

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.24.48.005

УДК 532.593

© А. В. Пинаев, П. А. Пинаев, 2024

А. В. ПИНАЕВ

д-р физ.-мат. наук, доцент,
главный научный сотрудник
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск
e-mail: avpin51@mail.ru



П. А. ПИНАЕВ

младший научный сотрудник
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск
e-mail: pavel_academ@mail.ru



РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В СМЕСЯХ CH_4 /ВОЗДУХ, CH_4 /ВОЗДУХ/ УГОЛЬНАЯ ВЗВЕСЬ В ЗАКРЫТОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Исследовано инициирование и распространение волн горения в длинной закрытой вертикальной трубе в смесях CH_4 /воздух и CH_4 /воздух/угольная взвесь с содержанием метана $\alpha = 5 \div 7$ % (об.) при поджигании сверху. Пламя не распространялось в газовых и газоугольных смесях с $\alpha \leq 5,5$ % (об.), возможность воспламенения и режимы горения смесей зависят от величины α и направления вектора скорости пламени относительно силы тяжести.

Ключевые слова: ВЕРТИКАЛЬНЫЙ КАНАЛ, ВОЛНА ГОРЕНИЯ, МЕТАН, УГОЛЬНАЯ ВЗВЕСЬ, ДВУХТОПЛИВНАЯ ГЕТЕРОГЕННАЯ СМЕСЬ, НИЖНИЙ КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ, ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ.

ВВЕДЕНИЕ

Двухтопливные гетерогенные смеси (ДГС) CH_4 /воздух/угольная взвесь изучены меньше, чем соответствующие газовые смеси. Пламя, взрывные и детонационные волны в системах CH_4 /воздух/уголь, CH_4 / O_2 /уголь, CH_4 / H_2 /воздух/уголь исследованы в [1–4], где показано, что параметры детонации в газовых и газоугольных смесях близки между собой, доля сгоревшего угля не превышает 20 % от стехиометрии. Аналогичные результаты получены в этих работах и для пламён. Т. е. энерговыделение в зоне реакции детонационных и дефлаграционных волн определяется в основном метаном, а не медленно горящими угольными частицами.

Данные о величине нижнего концентрационного предела распространения (НКПР) пламени метана в воздухе различаются. Например, в ТУ на поставку природного газа по ГОСТ 5542-2014 и СТО Газпром 089-2010 НКПР пламени метана в воздухе $\alpha^* = 4,4$ % (об.). Согласно ГОСТ Р 12.3.047-98 (Пожарная безопасность технологических процессов, общие требования, методы контроля) $\alpha^* = 5,28$ % (об.). В научной литературе значения α^* метана отличаются у разных авторов и из-за несовпадения условий проведения опытов. Так, при поджигании смеси снизу в вертикальной трубке длиной l 1,5 м и диаметром d 50 мм в [5] и [6] $\alpha^* = 5$ и 5,28 % (об.) соответственно. В [7] для смесей CH_4 /

воздух приводятся значения $\alpha^* = 5,35; 5,40$ и $5,95$ % (об.) соответственно для распространения пламени вверх, горизонтально и вниз в закрытой трубке l 1,5 м и d 75 мм, т. е. наиболее затруднено распространение пламени вниз по вектору силы тяжести при поджигании сверху.

В [8] проведён анализ влияния температуры, давления, концентрации метана и добавок на характеристики взрывоопасности метана. В [9] изучали пределы горения метановоздушных смесей в вертикальных трубках d 45÷167 мм, l 1 и 3 м с открытым нижним или верхним концом при зажигании сверху. Пределы горения не зависели от диаметра трубы при d 20÷167 мм, теплообмен в основном определялся свободной конвекцией. В [10] при изучении распространения пламени в пропане и пропилене с разбавителями в открытой трубке d 50 мм, l 1,5 м отмечено, что область воспламенения движущегося вниз пламени значительно уже, чем распространяющегося снизу вверх. В [11] в трубке d 50 мм, l 1,5 м при зажигании искрой снизу область воспламенения была меньше, чем в сосуде 53 л, значения НКПР пламени практически совпадали при всех концентрациях кислорода на установках обоих типов.

