

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.65.27.004

УДК 532.593

© А.В. Пинаев, П.А. Пинаев, 2023

А.В. ПИНАЕВ

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



П.А. ПИНАЕВ

младший научный сотрудник
Институт лазерной физики СО РАН,
г. Новосибирск
e-mail: pavel_academ@mail.ru



КОЛЕБАНИЯ ПЛАМЕНИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ

Исследованы волны горения, распространяющиеся со знакопеременной скоростью в метановоздушных и угле-метановоздушных смесях в вертикальной закрытой ударной трубе. Измерены скорости фронта пламени, профили давления и свечения, проведены оптические съёмки пламени. Результаты исследования могут быть полезны для разработки теоретических моделей и прогнозирования поведения пламени в угольных шахтах.

Ключевые слова: МЕТАНОВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, УГЛЕ-МЕТАНО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, ВОЛНА ГОРЕНИЯ, КОЛЕБАНИЯ ПЛАМЕНИ, ЗНАКОПЕРЕМЕННАЯ СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ, ОПТИЧЕСКИЕ СЪЁМКИ.

ВВЕДЕНИЕ

При угледобыче иногда происходят запыленные выбросы сжатого угольного газа, содержащего преимущественно метан. После перемешивания горючего газа с воздухом возможно случайное воспламенение смеси, формирование волны горения (ВГ), срыв потока газа угольной пыли со стенок штрека и распространение пламени по газоугольной взвеси.

В [1, 2] исследованы волны горения, взрывные и детонационные волны во взвесах

угля в смесях CH_4/Air и CH_4/O_2 , в [3–6] исследованы ВГ во взвесах $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$. Пламена в газовзвесах угольной пыли в трубах, угольных штреках распространяются преимущественно в турбулентном режиме. Теоретические расчёты скорости турбулентного пламени в газовзвесах отсутствуют. Качественно теория соответствует эксперименту лишь для ламинарного режима горения в газах. В [6] показана пригодность математической модели пламени, если в модели в качестве параметра используется экспериментальная скорость ВГ.

Зона реакции в ВГ и горячие продукты горения — это область с градиентом плотности, которая легче окружающего газа. В вертикальном закрытом канале при иницировании ВГ сверху пламя распространяется вниз, продукты горения стремятся всплыть вверх, благодаря этому могут возникнуть колебания пламени. Авторам не известны работы, в которых бы детально изучали такой процесс. В [7] лишь сообщается, что скорость распространения ВГ вверх по трубе (при поджигании газовой смеси снизу) больше, чем скорость распространения ВГ вниз (при поджигании смеси сверху). Целью работы является исследование волн горения в смесях метан/воздух и метан/воздух/взвесь угля в вертикальном закрытом канале.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в закрытой вертикальной ударной трубе длиной $L = 6,75$ м, диаметром $d = 70$ мм, при давлении $p_0 = 0,1$ МПа. Трубу вакуумировали и затем заполняли равномерно сверху смесью CH_4/Air из баллона через редуктор и контейнер с угольным порошком. Частицы угля, следуя за потоком газа, равномерно вместе с газом распределялись по объёму трубы. Среднеобъёмная концентрация частиц пыли в трубе $\rho \approx 0,10 \div 0,42$ кг/м³, ВГ инициировали сверху электрической искрой с энергией ≤ 1 Дж. Пламя регистрировали фотоумножителями ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 и пьезодатчиками Д1 ÷ Д8. Ошибки измерения усреднённой скорости пламени не превышали 20 %.

Съёмку ВГ осуществляли цифровой видеокамерой FASTCAM SA5 через щель 10×290 мм в оптической секции (начало щели от верха трубы $x = 523$ см). С помощью цифровых снимков обнаружены и исследованы колебания пламени, измерены

мгновенные скорости фронта ВГ в разных участках щели с погрешностью < 10 %. Частота съёмки $F = 250 \div 1000$ FPS, время выдержки $St = 4 \div 0,1$ мс.

