

ГОРЕНИЕ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Игнатенко Д.Г., Миронов В.Н., к.т.н., Пенязьков О.Г., чл.-корр., Скилондь А.В.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

e-mail: v.mironov@dnr.itmo.by

Описана установка для изучения распространения и ускорения двухфазных пламен с автоматическим управлением на базе контроллера, пневмораспределителей и высоко-точных реле времени. Получены зависимости скоростей распространения и ускорений фронтов пламени от времени, а также распределения указанных скоростей и ускорений фронтов горения по высоте рабочего канала для древесной пыли фракций от 50 до 100 мкм и менее 50 мкм при длине рабочей секции 0,5 и 1,0 м. Представлены зависимости избыточного давления в рабочем канале и скорости его нарастания при горении богатых пылевоздушных смесей от времени и местоположения фронта горения. Исследованы поведение и характеристики горения при различных коэффициентах стехиометрии. Полученные результаты могут быть использованы при построении и апробации моделей горения в гетерогенных системах.

The setup for studying the propagation and acceleration of two-phase flames with automatic control based on controller, pneumatic valves and high-current relays is described. Front combustion and acceleration velocities as a function of time, as well as distributions of the above velocities and combustion front accelerations with working channel height for wood dust of two fractions: from 50 to 100 μm and less than 50 μm are obtained. The length of the working section is 0.5 and 1.0 m. The dependences of excess pressure in the working channel and a rate of its rise for combustion of rich dust-air mixtures are presented here. The combustion behavior and its characteristics with different stoichiometry coefficients are analyzed. The results obtained can be used to construct and test combustion models in heterogeneous systems.

(Поступила в редакцию 6 декабря 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Снижение пожаровзрывоопасности различных технологических производств и хранилищ – одна из актуальных задач профилактики чрезвычайных ситуаций. С точки зрения горения гетерогенных систем это, прежде всего, относится к производствам, в которых образуются тонкодисперсные фракции минеральных или органических материалов. При этом несущественно, являются указанные материалы основным продуктом производства (угольная пыль или мука на мельницах), отходами (древесная пыль на шлифовальных участках мебельных фабрик) или объектом складирования (в элеваторах). Определяющими факторами уровня материального ущерба и людских потерь являются горючесть, концентрация дисперсной фазы и теплотворная способность материала. Одним из ярких примеров последствий, к которым приводит отсутствие или недобросовестное проведение профилактических противопожарных мероприятий, являются воспламенение, горение и взрыв взвешенной зерновой пыли на крупнейшем в мире зерновом элеваторе (Wichita, Kansas) 8 июня 1998 года, повлекшие многочисленные жертвы и приведшие к существенным разрушениям строительных конструкций и выходу из строя оборудования [1]. Аналогичные происшествия происходят на предприятиях по производству полиэтилена, сахара и т. д. при наличии в рабочих и складских помещениях мелкодисперсной пыли основных или промежуточных продуктов [2].

Для Беларуси, обладающей значительными ресурсами деловой древесины и имеющей ряд деревообрабатывающих производств, в том числе – более десятка мебельных, актуальна

разработка профилактических мероприятий для воздушно-пылевых сред на основе древесной пыли – частой причины пожаров и взрывов. Особенно благоприятные условия для развития этих процессов реализуются в вентиляционных и транспортных каналах, где за счет трения могут формироваться мощные электростатические заряды. Возникающие при пробое дисперсной среды в канале искровые разряды могут вызвать воспламенение пылевоздушной смеси и при дальнейшем развитии горения – ее дефлаграционный взрыв, приводящий к частичному переходу отложений древесной пыли в помещении во взвешенное состояние. Концентрация ее в воздухе может стать взрывоопасной, и при определенных условиях ударные волны повторных взрывов вызовут переход во взвешенное состояние массы пыли, достаточной для создания в несущих элементах конструкций здания напряжений, превышающих пределы их прочности.