Практически все эксперименты по определению НКПР пламени метана выполнены в коротких каналах 1,5–3 м. Существует гипотетическое предположение, что при иницировании бедной метановоздушной смеси с угольной взвесью частицы угля воспламеняются и понизят α^* в несколько раз. Для проверки этой гипотезы и исследования возможности воспламенения смесей $\text{CH}_4/\text{воздух}$ и $\text{CH}_4/\text{воздух}/\text{уголь}$ вблизи НКПР в работе проведены эксперименты в длинной вертикальной трубке.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в закрытой трубке l 6,75 м, d 70 мм. Газовые смеси метана (99,99 %) с воздухом составляли по манометрам класса точности 0,4 в баллонах 40 л. Трубу вакуумировали и заполняли газовыми или двухтопливными гетерогенными смесями до

атмосферного давления. Для создания ДГС газовые смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$ равномерно подавались через редуктор, затем через контейнер с угольным порошком и распылитель сверху трубы. При заполнении трубы смесью течение газа увлекает частицы угля и выравнивает их распределение по длине (как и давление газа). Горение газозвесей иницировали сверху искрой при энергии в конденсаторе $W \approx 1\div 10$ Дж или открытым огнём. Температура в помещении 18 °С.

Среднеобъёмная концентрация частиц пыли в трубе $\rho_0 \approx 100\div 530$ г/м³, частицы распределены по фракциям 0–40, 40–64, 64–94, 94–140, 140–200 мкм с массовой долей 26,6; 9,3; 13,8; 16,6; 33,7 % соответственно. При изменении ρ_0 от 530 до 100 г/м³ количество осевшего на стенках порошка угля после протирки трубы составляло соответственно 10÷30 % от массы угля в объеме трубы. Для лучшего удаления угля со стенок трубу промывали и протирали, влияние способа очистки трубы на параметры пламени и α^* не обнаружено.

Профили свечения с фотоумножителей ФЭУ1÷ФЭУ3 и сигналы с пьезодатчиков Д1÷Д8 регистрировали осциллографами Tektronix TDS2014. Ошибки измерения скорости волн не превышали 5 %. Съёмку свечения пламён осуществляли скоростной видеокамерой FASTCAM SA5 через щель 10×290 мм с частотой $F = 60\div 250$ кадр/с, максимальное время выдержки $St \leq 1/F$. Расстояния от начала трубы сверху вниз до Д1÷Д8 $x_1 = 0,79; 0,91; 1,825; 2,86; 2,98; 5,29; 5,49; 6,065$ м соответственно; ФЭУ1 расположен напротив Д3, ФЭУ2 — на $x = 2,485$ м, ФЭУ3 — напротив Д6, начало оптической щели — $x = 5,225$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

СМЕСИ $\alpha\text{CH}_4+(1-\alpha)\text{ВОЗДУХ}$, $\alpha\text{CH}_4/\text{ВОЗДУХ}/\text{УГОЛЬ}$ ($\alpha = 5; 5,5$ %). При искровом иницировании в газовых смесях $\alpha = 5; 5,5$ % волны горения не возбуждались.

При более сильном иницировании смесей открытым огнём трубу заполняли газовыми смесями $\alpha = 5$ либо $5,5$ %, затем сверху добавляли стехиометрическую смесь ($\alpha_{\text{stoich}} = 9,5$ %) на длину $x_1 \approx 0,7$ и $x_2 \approx 1,4$ м

до давления $p_0 = 0,1$ МПа. В стехиометрической смеси после искрового инициирования распространялось пламя. В исследуемых смесях, расположенных ниже, регистрировались расширяющиеся продукты горения стехиометрической смеси вплоть до расстояний $X_1 \approx 2,3$ и $X_2 \approx 3$ м. При $x > X_1, X_2$ свечение продуктов реакции прекращалось, волна сжатия исчезала. Точно такие же профили давления, свечения и значения X_1, X_2 наблюдали, если трубу заполняли воздухом, а сверху добавляли стехиометрическую смесь 9,5 %CH₄/воздух. Выполненные опыты доказывают отсутствие волн горения в вертикальном канале в бедных метановоздушных смесях при $\alpha = 5; 5,5$ %.

