

УДК 534.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ И СТРУКТУРЫ ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В ВОЗДУШНОЙ ВЗВЕСИ ХЛОПЬЕВИДНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Q. Jing¹, D. Wang², C.-L. Shi², Q.-M. Liu³, Y. Shen³, Z.-S. Wang³, C.-Q. Liu³, Z. Yang³, Z.-L. He³, X. Chen³, S.-Z. Li³, J.-X. Huang³

¹ College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

² Beijing Key Laboratory of Metro Fire and Passenger Transportation Safety, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China

³ State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China, 1499733742@qq.com

Проведено экспериментальное исследование двухфазного потока при взрыве воздушной взвеси хлопьевидных частиц алюминия в крупномасштабной горизонтальной трубе длиной 32.4 м с внутренним диаметром 0.199 м. Анализировался переход горения в детонацию при воспламенении электрической искрой с энергией 40 Дж взвесей с различными массовыми концентрациями частиц алюминия в воздухе. Экспериментально показано установление самоподдерживающейся детонации в диапазоне концентраций частиц алюминия в воздухе $286 \div 532 \text{ г/м}^3$. Детально проанализирован процесс перехода горения в детонацию при оптимальной концентрации частиц алюминия 409 г/м^3 , при этом скорость детонации составила 1690 м/с , давление детонации — 58 бар. В самоподдерживающемся режиме детонации избыточное давление топливно-воздушной смеси проявляет типичный характер постоянных колебаний, при этом скорость детонационной волны постоянна. Также наблюдалась двухголовая спиновая детонация алюминиево-воздушной смеси. Проанализированы структура детонационной волны, параметры поля течения, взаимодействие между ударными волнами, траектории тройных точек. Размер детонационных ячеек при оптимальной концентрации составил около 486 мм.

Ключевые слова: переход горения в детонацию, порошок хлопьевидных частиц алюминия, двухфазная детонация, структура детонационной волны, избыточное давление детонации, скорость детонации.

DOI 10.15372/FGV2022.9231

ВВЕДЕНИЕ

Порошки алюминия являются важным промышленным сырьем широкого применения в военной и аэрокосмической отраслях. Алюминиевые порошки из частиц микронного размера дешевы, легко детонируют в воздухе и перспективны в топливно-воздушных взрывчатых смесях [1, 2]. С другой стороны, время от времени происходят инциденты со взрывами алюминиевого порошка в промышленности, имеющие серьезные последствия. В 2014 г. несчастный случай в Куньшань (Цзянсу, Китай) при детонации алюминиевого порошка с маркировкой 8.2 привел к 146 смертям, а прямые экономические потери составили 351 млн юаней. Это самая серьезная на сегодняшний день авария, не связанная со взрывом угольной пыли. По сравнению

с другими катастрофическими взрывами в промышленности, детонация пыли характеризуется меньшим ростом давления, однако это давление сохраняется в течение длительного времени, часто вызывая вторичный взрыв большой разрушительной силы, при этом обычно выделяется энергии намного больше, чем у горючих газов или паров жидкости [3–6].

По основам теории и факторам, влияющим на детонацию пылевзвесей, проведено множество научных исследований и получен ряд ценных результатов [3, 5, 7–10]. Исследования были направлены на определение параметров детонации взвешенной в воздухе пыли, на анализ взаимодействия ударной волны с частицами, на изучение ударно-волнового воспламенения и закономерностей распространения пламени. В основном исследовались алюминиевая пыль, магниевая пыль, угольная пыль и пыль энергетических материалов [11–13]. При этом широко используются такие установки, как труба

© Jing Q., Wang D., Shi C.-L., Liu Q.-M., Shen Y., Wang Z.-S., Liu C.-Q., Yang Z., He Z.-L., Chen X., Li S.-Z., Huang J.-X., 2023.

Гартмана, 20-литровая сферическая взрывная камера, стандартная взрывная камера объемом 1 м^3 и детонационная труба [14–18].

Механизм развития взрыва пылевзвеси — ускорение пламени и переход горения в детонацию (ПГД) — представляет собой очень сложную и до сих пор не решенную проблему. Большинство экспериментальных исследований детонации пыли проводилось в малых детонационных трубах [19–22]. Обычно, чтобы компенсировать недостаточный размер и добиться взрыва пылевзвеси в детонационной трубе ограниченной длины, используется сильный источник воспламенения или устанавливаются препятствия. Множество работ посвящено также численному исследованию детонации пыли. В [23] моделировался процесс детонации на основе решения одномерного уравнения, учитывающего зависимость теплоемкости от температуры пылевой смеси; для исследования влияния фактической теплоемкости твердых частиц на параметры детонации использовалась модель смешанного горения. В [24] экспериментально и теоретически исследовалась самоподдерживающаяся детонация пылевого слоя, расположенного на нижней стенке квадратной трубы. Рассматривались три вида частиц среднего диаметра 15 мкм: алюминий, гексоген (RDX), октоген (HMX). В [25] численно исследовались подъем и диффузия слоя пыли за ударной волной, а также воспламенение, горение и детонация слоя угольной пыли в трубе. В [26] разработана математическая модель воспламенения и детонации взвесей частиц битуминизированного угля с учетом реакций пиролиза, горения летучих веществ и кокса, а также температурной неоднородности частиц. В [27] в рамках модели двухфазных сжимаемых реагирующих потоков, содержащих твердые частицы, анализировался закон затухания детонационных волн в незапыленном и запыленном воздухе. В [28] исследовалось распространение детонационных волн в линейно расширяющихся каналах, заполненных кислородом и ультрадисперсными частицами алюминия различных концентраций. Была предложена полуэмпирическая модель параметров детонации субмикронных частиц алюминия, учитывающая переход от диффузионно-лимитированного режима горения к кинетическому режиму.

