

УДК 532.593

ПЛАМЕНА СО ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ В СМЕСЯХ МЕТАН/ВОЗДУХ, МЕТАН/ВОЗДУХ/ВЗВЕСЬ УГЛЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ

А. В. Пинаев, П. А. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, avpin@ngs.ru

Представлены результаты экспериментального исследования пламен, распространяющихся со знакопеременной скоростью, в метановоздушных и углеметановоздушных смесях в вертикально расположенной закрытой трубе при концентрациях угольной пыли $0.10 \div 0.42 \text{ кг/м}^3$. Результаты исследования могут быть полезны для разработки моделей горения и оценки динамического и теплового воздействия при горении метановоздушной угольной взвеси в угольных шахтах.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, угольная газовзвесь, волна горения, знакопеременная скорость пламени, оптическая съемка пламени, пульсации скорости пламени.

DOI 10.15372/FGV2022.9216

ВВЕДЕНИЕ

В воздухе действующих угольных шахт находятся взвешенные угольные частицы; на стенках штреков, оборудовании и механизмах постепенно накапливается слой угольной пыли. Иногда происходят залповые выбросы сжатого угольного газа (преимущественно метана) из угольной породы. Вероятны следующие этапы развития катастроф в шахтах: возгорание угольной пыли при трении в механизмах, искровое воспламенение метановоздушной смеси, последующее формирование волны горения или взрывной волны, срыв потоком газа угольной пыли со стенок выработки и образование взвеси угольной пыли, распространение пламени, взрывной или детонационной волны по угольной газовзвеси.

Распространение пламени в гетерогенных смесях метан/воздух/взвесь угля менее изучено, чем в гомогенных смесях метан/воздух. В [1, 2] экспериментально исследованы волны горения, взрывные и детонационные волны в системах метан/воздух/взвесь угля, метан/кислород/взвесь угля. В [3, 4] экспериментально и численно исследовано распространение пламени в газовзвесьях угольной пыли. В газовзвесьях угольной пыли качественное соответствие теоретической и экспериментальной скоростей пламени существует лишь для ламинарного режима горения [4, 5].

Пламена в газовзвесьях угольной пыли в длинных трубах, выработках угольных шахт распространяются преимущественно в турбулентном режиме. Теоретические расчеты скорости турбулентного пламени в газовзвесьях отсутствуют. Для быстрых практических расчетов взрывов газа с угольной пылью в работе [6] в качестве параметра в математической модели использовано значение экспериментальной скорости распространения пламени и показана пригодность такой модели.

По-видимому, в вертикальном закрытом канале наиболее выражено влияние гравитации на распространение пламени. Поясним это на таком примере. Представим, что мы инициировали волну горения в химически активной смеси слабой искрой сверху вертикального канала. Тогда фронт пламени и зона реакции начнут распространяться вниз, но горячие (более легкие) продукты реакции будут стремиться всплыть вверх, увлекая за собой и фронт пламени. Одновременно из зоны реакции будут распространяться звуковые возмущения, которые будут отражаться от торцов трубы. Эти процессы могут привести к возникновению продольных колебаний пламени, а волна горения будет распространяться со знакопеременной скоростью. Авторам не известны работы, в которых был бы описан и детально изучен такой процесс в газовых смесях и газовзвесьях угольных пылей. О влиянии гравитации на волны горения в вертикальных трубах в работе [7] приводятся следующие сведения: при поджигании газовой смеси снизу трубы скорость

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

© Пинаев А. В., Пинаев П. А., 2023.

распространения волны горения вверх больше, чем при распространении волны вниз по трубе при поджигании смеси сверху.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать распространение пламени в системах метан/воздух и метан/воздух/взвесь угля при различных концентрациях угольной взвеси в вертикальном закрытом канале.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили на закрытой вертикальной ударной трубе длиной $L = 6.75$ м, диаметром $d = 0.07$ м ($L/d \approx 96$). Трубу вакуумировали и заполняли смесью CH_4 /воздух из баллона объемом 40 л через редуктор до давления $p_0 \approx 0.1$ МПа. Для создания газовзвесей CH_4 /воздух/уголь смеси CH_4 /воздух подавали равномерно через контейнер с угольными частицами и распылитель сверху трубы. Среднеобъемная концентрация частиц пыли в трубе $\rho \approx 0.10 \div 0.42$ кг/м³. Исследуемые смеси инициировали сверху электрической искрой с энергией меньше 1 Дж.

Для фиксации пламени использовали фотоумножители (ФЭУ) и пьезодатчики Д1 ÷ Д8. Профили свечения с ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 и сигналы с Д1 ÷ Д8 регистрировали 4-лучевыми осциллографами Tektronix TDS2014. Конструкция и методы тарирования датчиков описаны в [8, 9]. Ошибки измерения осредненной скорости пламени с помощью ФЭУ и датчиков не превышали 20 %. Расстояние от начала трубы до датчиков Д1 ÷ Д8 составляло $x_i = 79, 91, 182.5, 286, 298, 529, 549, 606.5$ см соответственно. ФЭУ1 был расположен напротив датчика Д3, ФЭУ2 — на расстоянии $x = 248.5$ см, ФЭУ3 — напротив Д7.

Съемку волны горения осуществляли скоростной монохромной видеокамерой FASTCAM SA5 через щель 10×290 мм оптической секции трубы. Координата начала щели — $x = 522.5$ см. Частота съемки $F = 250 \div 1\,000$ кадр/с, время выдержки $St = 4 \div 0.1$ мс. По снимкам с видеокамеры были проанализированы все пульсации пламени в оптической секции и измерены мгновенные скорости фронта волны горения от координаты или от времени с погрешностью менее 10 %.