В данной ситуации одним из важных элементов профилактики чрезвычайных ситуаций является предотвращение возможности заметного ускорения фронта горения в технологических каналах. Оптимальное решение этой задачи может быть получено с помощью компьютерного моделирования процессов, основанного на детальном и всестороннем экспериментальном изучении механизмов инициирования, распространения и ускорения гетерогенных пламен, количественных характеристик этих процессов и их зависимостей от параметров воздушно-пылевых сред [3]. Необходимость таких исследований обусловлена еще и тем, что даже тщательное изучение техногенных аварий квалифицированными экспертами не может обеспечить необходимую полноту информации по данной проблеме [1]. Таким образом, экспериментальные исследования нестационарного горения в пылевоздушных системах – важный фактор минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций на производствах и снижения их негативного воздействия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе исследовалось горение древесной пыли двух фракций: от 50 до 100 мкм (1) и менее 50 мкм (2). Экспериментальная установка для исследования горения и ускорения пылевоздушных пламен показана на рис. 1, ее принципиальная схема – на рис. 2.

Рабочая секция 1 экспериментальной установки представляет собой канал круглого сечения внутренним диаметром 90 мм, выполненный из прозрачного кварцевого стекла с фланцами из литьевого полиамида. Высота открытого участка рабочей секции H первоначально составляла 0,465 м, затем – 0,970 м. Пылевоздушная смесь приготавливалась с помощью камеры взвихрения, содержащей узел инжектора 4 и веерное сопло 3. Двухфазная смесь и продукты сгорания удалялись из рабочей секции с помощью системы откачки. Она состоит из предварительного теплосъемника 23, в котором продукты сгорания охлаждались в слое медной стружки; защищаемого им от оплавления канала из гофрированного материала 22; основного теплосъемника 14 (массивного медного цилиндра с системой гексагонально расположенных сужающихся каналов), обеспечивающего охлаждение продуктов сгорания до безопасной для их кратковременной откачки через пылесос 16 температуры, а также ротаметра 15 для определения расхода смеси через рабочую секцию 1.

Элементы системы откачки могут рассматриваться как модели местных сопротивлений каналов пневмотранспорта или вентиляционных систем (участков сужения, поворота и т. п.).

Пылевоздушная смесь поджигалась нихромовой спиралью 2, установленной во входном сечении кварцевого канала. Однородность распределения дисперсной фазы по каналу контролировалась по интенсивности рассеяния излучения на частицах в вертикальной плоскости лазерного ножа, формируемого с помощью лазера 20. Распространение пламени регистрировалось цифровой видеокамерой 18 (Casio EX-F1) с частотой 300 или 600 кадр/с. Для изучения структуры зоны горения в ряде экспериментов часть поля зрения камеры закрывалась нейтральным светофильтром 17 со средней оптической плотностью $D = 1,83$ в интервале длин волн от 0,42 до 0,68 мкм. Таким образом, камера регистрировала излучение из области горения, ослабленное в 67 раз. Измерение давлений в начале и конце рабочей секции производилось пьезодатчиками РСВ 103В12 Piezotronics (21).

