

УДК 536.46

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗА, ИНИЦИИРУЕМОГО РАЗНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПОДЖИГА

Н. Чжоу<sup>1</sup>, Ц.-Я. Юй<sup>1</sup>, Г.-В. Чжан<sup>1</sup>, С.-Я Лю<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Чанчжоуский государственный университет, 213164 Чанчжоу, Китай, zhouning@cczu.edu.cn

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт пожаров, 300481 Тяньцзинь, Китай

Экспериментально исследовано распространение пламени при взрыве горючего газа в закрытой трубе длиной 12 м и внутреннего диаметра 0.125 м при разной энергии зажигания. Показано, что увеличение энергии зажигания приводит к большей интенсивности взрыва, более высоким значениям максимального пика давления и динамической деформации тонкой стенки в целом. Динамическая деформация тонкостенной трубы начинается вследствие прихода ударной волны-предвестника и затем колеблется в течение долгого времени, что связано с приходом отраженных прямых и обратных волн. Имеет место хорошее соответствие между сигналами динамической деформации и волны давления. Результаты исследований могут послужить теоретическим базисом при экспертизе аварий с промышленными взрывчатыми веществами, а также при проектировании конструкций, устойчивых к взрыву и ударным волнам, и могут стать основой методических рекомендаций по промышленной безопасности, а также по предотвращению или смягчению последствий аварий, связанных с взрывами.

Ключевые слова: детонационная труба, взрыв облака газа, энергия зажигания, пик давления, динамическая деформация.

DOI 10.15372/FGV20180612

## ВВЕДЕНИЕ

Промышленное производство развивается стремительно благодаря быстрому развитию науки и технологий. Вместе с тем растут потенциальные угрозы технологических аварий и количество жертв этих аварий. Большое число аварий связано с взрывами [1]. Из последних назовем следующие: разрыв трубы диаметром 0.76 м для природного газа в Нью-Мехико (2000), взрыв вследствие утечки газа в нефтехимической компании Ланжоу (2010), взрыв трубы для природного газа в результате утечки аммиака в штате Оахака на юге Мексики (2013), взрыв вследствие утечки газа в Тайваньском Каошинге (2014), мощный взрыв опасных химических веществ в Тяньцзине (2015) и т. д. Упомянутые взрывы не только нанесли серьезный урон жизням людей, но и привели к большим экономическим потерям.

Первое исследование влияния препятствий в трубопроводе на распространение взрывного

горения было проведено в 1926 г. [2]. Обнаружено, что препятствия вызывают ускорение и стимулирование процесса. С тех пор процесс ускорения пламени находится в фокусе исследований. В [3, 4] установлено, что конструкция как трубы, так и препятствия оказывает существенное влияние на турбулентное распространение пламени и процесс перехода горения в детонацию. В [5–8] исследовалось влияние размера препятствия, степени запираания и сечения трубопровода на распространение пламени и волны давления при горении горючего газа. В экспериментах [9, 10] установлено, что турбулентность существенно увеличивает давление. В экспериментах [11, 12] изучались характеристики распространения пламени, отмечалось, что при относительно высоком содержании азота в смеси с пропаном и кислородом явного ускорения не происходит. В экспериментах [13] исследовалось влияние препятствия на распространение пламени, детальный анализ касался перехода пламени в детонацию, влияния диаметра трубы, энергии зажигания при высоком давлении, размера, конструкции препятствия и зазора. В [14] выполнены эксперименты по исследованию характеристик взрывного горе-

© Zhou Ning<sup>1</sup>, Yu Qiaoyan<sup>1</sup>, Zhang Guowen<sup>1</sup>, Liu Xuanya<sup>2</sup>, 2018.

<sup>1</sup>School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China. <sup>2</sup>Tianjin Fire Research Institute, Tianjin, 300381, China.

ния в закрытой с обоих концов трубе с препятствием. В [15, 16] показано, что детонационное горение ускорялось вследствие положительной обратной связи, которая обусловлена влиянием волны сжатия на зону непрореагировавшего газа, нагретого за счет теплопроводности и турбулентности.