Исследованы: стехиометрическая смесь $\text{CH}_4 + 9,524\text{Air}$ (9,5 % об. метана), бедная по горючему смесь $0,07\text{CH}_4 + 0,93\text{Air}$ (коэффициент избытка воздуха $h_{\text{Air}} \approx 39,5$ %) и смеси $(0,07 \text{CH}_4 + 0,93\text{Air})/\text{угольная взвесь}$. Стехиометрические смеси с углеродом и углем (в угле 78,4 % C [1, 2]): $0,07 \text{CH}_4 + 0,93 \text{Air} + 0,79 \text{C}$ и $0,07 \text{CH}_4 + 0,93 \text{Air} + 1,01 \text{Coal}$ (для этой смеси стехиометрическая масса угля в ударной трубе $m_{\text{st}} \approx 0,93$ г, $\rho_{\text{st}} \approx 35,6$ г/м³).

В опытах содержание угля в газовзвесьях превышало ρ_{st} в $2,8 \div 11,8$ раз. Массовое распределение частиц угля по фракциям размером $\delta = 0 \div 40, 40 \div 64, 64 \div 94, 94 \div 140, 140 \div 200$ мкм составляло 26,6, 9,3, 13,8, 16,6, 33,7 % соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

1. Профили сигналов в ВГ с датчиков и ФЭУ. Для всех смесей подъём сигналов на датчиках примерно совпадает с моментом прихода фронта пламени. В стех. смеси 9,5 % CH_4/Air на сигналах с ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 видны изменения яркости пламени с частотами $f1 \approx 50 \pm 2, f2 \approx 54 \pm 4, f3 \approx 61 \pm 18$ Гц, длительность свечения пламени $\Delta\tau_{\text{св}} \approx 80\text{--}300$ мс. Для смеси 7 % CH_4/Air интенсивность свечения в ВГ уменьшается по сравнению со стехиометрической смесью в 10–20 раз, длительность свечения $\Delta\tau_{\text{св}} \approx 50\text{--}60$ мс, $f1 \approx 45 \pm 8, f2 \approx 33 \pm 3, f3 \approx 43 \pm 3$ Гц.

В газовзвесьях 7 % $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$ $\Delta\tau_{\text{св}} \approx 100\text{--}150$ мс, $f1 \approx 31 \pm 8, f2 \approx 29,5 \pm 6,5, f3 \approx 39 \pm 7$ Гц; яркость пламени возрастает в 50–100 раз (рис. 1) по сравнению с ВГ в газовой смеси 7 % CH_4/Air .

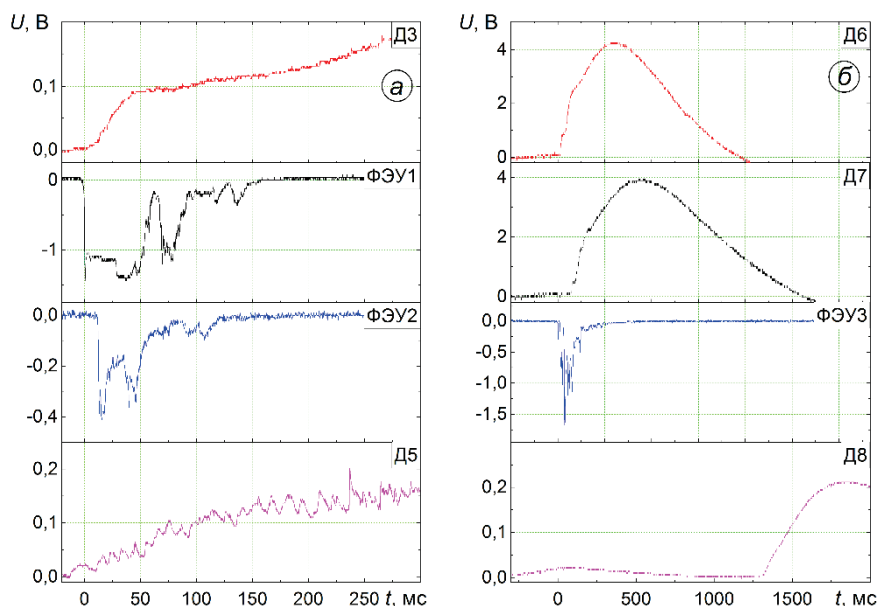


Рис. 1. Профили сигналов с пьезодатчиков и ФЭУ в ВГ в гетерогенной смеси (7 % CH_4 + 93 % Air)/Уголь, $\rho \approx 114 \text{ г/м}^3$. Расстояния от начала трубы до Д1÷Д8 $x_1 = 79, 91, 182, 5, 286, 298, 529, 549, 606, 5 \text{ см}$ соответственно; ФЭУ1 расположен напротив Д3, ФЭУ2 – на $x = 248, 5 \text{ см}$, ФЭУ3 — напротив Д6 (вблизи начала оптической щели)