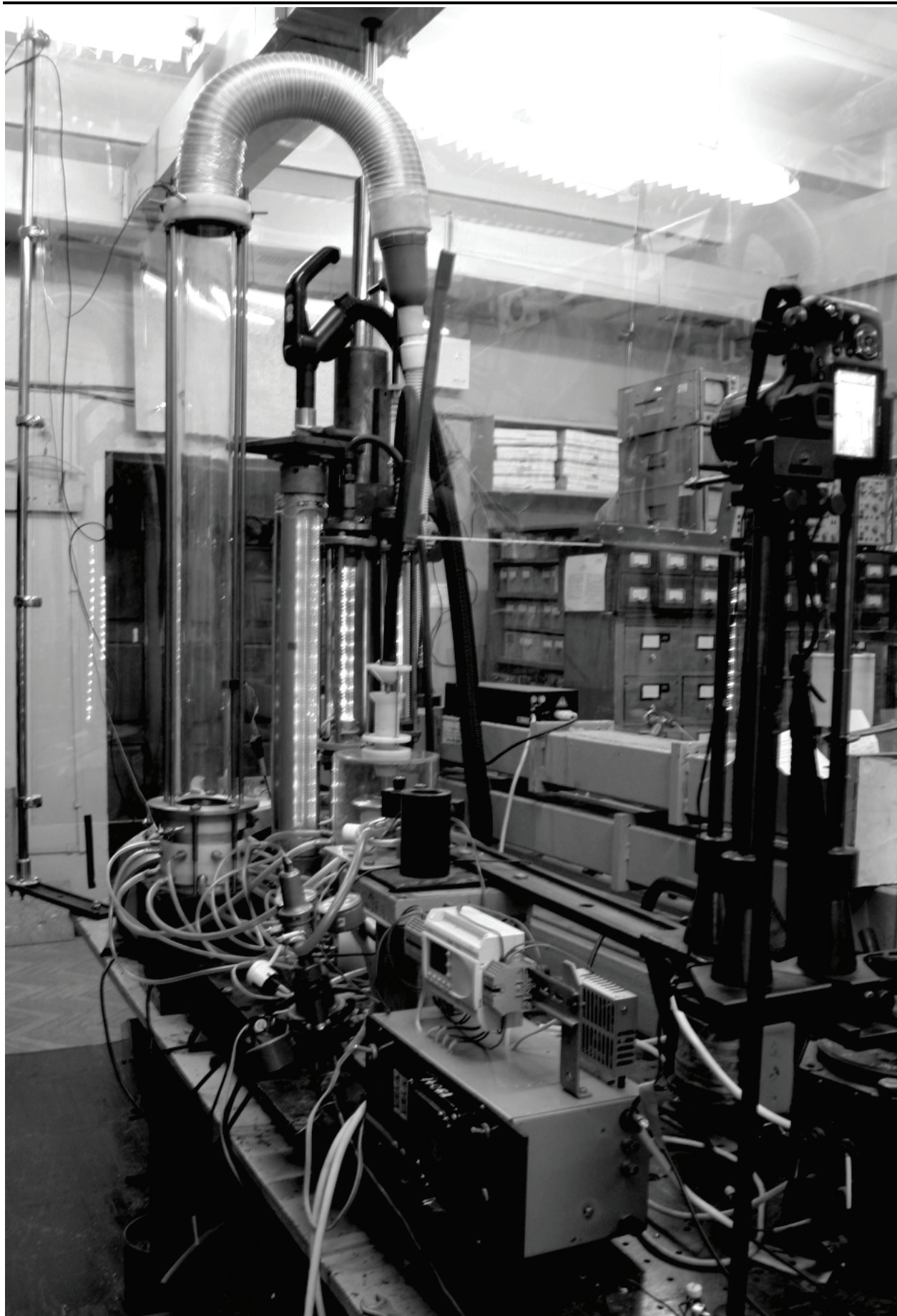
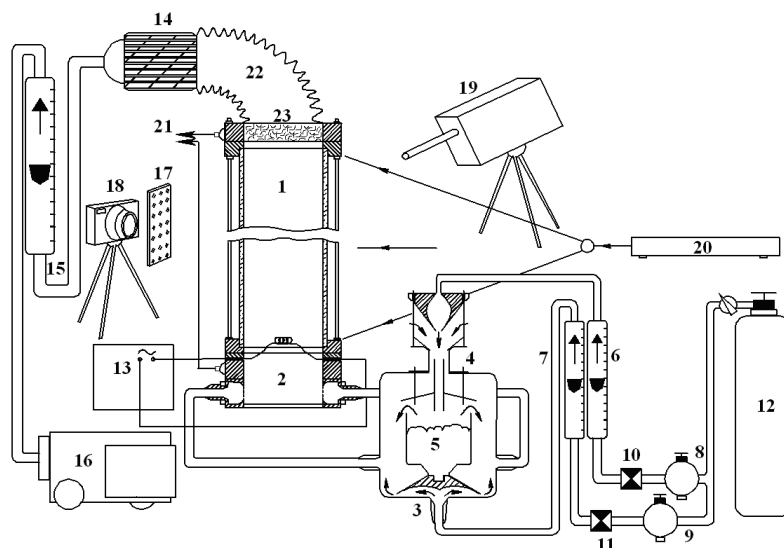