Несмотря на многочисленные исследования законов горения заранее смешанных газовых смесей, вопросы возникновения напряжений и деформаций в области динамического отклика трубопровода на ударную волну в основном касались взрыва твердых взрывчатых веществ [17, 18]. Механизму разрушения длинного трубопровода при взрыве посвящено мало работ. Цель данной работы — исследовать экспериментально влияние энергии зажигания на распространение пламени при взрыве в промышленной цистерне под давлением, а также динамические деформации в тонкостенной трубе. Эти результаты могут послужить теоретическим базисом для оценки последствий аварий, вызванных взрывом, и для создания конструкций, устойчивых к взрыву и ударным воздействиям, а также для выработки методических рекомендаций по промышленной безопасности, в том числе предсказание и уменьшение последствий таких аварий со взрывами.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из трубопровода, системы распределения газа, тестовой системы, вспомогательной аппаратуры и т. д. Тестовый бесшовный трубопровод выполнен из нержавеющей стали, его внутренний диаметр 0.125 м, внешний — 0.135 м, длина 12 м, толщина стенки 0.005 м, максимально допустимое давление 5 МПа. Система распределения газа включает в себя компрессоры воздуха, баллоны с пропаном и хранилище газа с предварительным смешением газов в соответствии с соотношением объем — давление. В тестовую систему входят система сбора данных, датчики, устройство инициирования, высокочастотный датчик деформации типа SDY2107A. Иницирующее устройство представляет собой емкостный накопитель. Электрическая энергия, запасенная в накопителе, подается на электроды, создавая электрическую искру, которая поджигает газовую смесь. Энергия поджига изменяется в диапазоне 0.1 ÷ 19 Дж. Дополнительное оборудование включает в себя воздушный компрес-

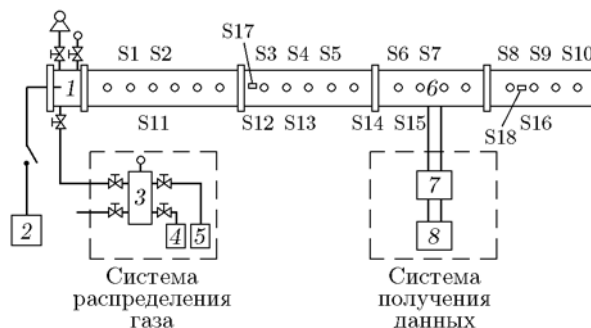


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — иницирующий электрод, 2 — воспламенитель, 3 — сосуд для предварительного смешения газов, 4 — компрессор, 5 — баллон с пропаном, 6 — окно для наблюдения, 7 — регистратор данных, 8 — монитор; S1–S10 — местоположение фотоэлектрических датчиков для измерения скорости распространения пламени; S11–S16 — датчики давления; S17, S18 — датчики деформации для измерения динамического отклика тонкостенного трубопровода на взрывное нагружение внутри него

сор, вакуумные насосы, клапаны и др. Соответствующее оборудование показано на рис. 1.

По всей длине трубы размещались десять фотоэлектрических датчиков S1–S10, шесть датчиков давления S11–S16 и две группы датчиков деформации S17, S18. Для исследования связи между давлением взрыва и фронтом распространения пламени фотоэлектрический датчик S4 и датчик давления S13 устанавливались в одном и том же месте. Таким же образом были смонтированы группы датчиков S6 и S14, S7 и S15, S8 и S16. Для установления взаимосвязи между давлением взрыва и динамической деформацией тонкостенной трубы датчики S12 и S17, S16 и S18 также размещались в одних и тех же местах, отдельно от указанных выше групп датчиков. Учитывая, что деформации, возникающие в экспериментальной установке, достаточно малы, для контроля за деформацией стенки трубопровода мы выбрали полупроводниковые тензодатчики, чувствительность которых примерно в 55 раз выше, чем у обычных тензодатчиков сопротивления. Расстояния от места инициирования до каждого датчика показаны в таблице.

