УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ ЗАЖИГАНИЯ И НАЛИЧИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ДЕФЛАГРАЦИЮ ВЕНТИЛИРУЕМОГО МЕТАНОВОЗДУШНОГО ПОТОКА

# J.-L. $Li^1$ , J. $Guo^2$ , X.-X. $Sun^3$ , F.-Q. $Yang^2$

<sup>1</sup> School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, PR China
<sup>2</sup> College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116,

PR China, guojinfzu@gmail.com

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230009, PR China

Проведено исследование вентилируемого взрыва 9%-й метановоздушной смеси при переднем, центральном и заднем расположении точки зажигания в прямоугольной емкости объемом 1 м<sup>3</sup> в присутствии и в отсутствие препятствий в виде цилиндров, расположенных параллельно направлению вентилирования. Наблюдались три пика давления P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> и P<sub>ext</sub>, соответствующие срыву вентилирования, пламеакустическому взаимодействию и внешнему взрыву. Пик давления P<sub>1</sub> возникал во всех экспериментах и был нечувствителен к положению точки зажигания, но в присутствии препятствий его величина возрастала. Пик давления Р<sub>2</sub> появлялся только в случаях центрального и переднего положения точки зажигания в отсутствие препятствий. Пик давления Pext наблюдался в опытах с задним расположением точки зажигания и увеличивался в присутствии препятствий. Длительность осцилляций Гельмгольца была больше при переднем положении точки зажигания, а присутствие препятствий слабо влияло на их частоту. Сравнение результатов моделирования временных зависимостей давления и распространения пламени в программе FLACS с экспериментальными результатами подтвердило возможность использовать эту программу для предсказания свойств вентилируемого взрыва метановоздушной смеси. Программа FLACS в основном предсказывает форму кривых избыточного давления. В присутствии препятствий моделирование лучше соответствует эксперименту, так как FLACS не предсказывает пик давления P<sub>2</sub>, вызываемый пламеакустическими взаимодействиями. Моделирование удовлетворительно согласуется с экспериментом в случае заднего зажигания, так как величина пика давления  $P_{ext}$  и влияние препятствий на  $P_{ext}$  были рассчитаны с хорошей точностью. Поведение пламени, рассчитанное по программе FLACS, соответствовало экспериментальному, но расчеты не воспроизводили влияние неустойчивости Тейлора на пламя.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, вентилируемый взрыв, препятствие, избыточное давление, пламя.

DOI 10.15372/FGV2022.9208

#### ВВЕДЕНИЕ

Метан, основной компонент природного газа, играет важную роль в промышленности и быту. Однако при его хранении, транспортировке и использовании в случае случайной утечки в замкнутое пространство существует возможность взрывов, приводящих к человеческим жертвам и имущественному ущербу. С целью минимизации этих последствий в промышленном проектировании часто применяется вентилирование. За последние десятилетия были проведены экспериментальные и численные исследования [1–5] факторов, оказываюцих влияние на процесс взрывного вентилирования.

Среди существенных факторов важную роль в формировании избыточного давления, ответственного за уровень ущерба от взрыва, играет положение точки зажигания, классифицируемое в общем как переднее, центральное и заднее. Существуют разные мнения по вопросу влияния положения зажигания. Например, в некоторых исследованиях [6, 7] показано, что взрыв при центральном зажигании приводит к более высокому внутреннему избыточному давлению вследствие максимальной площади пламени и меньших потерь тепла через стенку сосуда. В [8] обнаружено, что при центральном поджиге происходит самое быстрое увеличение давления. Авторы работ [9, 10] наихудшей ситуацией считают заднее зажига-

<sup>©</sup> Li J.-L., Guo J., Sun X.-X., Yang F.-Q., 2023.

ние из-за того, что пламя ускоряется на большем расстоянии и происходит сильный внешний взрыв. В [11] установлено, что при заднем зажигании достигается наивысшая скорость увеличения давления. Однако исследования [2] показали, что это не наихудший случай, потому что на процесс вентилирования оказывает влияние совокупность конкурирующих факторов, таких как размер вентиляционного устройства, препятствие, давление активации вентиляционной крышки. Причем существование препятствий — оборудования и трубопроводов — в заводских условиях неизбежно. Отвод газовых смесей может зависеть от наличия препятствий, и ранее сделанные выводы о влиянии положения точки зажигания могут оказаться неверными. Поэтому необходимо дополнительно исследовать влияние положения зажигания на дефлаграцию при отводе газовых смесей (вентилировании) в присутствии препятствий.