В экспериментах с угольными взвесями после каждого опыта взвешивали оставшийся в контейнере порошок, а также осевшую угольную пыль на нижнем фланце и на стенках тру-

бы (путем взвешивания ветоши до и после протирки трубы). Эти измерения позволили установить концентрацию частиц пыли в опыте и долю сгоревшего угля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В работе исследованы стехиометрическая смесь $\text{CH}_4 + 9.524\text{Air}$ (9.5 % (об.) метана), бедная по горючему смесь $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ (7 % (об.) метана) и смеси $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})$ /угольная взвесь. 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. Данные о фракционном составе получены с использованием набора сит «мокрым» способом (со струей воды).

В бедной по метану смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ коэффициент избытка воздуха $h \approx 39.5$ %. Смеси с углеродом $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air} + 0.79\text{C}$ и углем $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air} + 1.01\text{уголь}$ — стехиометрические (здесь в угле содержится 78.4 % углерода [1, 2]). Отсюда следует, что необходимая для стехиометрии масса угля в трубе $m_{st} \approx 0.93$ г ($\rho_{st} \approx 35.6$ г/м³). В наших опытах содержание угля в газовзвесах превышало стехиометрическую концентрацию в $2.8 \div 11.8$ раза.

Особенности инициирования пламени в смесях

Стехиометрическая смесь CH_4 /воздух и смеси $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})$ /уголь легко инициируются искрой, и пламя устойчиво распространяется по трубе.

Для лучшего воспламенения бедной по метану смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ сверху добавляли $0.5 \div 2$ л стехиометрической смеси CH_4 /воздух. По смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ лучше распространяется пламя, если в трубе изначально присутствует немного угольной пыли, $\rho_0 \leq 1$ г/м³. Такие твердые частицы играют роль горячих точек и поддерживают горение газовой смеси. С увеличением числа опытов количество частиц пыли в трубе уменьшается, свечение в волне горения слабеет и пламя затухает.

Профили сигналов от датчиков и ФЭУ в волне горения

Пьезодатчики были использованы как индикаторы давления и частично теплового воздействия для фиксации волны горения. Дат-

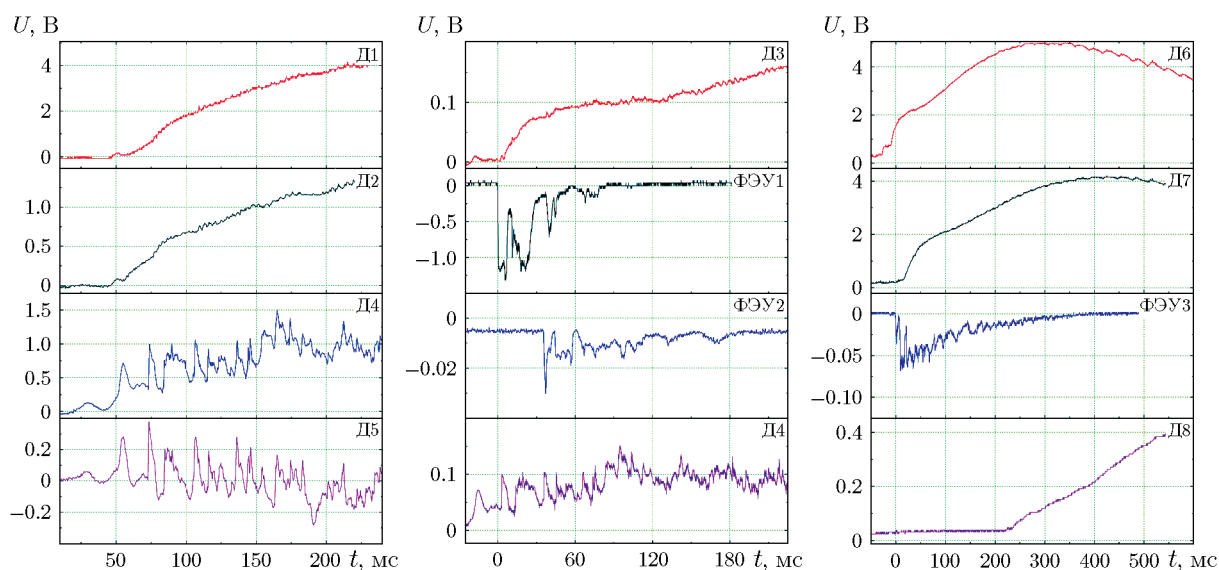


Рис. 1. Профили сигналов от пьезодатчиков и ФЭУ в волне горения стехиометрической газовой смеси $\text{CH}_4 + 9.524\text{Air}$

чики данной конструкции вырабатывают электрический сигнал за счет деформации пьезоэлемента при силовом действии со стороны газа и при длительном (более 1 мс) нагреве торцевой поверхности датчика. Поэтому шкала сигналов приведена в единицах измерения В/дел. Характерные осциллограммы сигналов в волне горения стехиометрической смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$ представлены на рис. 1. Из анализа осциллограмм следует, что подъем сигналов на датчиках начинается примерно в момент прихода фронта пламени. Датчики Д4 и Д5 регистрируют неустойчивость пламени (рис. 1,а). На профилях сигналов от ФЭУ1 и ФЭУ2 видны изменения яркости пламени с частотами относительно стенок трубы $f_1 \approx 50 \pm 2$ Гц, $f_2 \approx 54 \pm 4$ Гц (рис. 1,б), что указывает на наличие попутных и встречных потоков газа. В нижней части трубы на ФЭУ3 частота колебаний возрастает до $f_3 \approx 61 \pm 18$ Гц. Длительность свечения в пламени для стехиометрической смеси $\Delta\tau \approx 80 \div 300$ мс.