На рис. 2 приведены кривые 1÷3 зависимости частот колебаний пламени $f_1 \div f_3$ от координаты x вдоль трубы, полученные с помощью ФЭУ. Из-за трудности выделения основных частот колебаний, ошибки их измерения достигают 30–50 %. Кривая 1 для смеси 9,5 % CH_4/Air лежит выше кривых 2 и 3. Частоты колебаний пламени с расстоянием увеличиваются из-за возрастания средней температуры газа в трубе по мере сгорания смесей. В газовзвесьях 7 % $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$

частоты 3 меньше, чем 1 и 2 для газовых смесей. Этот факт можно объяснить более низкой скоростью распространения звуковых возмущений в газовзвесьях по сравнению с газовыми смесями. Используя выражения для скорости звука в газовзвесьях [8], для $\rho \approx 0,1 \div 0,42 \text{ кг/м}^3$ получим оценку равновесной скорости звука $C_e \approx 326 \div 283 \text{ м/с}$. Значения C_e меньше скорости звука в газе без пыли при локальном термодинамическом равновесии $C_1 \approx 343 \text{ м/с}$.

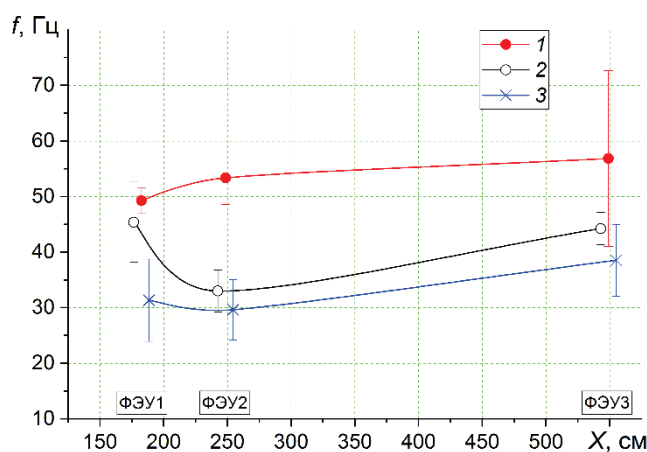


Рис. 2. Частоты пульсаций ВГ по длине ударной трубы, 1 — $\text{CH}_4 + 9,524 \text{ Air}$; 2 — 7 % $\text{CH}_4 + 93 \text{ % Air}$; 3 — (7 % $\text{CH}_4 + 93 \text{ % Air}$)/Уголь, $\rho \approx 0,1 \div 0,42 \text{ г/м}^3$.

2. Усреднённые скорости ВГ по длине трубы. На начальном участке трубы в стех. смеси наибольшая скорость ВГ $D \approx 31$ м/с. В конце трубы скорость ВГ во всех смесях уменьшается до значений $D \approx 2-3$ м/с.

Выделены четыре группы ρ в смесях 7 % $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$: $\rho = 0,1 - 0,11$ (I); $0,18-0,22$ (II); $0,27-0,32$ (III); $0,36-0,42$ (IV) кг/м³. В смесях (I) скорость убывает от $D \approx 32 \pm 15$ м/с в начале трубы до $D \approx 0,8-3,8$ м/с в конце трубы. При немонотонном характере распространения пламени в группах II ÷ IV скорость ВГ убывает к концу трубы до $D \approx 0,5-1,5$ м/с. С увеличением ρ при $1,75 < x < 2,50$ м скорость пламени либо временно стабилизируется (II, III), либо возрастает (IV). После $x > 2,5$ м средняя скорость пламени падает, и в конце канала она примерно постоянная. Сравнительно большие значения D в начале канала обусловлены расширением области продуктов сгорания газовой смеси при быстром локальном повышении температуры после воспламенения. Усреднённая скорость ВГ в конце трубы практически не зависит от ρ .

3. Оптическая съёмка пламени в смесях CH_4/Air . При изучении ВГ с помощью видеокамеры во всех смесях обнаружено возвратно-поступательное движение пламени по длине трубы. Колебания пламени возникают из-за двух конкурирующих между собой процессов. После поджигания смеси ВГ распространяется вниз по свежей смеси, но одновременно горячие более лёгкие продукты реакции всплывают вверх, увлекая за собой на некоторое время фронт пламени, свежую смесь и останавливая волну. Затем цикл

повторяется, и волна горения перемещается вниз по свежей смеси.