ДГС α CH₄/воздух/угольная взвесь, $\alpha = 5; 5,5$ %, $\rho_0 = 100 \div 530$ г/м³ также не воспламенялись от искры. При заполнении трубы этими ДГС и добавлении без задержки по времени сверху до $p_0 = 0,1$ МПа взвеси 9,5 %CH₄/воздух/уголь после инициирования продукты горения стехиометрической смеси расширялись до $X_2 \approx 3$ м. Затем при $x > X_2$ свечение на ФЭУ и пучности давления на Д6÷Д8 полностью исчезали. Пламя не образуется в ДГС при $\alpha = 5; 5,5$ %, потому что метановоздушные смеси, как показано выше, при этих значениях α не воспламеняются, а частицы угля в отсутствие пламени не являются эквивалентной заменой метана.

Таким образом, доказано, что пламя не распространяется в вертикальном канале в газовых смесях и ДГС при $\alpha = 5; 5,5$ %, поэтому исследования смесей с более низкой концентрацией CH₄ не проводили.

СМЕСИ α CH₄+(1- α)ВОЗДУХ, α CH₄/ВОЗДУХ/УГОЛЬ, $\alpha = 6$ %. Газовые смеси при $\alpha = 6$ % воспламенялись от искры, и по трубе вниз распространялась волна горения. Пламя в виде тонкого светящегося круга со слабым свечением двигалось бесшумно со скоростью $D \approx 30\text{--}8$ см/с. Фронт пламени, плавно изгибаясь, оставался близким к плоской форме. После сгорания смеси давление в трубе уменьшалось до $p_2 \approx 0,091\text{--}0,093$ МПа. Из-за уменьшения давления и низкого

энерговыведения пламя в нижней части трубы в 70–80 % опытов затухает. Характерные снимки свечения волны горения приведены на рис. 1: пламя движется равномерно со средней скоростью в оптической секции $D_{\text{ср}} \approx 12$ см/с.

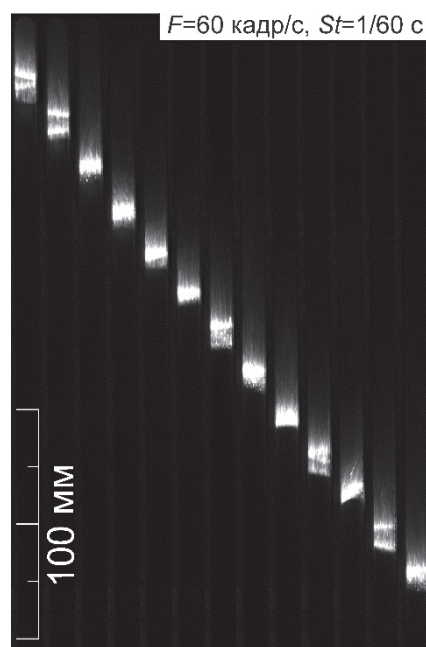


Рис. 1. Покадровые снимки свечения пламени в смеси 6 %CH₄/воздух. Пламя движется равномерно вниз по трубе, кадры приведены с частотой 5 кадр/с, $D_{\text{ср}} \approx +12$ см/с

В ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь пламя также инициируется искрой, интенсивность свечения примерно на порядок превышает свечение в газовой смеси, в нижней части трубы пламя часто затухает (сигналы на Д7, Д8 исчезают). В двухфазной смеси наблюдаются два режима распространения волн горения. Первый — такой же, как и в газовой смеси 6 %CH₄/воздух: пламя распространяется бесшумно, равномерно со скоростью $D \approx 35\text{--}10$ см/с в виде ярко светящегося круга (рис. 2). Частота съёмки, время выдержки и диафрагма в опытах на рис. 1, 2 одинаковые.

Второй режим в ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь наблюдается при увеличении концентрации угля, он более высокоскоростной (D возрастает более чем на порядок) и качественно отличается от первого режима. Волна горения распространяется с шипением, пламя ярче

и длиннее на порядок (рис. 3). Как и в [12, 13], наблюдаются сильные низкочастотные колебания пламени со знакопеременной скоростью — волна периодически останавливается, после чего меняет направление движения, частота колебаний $f \approx 31,7 \pm 4$ Гц (рис. 3). На длине оптической секции средняя скорость фронта пламени вниз ($\bar{D}_+ \approx +6,6$ м/с) больше, чем при колебаниях вверх ($\bar{D}_- \approx -2,2$ м/с) — скорость пламени вниз считается положительной, вверх — отрицательной.