Рисунок 1 – Установка для изучения двухфазного горения



1 – рабочая секция; 2 – кольцевой входной коллектор со спиралью поджига; 3 – верхнее сопло; 4 – узел инжектора камеры взвихрения; 5 – кювета с дисперсной фазой; 6, 7 – ротаметры; 8, 9 – редукторы; 10, 11 – пневмораспределители EVT-317-500 трактов сопла инжектора и верхнего сопла соответственно; 12 – баллон со сжатым воздухом (до 15 МПа); 13 – блок поджига; 14 – основной теплоъемник; 15 – ротаметр РМФ6; 16 – пылесос с центробежной сепарацией SAMSUNG VCC8451; 17 – светофильтр HC-10; 18 – цифровая видеокамера Casio EX-F1; 19 – фотоэмиссионный пирометр; 20 – лазер ЛГН 223-1; 21 – выходы с датчиков давления РСВ 103В12 Piezotronics; 22 – гофрированный канал; 23 – предварительный теплоъемник.

Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Система синхронизации установки обеспечивалась контроллером ECC-PNAL2-24MR-D (на рис. 1 внизу на переднем плане), который через систему сильноточных реле времени PCS-516U осуществлял последовательный или параллельный запуск и выключение узлов и элементов установки в заданные моменты времени. Рабочий цикл контроллера ECC-PNAL2-24MR-D составлялся в виде мнемонической схемы на ПК. Программа, управляющая контроллером, представляет собой систему задержек и логических элементов, позволяющих использовать два различных цикла запуска процесса: рабочий и режим настройки параметров. Схема программы приведена на рис. 3.

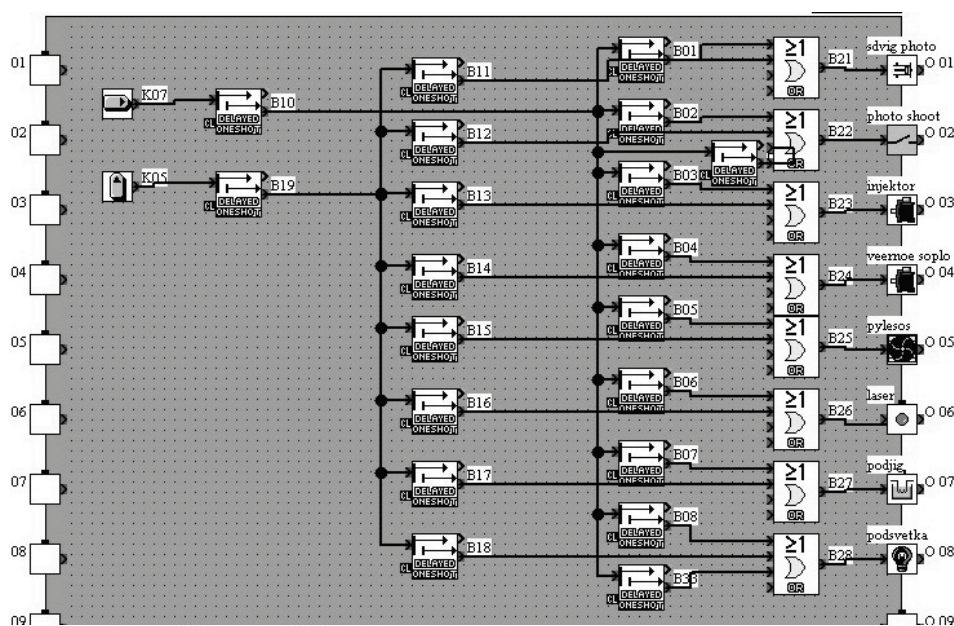


Рисунок 3 – Программа, управляющая контроллером экспериментальной установки

Подготовка к экспериментам проводилась по следующей методике. Исходя из задач, определяли и устанавливали параметры эксперимента в режиме настройки. Регулировали с помощью автотрансформатора расход воздуха через пылесос SAMSUNG VCC8451. Определяли время выхода на режим системы откачки (в него входили времена срабатывания соответствующего реле PCS-516U, включения процессора пылесоса, установки режима его работы и время выхода ротора двигателя пылесоса на постоянную частоту вращения – до установления равновесия поплавка РМФб).