Свечение за фронтом ВГ в смеси 7 % CH_4/Air слабое, неравномерное, яркие треки на снимках (рис. 3а) — отдельные частицы пыли, которые в небольшом количестве всегда находятся в газе либо на стенках трубы. Аналогичные колебания ВГ наблюдаются в стех. смеси 9,5 % CH_4/Air , где свечение пламени более яркое.

Кадры на рис. 3а выбраны в моменты остановок ВГ. Передний фронт пламени неровный, свечение неоднородное, протяжённость светящейся области 5–20 см. Кривые мгновенных значений скорости V фронта ВГ в оптической секции построены в зависимости от координаты l (рис. 3б) и времени t (рис. 3в). Кривая 1 скорости $V(t)$, построенная по точкам с шагом $h = 4$ мс, имеет более простой вид, чем $V(l)$ (рис. 3б, в). Здесь и далее погрешности измерения скорости ВГ 10 %, частоты колебаний пламени 5 %.

Для отслеживания траекторий скорости на них приведены целые числа $n = 1 + t_n/h$ (где $n \geq 1$, $t_n \geq 0$ — время от начального кадра ВГ). Скорость фронта ВГ при движении вниз положительная, при движении вверх отрицательная. Площадь участков с положительной скоростью больше, чем с $V < 0$. Мгновенные значения скорости фронта ВГ здесь — $10 \text{ м/с} \leq V \leq +14 \text{ м/с}$, максимальные положительные скорости ВГ больше, чем отрицательные. Усреднённая по длине щели скорость пламени (2) $\bar{V}(l) = \bar{V}(t) \approx +(0,5-2) \text{ м/с}$. Период колебаний ВГ $T \approx 29,4$ мс, $f \approx 34$ Гц. В наших опытах для смеси 7 % $\text{CH}_4 + 93$ % Air в оптической секции $f \approx 34 \pm 2$ Гц.

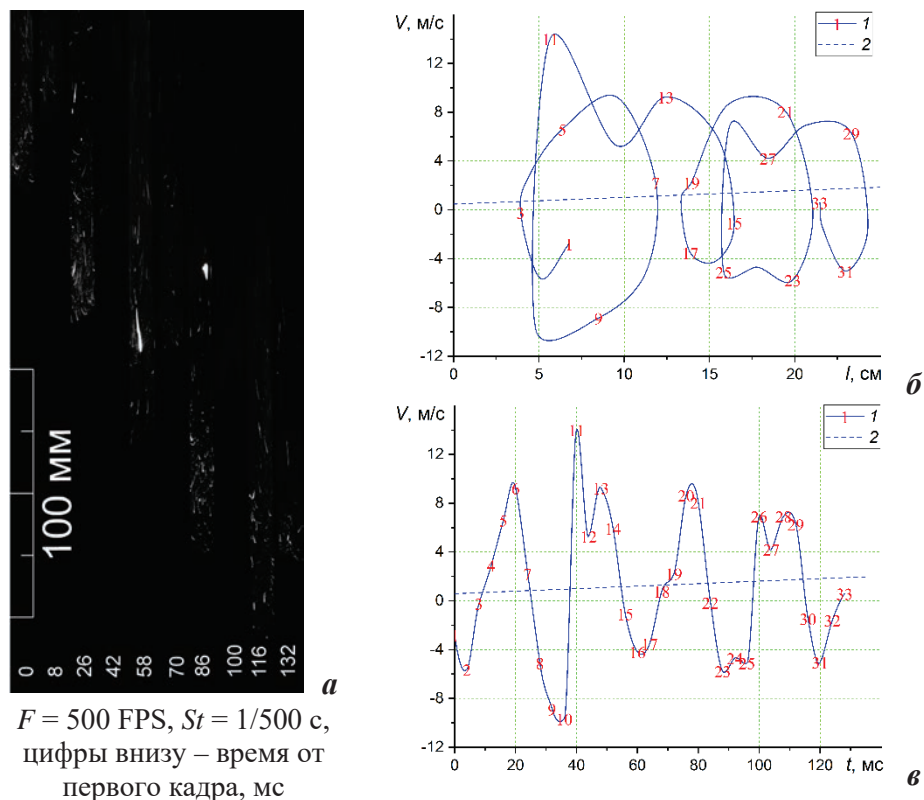


Рис. 3. Цифровые снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки), (а); скорости фронта ВГ в оптической секции в зависимости от расстояния l (б) и времени t (в).