Эксперименты выполняли при нормальных значениях температуры и давления в закрытой трубе (на торце — пластина из нержавеющей стали). Газовая смесь 4 % пропана с воздухом готовилась за 3 ч до проведения эксперимента. Для каждого набора экс-

Расположение датчиков на трубе	
Номер датчика	Расстояние, м
S1	1.5
S2	2.0
S3	4.5
S4	5.0
S5	5.5
S6	7.5
S7	8.0
S8	10.5
S9	11.0
S10	11.5
S11	2.0
S12	4.5
S13	5.0
S14	7.5
S15	8.0
S16	10.5
S17	4.5
S18	10.5

периментальных условий было выполнено по пять экспериментов. В дальнейшем для анализа использовались средние значения экспериментальных данных.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Фотоэлектрический сигнал и сигнал давления в конкретном сечении

Фотоэлектрические сигналы и сигналы давления от групп датчиков S4 и S13, S6 и S14, S7 и S15, S8 и S16 показаны на рис. 2 в одном и том же сечении. Сигнал давления всегда появляется раньше, чем сигнал пламени, поскольку при взрыве волна давления распространяется быстрее, чем фронт пламени. Расположение ударной волны перед фронтом пламени соответствует тому, что детонация в трубопроводе еще не достигла самоподдерживающегося режима. Детонация переходит в стационарный режим только тогда, когда фронт пламени догоняет волну давления и они перекрываются. Длина горизонтальных стрелок на рис. 2

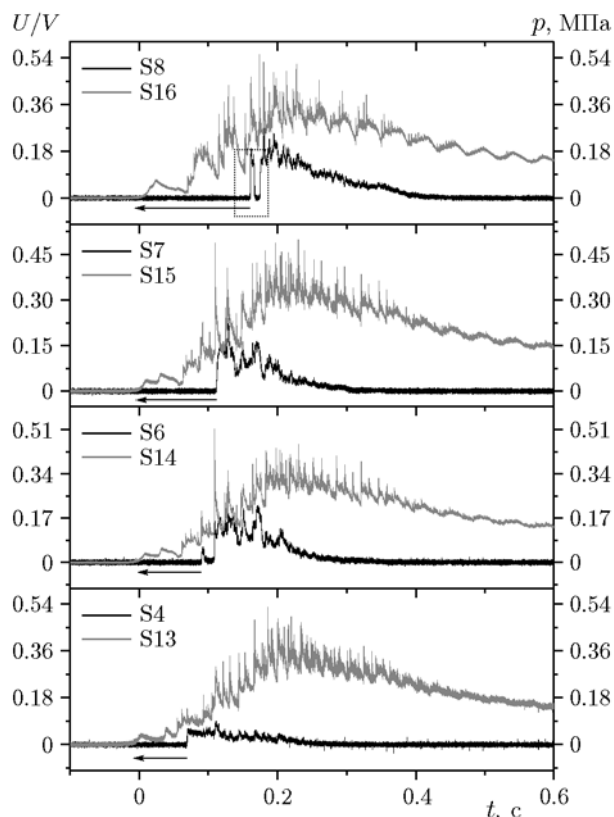


Рис. 2. Соотношение фотоэлектрического сигнала и сигнала давления, полученных от датчиков, расположенных на одном и том же расстоянии от места зажигания:

серая линия — скорость волны давления, черная линия — скорость пламени; стрелки показывают время, в течение которого волна находится впереди пламени; штриховым прямоугольником на верхнем рисунке выделен фотоэлектрический сигнал, резко падающий до нуля и быстро возвращающийся обратно, что является результатом воздействия отраженной волны, отражение может быть причиной затухания пламени и повторного воспламенения

показывает временную задержку между сигналом свечения и сигналом давления. Видно, что при распространении взрывной волны по трубопроводу задержка постепенно увеличивается и ударная волна постепенно удаляется от фронта пламени.

Из рис. 2 видно, что напряжение на фотоэлектрических датчиках подвержено регулярным всплескам. Пламя затухает и снова разгорается в процессе распространения (см. выделенный в верхней части рис. 2 прямоугольник). Это обусловлено отраженной ударной волной, которая представляет собой волну сжатия, распространяющуюся к торцу трубы, где про-

изошло инициирование. Отраженные ударные волны, встречаясь с зоной реакции, останавливают фронт пламени и увеличивают возмущение в зоне горения. Таким образом, происходит локальное стимулирование горения газа. Сжатие пламени в направлении распространения за счет отраженной ударной волны может увеличить яркость пламени.