Хлопьевидный алюминиевый порошок в сравнении с порошком сферических частиц алюминия того же размера отличается боль-

шей удельной поверхностью и более высокой способностью к горению и взрыву. В данной работе исследуются процесс ПГД и структура волны детонации воздушной взвеси хлопьевидных частиц алюминия в большой горизонтальной трубе, что имеет практически важное значение для повышения энергетических параметров и улучшения характеристик топливно-воздушных взрывчатых смесей, а также для разработки эффективных технических средств защиты и подавления взрыва.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка (рис. 1) состоит из экспериментальной трубы, электрической системы зажигания, блока управления, системы сбора данных, вентиляционной системы, вакуумного насоса, воздушного насоса и демпфирующей емкости объемом 10 м^3 . Экспериментальная труба включает в себя испытательный участок, 40 систем рассеивания пыли и соединительный участок. Рассеивающие системы устанавливаются горизонтально по обеим сторонам рабочего участка через равные промежутки 0.7 м в направлении оси трубы. Система электрического зажигания состоит из стержня электрического зажигания и электроискрового генератора. Рабочий участок представляет собой трубу диаметром 199 мм и длиной 28 м, закрытую со стороны горения и с открытым выходом. Участок равномерно разделен на четыре части по 7 м. Электрическая энергия, вырабатываемая искровым генератором, составляет 40 Дж. Каждая пылерассеивающая установка состоит из барокамеры, электромагнитного клапана, коллектора, мерного контейнера и сферического сопла. Камера давления соединена с воздушным насосом, порошок диспергируется под давлением 8 бар. Распределение пыли в мерных контейнерах обеспечивается электромагнитными клапанами, контролируемые блоком управления. Для создания в трубе равномерно распределенного пылевого облака в каждом сферическом сопле просверлено 164 отверстия диаметром от 1.2 до 1.8 мм. Распределение алюминиевого порошка, воспламенение пылевоздушной смеси и срабатывание системы сбора данных контролируются блоком управления. Соединительный участок длиной 1.6 м и такого же внутреннего диаметра, как и испытательный участок, делится на две части: для оптической визуализации и для изучения структуры волн.

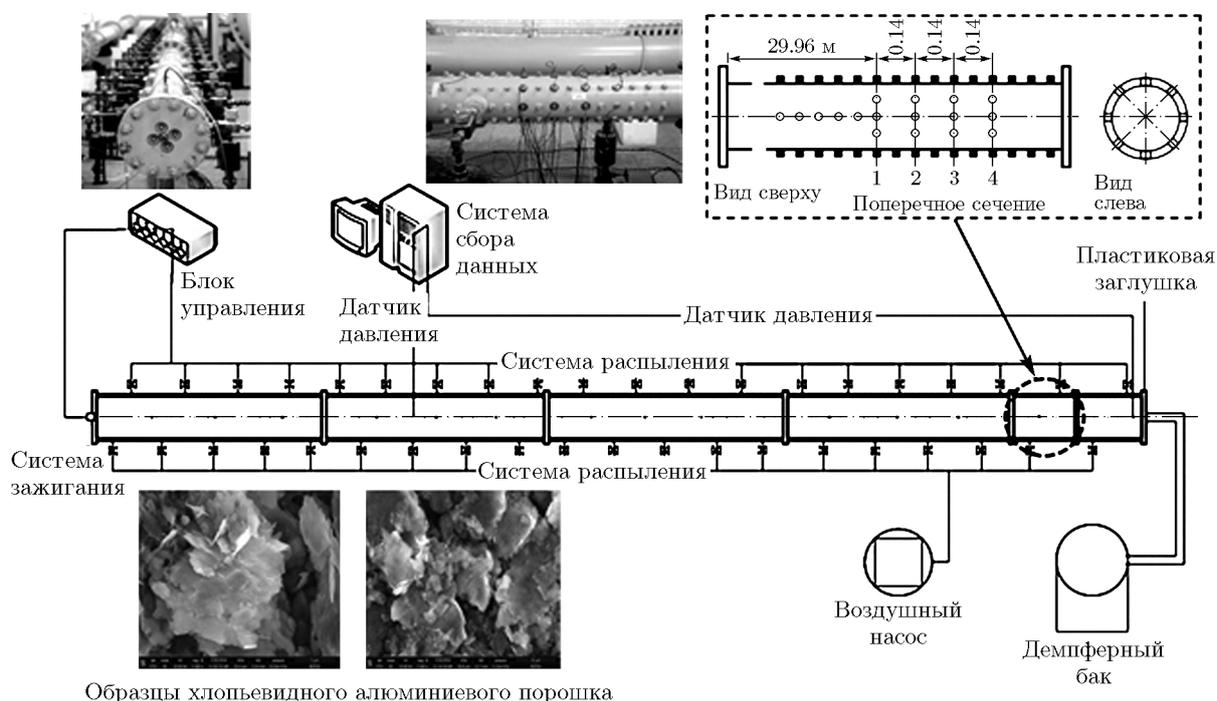


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Расстояние от датчиков давления до точки зажигания, м

p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15	p16
0.7	3.5	6.3	8.4	10.5	12.6	14.7	16.1	17.5	18.9	20.3	21.7	23.1	24.5	25.9	27.3

Для исследования ПГД устанавливаются 16 датчиков Kistler на стенке трубы (места их расположения указаны в таблице). Кроме того, для изучения структуры детонационной волны вдоль оси трубы выбираются четыре поперечных сечения (см. рис. 1). Восемь датчиков давления располагаются на этапе самоподдерживающегося распространения детонации на расстоянии 29.96 м от точки зажигания с интервалом 45° по окружности трубы. Вид слева в разрезе показан на рис. 1. На конце трубки между трубой и демпферным баком помещается пластиковая заглушка, помогающая достигать вакуума в экспериментальной трубе и препятствующая выходу из трубы облака дисперсной смеси до прохождения ударной волны.