1 — скорости фронта ВГ, измеренные с шагом $h = 4 \text{ мс}$, 2 — усредненные скорости фронта ВГ.

Газовая смесь 7 % $\text{CH}_4 + 93 \text{ \% Air}$, $f \approx 34 \text{ Гц}$.

4. Оптическая съёмка пламени в смесях $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{уголь}$. Интенсивность свечения в смесях (7 % $\text{CH}_4 + 93 \text{ \% Air}$)/Уголь на 1–2 порядка выше, чем в газовых смесях CH_4/Air . Поэтому частота съёмки была повышена до $F = 1000 \text{ FPS}$, а время выдержки уменьшено до

$St = 1/3000 \div 10^{-4} \text{ с}$. Цифровые снимки свечения пламени и кривые скоростей фронта ВГ $V(l)$ и $V(t)$ приведены на рис. 4 и рис. 5. Все особенности распространения ВГ со знакопеременной скоростью в гетерогенной смеси сохраняются.

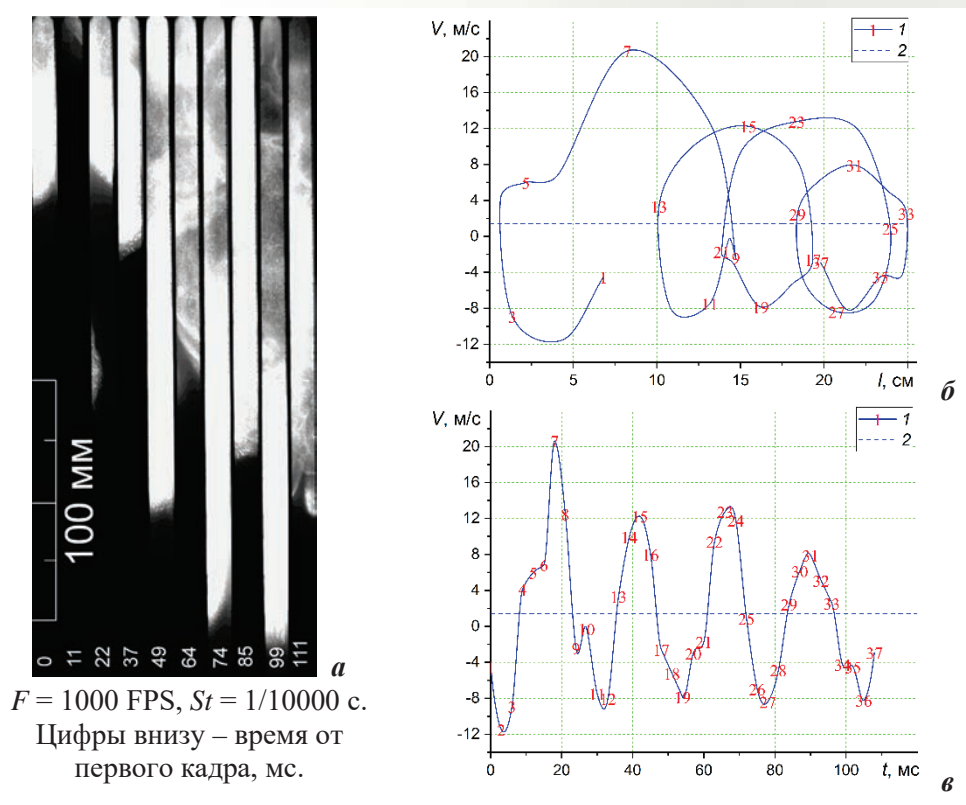


Рис. 4. Цифровые снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки) (а); скорости фронта ВГ в оптической секции в зависимости от расстояния l (б) и времени t (в).

1 — скорости фронта ВГ, измеренные с шагом $h = 3 \text{ мс}$, 2 — усредненные скорости фронта ВГ.

Смесь 7 % об. CH_4 /взвесь угля, $\rho \approx 268 \text{ г/м}^3$, $f \approx 39,8 \text{ Гц}$

Фронт пламени неровный, протяжённость яркой части пламени изменяется во времени и составляет 20–30 см, свечение в ВГ неоднородно. Максимальные значения скорости меняются в диапазоне $-12 \text{ м/с} \leq V \leq +20 \text{ м/с}$. Пламя распространяется вниз по трубе со

средней скоростью $\bar{V} \approx +1,5 \text{ м/с}$ (см. рис. 4).