Устанавливали расходы воздуха через сопло инжектора и веерное сопло по ротаметрам каждой из ветвей подачи воздуха с помощью редукторов при рабочей геометрии камеры взвихрения (с установленной в нее кюветой, но без пыли).

Устанавливали при выбранных параметрах потока время подачи напряжения на нихромовую спираль до ее свечения желтым светом (1000–1100 °С).

Устанавливали предварительные времена срабатывания пылесоса и пневмораспределителей воздушных сопел, загружали в кювету заданную массу пыли необходимой фракции, высушенной до влажности 4 %, и осуществляли запуск системы (без поджига) с регистрацией с помощью лазерного ножа распределения пыли по вертикальному диаметральному сечению рабочего канала для определения момента времени, когда концентрация пыли (по радиусу и длине канала) достаточно однородна.

После этого производилось программирование рабочего режима установки с панели контроллера, при этом времена срабатывания и выключения узлов и элементов выбирались такими, чтобы произвести поджиг сразу после установления в канале равномерного потока пылевоздушной смеси и выключить подачу пыли в момент завершения регистрации процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

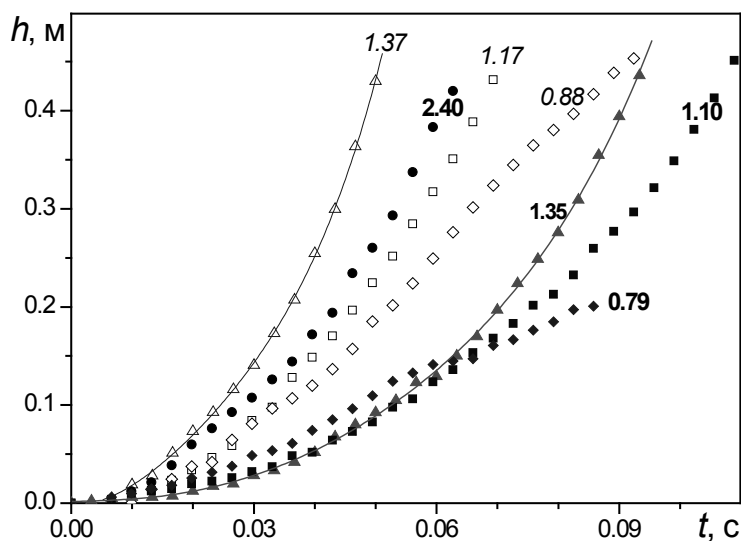
В ходе экспериментов по распространению горения древесной пыли в рабочей секции установки при $H = 0,465$ м установлено, что в области $0,9 \leq \phi \leq 2,4$ после воспламенения наблюдалось, как правило, фронтальное распространение пламени вверх по потоку с возрастанием его скорости. Для $\phi = 0,7–0,8$ пламя первоначально распространяется с возрастающей скоростью, затем замедляется и гаснет вследствие уменьшения тепловыделения. В области $0,4 \leq \phi \leq 0,6$ горение в канале наблюдается в отдельных очагах, распространяющихся вверх по потоку. Очевидно, оно происходит в областях, где локальные значения коэффициента стехиометрии превышают средние значения, и имеет стохастический характер. Наконец, при $\phi \sim 0,3$ воспламенение частиц происходит лишь около нагретой спирали и не приводит к распространению пламени. Нижняя граница очагового горения для фракции 2 ниже, чем для фракции 1.