Характерные осциллограммы сигналов в волне горения смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ подобны осциллограммам на рис. 1, пульсационный характер сигналов с датчиков и ФЭУ сохраняется, но интенсивность свечения уменьшается по сравнению со стехиометрической смесью в $10 \div 20$ раз, длительность свечения $\Delta\tau \approx 50 \div 60$ мс. На ФЭУ1 и ФЭУ2 $f_1 \approx 45 \pm 8$ Гц, $f_2 \approx 33 \pm 3$ Гц, на ФЭУ3 частота возрастает до $f_3 \approx 43 \pm 3$ Гц.

В гетерогенных смесях $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{уголь}$ по сравнению с волной горения в газовой смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ яркость пламени возрастает в $50 \div 100$ раз благодаря горению частиц угля (рис. 2), $\Delta\tau \approx 100 \div 150$ мс. Здесь $f_1 \approx 31 \pm 8$ Гц, $f_2 \approx 29.5 \pm 6.5$ Гц, в нижней части трубы частота колебаний возрастает до $f_3 \approx 39 \pm 7$ Гц. В отличие от ударных и детонационных волн, отраженная от торца трубы волна горения отсутствует.

Кривые 1–3 зависимости частоты колебаний пламени $f_1 \div f_3$ от координаты вдоль трубы, полученные с помощью ФЭУ, приведены на рис. 3. Кривая 1 для стехиометрической смеси лежит выше кривых 2 и 3. Во всех смесях частота колебаний пламени увеличивается с расстоянием, по-видимому, из-за возрастания средней температуры газа в трубе по мере сгорания смесей. В фиксированных точках для всех смесей заданного состава наблюдается разброс частоты f_i (см. рис. 3). Например, в бедной по метану смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$ в трех точках измерения $f_2 \approx 30 \div 53$ Гц (кривая 2). Приведенные на рис. 3 данные носят скорее качественный характер, поскольку ошибки определения частот достигают $30 \div 50$ %, и не всегда можно выделить основные частоты колебаний по сигналам с ФЭУ.

Сделаем простую оценку частоты колебаний пламени, полагая, что зона реакции волны горения является источником звуковых воз-

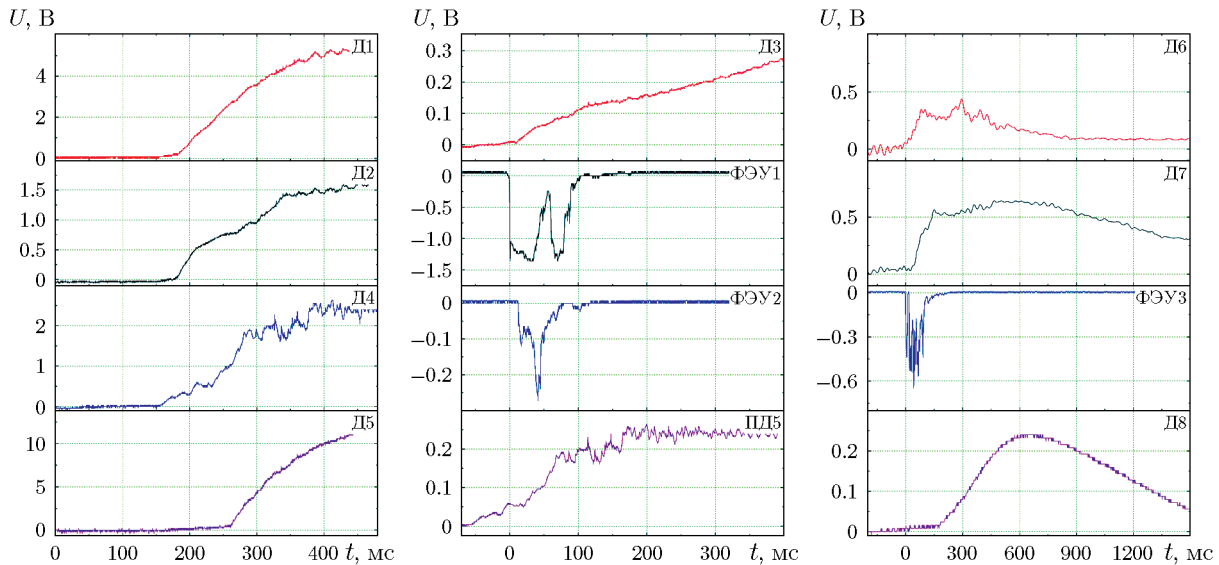


Рис. 2. Профили сигналов от пьезодатчиков и ФЭУ в волне горения гетерогенной смеси ($\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$)/уголь ($\rho \approx 114 \text{ г/м}^3$)

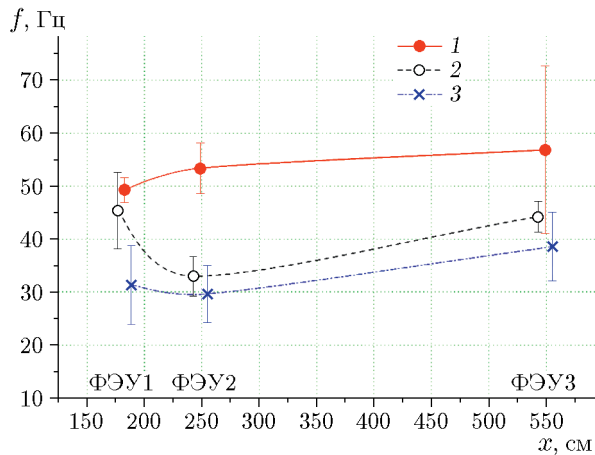


Рис. 3. Частота пульсаций в волне горения по длине ударной трубы:

1 — $\text{CH}_4 + 9.524\text{Air}$, 2 — $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$, 3 — $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{уголь}$, $\rho \approx 0.10 \div 0.42 \text{ г/м}^3$

мушений. В момент инициирования (пламя вверх) средняя скорость звука в трубе $c \approx 340 \text{ м/с}$, период собственных продольных колебаний $T \approx 2L/c \approx 40 \text{ мс}$, частота $f \approx 25 \text{ Гц}$. По мере движения волны вниз и сгорания газовой смеси, температура и средняя скорость звука в газе возрастают, поэтому частота колебаний пламени должна увеличиваться.