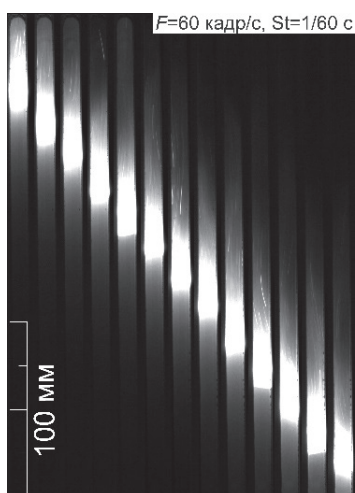


Рис. 2. Покадровые снимки свечения волны горения в ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь, $\rho_0 \approx 202$ г/м³. Пламя движется равномерно вниз по трубе, кадры приведены с частотой 5 кадр/с, $D_{cp} \approx +9$ см/с.

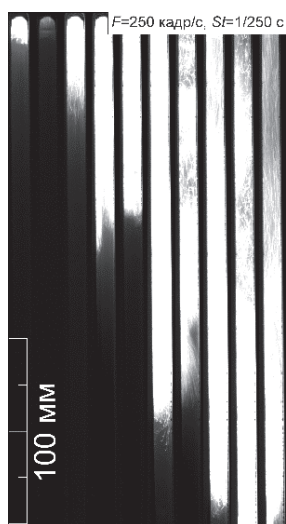
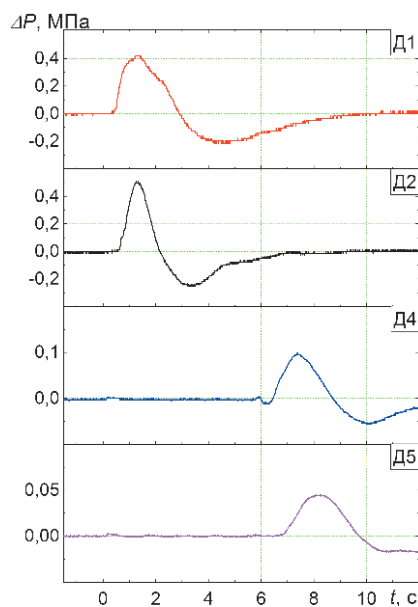


Рис. 3. Покадровые снимки свечения волны горения, движущейся со знакопеременной скоростью в ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь, $\rho_0 \approx 385$ г/м³. Кадры приведены с частотой 50 кадр/с, средняя скорость распространения пламени в оптической секции $D_{cp} \approx +2,2$ м/с, $f \approx 31,7$ Гц.

Значения скорости волны при колебаниях вверх и вниз в несколько раз превышают среднюю скорость пламени, скорость движения пламени вниз всегда больше, чем скорость движения вверх. Особенностью таких колебаний является перемещение вверх и вниз не только фронта пламени, но и массы газа с частицами угля.

В [9] в постановке опытов, когда верх трубы открыт, низ закрыт, зажигание сверху факелом наблюдалось спокойное распространение пламени; если верх трубы закрыт, низ открыт, зажигание искрой сверху, то пламя совершало всего одно колебание — двигалось вниз, затем замедлялось, и при движении вверх, приобретая форму колокола, затухало.

Осциллограммы с датчиков и ФЭУ для второго режима горения приведены на рис. 4. Начало свечения совпадает с началом подъёма давления в волне горения. Протяжённость области сжатия примерно на порядок больше области свечения. Длительность области сжатия по осциллограммам 1,6–2,5 с, протяжённость 0,8–4 м. Средние скорости волны горения на участках измерения по длине канала $D \approx 0,3$ –2,5 м/с, в конце трубы скорость пламени $D \approx 1,1$ м/с (рис. 4). Пламя за время прохождения оптической секции ($t_1 \approx 0,25$ с) совершает $N = f \times t_1 \approx 7$ –8 колебаний.