На рис. 4 показаны типичные временные зависимости местоположения фронтов горения, полученные при обработке видеозаписей процессов. Видно, что с ростом ϕ скорость горения, как правило, возрастает. Переход от крупной фракции пыли к мелкой приводит к интенсификации процесса. Для более точной оценки влияния размера частиц рассмотрим поведение пылевоздушных систем с различным фракционным составом, но близкими коэффициентами стехиометрии и параметрами потока (фракция 1: $\phi = 1,35$, $u = 1,06$ м/с; фракция 2: $\phi = 1,37$, $u = 1,07$ м/с).

Анализ видеозаписи горения фракции 1 показывает, что первоначально увеличение размера очага происходит сравнительно медленно. Он вытянут в вертикальном направлении, что обусловлено направлением потока пылевоздушной смеси, и достаточно медленно расширяется в поперечном сечении. Даже через 40 мс фронт горения еще не достигает стенок канала. За последующие 53 мс фронт горения проходит в вертикальном направлении почти в восемь раз большее расстояние, чем за первые 40 мс (рис. 4). Полную длину открытого участка при $H = 0,465$ м фронт горения проходит менее чем за 0,1 с.

Скорость горения фракции 2 существенно выше. Полное время распространения фронта пламени не превышает 51 мс, т. е. почти в два раза меньше, чем для крупной фракции. Как и в предыдущем случае, после достижения очагом горения стенок канала происходит быстрое возрастание скорости распространения фронта вверх по потоку. Отметим, что

превышение скоростей распространения пламени в пылевоздушных смесях с более мелкими частицами наблюдалось во всех случаях устойчивого фронтального горения.



Цифры рядом с точками и кривыми – коэффициенты избытка горючего; залитые символы и цифры, выполненные жирным шрифтом, – фракция 1, контурные символы и цифры курсивом – фракция 2.

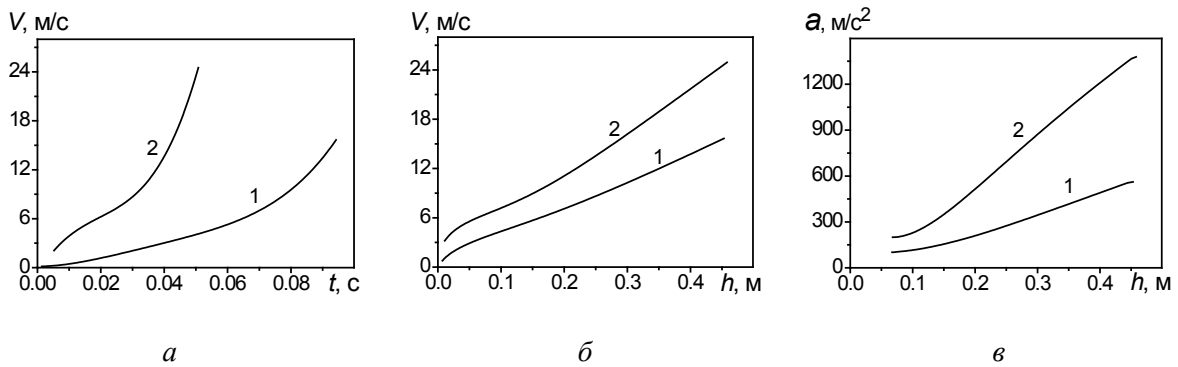
Рисунок 4 – Расстояния, проходимые фронтами горения в пылевоздушных смесях древесной пыли

На рис. 4 для сравниваемых процессов представлены кривые 4-го порядка, аппроксимирующие экспериментальные значения положений фронтов в разные моменты времени. Для определения скоростей распространения фронта горения производилось их численное дифференцирование. Результаты представлены на рис. 5, а. Поведение фронтов горения во времени для пылевоздушных смесей разного фракционного состава различно. Скорость распространения пламени при горении пыли фракции 1 со временем возрастает почти линейно и лишь в последней трети процесса начинается ее ускоренный рост. В начале процесса горения фракции 2 повышение скорости происходит значительно быстрее, чем в случае горения фракции 1. Затем набор скорости замедляется, после чего опять ускоряется с большим темпом. В конце открытого участка скорость распространения фронта горения составляет 15,6 м/с для фракции 1 и 24,8 м/с для фракции 2.