В угольных взвесьях, несмотря на более яркое свечение (и более высокие температуры пламени), кривая 3 лежит ниже кривых 1, 2 для газовых смесей. Этот факт можно объяс-

нить более низкой скоростью распространения звуковых возмущений в газозвесьях по сравнению с газовыми смесями.

Оценим скорость звука в газозвесьях. Газозвесь — двухфазная среда с дисперсией, поэтому скорость звука C зависит от частоты ω и объемной плотности взвеси $\rho_2 \equiv \rho$, т. е. $C = C(\omega, \rho_2)$. Рассмотрим два предельных случая: $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$. Первому случаю соответствует замороженная скорость звука C_f , второму — равновесная скорость звука C_e . Для оценки значений C_f и C_e воспользуемся выражениями из [10].

Поскольку доля сгоревшего угля и объем твердой фазы малы, будем считать, что фазовые переходы отсутствуют и $\alpha_2 = V_2/(V_1 + V_2) = \rho_2/\rho_2^0 \ll 1$ (где V_1 и V_2 — объемы газовой и твердой фаз, ρ_2^0 — плотность вещества твердой частицы, индексы 1 и 2 относятся соответственно к газовой фазе и к взвеси частиц). Тогда замороженная скорость звука в аэрозвеси $C_f = C_1 = \sqrt{\gamma_1 p_1^0 / \rho_1^0}$, где C_1 — скорость звука в газе без пыли при локальном термодинамическом равновесии. Здесь γ_1 , p_1^0 , ρ_1^0 , T_{10} — соответственно показатель адиабаты, давление, плотность и температура газа перед фронтом волны горения. При $\gamma_1 \approx 1.4$, $p_1^0 = 0.1 \text{ МПа}$, $\rho_1^0 \approx 1.2 \text{ кг/м}^3$, $T_{10} = 293 \text{ К}$ будем иметь $C_1 \approx 343 \text{ м/с}$.

Искомая равновесная скорость звука в

аэровзвеси определяется выражением

$$C_e = C_1 \sqrt{\gamma_e / (\gamma_1 (1 + \tilde{\rho}_2))},$$

где $\gamma_e = c_p / c_V$ — равновесный показатель адиабаты, $c_p = (c_1 + c_2 \tilde{\rho}_2) / (1 + \tilde{\rho}_2)$, $c_V = (c_1 - R_1 + c_2 \tilde{\rho}_2) / (1 + \tilde{\rho}_2)$, $c_1 \equiv c_{p1}$ — удельная теплоемкость газа перед пламенем, $R_1 = R / \mu_1$, $R = 8.31 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль · К) — универсальная газовая постоянная, μ_1 — молярная масса газа, c_2 — удельная теплоемкость угля, $\tilde{\rho}_2 = \rho_2 / \rho_1^0$. При $\mu_1 \approx 29$ кг/кмоль, $c_1 \approx 10^3$ м²/(с² · К), $c_2 \approx 750$ м²/(с² · К), $\rho_1^0 \approx 1350$ кг/м³, $\rho_2 \approx 0.1 \div 0.42$ кг/м³ получим $\alpha_2 \approx (0.7 \div 3) \cdot 10^{-4} \ll 1$, $\gamma_e \approx 1.37 \div 1.29$, $C_e \approx 326 \div 283$ м/с.

Заметим, что при тех же условиях (отсутствуют фазовые переходы и $\alpha_2 \ll 1$) существует второй подход [10] для описания равновесной схемы в виде калорически совершенного газа. Такая модель идеального газа для смеси в целом соответствует размеру частиц $\delta \rightarrow 0$. Замороженная схема соответствует случаю $\delta \rightarrow \infty$, когда частицы не оказывают влияния на газ, а газ — на частицы (частицы движутся прямолинейно и не меняют своей температуры). Выражения для равновесной и замороженной скоростей звука при этом совпадают с формулами для C_e и C_f при $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$.

Поскольку $f \sim C_e$, то из данных, приведенных на рис. 3, имеем среднее значение отношения $f_3/f_2 \approx 0.8$, из наших оценок $f_3/f_2 \sim C_e/C_f \approx 0.95 \div 0.83$. То есть совпадение отношения частот и скоростей звука в угольных газовзвесах и газовых смесях удовлетворительное.

Осредненные по длине трубы скорости волны горения

Результаты измерения осредненных скоростей пламен D с доверительными интервалами приведены на рис. 4. На начальном участке трубы наибольшая скорость волны горения регистрируется в стехиометрической смеси 1 ($D \approx 31$ м/с). В конце трубы пламя стабилизируется, скорости волны в смесях 1–3 примерно одинаковы ($D \approx 2 \div 3$ м/с). Добавление в бедную газовую смесь частиц угля практически не влияет на скорость пламени D .