Алюминиевый порошок, использованный в экспериментах, состоит из хлопьевидных частиц алюминия среднего диаметра по Саутеру $d_{32} = 10 \div 16$ мкм с толщиной чешуек $1.5 \div 2$ мкм. Образцы алюминиевой пыли взвешиваются на электронных весах и переносятся в контейнеры для образцов. Эксперименталь-

ная труба заполнена воздухом. После заполнения трубы топливом через некоторое время задержки воспламенения высоковольтным искровым запальником инициируется горение смеси. После серии экспериментов было выявлено, что смеси могут успешно воспламеняться в течение $350 \div 450$ мс от начала диспергирования. Оптимальное время задержки воспламенения пылевзвеси хлопьевидного алюминиевого порошка в воздухе составляет 370 мс. После каждого опыта продукты сгорания отсасываются, затем экспериментальная труба наполняется свежим воздухом и готовится к следующему эксперименту.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Переход горения в детонацию взвеси хлопьевидных частиц алюминия в воздухе

Профили избыточного давления p_{over} в процессе ПГД взвеси алюминиевого порошка в воздухе (при концентрации $C_{Al} = 409$ г/м³) представлены на рис. 2, а на рис. 3 — зависимости пикового избыточного давления $p_{over,max}$ и

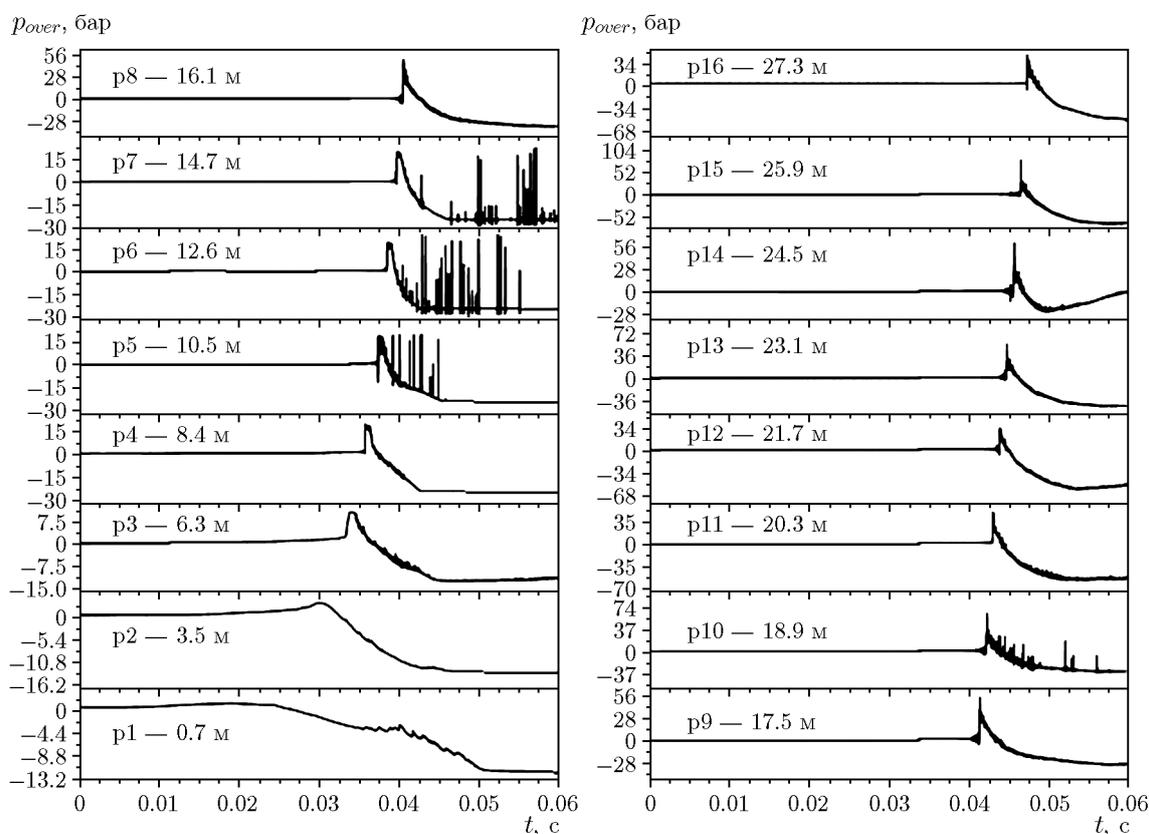


Рис. 2. Профили давления в каждой точке регистрации ($C_{Al} = 409 \text{ г/м}^3$)

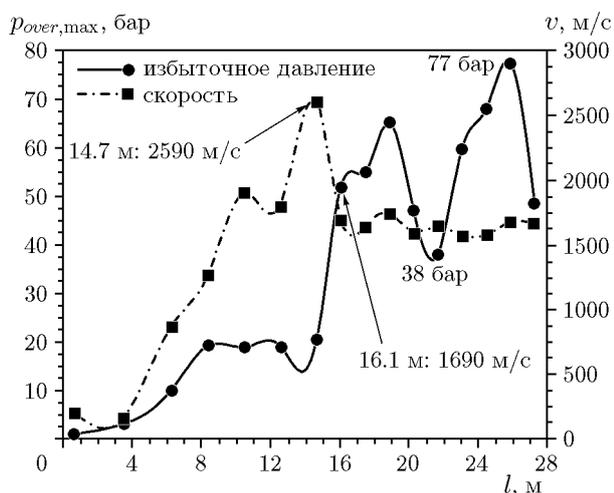


Рис. 3. Изменение пикового избыточного давления и скорости лидирующего фронта в процессе ПГД ($C_{Al} = 409 \text{ г/м}^3$)

скорости ударной волны v от пути распространения l . Под действием высокого давления насыщенных паров оксида пропилена капли распыляются в трубу секции зажигания, дробятся, испаряются и воспламеняются электриче-

ской искрой мощностью 40 Дж за очень короткое время. Смесь алюминиевого порошка и воздуха зажигается от пламени оксида пропилена, затем двухфазное пламя разгоняется в экспериментальной трубе. Процесс ПГД алюминиевой пылевоздушной смеси делится на фазу сжатия с медленной реакцией и ударную фазу с быстрой реакцией, при этом быстро протекающая ударная фаза характеризуется критической ударной волной, приводящей к возникновению детонации.