Ранее в таких исследованиях использовались препятствия цилиндрической, квадратной и треугольной формы, а также пластины [2, 12– 14]. В работах [15, 16] было показано, что наличие препятствий приводит к увеличению максимального избыточного давления, при этом наиболее высокие значения избыточного давления и скорости пламени наблюдались в случае препятствий с острыми углами [12, 17, 18]. В то же время в [19, 20] в некоторых экспериментах с препятствиями зафиксировано уменьшение максимальной силы взрыва, а это означает, что влияние препятствий требует дальнейшего изучения. Кроме того, в выполненных работах препятствия располагались в основном перпендикулярно направлению газоотвода, что затрудняло вентилирование и распространение пламени. Но в реальности объекты могут располагаться и вдоль направления вентилирования, как, например, газовые баллоны в технологическом резервуаре. Следовательно, необходимо также изучить влияние на взрыв препятствий, установленных параллельно направлению вентилирования.

Крупномасштабные эксперименты по вентилированию не всегда осуществимы по соображениям безопасности и экономической целесообразности. Поэтому в качестве инструмента для предсказания характеристик взрыва в таких испытаниях был предложен метод вычислительной динамики жидкости (CFD). В предыдущих работах результаты экспериментального исследования дефлаграции в вентилируемом водородовоздушном пламени были применены для валидации предсказательной способности моделирования при помощи программы FLACS. Результаты моделирования [21, 22] в целом воспроизводили основные тенденции поведения системы, выявленные в экспериментах. Предсказанные в [23, 24] величины избыточного давления, а также соответствующее расширение пламени и его маршрут качественно находились в хорошем согласии с экспериментальными результатами. В [25] коммерческая версия программы FLACS в целом давала завышенные максимальные избыточные давления по сравнению с экспериментальными. Рекомендации и практические аспекты применения FLACS представлены в работе [26]. Возможности FLACS в моделировании взрыва вентилируемой метановоздушной смеси были подтверждены авторами [27, 28]. Они показали, что FLACS дает точные значения внутреннего давления, но не позволяет правильно рассчитывать акустически передаваемые давления. В некоторых экспериментах по дефлаграции водородовоздушной смеси (особенно в случае высоких концентраций водорода) [29, 30] акустический пик избыточного давления не являлся преобладающим. Таким образом, программа FLACS все же может предсказывать максимальное избыточное давление в таких вентилируемых процессах, хотя не позволяет моделировать акустические осцилляции в пламени [24]. Однако в случае вентилируемого взрыва метановоздушной смеси пиковое давление при vсилении акустической волной может стать доминирующим [31, 32], так что FLACS будет давать заниженные значения максимального избыточного давления из-за того, что не вычисляются пламеакустические осцилляции. Учитывая расхождения в поведении этих двух топлив и тот факт, что в недавних исследованиях основное внимание уделялось водороду, нужно признать, что требуется проведение исследований вентилируемого взрыва метановоздушной смеси. Кроме того, необходимо получить больше данных для случаев с наличием препятствий (особенно цилиндрических препятствий, расположенных параллельно направлению вентилирования).

Чтобы решить вышеописанные проблемы, мы провели вентилируемые взрывы при переднем, центральном и заднем положении точки зажигания 9%-х метановоздушных смесей в прямоугольной камере объемом 1 м<sup>3</sup> с цилиндрическими препятствиями и без них. Изучались изменение давления и динамика распространения пламени в зависимости от положения точки зажигания и наличия препятствий. Кроме того, проведено сравнение зависимостей давления от времени и поведения пламени, моделируемых при помощи программы FLACS для метановоздушных смесей, с экспериментально определенными характеристиками с целью подтвердить возможности использования FLACS для моделирования вентилируемых взрывов метановоздушных смесей при наличии препятствий и в их отсутствие.

#### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовались стальные прямоугольные емкости шириной 1000 мм, глубиной 550 мм и высотой 1800 мм (рис. 1). Размеры вентиляционного вывода в верхней части составляли 600 × 400 мм, в качестве крышки использовалась закрепленная болтами по краям алюминиевая мембрана, для которой статическое разрушающее давление составля-



Рис. 1. Экспериментальная установка. Датчик давления (PT):

все размеры указаны в миллиметрах

ло 7 ÷ 10 кПа. Регистрация эволюции пламени осуществлялась высокоскоростной видеокамерой с частотой 500 Гц через три окна длиной 700 мм и шириной 400 мм, расположенных в передней части емкости. По центральной линии задней стенки на высоте 100, 900 или 1 700 мм от основания находился электрод длиной 150 мм для поджигания метановоздушной смеси искрой с энергией около 500 мДж. На боковой стенке на высоте 100, 900 и 1700 мм от дна располагались три пьезорезистивных датчика (РТ1–РТ3). В экспериментах с препятствиями внутри емкости вертикально устанавливались четыре алюминиевых цилиндра объемом около 55 л каждый, высотой 1500 мм и диаметром 216 мм (см. рис. 1). Метановоздушную смесь, содержащую 9 % метана, готовили по парциальным давлениям. Начальные температура и давление составляли соответственно 101 кПа и 280 К.