На рис. 5 представлены зависимости осредненной скорости пламени D от координаты x для четырех групп концентрации пыли

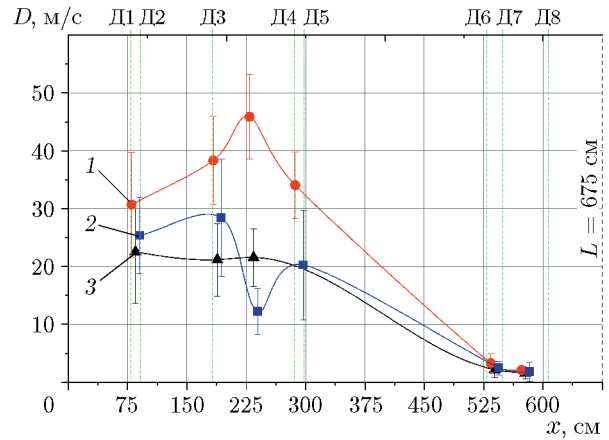


Рис. 4. Осредненные на участках измерения скорости волны горения по длине ударной трубы:

1 — $\text{CH}_4 + 9.524\text{Air}$, 2 — $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$, 3 — $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{уголь}$, $\rho \approx 0.10 \div 0.42$ кг/м³

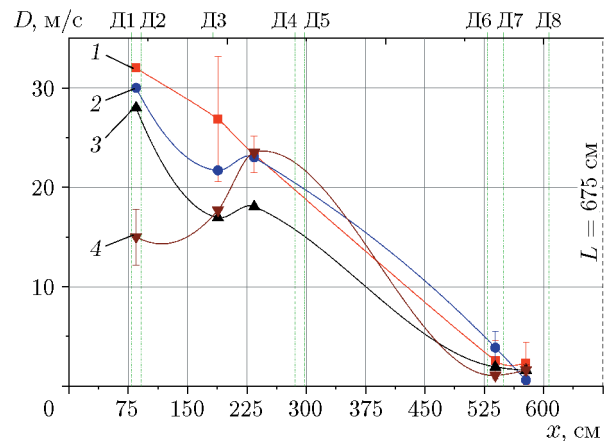


Рис. 5. Осредненные на участках измерения скорости волны горения по длине ударной трубы в смесях $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{уголь}$:

1 — $\rho = 0.1 \div 0.11$ кг/м³, 2 — $\rho = 0.18 \div 0.22$ кг/м³, 3 — $\rho = 0.27 \div 0.32$ кг/м³, 4 — $\rho = 0.36 \div 0.42$ кг/м³

ρ (здесь в нескольких точках приведены доверительные интервалы). В смесях (1) с меньшей концентрацией ρ скорость D убывает от 32 ± 15 до $0.8 \div 3.8$ м/с в конце трубы. При немономонном характере распространения пламени в группах 2–4 с большей концентрацией ρ к концу трубы скорость волны убывает до $D \approx 0.5 \div 1.5$ м/с.

С увеличением концентрации пыли ρ скорость пламени при $1.75 < x < 2.50$ м либо временно стабилизируется (2, 3), либо возрастает (4). При $x > 2.5$ м средняя скорость пламени падает, и в конце канала она примерно

постоянная. Большие значения D на начальном участке канала обусловлены расширением области продуктов сгорания газовой смеси при быстром локальном повышении температуры. Осредненная скорость пламени в конце трубы слабо зависит от массовой концентрации угольной пыли.

Оптическая съемка пламени в смесях метан/воздух

Максимальное время выдержки на камере ограничено величиной $1/F$. При сравнительно высокой частоте кадров ($F \geq 1000$ кадр/с) измерение скорости пламени в смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ становится невозможным из-за низкой яркости свечения. С уменьшением частоты съемки ($F \leq 500$ кадр/с) время экспозиции увеличивается, свечение пламени можно различить, но из-за размазывания фронта волны возрастают ошибки определения скорости пламени и его местонахождения.

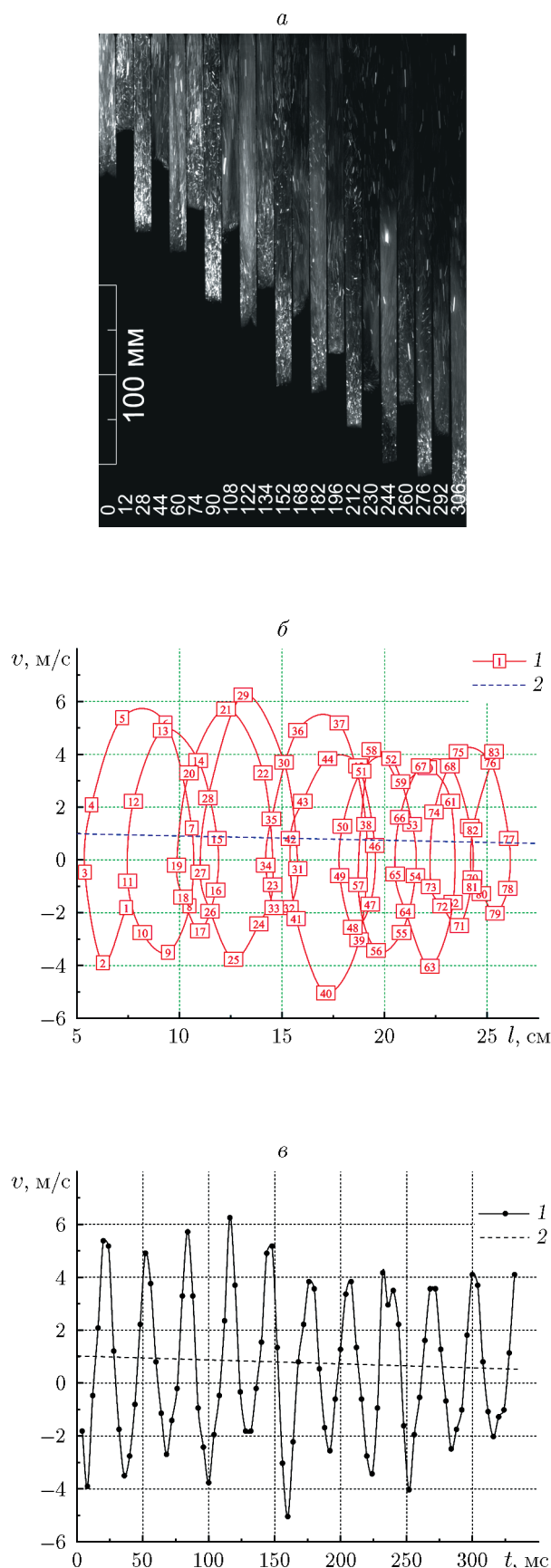
При изучении волны горения с помощью видеокамеры обнаружено сложное возвратно-поступательное движение пламени по длине трубы (рис. 6). Свечение за фронтом волны в смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ слабое, неравномерное, яркие треки на снимках (рис. 6, а) — это частицы пыли, которые в небольшом количестве всегда находятся в газе либо срываются со стенок трубы. Приведенные кадры соответствуют моментам остановки пламени. Видно, что фронт пламени неровный, протяженность светящейся области пламени изменяется от 5 до 20 см. Кривые мгновенных значений скорости v фронта волны горения в оптической секции построены в зависимости от координаты l (рис. 6, б) и времени t (рис. 6, в). Здесь и далее погрешность измерения скорости пламени 10 %, частоты колебаний пламени — 5 %.