В отличие от временных зависимостей пространственные распределения скоростей для двух пылевоздушных смесей подобны (рис. 5, б). Так, в середине рабочей секции скорости составляют 8,0 и 12,7 м/с, а в конце, как отмечалось, – 15,6 и 24,8 м/с для фракций 1 и 2 соответственно. Таким образом, по крайней мере, в верхней половине секции соотношение скоростей фронтов постоянно и равно 1,6.

Из зависимостей скорости распространения фронтов горения (рис. 5, а) можно получить их ускорения для исследуемых фракций. Эти данные имеет смысл сравнивать с момента, когда фронты очагового горения по типу сферического достигают стенок канала, и распространяющееся пламя становится аналогом полупроницаемого поршня, вызывающего волну сжатия и турбулизацию течения перед фронтом [4], что и приводит к интенсификации горения в канале. Из видеозаписей процессов следует, что фронты горения достигают стенок канала на высоте $h \approx 0,1$ м.

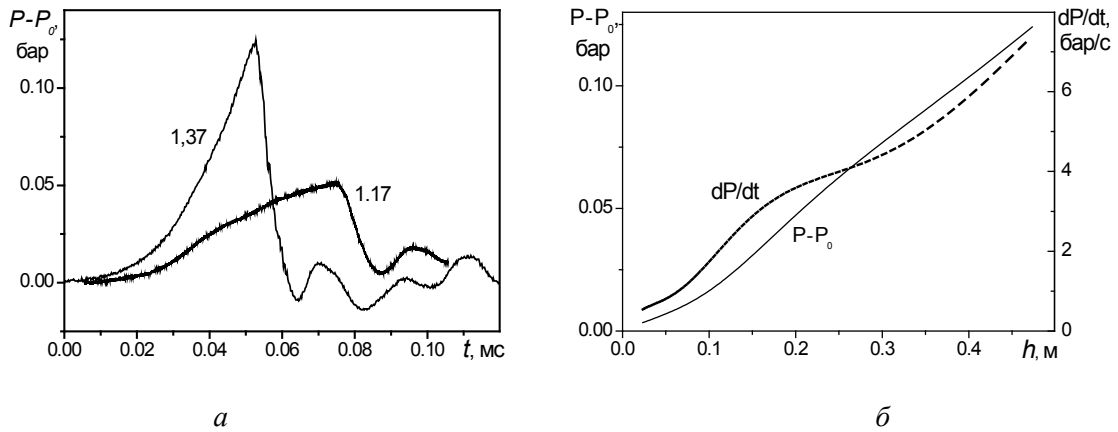
Рассмотрим пространственные распределения изучаемых характеристик (рис. 5, в). Видно, что ускорения фронтов горения возрастают при переходе к более мелкой фракции резче, чем скорости (если соотношение скоростей фронтов равно 1,6, то ускорений – уже около 2,5). Для мелкой фракции больше и возрастание ускорения с момента формирования полупроницаемого поршня – в шесть раз, в то время как для крупной фракции – в пять.



Цифры рядом с кривыми – номера фракций частиц

Рисунок 5 – Зависимости скоростей фронтов горения от времени в богатых пылевоздушных смесях (а), распределения скоростей (б) и ускорений (в) фронтов горения по высоте h открытого участка

На рис. 6, а представлены зависимости избыточных давлений в конце рабочей секции (на 0,035 м выше верхней границы открытого участка), полученные в экспериментах с древесной пылью фракции 2. Как известно, при малой объемной доле частиц скорость звука в пылевоздушной смеси падает с повышением концентрации дисперсной фазы [5], что приводит к большей крутизне волн сжатия. Правомерно поэтому ожидать с повышением ϕ более быстрого роста давления в рабочем канале. Однако представленные на рис. 6, а зависимости не могут быть объяснены только этим. При коэффициенте стехиометрии $\phi = 1,37$ максимальный прирост давления $\Delta P_{\max} = P_{\max} - P_0$ составил на длине канала 0,5 м около 0,125 бар и превысил величину второго по величине зарегистрированного ΔP_{\max} (при $\phi = 1,17$) почти в два с половиной раза. В то же время согласно расчетам, выполненным в соответствии с работой [5], скорости звука в пылевоздушных смесях при $T = 293$ К составляют 290 и 296 м/с для $\phi = 1,37$ и 1,17 соответственно, т. е. отличаются всего на 2 %.