## 2.2. Влияние энергии зажигания на максимальное давление взрыва

Интерполяция максимальных значений давления взрыва при энергии зажигания  $E_{ign} = 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 19$  Дж показана на рис. 3. Интерполяционная функция имеет вид  $Y = -8.5 \cdot 10^{-4} X^2 + 0.034X + 0.36858$ . Достоверность по критерию  $R^2$  равна 0.96953. По виду интерполяционной функции можно понять, что соотношение между максимальным давлением взрыва и энергией зажигания является простой нелинейной функцией. Энергия зажигания оказывает решающее влияние на максимальное давление взрыва. По мере того как энергия зажигания увеличивается, максимальное давление взрыва становится больше, что можно объяснить следующими причинами. Процесс инициирования является цепной реакцией, состоящей из множества простых реакций. Таким образом, чем больше энергия за-

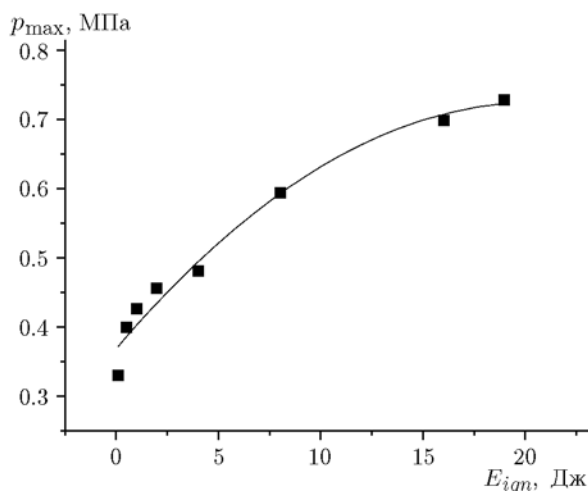


Рис. 3. Аппроксимация (линия) экспериментальных данных по максимальному пиковому давлению (значки) при разных условиях поджига

жигания, тем сильнее производство свободных радикалов в цепных реакциях, что влечет значительно больше химических реакций вследствие производства молекул через энергию активации и ускоряет скорость реакции. В то же время это увеличивает количество столкновений молекул. Как следствие, максимальное значение пика давления растет.

Максимальное значение пика давления зависит не только от энергии инициирования, но и от концентрации горючего газа, начальных давления и температуры. Поэтому соотношение между энергией зажигания и максимальным пиком давления является нелинейным.

## 2.3. Динамическая деформация трубопровода под действием ударной волны

Рис. 4 иллюстрирует соответствующие друг другу сигналы давления  $p$  и деформации  $\epsilon$  в одном и том же месте. Ударная волна-предвестник, генерированная взрывом, последовательно распространяется по трубопроводу и формирует отраженную ударную волну по достижении глухого торца. Отраженная волна, являющаяся волной сжатия, распространяется от глухого торца трубы к тому концу, в котором произошло инициирование. Поскольку скорость ударной волны выше скорости фронта пламени, ударная волна-предвестник, порожденная отраженной вперед и назад волной, будет при распространении регулярно встречаться с фронтом пламени. Сигналы давления, находящиеся в выделенных пунктирных прямоугольниках на рис. 4, генерируются ударными и отраженными волнами. Датчик S16 находится ближе к концу трубы, поэтому регистрируемые им сигналы отраженной волны появляются раньше.

Зарегистрированный датчиком S12 пик давления (см. прямоугольник на рис. 4,а) равен 0.159 МПа, а пик давления, обусловленный отраженной волной, равен 0.3292 МПа. Эти данные хорошо подтверждают эффект отражения от жесткой стенки (пиковое давление, вызванное отраженной волной, в два раза больше пикового значения, вызванного ударной волной-предвестником). Наблюдается хорошее соответствие между сигналом динамической деформации и сигналом волны давления. Действие волны давления в области взрыва вызывает упругую деформацию стенки тру-