Непосредственно на кривой 1 (см. рис. 6, б)

Рис. 6. Цифровые снимки пламени (а) и скорости фронта волны горения смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ в оптической секции в зависимости от расстояния (б) и времени (в):

а: $F = 500$ кадр/с, $St = 1/500$ с, снимки волны горения в моменты изменения направления движения волны (остановки), цифры внизу — время от первого кадра, мс;

б, в: 1 — скорость фронта волны горения, измеренная с шагом 4 мс, 2 — осредненная скорость фронта волны горения



для облегчения правильного пространственного воспроизведения зависимости $v(l)$ размещены целые числа в порядке возрастания (1, 2, 3, 4, ...). Скорость фронта пламени принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения. Волна горения распространяется вниз и вверх с периодом ≈ 30.6 мс, что соответствует частоте продольных колебаний пламени $f \approx 32.7$ Гц (см. рис. 6). Мгновенные значения скорости фронта пламени находятся в диапазоне $-5 \leq v(l) \leq 6.2$ м/с. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные. Осредненная по длине щели скорость пламени (прямая 2) $\bar{v}(l) \approx 1$ м/с.

Кривая 1 на рис 6,б, построенная по точкам с шагом 4 мс, имеет более простой вид, чем зависимость $v(l)$, и похожа на синусоиду (рис. 6,в). Мгновенные скорости $v(t)$ принимают положительные и отрицательные значения. Благодаря сгоранию свежей смеси в волне горения, площадь участков с положительной скоростью больше, чем с отрицательной. Пламя, распространяясь со знакопеременной скоростью, перемещается вниз по трубе, средняя скорость пламени (прямая 2) $\bar{v}(t) \approx 1$ м/с.

Частота колебаний пламени, измеренная в газовой смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ с помощью оптической камеры, находится в диапазоне $f \approx 32 \pm 1$ Гц.

Аналогичные колебания скорости волны горения наблюдаются в стехиометрической смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$, где свечение пламени более яркое.

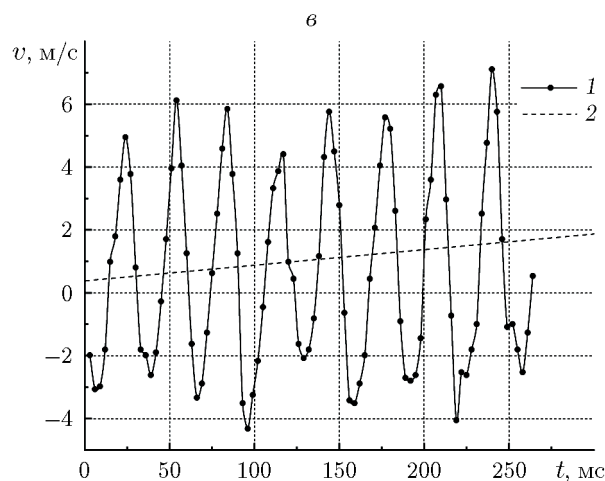
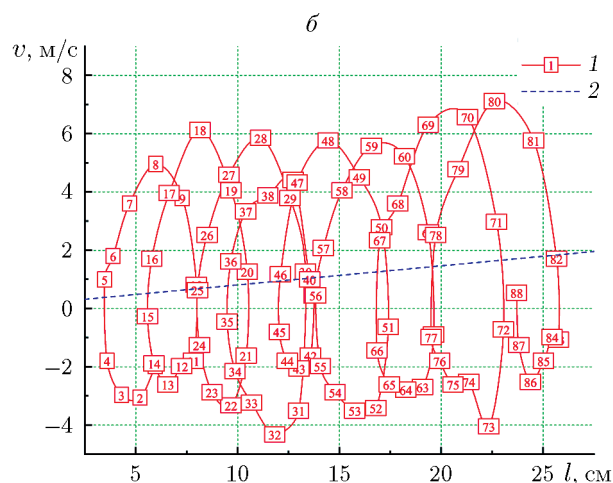
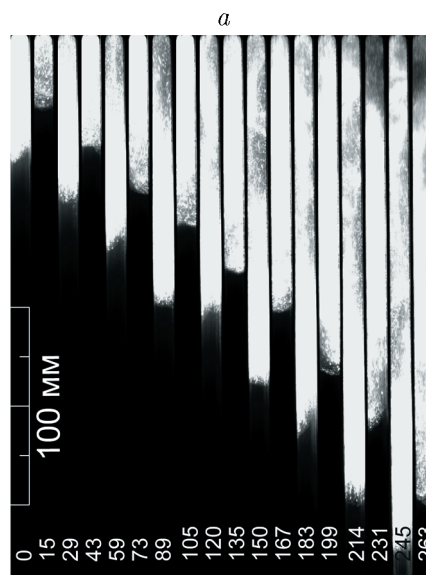
Оптическая съемка пламени в смесях метан/воздух/уголь