Для численного моделирования взрыва метановоздушной смеси использовали программное обеспечение FLACS v10.5. В программе FLACS для решения уравнений сохранения для сжимаемой среды применяется метод конечных объемов в трехмерной декартовой сетке [33]. В нее включены также уравнения сохранения массы, момента, энтальпии и массового соотношения компонентов на основе законов идеального газа. Решение ищется для компонентов скорости в расчетной сетке с чередующимися узлами, а также для скалярных переменных, таких как давление и температура, в ячейкоцентрированной сетке. Точность расчета в программе FLACS составляет второй порядок по пространственным переменным, а схема временного разрешения представляет собой обратную схему Эйлера первого порядка [33].

В данной работе в программе FLACS применялась встроенная трехмерная прямоугольная емкость в масштабе 1 : 1. Сброс давления устанавливался на уровне 8 кПа. Запись давления и распространения пламени осуществлялась в точках М1–М3 на расстоянии 100, 900 и 1 700 мм от дна емкости. Размер ячейки сетки 4 мм, при этом проверялась сходимость сетки. В направлении вентилирования применялось граничное условие плоскость — волна, а в других направлениях — условие Эйлера. Начальные условия выбирались на основе экспериментальных условий. В соответствии с рекомендациями пользователям программы FLACS [33] числовой параметр CFLC на основе скорости звука был равен 5, а параметр CFLV на основе скорости потока — 0.5.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В этом параграфе приведены данные по зависимости давления от времени P(t) и по распространению пламени при переднем, центральном и заднем зажигании 9%-й (по объему) метановоздушной смеси в присутствии препятствий и в их отсутствие. Рассмотрены различные механизмы, приводящие к возникновению избыточного давления и обусловливающие поведение пламени. Выявлено влияние препятствий на процесс вентилирования.

#### 2.1. Переднее зажигание

При переднем зажигании 9%-й метановоздушной смеси в прямоугольной емкости без препятствий (цилиндров) зарегистрированы два пика давления  $(P_1 \text{ и } P_2)$  (рис. 2, *a*). После зажигания пламя распространялось в форме сферы, и первый пик давления P<sub>1</sub> возникал вследствие воздействия на вентиляционную крышку [4, 8], как показано на рис. 3, a. Инерция вентилируемых газов приводила к отрицательному избыточному давлению внутри емкости, что вызывало осцилляции Гельмгольца [3, 34, 35] с частотой около 60 Гц. Синхронные изображения пламени на рис. 3, б, в показывают, что сохраняется объемное движение пламени вверх и вниз. При ускоренном движении пламени в направлении от вентиляционного выхода поверхность пламени становилась сморщенной, на ней появлялись небольшие выступы. Причина этого заключается в неустойчивости Рэлея — Тейлора [8, 36], что означает возникновение неустойчивости границы плотности при ее ускорении в сторону среды с большей плотностью. После этого внутреннее пламя распространялось вниз в виде осцилляций с ячеистой структурой, то появляющейся, то исчезающей на поверхности пламени, как показано на рис. 3,г,д. На заключительной стадии внутреннее пламя достигало дна емкости и зажигало несгоревший газ в угловом пространстве. Свечение пламени у дна емкости существенно увеличивалось, как видно на рис. 3, е. Соответственно пламя выделяло химическую энергию и усиливало осцилляции давления, что приводило к возникновению доминирующего пика давления  $P_2$  при



Рис. 2. Зависимость давления от времени при горении 9%-й метановоздушной смеси в объеме без препятствий (*a*) и в их присутствии (*б*)



Рис. 3. Изображения пламени в случае переднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без цилиндров

резонансном взаимодействии, как показано на рис. 2, *a*. Такое явление, наблюдавшееся в работе [3], было отнесено к пламеакустическому взаимодействию и физическому отклику емкости [2, 8, 37].

При установке цилиндров возникал только пик  $P_1$ , причем он стал выше (см. рис. 2,  $\delta$ ). После зажигания пламя по-прежнему оставалось сферическим, а пик P<sub>1</sub> был вызван открыванием вентиляционной крышки, как показано на рис. 4, a. Бо́льшая высота пика P<sub>1</sub> в этом случае могла быть обусловлена большей площадью пламени из-за присутствия цилиндров, что приводило к увеличению скорости нарастания давления [38]. После запирания вентиляции также возникали осцилляции Гельмгольца, но препятствия разрушающе действовали на объемное движение пламени [38]. Следовательно, неустойчивость Тейлора, запускаемая осцилляцией, была менее интенсивной, чем в случае без препятствий, как видно на рис. 4, 6, 6.