(1) *Медленно протекающая стадия сжатия.* Пиковое избыточное давление волны сжатия зависит от начальной энергии воспламенения и интенсивности остаточной турбулентности. Воздух в камере под высоким давлением создает турбулентный поток, при этом частицы алюминиевого порошка распыляются в участок экспериментальной трубы. Соответствующая интенсивность турбулентности является необходимым условием для формирования устойчивой взвеси пылевых облаков. Траектории волны сжатия в фазе медленной реакции соответствуют позициям p1 ÷ p6 на рис. 2. Видно, что на расстоянии $l = 3.5 \text{ м}$ от точ-

ки воспламенения появляется заметная волна сжатия, индуцируемая пламенем. В результате взаимодействия турбулентного потока со стенкой трубы за счет трения происходит дробление фронта пламени, что увеличивает площадь контакта и скорость диффузии между фронтом реакции и полем течения в несгоревшей области и приводит к ускорению химических реакций. Формируется турбулентное пламя, распространяющееся с более высокой скоростью, порождающее серию преследующих волн сжатия, что увеличивает интенсивность турбулентности и скорость горения во фронте пламени. Под действием этого механизма положительной обратной связи интенсивность волны сжатия неуклонно возрастает, и на расстоянии $l = 8.4$ м от точки воспламенения она переходит в ударную волну. Интенсивность ударной волны постепенно увеличивается за счет выделения энергии горения, и на удалении $l = 14.7$ м формируется критическая ударная волна.

(2) *Быстро протекающая ударная стадия реакции.* Выделение энергии при горении способствует постепенному увеличению интенсивности ударной волны, которая перерастает в критическую ударную волну. Механизм воспламенения смеси алюминиевого порошка с воздухом меняется от обусловленного эффектом теплопередачи к ударному механизму. По сравнению с медленной стадией сжатия, на быстрой стадии реакции переход от критической ударной волны к волне детонации происходит на более короткой длине, скорость ударной волны быстро увеличивается, число Маха достигает 8.1, а пиковое избыточное давление меняется от 20.9 до 51 бар. Скорость распространения пламени в фазе быстрой реакции зависит уже не от начальной энергии и начальной турбулентности, а от большей интенсивности турбулентности и скорости реакции вблизи фронта ударной волны.

(3) *Стадия самоподдерживающейся детонации.* На расстоянии 16.1 м от места воспламенения волна горения и ударная волна объединяются в детонационную. Самоподдерживающаяся волна детонации распространяется вдоль трубы до ее конца со скоростью 1690 м/с. Заметим, что это значение скорости самоподдерживающегося распространения несколько меньше теоретической скорости детонации Чепмена — Жуге (ЧЖ), равной 1805 м/с, так как упрощенная теория ЧЖ предполагает, что вся энергия, генерируемая

воспламеняемой смесью в плоскости ЧЖ, выделяется в плоскости ЧЖ. Однако при формировании волны детонации в реальных многофазных смесях существуют эффекты дисбаланса (такие, как тепловая и скоростная релаксация частиц в газе), незавершенные реакции и потери тепла могут не обеспечить полного тепловыделения. Видно, что пик избыточного давления начинает колебаться по мере распространения детонационной волны. Это связано с тем, что волна самоподдерживающейся детонации взвеси алюминиевого порошка в воздухе имеет спиралевидную форму, давление детонации в разных местах одного и того же сечения различно, избыточное давление во фронте спина может быть намного выше, чем на других участках фронта. Из-за неопределенности положения фронта спиновой детонации измеренные значения давления характеризуются большими колебаниями (рис. 4). В процессе распространения пламени внутренняя поперечная волна, падающая волна и волна Маха взаимодействуют между собой, поэтому детонационная волна имеет ячеистую структуру. Давление за фронтом детонационной волны возникает в результате чередования давления падающей волны, давления поперечной волны и давления в волне Маха. Соответственно, за волной давления наблюдаются пульсации давления с периодом около 0.3 мс, а размер ячейки волны детонации составляет около 497 мм.

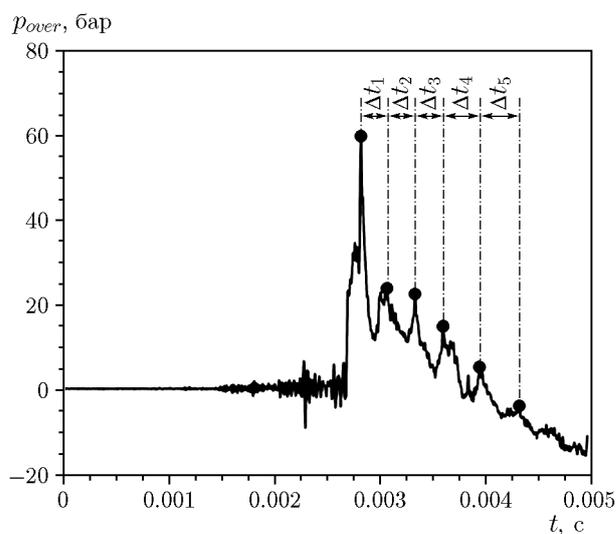


Рис. 4. Давление в точке p14 (24.5 м) на стадии самоподдерживающейся детонации:

$\overline{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i / n \approx 0.3$ мс — средний период пульсаций давления