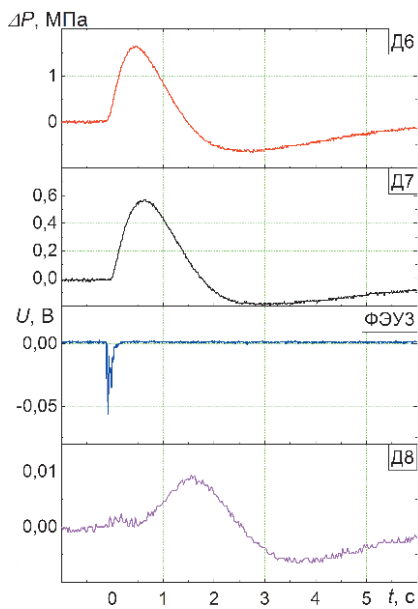


Рис. 4. Сигналы с датчиков Д1÷Д8 и ФЭУ1÷ФЭУ3 при прохождении волны горения в ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь, $\rho_0 \approx 385 \text{ г/м}^3$; $D_{01} \approx 1,79$; $D_{12} \approx 0,65$; $D_{24} \approx 0,33$; $D_{34} \approx 0,42$; $D_{\text{ФЭУ1-2}} \approx 0,83$; $D_{45} \approx 0,45$; $D_{67} \approx 2,4$; $D_{78} \approx 1,08 \text{ м/с}$

Зависимости осреднённых скоростей $D(x)$ для волн горения в газовой смеси и в ДГС 6 %CH₄/воздух/уголь приведены на рис. 5. Здесь обозначены либо только положительные, либо только отрицательные доверительные интервалы, чтобы исключить их пересечение. Скорости волн горения в ДГС из-за дополнительного энерговыделения частиц угля выше, чем в смеси 6 %CH₄/воздух.

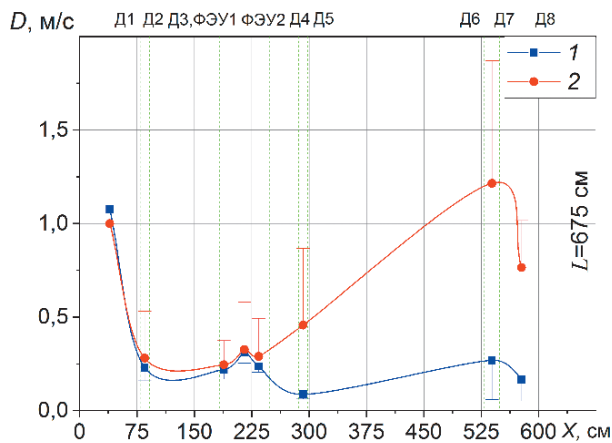


Рис. 5. Осреднённые скорости волн горения по длине трубы. 1 — 6 % CH₄+94 % воздух; 2 — ДГС 6 % CH₄/воздух/уголь, $\rho_0 \approx 100 \div 530 \text{ г/м}^3$. Зелёные вертикальные линии соответствуют расположению датчиков и ФЭУ

СМЕСИ $\alpha\text{CH}_4+(1-\alpha)\text{ВОЗДУХ}$, $\alpha\text{CH}_4/\text{ВОЗДУХ/УГОЛЬ}$, $\alpha = 7\%$. Газовая смесь 7%CH₄+93% воздух легко инициируется искрой, пламя совершает колебания и движется вниз со знакопеременной скоростью (рис. 6), средняя скорость при движении вниз $\bar{D}_+ \approx +3,6 \text{ м/с}$, при движении вверх $\bar{D}_- \approx -1,7 \text{ м/с}$.

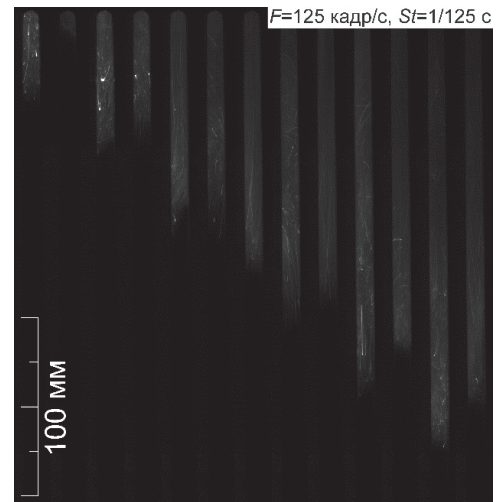


Рис. 6. Покадровые снимки свечения волн горения со знакопеременной скоростью, смесь 7 %CH₄/воздух, кадры приведены с частотой 62,5 кадр/с, $D_{\text{ср}} \approx +1,2 \text{ м/с}$, $f \approx 31,3 \text{ Гц}$



Рис. 7. Покадровые снимки свечения волны горения в ДГС 7%CH₄/воздух/уголь, $\rho_0 \approx 176 \text{ г/м}^3$, кадры приведены с частотой 62,5 кадр/с, $D_{\text{ср}} \approx +1,7 \text{ м/с}$, $f \approx 35,7 \text{ Гц}$