Более того, распространение пламени вниз на рис. 4, г происходит не так, как в случае без препятствий, показанном на рис. 3, г. Сразу за цилиндрами площадь горения и его скорость больше, чем в пламени в середине емкости. Поэтому при ускоренном движении пламени вниз оно разделялось на две части (см. рис.  $4, \epsilon$ ). Когда пламя достигало дна емкости, его свечение не увеличивалось (рис.  $4, \partial$ ), соответственно на временной зависимости давления не наблюдался пик P<sub>2</sub>. Авторы [2] также обнаружили значительное уменьшение этого пика в присутствии препятствий из-за нарушения акустики в камере. В настоящей работе препятствия располагались параллельно направлению вентилирования, здесь причиной



Рис. 4. Изображения пламени в случае переднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в присутствии цилиндров в объеме

отсутствия пика  $P_2$  мог быть тот факт, что пламя, распространяясь вдоль цилиндров, более существенно теряло температуру и энергию. Кроме того, пламеакустические осцилляции сильно связаны с длительностью горения внутри сосуда [30]. Цилиндры занимают значительный объем, что снижает количество несгоревшего топлива в емкости (особенно в угловом пространстве). Следовательно, длительность дефлаграции уменьшается [3], при этом подавляется взаимодействие пламени с акустической волной [2].

#### 2.2. Центральное зажигание

Как показано на рис. 5, общее нарастание давления при центральном зажигании анало-



Рис. 5. Зависимость давления от времени в случае центрального зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без препятствий (a) и при их наличии (b)



Рис. 6. Изображения пламени в случае центрального зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без цилиндров



Рис. 7. Изображения пламени в случае центрального зажигания 9%-й метановоздушной смеси в присутствии цилиндров в объеме

гично случаю переднего зажигания. Например, в эксперименте с цилиндрами наблюдались пики давления  $P_1$  и  $P_2$ , тогда как в эксперименте без цилиндров присутствовал только пик Р1. Эти два пика также обусловлены соответственно открыванием вентиляционной крышки и пламеакустическим взаимодействием. Добавление препятствий приводит к увеличению пика  $P_1$  (рис. 5,  $\delta$ ). В экспериментах с центральным зажиганием также зарегистрированы осцилляции Гельмгольца. Как видно на рис.  $6, \partial$ , при появлении P<sub>2</sub> в экспериментах без препятствий поведение пламени на этой стадии было подобно случаю с передним зажиганием, показанному на рис. 3, е. В экспериментах с цилиндрами пик P<sub>2</sub> исчез и на изображениях пламени не наблюдалось увеличения свечения пламени (рис.  $7, \partial$ ).

Однако различия между случаями центрального и переднего зажигания существуют.



Рис. 8. Осцилляции Гельмгольца, наблюдаемые в случаях переднего (*a*) и центрального (*б*) зажигания 9%-й метановоздушной смеси: слева — без цилиндров, справа — в присутствии

цилиндров

При зажигании в передней точке газообразные продукты горения сразу покидали емкость через вентиляционное устройство и не участвовали в процессах расширения [39]. Следовательно, внешнее облако топлива поджигалось на ранней стадии, вытесненного несгоревшего газа было слишком мало для того, чтобы образовать сферический пузырь пламени. По этой причине внешнее пламя, показанное на рис. 3,*г* и 4,*г*, при переднем зажигании имело форму, менее приближенную к сферической по сравнению с формой пламен в случае центрального зажигания, показанных на рис. 6,*г* и 7,*г*.

На рис. 8 представлена поверхность пламени во время осцилляций Гельмгольца при переднем и центральном зажигании. В экспериментах с передним зажиганием пламя располагалось ближе к вентиляционному устройству и легче удалялось через газоотвод, поэтому наблюдалась гораздо более сильная неустойчивость Тейлора. Наличие препятствий ослабляло неустойчивость Тейлора в опытах с передним зажиганием, поскольку оказывало влияние на объемное движение пламени.

#### 2.3. Заднее зажигание

В случае заднего зажигания внутреннее избыточное давление и поведение пламени были отличны от ранее рассмотренных случаев. На рис. 9 отсутствует пик  $P_2$ , но появился новый пик давления  $P_{ext}$ . В процессе вентилиро-



Рис. 9. Зависимость давления от времени в случае заднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без цилиндров (a) и при их наличии  $(\delta)$ 

вания пик  $P_1$  формировался по такому же механизму, что и в случаях переднего и центрального зажигания. Несгоревшие газы приходили в движение, пока пламя все еще располагалось вдали от вентиляционного устройства, и инерция отводимого газа также приводила к отрицательному избыточному давлению внутри емкости. Однако осцилляции Гельмгольца не наблюдались, потому что область пламени находилась слишком близко ко дну емкости. Как показано на рис. 10, 6, пламя сначала достигало вентиляционного устройства и затем поджигало предварительно удаленный несгоревший газ [40]. На рис. 10, 6 виден яркий шар пламени, появился пик  $P_{ext}$  [41].