На рис. 5а на переднем фронте пламени различаются неоднородные струи. На графиках зарегистрированы максимальные скорости $V \approx +45 \text{ м/с}$ и $V \approx -10 \text{ м/с}$.

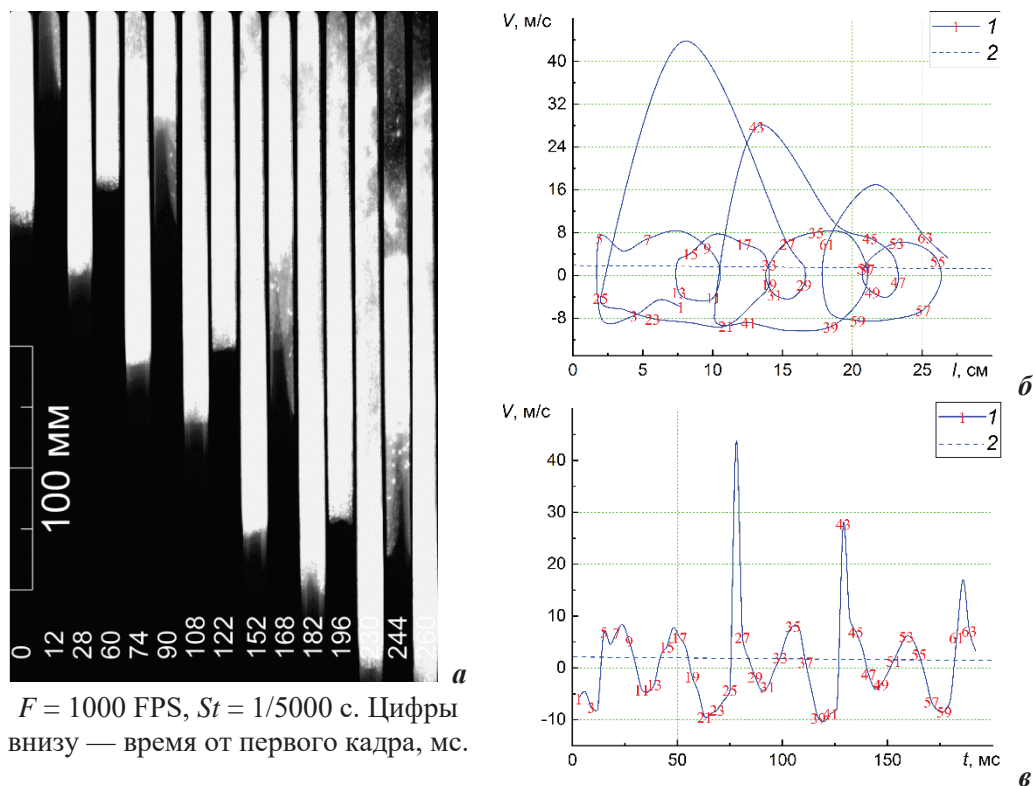


Рис. 5. Цифровые снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки) (а); скорости фронта ВГ в оптической секции в зависимости от расстояния l (б) и времени t (в). l — скорости фронта ВГ, измеренные с шагом $h = 3$ мс, 2 — усредненные скорости фронта ВГ. Смесь (7 % $\text{CH}_4 + 93$ % Air)/Уголь, $\rho \approx 318$ г/м³, $f \approx 35,7$ Гц.

При движении ВГ вниз фронт горения более ровный, чем при обратном направлении. В процессе движения ВГ вверх и в моменты остановок ($t = 12, 90, 168, 244$ мс) пламя у стенок замедляется, фронт ВГ искривляется (рис. 5).

ВЫВОДЫ

В гетерогенных смесях $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$ яркость пламени возрастает примерно на 2 порядка по сравнению с волной горения в газовых смесях. Горение угольных частиц повышает энерговыделение, но слабо влияет на скорость ВГ. В исследованных смесях усреднённая скорость пламени по длине трубы уменьшается от нескольких десятков м/с до значений порядка 1 м/с.

Оптическая съёмка пламени показала, что волны горения в смеси 7 % $\text{CH}_4 + 93$ % Air, распространяясь вниз, периодически меняют направление движения с частотой $f \approx 32 - 36$ Гц. Мгновенные значения скорости фронта пламени по длине щели находятся в диапазоне

от +14 м/с до -10 м/с. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные, усреднённая по длине щели скорость пламени $\bar{V} \approx +(0,5-2)$ м/с. Фронт пламени неровный, протяженность светящейся области пламени 5–20 см.