2.2. Влияние концентрации порошка алюминия на параметры ПГД

На рис. 5 и 6 показаны пики избыточного давления и скорости ударной волны в процессе ПГД при различных концентрациях порошка алюминия в воздухе. На рис. 7 представлены средние избыточные давления и средние скорости фронта в режиме самоподдерживающейся детонации при различных концентрациях алюминия. Результаты экспериментов показывают, что в смеси алюминиевого порошка с воздухом в горизонтальной ударной трубе ПГД и самоподдерживающаяся детонация

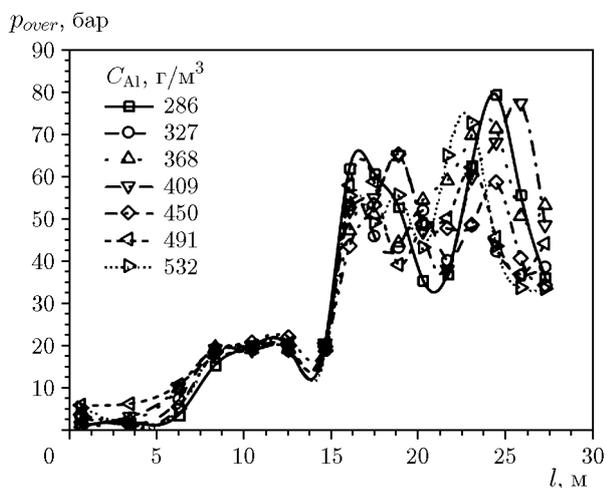


Рис. 5. Изменение пикового избыточного давления в процессе ПГД при различных концентрациях порошка алюминия в воздухе

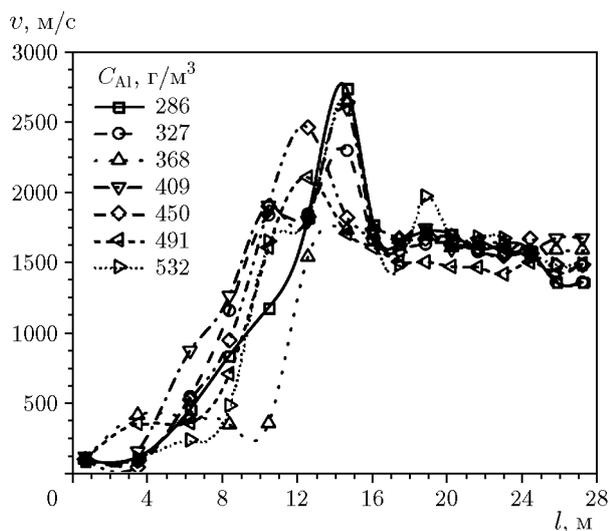


Рис. 6. Изменение скорости ударной волны в процессе ПГД при различных концентрациях порошка алюминия в воздухе

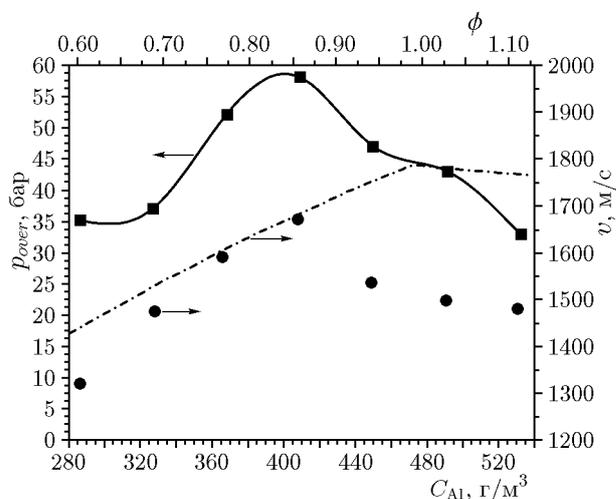


Рис. 7. Зависимости избыточного давления и скорости самоподдерживающейся детонации от концентрации алюминия в воздухе (эквивалентного соотношения ϕ)

достигаются в диапазоне концентраций $C_{Al} = 286 \div 532 \text{ г/м}^3$.

Аналогичные результаты для смеси алюминиевого порошка с воздухом при различных концентрациях алюминия получены и для зависимости пикового избыточного давления и скорости детонации от расстояния. Вблизи точки воспламенения 14,7 м имеется резкий скачок как пикового избыточного давления, так и скорости распространения, что является переходом от горения к детонации и формированием и распространением самоподдерживающейся детонационной волны. Тенденции изменения скорости детонации и пикового избыточного давления в зависимости от концентрации алюминия C_{Al} в воздухе (эквивалентного соотношения ϕ) согласуются с теорией ЧЖ. Существует оптимальная для взрыва концентрация $C_{Al} = 409 \text{ г/м}^3$, в этом случае на этапе самоподдерживающейся детонации пиковое избыточное давление составляет 58 бар, скорость распространения детонации 1690 м/с.

При $C_{Al} = 286 \text{ г/м}^3$ (ниже оптимальной концентрации) пиковое избыточное давление самоподдерживающейся детонации самое низкое, всего 35 бар, скорость детонации также минимальна, всего 1320 м/с. Конечно, если концентрация алюминиевого порошка ниже оптимальной, максимальное пиковое избыточное давление и скорость детонации в трубе будут расти с увеличением концентрации. Поскольку при низкой концентрации алюминиевого по-

рошка содержание кислорода в смеси становится относительно высоким (обогащенная кислородом смесь), то, даже если алюминиевый порошок сгорает полностью, его общее тепловыделение меньше, поэтому пиковое избыточное давление и скорость ниже. В обогащенных кислородом составах с увеличением концентрации алюминиевого порошка увеличивается количество пыли, участвующей в горении, поэтому пиковое избыточное давление и скорость детонации растут с увеличением концентрации алюминиевого порошка.