Рис. 10. Изображения пламени в случае заднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без цилиндров



Рис. 11. Изображения пламени в случае заднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в присутствии цилиндров в объеме

В опытах с препятствиями при заднем зажигании пики P<sub>1</sub> и P<sub>ext</sub> становятся выше (см. рис.  $9, \delta$ ). Вначале пламя плавно распространялось (рис. 11, *a*), затем достигало вентиляционного устройства (рис.  $11, \delta$ ), и далее происходил внешний взрыв. На стадии внешнего взрыва пламя попадало на верхние части цилиндров [38] с появлением светящихся участков (рис. 11, *в*). Препятствия приводили к сильному увеличению интенсивности внешнего взрыва, и его разрушительное действие [34] становилось более заметным. Вследствие этого пик Pext заметно увеличивался (см. рис.  $9, \delta$ ). Кроме того, после открывания вентиляционной крышки в случае с препятствиями пламя формировало внешний взрыв за 120 мс (время от P<sub>1</sub>

Номер опыта	Количество цилиндров	Положение зажигания	<i>Р</i> 1, кПа	<i>Р</i> 2, кПа	$P_{ext},$ кПа	Частота осцилляций, Гц		Длительность
						пламеакусти- ческие	Гельмгольца	осцилляций Гельмгольца, мс
1	0	Переднее	8.5	17.6		484	63	577
2		Центральное	8	21.6		350	46	194
3		Заднее	9.3		1.7		_	
4	4	Переднее	12.1				74	417
5		Центральное	13.2				133	166
6		Заднее	12.9		8.7			

Сводные данные о пиках давления и осцилляциях

до  $P_{ext}$ ), тогда как без препятствий для этого требовалось только 70 мс, и зажигание внешнего несгоревшего газа происходило раньше. При этом яркий шар пламени, вызванный внешним взрывом, находился также ближе к емкости по сравнению со случаями без препятствий (см. рис. 10,6 и 11,6).

## 2.4. Обобщение результатов: пики избыточного давления и осцилляции

Вышеприведенные зависимости давления от времени показывают, что избыточное давление, зарегистрированное датчиком РТ1, выше, чем зарегистрированное датчиком РТ3, особенно в случае переднего зажигания. Это показывает, что внутреннее избыточное давление снижается с уменьшением расстояния до вентиляционного устройства. Из таблицы видно, какое влияние оказывают положения точки зажигания и препятствия на пики давления и осцилляции по данным, зарегистрированным датчиком РТ1.

Время начала увеличения давления было примерно одинаковым во всех экспериментах. Пик давления P<sub>1</sub> регистрировался во всех опытах, и положение зажигания незначительно влияло на величину пика. Однако при добавлении цилиндров в емкость скорость возрастания давления в пике и его максимальная величина были больше. В опытах без цилиндров пик давления P<sub>2</sub> формировался вследствие пламеакустического взаимодействия при центральном и переднем зажигании, что приводило к сильному увеличению внутреннего избыточного давления, особенно в случае центрального зажигания, когда давление достигало максимума. В присутствии цилиндров величина максимального внутреннего избыточного давления уменьшалась в случае переднего и центрального зажигания, потому что исчезал пик  $P_2$ . Пик давления  $P_1$  становился доминирующим в экспериментах с препятствиями. Вызванный внешним взрывом пик  $P_{ext}$  наблюдался при заднем зажигании и увеличивался в присутствии цилиндров.

Результаты, приведенные в таблице, также показывают, что положение точки зажигания не оказывало существенного влияния на частоту акустических колебаний в пламени. Акустические колебания в основном связаны с характерным размером емкости и скоростью звуковой волны [37, 42]. В данном исследовании положение зажигания слабо влияло на скорость звуковой волны и не оказывало влияния на частоту акустических колебаний. Однако добавление цилиндров в емкость существенно изменяло характерные размеры емкости, что, возможно, стало причиной отсутствия пламеакустических осцилляций. Наконец, частота осцилляций Гельмгольца была нечувствительна к наличию или отсутствию цилиндров, но их длительность была больше в случае переднего зажигания.

## 3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ FLACS И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты моделирования визуализировали при помощи средств дополнительной обработки Flowvis программы FLACS. Избыточное давление при внутреннем взрыве, предсказанное в точке M1, было больше предсказанного в точке M2, которое, в свою очередь, превышало предсказания в точке M3 (рис. 12). Внутреннее избыточное давление возрастало при увеличении расстояния до вентиляционного устройства, что соответствует эксперимен-



Рис. 12. Результаты моделирования зависимости давления в разных точках наблюдения от времени в случае переднего зажигания 9%-й метановоздушной смеси в объеме без препятствий

тальным результатам. Различие значений давления в разных точках емкости хорошо предсказывается. Ниже рассмотрены результаты моделирования величин избыточного давления взрыва в точке M1.

Экспериментальные и расчетные зависимости давления от времени приведены на рис. 13. Начальное увеличение давления, рассчитанное в программе FLACS, происходит быстрее, чем в эксперименте, из-за того, что память зажигания (опережение пламени) при моделировании отключается на расстоянии нескольких сантиметров от точки зажигания [43]. В случае без препятствий пик  $P_2$ , вызванный пламеакустическим взаимодействием, не предсказывается моделированием, потому что в программу FLACS не включена подпрограмма, вычисляющая взаимодействие между волнами пламени и акустическими модами емкости [33]. Следовательно, максимальное избыточное давление занижается в два раза при моделировании в условиях переднего и центрального зажигания без препятствий. За исключением пика  $P_2$ , формы расчетных зависимостей давления от времени близки к экспериментальным, особенно для случая заднего зажигания, когда пики P<sub>1</sub> и P<sub>ext</sub> моделируются с хорошей точностью. Более того, с хорошей точностью рассчитываются осцилляции Гельмгольца, хотя их длительность занижена в расчетах с передним зажиганием.