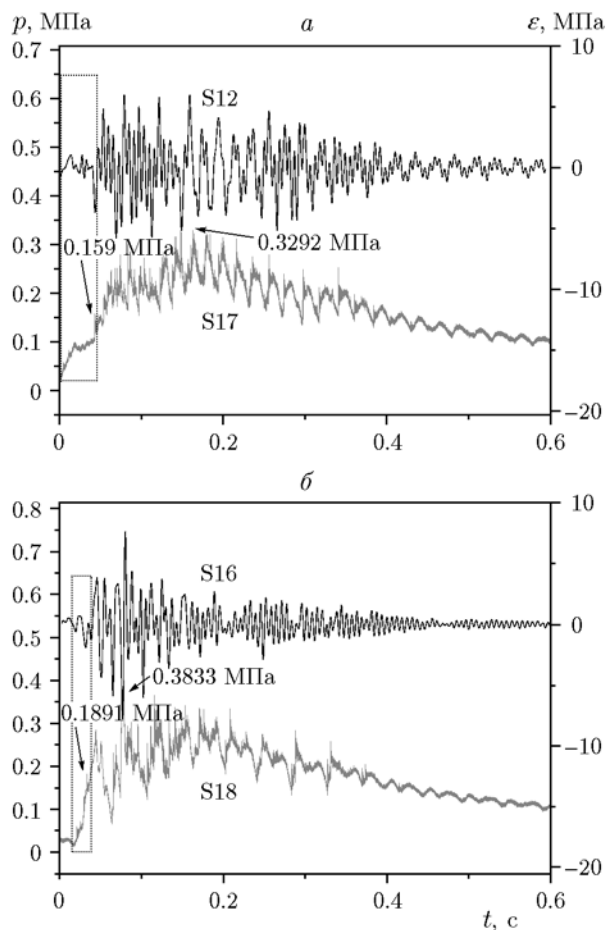


Рис. 4. Сравнение сигнала давления и деформации в одном и том же месте:

серая линия — давление в трубе, черная — скорость деформации тонкостенной трубы; волна давления усиливается примерно в два раза после отражения от концов трубы, так же увеличивается скорость деформации

бопровода, при смене давления динамическая деформация тонкостенной трубы также будет меняться. Динамические деформации осциллируют в течение долгого времени, становятся в конечном счете равными нулю, и трубопровод не деформируется. В целом, можно сказать, что динамическая деформация в процессе взрыва сначала резко возрастает под действием ударной волны-предвестника, а затем длительное время осциллирует.

Из рис. 4 видно, что максимальная динамическая деформация и максимальное давление возникают в одно и то же время. Другими словами, когда давление взрыва в трубопроводе достигает пика, стенка трубы деформируется максимально.

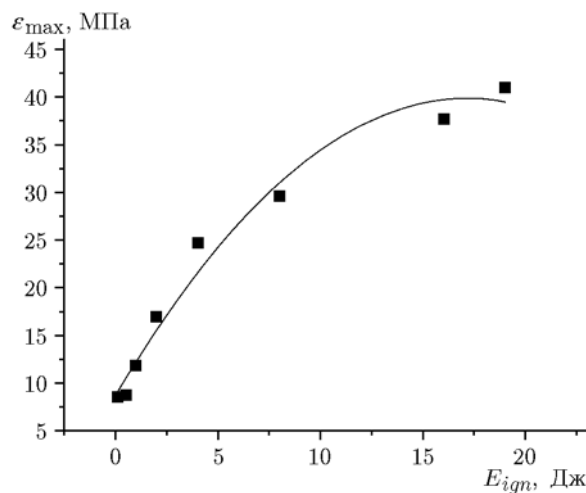


Рис. 5. Аппроксимация (линия) экспериментальных данных по максимальной микродеформации (значки) при разных энергиях зажигания

#### 2.4. Влияние энергии зажигания на динамическую деформацию тонкостенной трубы

Интерполяционная кривая максимальных микродеформаций при указанных ранее значениях энергии иницирования  $E_{ign} = 0.1 \div 19$  Дж показана на рис. 5. Интерполяционная функция имеет вид  $Y = -0.10586X^2 + 3.6281X + 8.72987$ , достоверность по критерию  $R^2$  равна 0.97116. Видно, что между максимальной микродеформацией и энергией зажигания существует нелинейная зависимость. Интерполяционные кривые на рис. 3 и 5 подобны друг другу, отсюда можно сделать вывод, что энергия иницирования играет ключевую роль для достижения максимума микродеформации: с ростом энергии иницирования увеличивается максимум микродеформации. Это хорошо согласуется с влиянием энергии иницирования на максимум пика давления взрыва.