В ДГС 7 %CH₄/воздух/уголь при инициировании искрой также возбуждается волна горения. Яркость пламени в ДГС, существенно

выше, чем в газовой смеси (см. рис. 7). Фронт пламени неровный, свечение за фронтом неоднородное. Пламя, как и в газовой смеси, совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью, $\bar{D}_+ \approx +5$ м/с, $\bar{D}_- \approx -2$ м/с. Благодаря большой яркости свечения частота съёмки на рис. 7 увеличена до $F = 500$ кадр/с, а время выдержки уменьшено до $St = 1/5000$ с. Это позволило исключить размазывание изображений и более детально рассмотреть структуру пламени.

Реакция между избыточным кислородом в газовой смеси и углем не приводит к существенному росту скорости пламени в ДГС по сравнению с газовой смесью 7 %CH₄/воздух. В опытах не обнаружено влияние среднеобъёмной плотности угольной взвеси на скорость пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы возможность существования и характер распространения волн горения в бедных по метану газовых смесях CH₄/воздух с содержанием метана 5÷7 % (об.) и в тех же газовых смесях с взвешенной угольной пылью. Пламя не инициировалось в вертикальном закрытом канале при зажигании сверху в газовых и газугольных смесях с содержанием метана $\alpha \leq 5-5,5$ %

(об.); при $\alpha \geq 6$ % в канале распространялись волны горения. В описанных выше условиях НКПР метана $5,5 \leq \alpha^* < 6$ % (об.).

В двухтопливной гетерогенной смеси (6 % CH₄+94 % воздух)/уголь по сравнению с волной горения в газовой смеси (6 % CH₄+94 % воздух) возрастает яркость пламени. В ДГС с содержанием метана 6 % (об.) обнаружены два режима распространения пламени: с короткой и длинной областью свечения. Пламя с коротким свечением в виде кругового диска движется равномерно вдоль щели. Во втором режиме, при большей концентрации угольной взвеси, протяжённое пламя совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью и распространяется быстрее примерно на порядок, чем короткое пламя в ДГС и пламя в газовой смеси.

При $\alpha = 7$ % (об.) пламя распространяется с характерными продольными колебаниями со знакопеременной скоростью; добавление угольной взвеси в газовую смесь не увеличивает скорость волны горения, не обнаружено влияние среднеобъёмной плотности угольной взвеси на скорость пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук № 2.3.1.2.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Волны горения и детонации в смесях газов CH₄/Air, CH₄/O₂, O₂ с взвесями каменного угля // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 6. С. 56–68.
2. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Детонационные волны в системах метан/водород/кислород/взвесь угля // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 4. С. 91–96.
3. Моисеева К. М., Пинаев А. В., Васильев А. А., Крайнов А. Ю., Пинаев П. А. Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 5. С. 54–63.
4. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Structure of shock and detonation waves propagating in hybrid methane/hydrogen/air/coal dust mixtures // Shock Waves. 2023. Vol. 33. No. 6. P. 473–482.
5. Zabetakis M. G. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors // Bulletin 627, U.S. Bureau of Mines, 1965.
6. Справочник. Пожаровзрывоопасность веществ, материалов и средства их тушения. М.: Химия, 1990.
7. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968. 592 с.
8. Бунев В. А., Коржавин А. А., Сеначин П. К. Анализ влияния различных факторов на характеристики взрывоопасности метана // Ползуновский вестник. 2012. № 3/1. С. 5–16.

9. Бабкин В. С., Замашиков В. В., Бадалян А. М., Кривулин В. Н., Кудрявцев Е. А., Баратов А. Н. Влияние диаметра трубы на пределы распространения гомогенных газовых пламен // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18. № 2. С. 44–52.

10. Шебеко Ю. Н., Цап В. Н., Корольченко А. Я., Иванов А. В., Бобков А. С. Особенности горения смесей горючих газов с парами хладонов при распространении пламени сверху вниз // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18. № 6. С. 27–30.

11. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Ильин А. Б., Малкин В. Л. Влияние хладонов на концентрационные пределы воспламенения углеводородов при горении в окислительных средах с повышенным содержанием кислорода // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22. № 1. С. 14–18.

12. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Колебания пламени в вертикальном закрытом канале // Вестник Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2023. № 1. С. 38–46.

13. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Пламена со знакопеременной скоростью в смесях CH_4 /воздух, CH_4 /воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59. № 5. С. 3–12.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.24.48.005

UDC 532.593

© A.V. Pinaev, P. A. Pinaev, 2024

A.V. PINAEV

Doctor Phys.-Math. Sciences, Associate Professor

Chief Researcher,

M.A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk

e-mail: avpin@ngs.ru

P. A. PINAEV

Junior Researcher

M.A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk

e-mail: pavel_academ@mail.ru

COMBUSTION MODES IN MIXTURES CH_4 /AIR, CH_4 /AIR /COAL SLURRY IN A CLOSED VERTICAL CHANNEL COMBUSTION

The initiation and propagation of combustion waves in a long-closed vertical pipe in mixtures of CH_4 /air and CH_4 /air/coal suspension with a methane content of $\alpha = 5\div 7\%$ (vol.) during ignition from above has been studied combustion. The flame did not spread in gas and coal-gas mixtures with $\alpha \leq 5,5\%$ (vol.), the possibility of ignition and combustion modes of mixtures depend on the magnitude of α and the direction of the flame velocity vector relative to gravity.

Keywords: VERTICAL CHANNEL, COMBUSTION WAVE, METHANE, COAL SUSPENSION, TWO-FUEL HETEROGENEOUS MIXTURE, LOWER CONCENTRATION LIMIT OF FLAME PROPAGATION, FIRE SAFETY.

REFERENCES

1. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Combustion and detonation waves in mixtures of CH_4 /Ar, CH_4 / O_2 , O_2 gases with coal suspensions// Physics of combustion and explosion [Fizika goreniiya i vzryva]. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 56–68. [In Russ.].

2. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Detonation waves in methane/hydrogen/oxygen/coal suspension systems // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2022. Vol. 58. No. 4. P. 91–96. [In Russ.].
3. Moiseeva K. M., Pinaev A. V., Vasiliev A. A., Krainov A. Yu., Pinaev P. A. Study of combustion of coal-methane-air suspension in a long-closed channel // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2022. Vol. 58. No. 5. P. 54–63. [In Russ.].
4. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Structure of shock and detonation waves propagating in hybrid methane/hydrogen/air/coal dust mixtures // *Shock Waves*. 2023. Vol. 33. No. 6. P. 473–482.
5. Zabetakis M. G. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors // *Bulletin 627, U.S. Bureau of Mines*, 1965.
6. Handbook. Fire and explosion hazard of substances, materials and means of their extinguishing. Moscow: Chemistry, 1990. [In Russ.].
7. Lewis B., Elbe G. *Combustion, Flame and Explosions in Gases*. Moscow: Mir, 1968. 592 p. [In Russ.].
8. Bunev V. A., Korzhavin A. A., Senachin P. K. Analysis of the influence of various factors on the characteristics of methane explosion hazard // *Polzunovsky bulletin [Polzunovsky Vestnik]*. 2012. No. 3/1. P. 5–16. [In Russ.].
9. Babkin V. S., Zamashchikov V. V., Badalyan A. M., Krivulin V. N., Kudryavtsev E. A., Baratov A. N. Influence of pipe diameter on the limits of propagation of homogeneous gas flames // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 1982. Vol. 18. No. 2. P. 44–52. [In Russ.].
10. Shebeko Yu. N., Tsap V. N., Korolchenko A. Ya., Ivanov A. V., Bobkov A. S. Features of combustion of mixtures of combustible gases with freon vapors with flame propagation from top to bottom // *Physics of combustion and explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 1982. Vol. 18. No. 6. P. 27–30. [In Russ.].
11. Shebeko Yu. N., Korolchenko A. Ya., Ilyin A. B., Malkin V. L. Influence of freons on the concentration limits of ignition of hydrocarbons during combustion in oxidizing environments with increased oxygen content // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 1986. Vol. 22. No. 1. P. 14–18. [In Russ.].
12. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Flame oscillations in a vertical closed channel // *Bulletin of the Scientific Center of the VostNII for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]*. 2023. No. 1. P. 38–46. [In Russ.].
13. Pinaev A. V., Pinaev P. A. Flames with alternating velocity in CH₄/air, CH₄/air/coal suspension mixtures in a vertical closed tube // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2023. Vol. 59. No. 5. P. 3–12. [In Russ.].