Интенсивность свечения в смесях ($\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$)/взвесь угля на 1–2 порядка вы-

Рис. 7. Цифровые снимки пламени (а) и скорости распространения волны горения смеси ($\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$)/взвесь угля ($\rho = 393$ г/м³) в оптической секции в зависимости от расстояния (б) и времени (в):

а: $F = 1000$ кадр/с, $St = 1/3000$ с, снимки волны горения в моменты изменения направления движения волны (остановки), цифры внизу — время от первого кадра, мс;

б, в: 1 — скорость фронта волны горения, измеренная с шагом 3 мс, 2 — осредненная скорость фронта волны горения



ше, чем в газовых смесях $\text{CH}_4/\text{воздух}$. Поэтому частота съемки была повышена до $F = 1000$ кадр/с, а время выдержки уменьшено до $St = 1/3000 \div 1/10000$ с. Цифровые снимки свечения пламени и зависимости скоростей фронта волны горения $v(l)$ и $v(t)$ приведены на рис. 7 и 8. Частота колебаний пламени здесь $f \approx 32.2$ Гц.

На рис. 7 фронт пламени также неровный, протяженность яркой части пламени изменяется во времени и составляет $20 \div 30$ см. Видны неоднородности свечения пламени. Максимальные значения скорости меняются в диапазоне $-4.3 \leq v \leq 7.3$ м/с. Пламя распространяется вниз по трубе со средней скоростью $\bar{v}(l) \approx 0.4 \div 1.5$ м/с.

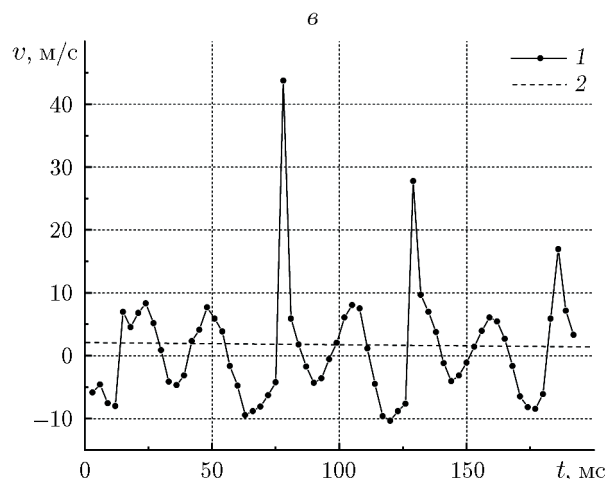
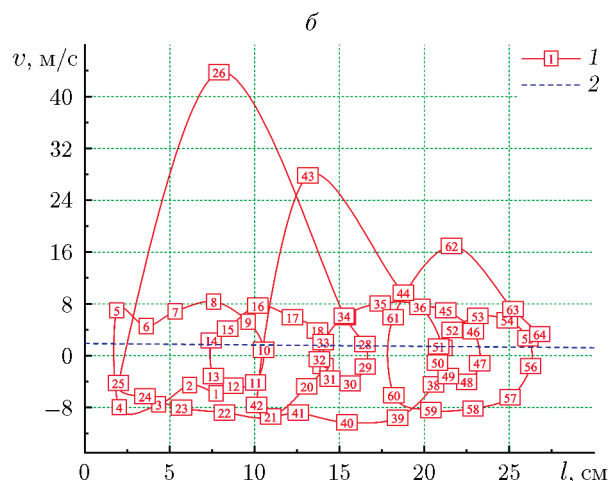
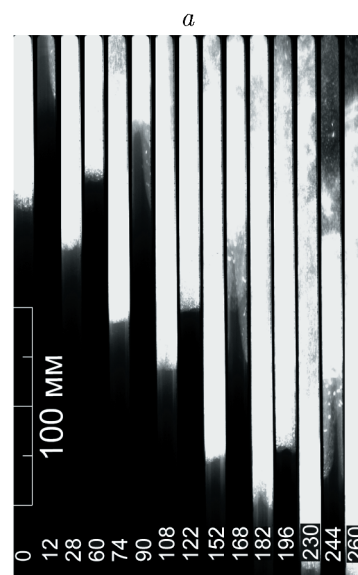
На рис. 8 из-за увеличения частоты кадров F и уменьшения времени задержки St на переднем фронте пламени удается различить неоднородные струйные области. На графиках $v(l)$ и $v(t)$ разрешаются дополнительные подробности и зарегистрированы максимальные скорости $v \approx 45$ и -10 м/с. Частота колебаний пламени в этом опыте $f \approx 32.2$ Гц.