В смесях (7 % $\text{CH}_4 + 93$ % Air)/Уголь на фронте пламени различаются неоднородные струи, протяжённость светящейся области ВГ 20–30 см, и она изменяется во времени, свечение пламени неоднородно. Мгновенные скорости ВГ изменяются от +45 м/с до -12 м/с, средняя скорость пламени в оптической секции $\bar{V} \approx +(1,5-2)$ м/с, частота колебаний пламени $f \approx 36-40$ Гц

В вертикальной трубе возвратно-поступательное движение волн горения со знакопеременной скоростью обусловлено действием выталкивающей силы на продукты горения.

Источник финансирования: 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. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 4. С. 5–16.
2. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Волны горения и детонации в смесях газов CH_4/Air , CH_4/O_2 , O_2 с взвесями каменного угля // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 6. С. 56–68.
3. 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.
4. Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong. Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks // Combustion Science and Technology. 2021. V. 193. No. 10. P. 1734–1746.
5. Дементьев А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газовзвеси с экспериментальными данными // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 6. С. 1538–1546.
6. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной взвеси угольной пыли // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 5. С. 1328–1334.
7. 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.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968. 592 с.
9. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с. (Dynamics of Multiphase Media: Vol. 1–2, 507 p. (1990). Hemisphere Publ. Corp New York, United States. ISBN: 9780891163282).

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.65.27.004

UDC 532.593

© A.V. Pinaev, P.A. Pinaev, 2023

A.V. PINAEV

Doctor Phys.-Math. Sciences, Associate Professor
Chief Researcher,
M.A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS
e-mail: avpin@ngs.ru

P.A. PINAEV

Junior Researcher
Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk
e-mail: pavel_academ@mail.ru

FLAME FLUCTUATIONS IN VERTICAL CLOSED CHANNEL

Combustion waves propagating at alternating speed in methane-air and coal-methane-air mixtures in a vertical closed shock tube were studied. Flame front velocities, pressure and glow profiles were measured, optical flame surveys were carried out. Study findings could be useful for developing theoretical models and predicting flame behavior in coal mines.

Keywords: METHANE-AIR MIXTURE, COAL-METHANE-AIR MIXTURE, COMBUSTION WAVE, FLAME VIBRATIONS, ALTERNATING FLAME VELOCITY, OPTICAL SURVEYS.

REFERENCES

1. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Study of the comparative chemical activity of methane and suspended coal particles during combustion, explosions and detonation // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]. 2019. No. 4. P. 5–16. [In Russ.].
2. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Combustion and detonation waves in mixtures of gases CH_4/Ar , CH_4/O_2 , O_2 with coal suspensions // Physics of combustion and explosion [Fizika gorenija i vzryva]. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 56–68. [In Russ.].
3. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Detonation waves in methane/hydrogen/oxygen/coal suspension systems // Physics of combustion and explosion [Fizika gorenija i vzryva]. 2022. Vol. 58. No. 4. P. 91–96. [In Russ.].
4. Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong. Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks // Combustion Science and Technology. 2021. V. 193. No. 10. P. 1734–1746.
5. Dementiev A.A., Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Paleev D.Yu. Comparison of simulation results of flame propagation in hybrid gas suspension with experimental data // Engineering and Physics Journal [Inzhenerno-fizicheskij zhurnal]. 2016. Vol. 89. No. 6. P. 1538–1546. [In Russ.].
6. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Simulation of spark ignition of bidispersed air suspension of coal dust // Engineering and Physics Journal [Inzhenerno-fizicheskij zhurnal]. 2018. T. 91. No. 5. P. 1328–1334. [In Russ.].
7. Moiseeva K.M., Pinaev A.V., Vasiliev A.A., Krainov A.Yu., Pinaev P.A. Study of combustion of carbon methane-air suspension in a long-closed channel // Physics of combustion and explosion [Fizika gorenija i vzryva]. 2022. T. 58. No. 5. P. 54–63. [In Russ.].
8. Lewis B., Elbe G. Combustion, flames and gas explosions. M.: World, 1968. 592 p. [In Russ.].
9. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. PART 1. M.: Science, 1987. 464 p.