Рис. 13. Зависимости давления от времени, полученные моделированием и экспериментально: *a* — переднее, центральное и заднее зажигание (слева направо) в объеме без препятствий, *б* — переднее, центральное и заднее зажигание (слева направо) в присутствии препятствий



а. Переднее зажигание (без препятствий)

Рис. 14. Поведение пламени 9%-й метановоздушной смеси по результатам моделирования (нечетные кадры) и экспериментов (четные кадры)

После добавления цилиндров пик  $P_1$  в экспериментах увеличился, но расчет этого не показал. Таким образом, пик  $P_1$  в расчетах соответствует экспериментальному с коэффициентом 0.8. Однако форма расчетных кривых избыточного давления лучше соответствовала экспериментальным данным из-за исчезновения пика  $P_2$  в экспериментах. Кроме того, расчет в программе FLACS точно предсказал влияние препятствий на пик  $P_{ext}$ : этот пик также увеличился, но все же был несколько ниже, чем в экспериментах.

Как показано на рис. 14, поведение пламени, смоделированное с помощью FLACS, аналогично экспериментальному. Смоделированное пламя двигалось быстрее, чем зарегистрированное в эксперименте, что согласуется с обсуждавшимися выше результатами по давлению, как показано на рис. 13 и 14. Хотя форма внешнего пламени различна, ламинарное пламя на ранней стадии дефлаграции и характер его распространения вниз до окончания горения соответствовали экспериментальным данным, как показано на рис. 14. При моделировании случаев с препятствиями нижняя часть пламени также разделена на две части, когда оно ускорялось вниз, как показано на рис. 14,г. Однако моделирование не обнаружило неустойчивость Тейлора, хорошо видимую в начале вентилирования, именно потому, что складки не были видны на поверхности пламени, что усилило бы осцилляции Гельмгольца. Это привело к занижению длительности осцилляций по сравнению с экспериментом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы вентилируемые взрывы 9%-й метановоздушной смеси при различном положении точки зажигания в прямоугольной емкости объемом 1 м<sup>3</sup> с препятствиями и в их отсутствие. Препятствия имели форму цилиндров и располагались параллельно направлению вентилирования. Проведено сравнение экспериментальных зависимостей давления от времени с результатами моделирования в программе FLACS для подтверждения возможности ее применения для моделирования вентилируемого взрыва метановоздушных смесей. Сделаны следующие основные выводы.

1. Пик давления  $P_1$ , соответствующий моменту открывания вентиляционной крышки, оказался нечувствительным к положению точки зажигания, но введение в систему препятствий приводит к увеличению амплитуды этого пика. Пик давления  $P_2$ , связанный с пламеакустическим взаимодействием, появляется при взрывах с центральным и передним положением точки зажигания. При добавлении препятствий в виде цилиндров акустические колебания подавлялись и пик  $P_2$  исчезал. Пик давления Pert, связанный с внешним взрывом, наблюдался в опытах с задним зажиганием и увеличивался в присутствии цилиндров. Положение точки зажигания не оказывало заметного влияния на частоту пламеакустических осцилляций. Частота осцилляций Гельмгольца была нечувствительна и к наличию препятствий, но длительность этих осцилляций увеличивалась при переднем положении точки зажигания.

2. Моделирование при помощи программы FLACS не предсказывало пика давления  $P_2$  при центральном и переднем положении точки зажигания в отсутствие препятствий. Таким образом, в этих случаях максимальное избыточное давление в расчетах занижалось в два раза, что требует дальнейшего изучения. При добавлении препятствий результаты моделирования лучше согласовались с экспериментальными данными, поскольку пик  $P_2$  исчезал. Пик давления P<sub>1</sub> точно предсказывался в расчетах для взрывов в отсутствие препятствий, а при их наличии расчеты давали заниженное значение P<sub>1</sub>. Результаты моделирования в рамках программы FLACS удовлетворительно согласуются с экспериментами при заднем положении точки зажигания: расчеты точно предсказывали наличие пика Pext и влияние препятствий на него. Поведение пламени, предсказанное в FLACS, было подобно экспериментальному, но влияние неустойчивости Тейлора не рассматривалось в расчетах, и в результате длительность осцилляций Гельмгольца была занижена.