#### 2.5. Скорость растяжения тонкостенной трубы под действием ударной волны от взрыва газа

Из-за турбулентного горения структура пламени искажается и скорость распространения пламени осциллирует. Тем не менее изменение структуры пламени и осцилляции скорости не приводят к осцилляциям трубопровода и к деформации стенки трубы, динамическая деформация тонкостенной трубы вызвана ударной волной от взрыва газа. При воздействии

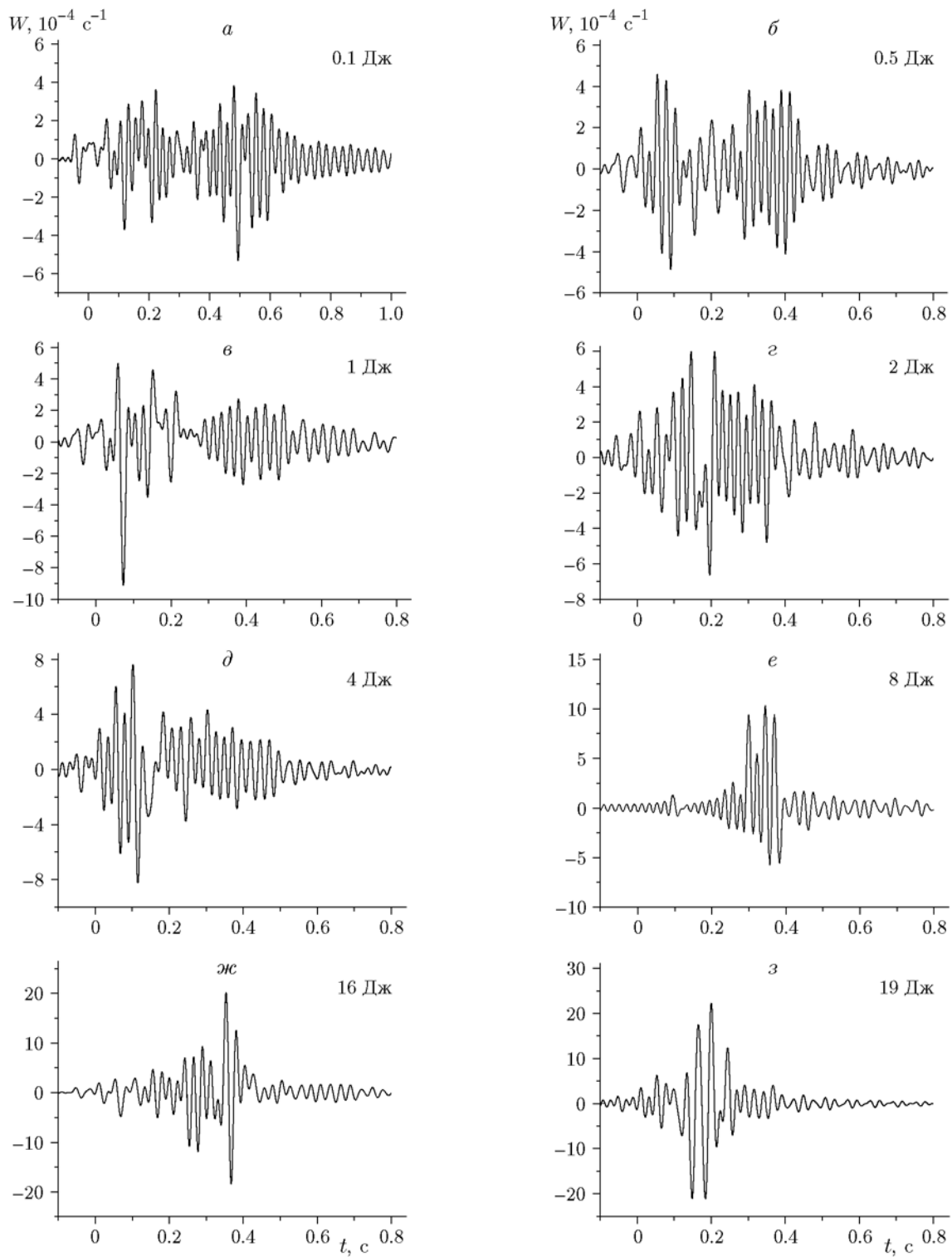


Рис. 6. Изменение во времени скорости деформации тонкостенной трубы при разной энергии зажигания