Масса угля $m_g(\rho)$, перешедшего в газовую фазу, приведена на рис. 9. Величину m_g определяли по формуле $m_g = m_1 - m_2 - m_3$, где m_1 — масса угля, поступившего в ударную трубу, m_2 — масса угля, оказавшегося на фланце, m_3 — масса угля на стенках. Из рис. 9 видно, что зависимость $m_g(\rho)$ приблизительно линейная. При $\rho \approx 100$ г/м³ $m_g/m_{st} \approx 0.6$, т. е. примерно половина стехиометрической массы угля переходит в газовую фазу, а при увеличении концентрации частиц угля в четыре раза $m_g/m_{st} \approx 2.3 \div 2.8$.

Рис. 8. Цифровые снимки пламени (а) и скорости распространения волны горения смеси $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{взвесь угля}$ ($\rho = 318$ г/м³) в оптической секции в зависимости от расстояния (б) и времени (в):

а: $F = 1000$ кадр/с, $St = 1/5000$ с, снимки волны горения в моменты изменения направления движения волны (остановки), цифры внизу — время от первого кадра, мс;

б, в: 1 — скорость фронта волны горения, измеренная с шагом 3 мс, 2 — осредненная скорость фронта волны горения



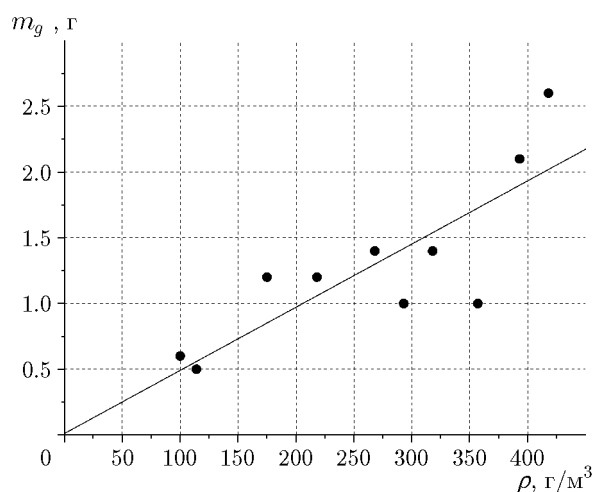


Рис. 9. Масса угля, перешедшего в газовую фазу, в зависимости от концентрации частиц пыли в ударной трубе

ВЫВОДЫ

В вертикальной закрытой ударной трубе при инициировании искрой сверху изучены волны горения в стехиометрической смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$, бедной по горючему смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ (7 % CH_4) и гетерогенных смесях $(\text{CH}_4 + 13.286\text{Air})/\text{уголь}$.

В гетерогенных смесях по сравнению с волной горения в газовой смеси яркость пламени возрастает в $50 \div 100$ раз из-за горения частиц угля. Горение частиц угля повышает энерговыделение, но скорость волны горения при этом практически не изменяется. Во всех исследованных системах осредненная скорость пламени по длине трубы уменьшается от нескольких десятков метров в секунду до значений порядка 1 м/с.

Оптическая съемка пламени показала, что во всех исследованных смесях волны горения периодически меняют направление движения с частотой $f \approx 31 \div 33$ Гц, скорость волны принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения.

В смеси $\text{CH}_4 + 13.286\text{Air}$ пламя совершает колебания с частотой 32 ± 1 Гц. Мгновенные значения скорости фронта пламени по длине щели находятся в диапазоне от 6.2 до -5 м/с. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные, осредненная по длине щели скорость пламени $\bar{v}(l) \approx 1$ м/с. Фронт пламени неровный, протяженность све-

тящейся области пламени изменяется от 5 до 20 см.

В смесях $\text{CH}_4/\text{воздух}/\text{уголь}$ фронт пламени неровный, на фронте различаются неоднородные струи, протяженность яркой части пламени $20 \div 30$ см, и она изменяется во времени, свечение пламени неоднородно. Пламя распространяется со знакопеременной скоростью, мгновенные скорости волны горения изменяются от -10 до 45 м/с, средняя скорость пламени в оптической секции $\bar{v}(l) \approx 0.4 \div 1.5$ м/с.

Из-за уменьшения скорости звука в аэрозвеси частота колебаний пламени по длине трубы в смесях $\text{CH}_4/\text{воздух}/\text{уголь}$ меньше, чем в газовых смесях $\text{CH}_4/\text{воздух}$.

В вертикальной трубе сложное возвратно-поступательное движение волн горения со знакопеременной скоростью в газовых смесях и газозвесах угольной пыли с различным энерговыделением обусловлено влиянием силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вестн. науч. центра ВостНИИ по пром. и эколог. 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. — DOI: 10.15372/FGV20200606.
3. Niu Y.-H., Zhang L.-L., Shi B.-M., Yang Q.-N., Zhong Z. Methane-coal dust mixed explosion in transversal pipe networks // Combust. Sci. Technol. — 2021. — V. 193, N 10. — P. 1734–1746. — DOI: 10.1080/00102202.2019.1711071.
4. Дементьев А. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными // Инж.-физ. журн. — 2016. — Т. 89, № 6. — С. 1538–1546.
5. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // Инж.-физ. журн. — 2018. — Т. 91, № 5. — С. 1328–1334.
6. 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. — DOI: 10.15372/FGV20220507.

7. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
8. **Лямин Г. А., Пинаев А. В., Лебедев А. С.** Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 3. — С. 94–103.
9. **Пинаев А. В., Лямин Г. А.** Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарировки // ПТЭ. — 1992. — № 2. — С. 236–239.
10. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М.: Наука, 1987.

Поступила в редакцию 12.08.2022.

После доработки 15.09.2022.

Принята к публикации 09.11.2022.