Исследование выполнено при поддержке National Social Science Foundation of China (grant N 17CGL049), National Natural Science Foundation of China (grant N 51874100, N 51704079).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wan S. J., Yu M. G., Zheng K., Xu Y. L., Yuan Z., Wang C. Y. Influence of obstacle blockage on methane/air explosion characteristics affected by side venting in a duct // J. Loss Prev. Process Ind. — 2018. — V. 54. — P. 281–288. — DOI: 10.1016/j.jlp.2018.05.003.

- Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures // Combust. Sci. Technol. 2010. V. 182, N 11-12. P. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415.
- Cooper M. G., Fairweather M., Tite J. P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions // Combust. Flame. — 1986. — V. 65, N 1. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/0010-2180(86)90067-2.
- Rocourt X., Awamat S., Sochet I., Jallais S. Vented hydrogen-air deflagration in a small enclosed volume // Int. J. Hydrogen Energy. — 2014. — V. 39, N 35. — P. 20462–20466. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.233.
- 5. Pang L., Hu Q.-R., Yang K. Влияние параметров вентиляции на внешний взрыв, вызванный взрывом смеси метан — воздух в помещении // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 12–27. — DOI: 10.15372/FGV20220202.
- Ponizy B., Leyer J. C. Flame dynamics in a vented vessel connected to a duct: 2. Influence of ignition site, membrane rupture, and turbulence // Combust. Flame. — 1999. — V. 116, N 1-2. — P. 272–281. — DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00039-X.
- Bradley D., Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I — Theory // Combust. Flame. — 1978. — V. 32. — P. 221–236. — DOI: 10.1016/0010-2180(78)90098-6.
- Solberg D., Pappas J., Skramstad E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // Symp. (Int.) Combust. 1981. V. 18, N 1. P. 1607–1614. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80164-6.
- 9. Kasmani R. M., Andrews G. E., Phylaktou H. N. Experimental study on vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct // Process Saf. Environ. Prot. — 2013. — V. 91, N 4. — P. 245–252. — DOI: 10.1016/j.psep.2012.05.006.
- Kasmani R. M., Andrews G. E., Phylaktou H. N., Willacy S. K. Influence of static burst pressure and ignition position on duct-vented gas explosions // 5th Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards. — 2007. — P. 254–264.
- Ferrara G., Di Benedetto A., Willacy S., Phylaktou H., Andrews G., Mkpadi M. Duct-vented propane-air explosions with central and rear ignition // Fire Saf. Sci. — 2005. — V. 8. — P. 1341–1352. — DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-1341.
- 12. Park D. J., Lee Y. S., Green A. R. Experiments on the effects of multiple obstacles in vented explosion chambers // J. Hazard. Mater. —

2008. — V. 153, N 1-2. — P. 340–350. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.08.055.

- 13. Oh K.-H., Kim H., Kim J.-B., Lee S.-E. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics // J. Loss Prev. Process Ind. — 2001. — V. 14, N 6. — P. 597–602. — DOI: 10.1016/S0950-4230(01)00054-7.
- Chao J., Lee J. H. S. The propagation mechanism of high speed turbulent deflagrations // Shock Waves. — 2003. — V. 12, N 4. — P. 277–289. — DOI: 10.1007/s00193-002-0161-2.
- Tomlin G., Johnson D. M., Cronin P., Phylaktou H. N., Andrews G. E. The effect of vent size and congestion in large-scale vented natural gas/air explosions // J. Loss Prev. Process Ind. — 2015. — V. 35. — P. 169–181. — DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.014.
- Moen I. O., Lee J. H. S., Hjertager B. H., Fuhre K., Eckhoff R. K. Pressure development due to turbulent flame propagation in large-scale methane-air explosions // Combust. Flame. — 1982. — V. 47. — P. 31–52. — DOI: 10.1016/0010-2180(82)90087-6.
- Park D., Green A., Lee Y., Chen Y. Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement // Combust. Flame. — 2007. — V. 150, N 1-2. — P. 27–39. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.005.
- Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. Using large eddy simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles // J. Hazard. Mater. 2009. V. 169, N 1-3. P. 435–442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115.
- Bauwens C. R., Chao J., Dorofeev S. B. Effect of hydrogen concentration on vented explosion overpressures from lean hydrogen-air deflagrations // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37, N 22. P. 17599–17605. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.053.
- Schiavetti M., Pini T., Carcassi M. Homogeneous hydrogen deflagrations in small scale enclosure // VII Int. Conf. on Hydrogen Safety. — 2017. — P. 533–544.
- Holborn P. G., Battersby P., Ingram J. M., Averill A. F., Nolan P. F. Modelling the mitigation of lean hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog // Int. J. Hydrogen Energy. — 2012. — V. 37, N 20. — P. 15406– 15422. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.131.
- 22. Holborn P. G., Battersby P., Ingram J. M., Averill A. F., Nolan P. F. Modelling the mitigation of hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog and nitrogen dilution // Int. J. Hydrogen Energy. — 2013. — V. 38, N 8. — P. 3471–3487. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.134.
- 23. Marangon A., Schiavetti M., Carcassi M., Pittiglio P., Bragatto P., Castellano A. Turbulent hydrogen deflagration induced by ostacles

in real confined environment // Int. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34, N 10. — P. 4669– 4674. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.053.

