i gazovykh sistem: materialy VIII Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu* [Combustion of heterogeneous and gas systems. Proceedings of VIII All-Union Symposium on Combustion and Explosion]. Chernogolovka, 1986, pp. 35–39 (in Russian).
17. Gorev V. A., Belyaev V. V., Fedotov V. N. Condition of the beginning of vibrational gas combustion in an unsealed vessel of rectangular shape. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 1, pp. 31–34. DOI: 10.1007/bf00758231.
18. Gorev V. A., Fedotov V. N. About a role of acoustic vibrations at explosive combustion of gases in the depressurized vessel. In: *Struktura gazovykh plamen: materialy Mezhdunarodnogo seminar po strukture gazovykh plamen* [Structure gas flames. Proceedings of International Seminar on Structure Gas Flames]. Novosibirsk, July 1986, pp. 202–208 (in Russian).
19. Dorofeev S. B., Bezmelnitsin A. V., Sidorov V. P. Transition to detonation in vented hydrogen-air explosions. *Combustion and Flame*, 1995, vol. 103, issue 3, pp. 243–246. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00148-y.
20. Medvedev S. P., Agafonov G. L., Khomik S. V. Low-temperature ignition delay for hydrogen-air mixtures in light of a reaction mechanism with quantum correction. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 126, pp. 150–153. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.019.
21. Urzay J., Kseib N., Davidson D. F., Iaccarino G., Hanson R. K. Uncertainty-quantification analysis of the effects of residual impurities on hydrogen-oxygen ignition in shock tubes. *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, issue 1, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.012.
22. Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Gelfand B. E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion. *Symposium (International) on Combustion*, 1994, vol. 25, issue 1, pp. 73–78. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80630-2.
23. Gelfand B. E., Popov O. E., Chayvanov B. B. *Vodorod: parametry goreniya i vzryva* [Hydrogen: combustion and explosion parameters]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 288 p. (in Russian).
24. Gorev V. A., Miroshnikov S. N. The accelerating combustion in gas volumes. *Khimicheskaya fizika / Chemical Physics*, 1982, no. 6, pp. 854–858 (in Russian).
25. Phylaktou H., Andrews G. E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*, 1991, vol. 85, issue 3-4, pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7.
26. Molkov V. V. Theoretical generalization of international experimental data on vented gas explosion dynamics. *Physics of Combustion and Explosions*, 1995, no. 25, pp. 165–181.

For citation: Gorev V. A., Salymova E. Yu. About the possibility of vibration combustion at internal explosions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.