При $C_{Al} = 532 \text{ г/м}^3$ (выше оптимальной) пиковое избыточное давление самоподдерживающейся детонации ниже и составляет 33 бар, ниже также скорость волны самостоятельной детонации — 1480 м/с. Поскольку концентрация алюминиевого порошка после достижения оптимального значения продолжала увеличиваться, пиковое избыточное давление и скорость детонации начали медленно снижаться. Это связано с тем, что при высокой концентрации алюминиевого порошка относительное содержание кислорода в смеси низкое (обедненная кислородом смесь) и частицы алюминия не могут полностью сгорать из-за недостаточной подачи кислорода, что приводит к снижению пикового избыточного давления и скорости. В то же время по мере увеличения концентрации алюминия в обедненной смеси всё большее количество алюминиевого порошка сгорает не полностью, поэтому пиковое избыточное давление и скорость детонации не растут с увеличением концентрации пыли, но могут уменьшаться. На рис. 7 видно, что, хотя экспериментально определенная скорость детонации и ниже теоретического значения ЧЖ, в целом распределение близко к теоретическому значению.

2.3. Структура детонационной волны во взвеси хлопьевидных частиц алюминия в воздухе

В процессе ПГД смеси алюминиевого порошка с воздухом при концентрации пыли $C_{Al} = 409 \text{ г/м}^3$ детонационная волна начинает формироваться примерно в 14.7 м от места воспламенения. До расстояния 19.7 м скорость детонации сохраняет постоянное значение $v = 1690 \text{ м/с}$, при этом избыточное давление снижается. Примерно от 19 м и до конца испытательного участка давление колеблется и самоподдерживающаяся детонация с поперечными волнами распространяется вдоль стенки трубы по спирали. Профили давления

в сечении 1 (см. рис. 1) при распространении волны самоподдерживающейся детонации представлены на рис. 8.

Учитывая средние скорости и время прихода детонационных волн в поперечных сечениях 1–4, можно определить форму ударных фронтов и углы β на каждый периметр окружности, как показано на рис. 9. На кривой ударного фронта появляются тройные точки, образованные взаимодействием падающей ударной волны, поперечной волны и волны Маха. Пиковые избыточные давления на каждой окружности и направления движения тройных точек приведены на рис. 10. На рис. 9 и 10 видно, что на каждой окружности пиковые избыточные давления появляются в тройных точках фронта волны, а траектории тройных точек образуют правильную ячеистую структуру. Рис. 9 показывает, что можно определить угол траектории двухголовой спиновой детонации. Тройная точка перемещается на 280 мм в осевом направлении и на половину окружности трубы в окружном направлении, поэтому угол траектории спиновой детонации равен примерно 48° . Окружная скорость поперечной волны составляет 1744 м/с, а длина ячейки двухголовой спиновой детонации 486 мм, что в целом согласуется с расчетным результатом, основанным на периоде пульсаций волны давления (497 мм).

Движение и периодические столкновения поперечных волн в детонационной волне создают центры детонации в топливно-воздушной смеси, которые меняют параметры детонации (скорость, избыточное давление и температуру) и размеры детонационных ячеек. При столкновении волн Маха создаются новые волны Маха и скорость волны детонации увеличивается, пока не достигнет пика. После столкновения волн Маха тройные точки расходятся и скорость детонационной волны уменьшается. Из-за инерции газа и частиц скорость газа и частиц не уменьшается таким же образом, как и скорость детонационной волны. Вскоре после столкновения волн Маха давление увеличивается из-за сжимаемости, вызванной инерцией газа и твердых частиц. Волну Маха и основную ударную волну можно идентифицировать по форме фронта ударной волны, движению тройной точки и зависимости скорости ударной волны и избыточного давления от расстояния в ячейке, как показано на рис. 9.