- 24. Tolias I. C., Stewart J. R., Newton A., Keenan J., Makarov D., Hoyes J. R., Molkov V., Venetsanos A. G. Numerical simulations of vented hydrogen deflagration in a medium-scale enclosure // J. Loss Prev. Process Ind. — 2018. — V. 52. — P. 125–139. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.10.014.
- Lakshmipathy S., Skjold T., Hisken H., Atanga G. Consequence models for vented hydrogen deflagrations: CFD vs. engineering models // Int. J. Hydrogen Energy. — 2019. — V. 44, N 17. — P. 8699–8710. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.079.
- Vyazmina E., Jallais S. Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: Effects of concentration, obstruction vent area and ignition position // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41, N 33. P. 15101–15109. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.189.
- Li J., Hao H. Far-field pressure prediction of a vented gas explosion from storage tanks by using new CFD simulation guidance // Process Saf. Environ. Prot. — 2018. — V. 119. — P. 360–378. — DOI: 10.1016/j.psep.2018.08.004.
- Li J., Hernandez F., Hao H., Fang Q., Xiang H. Vented methane-air explosion overpressure calculation — a simplified approach based on CFD // Process Saf. Environ. Prot. — 2017. — V. 109. — P. 489–508. — DOI: 10.1016/j.psep.2017.04.025.
- Zhang S., Tang Z. S., Li J. L., Wang J. G., Zhang J. Q., Guo J., Li Q. Effects of equivalence ratio, thickness of rupture membrane and vent area on vented hydrogen-air deflagrations in an end-vented duct with an obstacle // Int. J. Hydrogen Energy. — 2019. — V. 44, N 47. — P. 26100–26108. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.057.
- 30. Li H., Rui S., Guo J., Sun X., Li G., Zhang J. Effect of ignition position on vented hydrogen-air deflagration in a 1 m<sup>3</sup> vessel // J. Loss Prev. Process Ind. — 2019. — V. 62. — 103944. — DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103944.
- Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of instabilities and acoustics on pressure generated in vented propane-air explosions // 22nd Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Minsk, Belarus, 2009.
- 32. Bao Q., Fang Q., Zhang Y. D., Chen L., Yang S. G., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures // Fuel. — 2016. — V. 175. — P. 40–48. — DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084.

- 33. FLACS: v10.5. User's Manual, 2016.
- 34. Li H. W., Tang Z. S., Li J. L., Guo J., Zhang J. Q., Li Q. Investigation of vented hydrogen-air deflagrations in a congested vessel // Process Saf. Environ. Prot. — 2019. — V. 129. — P. 196–201. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.009.
- 35. Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. Experimental and numerical study of methane-air deflagrations in a vented enclosure // Fire Saf. Sci. 2008. V. 9. P. 1043–1054. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1043.
- 36. Rui S., Guo J., Li G., Wang C. The effect of vent burst pressure on a vented hydrogen-air deflagration in a 1 m<sup>3</sup> vessel // Int. J. Hydrogen Energy. — 2018. — V. 43, N 45. — P. 21169– 21176. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.124.
- 37. McCann D., Thomas G., Edwards D. Gasdynamics of vented explosions Part I: Experimental studies // Combust. Flame. — 1985. — V. 59, N 3. — P. 233–250. — DOI: 10.1016/0010-2180(85)90128-2.
- 38. Masri A., Ibrahim S., Nehzat N., Green A. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // Exp. Therm. Fluid Sci. — 2000. — V. 21, N 1-3. — P. 109–116. — DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6.
- 39. Daubech J., Proust C., Gentilhomme O., Jamois D., Mathieu L. Hydrogen-air vented explosions: new experimental data // Proc. of 5th ICHS. — 2013. — P. 37–49. — DOI: 10.1007/s11932-006-0048-6.
- 40. Kuhl A. L., Reichenbach H., Bell J. B., Beckner V. E. Explosion-induced ignition and combustion of acetylene clouds // Shock Waves. — 2018. — V. 28, N 5. — P. 1031–1037. — DOI: 10.1007/s00193-018-0843-z.
- Wang J., Guo J., Yang F., Zhang J., Lu S. Effects of hydrogen concentration on the vented deflagration of hydrogen-air mixtures in a 1-m<sup>3</sup> vessel // Int. J. Hydrogen Energy. — 2018. — V. 43, N 45. — P. 21161–21168. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.108.
- Blevins R. D. Formulas for natural frequency and mode shape. — London: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- 43. Rui S., Li Q., Guo J., Sun X. Experimental and numerical study on the effect of low vent burst pressure on vented methane-air deflagrations // Process Saf. Environ. Prot. 2021. V. 146. P. 35–42. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.028.

Поступила в редакцию 08.07.2022. После доработки 30.09.2022. Принята к публикации 01.02.2023.