этой ударной волны внутри закрытой тонкостенной трубы главная часть сигнала деформации стенки лежит в диапазоне низких частот  $0 \div 48.83$  Гц, остальная часть сигнала — в полосе частот  $48.83 \div 781.25$  Гц. Данные о скорости деформации  $W$  тонкостенной трубы получены путем анализа сигналов деформации при разных энергиях инициирования в низкочастотном диапазоне  $0 \div 48.83$  Гц и показаны на рис. 6.

Скорость растяжения используется для измерения скорости деформации. Из приведенных на рис. 6 результатов экспериментов по взрыву горючего газа в закрытой и ненагруженной трубе видно, что энергия зажигания оказывает существенное влияние на скорость деформации тонкостенной трубы. При  $E_{ign} = 8, 16$  и  $19$  Дж максимальная скорость деформации тонкостенной трубы превышает  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , при  $E_{ign} < 8$  Дж лежит в диапазоне  $10^{-4} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Это квазистатическое нагружение. Главная часть скорости деформации для каждого из упомянутых выше условий попадает в низкочастотный диапазон  $0 \div 48.83$  Гц, хотя в диапазоне  $48.83 \div 781.25$  Гц все еще есть некоторые сигналы.

Скорость растяжения достигает пика в ходе быстрых колебаний вверх и вниз (см. рис. 5), за которыми следует стационарное состояние.

Влияние скорости растяжения заметно, когда ударное нагружение происходит динамически. Мгновенное напряжение возрастает с увеличением скорости деформации. Динамическое напряжение больше статического при той же самой деформации. Скорость деформации вносит большой вклад в предел текучести металлического материала, но мало влияет на окончательную прочность и модуль упругости. При разработке и проверке промышленных действующих систем трубопроводов и резервуаров высокого давления учитываются расчеты допустимых статических напряжений. Тем не менее материал и структура разрушаются сильнее при динамических нагрузках. Таким образом, при разработке взрывоопасного оборудования и структур трубопроводов и резервуаров высокого давления следует учитывать как эффекты статической нагрузки, так и повреждения при динамической нагрузке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты по распространению пламени в смеси воздух — пропан в

закрытом трубопроводе длиной 12 м позволили сделать следующие выводы.

1. Сравнительный анализ сигналов с фотоэлектрических датчиков и датчиков давления показал, что при используемых энергиях инициирования взрывной процесс в трубопроводе не выходит на режим стационарной детонации. Заметного влияния отраженной ударной волны на скорость распространения пламени не обнаружено.

2. Чем больше энергия зажигания, тем выше максимальное давление взрыва. Их соотношение имеет нелинейный характер.

3. Существует хорошее соответствие между динамической деформацией и давлением. Деформация тонкостенной трубы сначала увеличивается вследствие ударной волны-предвестника, а затем достигает максимума, что вызвано отраженными волнами, распространяющимися вперед и назад, с последующими их осцилляциями в течение длительного времени.

4. Чем больше энергия зажигания, тем больше микродеформации. Они связаны простым нелинейным соотношением, подобным соотношению между максимальным пиком давления и энергией зажигания.

5. Энергия зажигания влияет на скорость деформации тонкостенной трубы. Максимальная скорость деформации имеет амплитуду  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Влияние скорости деформации очевидно, если ударная нагрузка на металлический материал всё время динамическая. Напряжение возрастает вместе с ростом скорости деформации. Динамическое напряжение превышает статическое при той же самой деформации. Существует очевидное влияние скорости деформации на предел текучести металлического материала. Этот фактор, наряду с эффектами статической нагрузки и повреждений при динамической нагрузке, следует принимать во внимание при разработке взрывоопасного оборудования и структуры трубопроводов, а также хранилищ газа высокого давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (N 51204026), Департамента пожаров Министерства общественной безопасности, научно-исследовательского проекта «Анализ рисков пожаров нефтехимических предприятий» (N 2015XFR22), Министерства общественной безопасности по программе «Исследование технологии подавления взрыва при утеч-

ке жидких углеводородов» (N 2014GABJC047), главного проекта Национальных исследований в области естественных наук школы высшего образования Янгсу (N 16KJA170004).