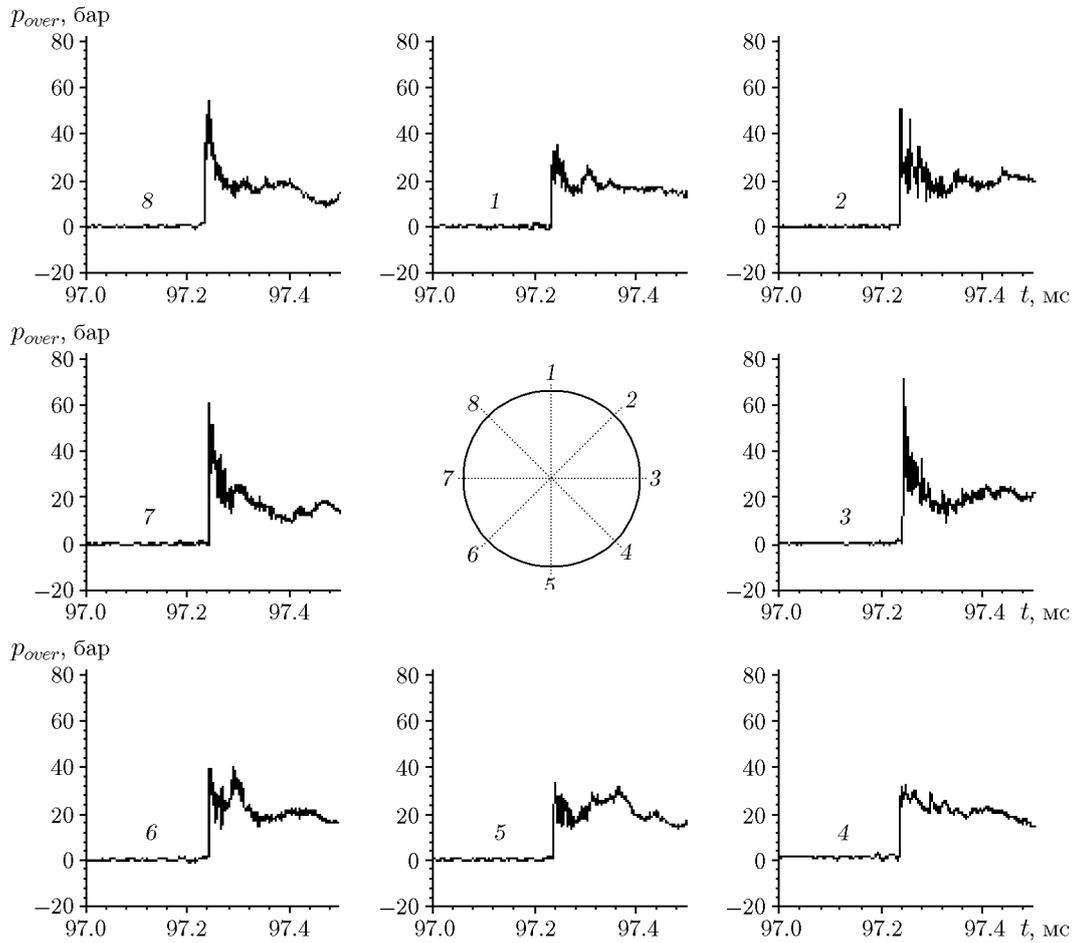


Рис. 8. Профили давления в поперечном сечении 1 (см. рис. 1)

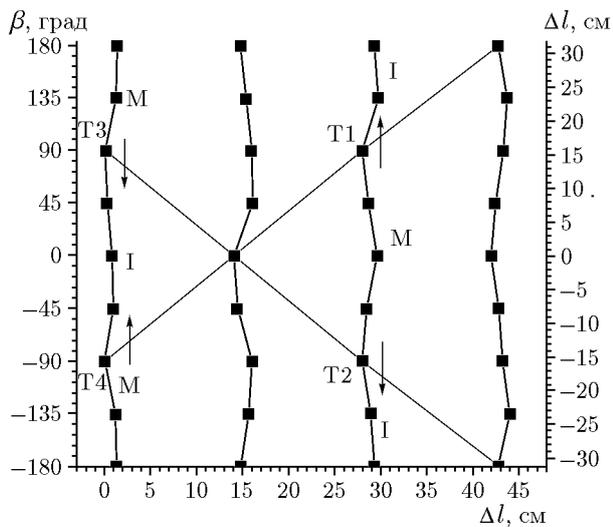


Рис. 9. Связь между формой фронта ударной волны и углом окружности, а также траектории тройных точек на стенке трубы: М — отраженная волна Маха, I — падающая волна, T1 ÷ T4 — тройные точки

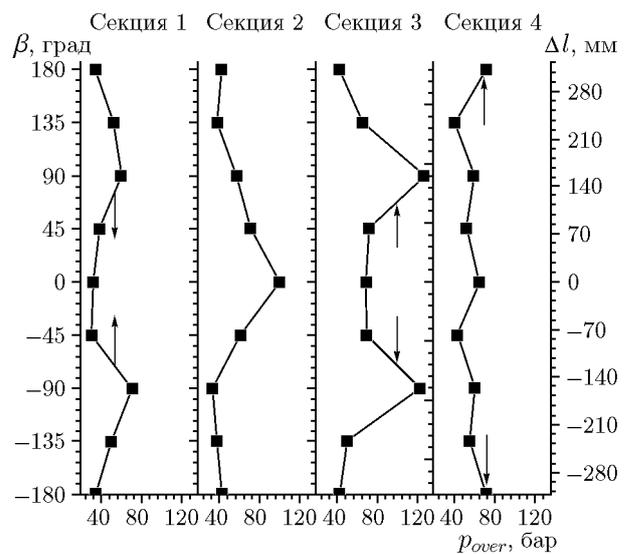


Рис. 10. Изменение пикового избыточного давления по углу вращения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия экспериментов с целью изучения процесса перехода горения в детонацию двухфазной смеси порошка хлопьевидных частиц алюминия с воздухом. Этот процесс делится на фазу сжатия с медленной реакцией и ударную фазу с быстрой реакцией, при этом ударная фаза с быстрой реакцией характеризуется критической ударной волной, приводящей к возникновению детонации. Самоподдерживающаяся детонация может быть достигнута в диапазоне концентраций хлопьевидного алюминиевого порошка $286 \div 532 \text{ г/м}^3$. Также был подробно проанализирован процесс перехода горения в детонацию смеси алюминиевого порошка с воздухом при оптимальной концентрации 409 г/м^3 . Скорость детонации и ее давление при оптимальной концентрации составляют 1690 м/с и 58 бар соответственно. Кроме того, на фронте детонационной волны взвеси алюминиевого порошка в воздухе наблюдалась двухголовая спиновая детонация. Проанализированы структура детонационной волны, параметры поля течения и взаимодействие ударной волны с траекториями тройных точек. Размер детонационной ячейки при оптимальной концентрации порошка составляет примерно 486 мм .

Данная работа выполнена при поддержке National Natural Science Foundation of China (grant N 52204244).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang D., Ji T., Jing Q., He W., Fan Z., Wu D., Qian X. Experimental study and mechanism model on the ignition sensitivity of typical organic dust clouds in O_2/N_2 , O_2/Ar and O_2/CO_2 atmospheres // *J. Hazard. Mater.* — 2021. — V. 412. — P. 125108. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125108.
2. Jing Q., Wang D., Liu Q., Shen Y., Wang Z., Chen X., Zhong Y. Transient reaction process and mechanism of cornstarch/air and CH_4 /cornstarch/air in a closed container: Quantitative research based on experiments and simulations // *J. Hazard. Mater.* — 2021. — V. 409. — P. 124475. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124475.
3. Bernard S., Lebecki K., Gillard P., Youinou L., Baudry G. Statistical method for the determination of the ignition energy of dust cloud-experimental validation // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2010. — V. 23, N 3. — P. 404–411. — DOI: 10.1016/j.jlp.2010.01.006.
4. Liu W., Bai C., Liu Q., Yao J. Study on the effect of temperature on the gas — liquid mass transfer rate of volatile liquid // *Eur. Phys. J. Plus.* — 2020. — V. 135. — P. 437. — DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00442-4.
5. Hao S., Yang M. Support point of locally optimal designs for multinomial logistic regression models // *J. Statist. Plan. Inference.* — 2020. — V. 209. — P. 144–159. — DOI: 10.1016/j.jspi.2020.03.006.
6. Castellanos D., Carreto-Vazquez V. H., Mashuga C. V., Trottier R., Mejia A. F., Mannan M. S. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust // *Powder Technol.* — 2014. — V. 254. — P. 331–337. — DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028.
7. Zhang F., Murray S. B., Gerrard K. B. Aluminum particles–air detonation at elevated pressures // *Shock Waves.* — 2006. — V. 15. — P. 313–324. — DOI: 10.1007/s00193-006-0027-0.
8. Di Sarli V., Danzi E., Marmo L., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulation of turbulent flow field, feeding and dispersion of non-spherical dust particles in the standard 20 L sphere // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2019. — V. 62. — P. 103983. — DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103983.
9. Liu Q., Li X., Bai C. Deflagration to detonation transition in aluminum dust-air mixture under weak ignition condition // *Combust. Flame.* — 2009. — V. 156, N 4. — P. 914–921. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.10.025.
10. Li Q., Lin B., Li W., Zhai C., Zhu C. Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20 L spherical vessels // *Powder Technol.* — 2011. — V. 212, N 2. — P. 303–309. — DOI: 10.1016/j.powtec.2011.04.038.
11. Jing Q., Wang D., Liu Q., Chen X., Shen Y., Wang Z., Zhong Y. Inhibition effect and mechanism of ultra-fine water mist on CH_4 /air detonation: Quantitative research based on CFD technology // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 148. — P. 75–92. — DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.007.
12. Jing Q., Wang D., Liu Q., Ren L., Wang Y., Liu C., Shen Y., Wang Z. Study on transient reaction mechanism and explosion intensity parameters of micron-sized flake aluminum dust in air // *Chem. Eng. Sci.* — 2021. — V. 246. — P. 116884. — DOI: 10.1016/j.ces.2021.116884.
13. Jing Q., Huang J., Liu Q., Wang D., Chen X., Wang Z., Liu C. The flame propagation characteristics and detonation parameters of ammonia/oxygen in a large-scale horizontal tube: As a carbon-free fuel and hydrogen-energy carrier // *Int. J. Hydrogen Energy.* — 2021. — V. 46, N 36. — P. 19158–19170. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.032.
14. Sanchirico R., Di Sarli V., Russo P., Di Benedetto A. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests // *Powder Technol.* —

2015. — V. 279. — P. 203–208. — DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.003.
15. **Kalejaiye O., Amyotte P. R., Pegg M. J., Cashdollar K. L.** Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2010. — V. 23, N 1. — P. 46–59. — DOI: 10.1016/j.jlp.2009.05.008.
16. **Bane S. P. M., Ziegler J. L., Boettcher P. A., Coronel S. A., Shepherd J. E.** Experimental investigation of spark ignition energy in kerosene, hexane, and hydrogen // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2013. — V. 26, N 2. — P. 290–294. — DOI: 10.1016/j.jlp.2011.03.007.
17. **Chen H., Yao Q., Zhang Y., Liu H., Zhang X.** Experimental study on minimum ignition temperature and explosion characteristics of micron-sized aluminum powder // *China Saf. Sci. J.* — 2019. — V. 29. — P. 96–102.
18. **Wang X., Wang Z., Ni L., Zhu M., Liu C.** Explosion characteristics of aluminum powder in different mixed gas environments // *Powder Technol.* — 2020. — V. 369. — P. 53–71. — DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.056.
19. **Akkerman V., Bychkov V., Petchenko A., Eriksson L.-E.** Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at the walls // *Combust. Flame.* — 2006. — V. 145, N 1-2. — P. 206–219. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.10.011.
20. **Zamfirescu C., Dincer I.** Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications // *Fuel Process. Technol.* — 2009. — V. 90, N 5. — P. 729–737. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.02.004.
21. **Liu Q., Bai C., Jiang L., Dai W.** Deflagration-to-detonation transition in nitromethane mist/aluminum dust/air mixtures // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 1. — P. 106–117. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.06.026.
22. **Gao Y., Lee J. H. S., Ng H. D.** Velocity fluctuation near the detonation limits // *Combust. Flame.* — 2014. — V. 161, N 11. — P. 2982–2990. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.04.020.
23. **Teng H., Jiang Z.** Numerical simulation of one-dimensional aluminum particle–air detonation with realistic heat capacities // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160, N 2. — P. 463–472. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.10.018.
24. **Fan B., Li H.** Detonation supported by combustible dust deposit // *Symp. (Int.) Combust.* — 1996. — V. 26, N 2. — P. 3007–3013. — DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80144-5.
25. **Semenov I., Utkin P., Markov V.** Numerical modelling of dust-layered detonation structure in a narrow tube // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2013. — V. 26, N 2. — P. 380–386. — DOI: 10.1016/j.jlp.2012.04.007.
26. **Fedorov A. V., Khmel T. A., Fomin V. M.** Analysis of the shock wave ignition and detonation in bituminous coal-dust suspensions // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2009. — V. 22, N 2. — P. 140–144. — DOI: 10.1016/j.jlp.2008.11.001
27. **Tahsini A. M.** Detonation wave attenuation in dust-free and dusty air // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2016. — V. 39. — P. 24–29. — DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.006.
28. **Lavruk S., Khmel T.** Regimes and critical conditions of detonation propagation in expanding channels in gas suspensions of ultrafine aluminum particles // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2021. — V. 71. — P. 104476. — DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104476.

*Поступила в редакцию 05.10.2022.
Принята к публикации 09.11.2022.*