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Bernard L., Elbe G. V.** Combustion, Flame, and Explosions of Gases. — N. Y.: Academic Press, 1961.
2. **Chapman W. R., Wheeler R. V.** The propagation of flame in mixtures of methane and air. part iv: the effect of restrictions in the path of the flame travels // J. Chem. Soc. — 1927. — V. 12, N 4. — P. 309–312.
3. **Lee J. H., Knystautas R., Chan C. K.** Turbulent Flame Propagation in obstacle-filled tubes // Symp. Combust. — 1985. — V. 20, N 1. — P. 1663–1672.
4. **Kumar R. K.** Flammability limits of hydrogen-oxygen diluent mixtures // J. Fire Sci. — 1985. — V. 3, N 4. — P. 245–262.
5. **Ibrahim S. S., Masri A. R.** The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration // J. Loss. Prevent. Proc. — 2001. — V. 14, N 3. — P. 213–221.
6. **Masri A. R., Ibrahim S.S., Nehzat N.** Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // Exp. Therm. Fluid. Sci. — 2000. — V. 21, N 1-3. — P. 109–116.
7. **Oh K. H., Kim H., Kim J. B.** A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics // J. Loss. Prevent. Proc. — 2001. — V. 14, N 6. — P. 597–602.
8. **Васильев А. А., Васильев В. А.** Иницирование многотопливных смесей с бифуркационными структурами // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 3–12.
9. **Sun J. H., Dobashi R., Hirano T.** Temperature profile across the combustion zone propagating through all iron particle cloud // J. Loss. Prevent. Proc. — 2001. — V. 14, N 6. — P. 463–467.
10. **Ju W. J., Dobashi R., Hirano T.** Reaction zone structure and propagation mechanisms of flames in stearic acid particle clouds // J. Loss. Prevent. Proc. — 1998. — V. 11, N 6. — P. 423–430.
11. **Thomas G., Bambrey R., Brown C.** Experimental observations of flame acceleration and transition to detonation following shock-flame interaction // Combust. Theor. Model. — 2001. — V. 6, N 4. — P. 573–594.
12. **Korobeinikov V. P., Levin V. A.** Strong explosion in a combustible gas mixture // Fluid. Dyn. — 1969. — V. 4, N 6. — P. 30–32.
13. **Zhou K. Y., Li Z. F.** Flame front acceleration of propane-air deflagration in straight tubes // Expl. Shock Wave. — 2000. — V. 2. — P. 137–142.
14. **Lu J., Ning J. G., Wang C., Lin B. Q.** Study on flame propagation and acceleration mechanism of city coal gas // Expl. Shock Wave. — 2004. — V. 24, N 4. — P. 305–311. [in Chinese].
15. **Hilbert R., Tap F., El-Rabii H., Thévenin D.** Impact of detailed chemistry and transport models on turbulent combustion simulations // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 61–117.
16. **Архипов В. А., Зарко В. Е., Жарова И. К., Жуков А. С., Козлов Е. А., Аксёненко Д. Д., Курбатов А. В.** Горение твердых топлив при обдуве высокоскоростным газовым потоком (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 3–22.
17. **DeLuca L. T., Galfetti L., Maggi F., Colombo G., Merotto L.** Characterization of HTPB-based solid fuel formulations: performance, mechanical properties, and pollution // Acta Astronaut. — 2013. — V. 92, N 2. — P. 150–162.
18. **Крайнов А. Ю., Моисеева К. М.** Режимы горения бедной метановоздушной смеси в U-образной горелке // Вестн. Том. ун-та. Математика и механика. — 2014. — Т. 2, № 28. — С. 69–76.

*Поступила в редакцию 2/VI 2017 г.*