Цифры рядом с кривыми – коэффициенты избытка горючего.

Рисунок 6 – Зависимости избыточного давления в конце рабочей части с $H = 0,465$ м от времени в богатых пылевоздушных смесях (а), зависимости избыточного давления и скорости его нарастания от местоположения фронта горения (б)

На рис. 6, б показано, как изменяется избыточное давление $\Delta P = P - P_0$ (сплошная линия) и скорость его нарастания dP/dt (пунктир) в конце рабочего канала по мере распространения по нему фронта горения в эксперименте при $\phi = 1,37$. Скорость нарастания давления связана со скоростью тепловыделения в зоне горения. Таким образом, пунктирная кривая показывает характер изменения скорости тепловыделения при распространении пламени по каналу.

На начальной фазе исследуемого процесса, фазе ламинарного сферического горения, быстрое повышение тепловыделения связано с квадратичной зависимостью поверхности горения от радиуса очага, снижение темпа его повышения при $h \geq 0,1$ м обусловлено переходом к горению в канале постоянного сечения. Последующее ускорение темпа роста тепловыделения и давления можно, на наш взгляд, объяснить двумя факторами: увеличением поверхности горения вследствие турбулизации двухфазного потока перед зоной горения и уменьшением коэффициента стехиометрии свежей смеси в верхней части открытого участка. Последнее объясняется тем, что за время распространения горения по рабочей секции масса частиц в фиксированном объеме двухфазного потока практически не изменяется (заморожена), в то время как масса газовой фазы вследствие формирования волны сжатия перед полупроницаемым поршнем фронта горения увеличивается.

В рассматриваемом эксперименте это привело, по-видимому, к приближению состава смеси в конце рабочей части к стехиометрическому. В результате при постоянной массе дисперсной фазы отмечается более полное ее сгорание и большее тепловыделение в зоне реакции, а также снижение потерь на нагревание балласта. Все это вызывает прогрессирующее ускорение фронта горения (рис. 5, в), сопровождаемое заметным даже на малой длине ($h = 0,5$ м) повышением интенсивности волны сжатия. Предполагается, что при увеличении длины рабочей части и разумном повышении начальной концентрации дисперсной фазы, еще обеспечивающем распространение горения по всему сечению канала, можно будет рассчитывать на более жесткое развитие процесса, в том числе с учетом снижения скорости звука в пылевоздушной смеси (при $\phi = 3$ она составляет около 250 м/с).

К настоящему времени выполнен ряд экспериментов при длине открытого участка рабочей секции $H = 0,970$ м. На рис. 7 представлены кадры из видеозаписей процесса горения древесной пыли фракции 1 для смесей с $\phi = 1,5$ и $\phi = 2$ при одинаковых условиях видеорегистрации. Видно, что в более богатой смеси процесс происходит с большим энерговыделением и более высокой видимой скоростью распространения фронта.

Графические результаты для указанных смесей представлены на рисунке 8 (контурные символы на рис. 8, а соответствуют данным для $H = 0,465$ м). При $\phi = 2$ максимальная скорость распространения пламени в длинном канале выше, чем в коротком по крайней мере на 3 м/с, однако наблюдается она не в конце рабочей части, а при $h \approx 0,8$ м. При $\phi = 1,5$ значение максимума скорости ниже, чем при $\phi = 2$, расположен он на той же высоте канала и выражен более резко (рис. 8, б). В целом тенденции, установленные при начальной высоте открытого участка рабочей секции, сохраняются (в первую очередь – по концентрационным границам режимов горения). Для выявления более глубоких закономерностей распространения и ускорения пламен необходимо обеспечить большую однородность и стабильность параметров в рабочей секции.

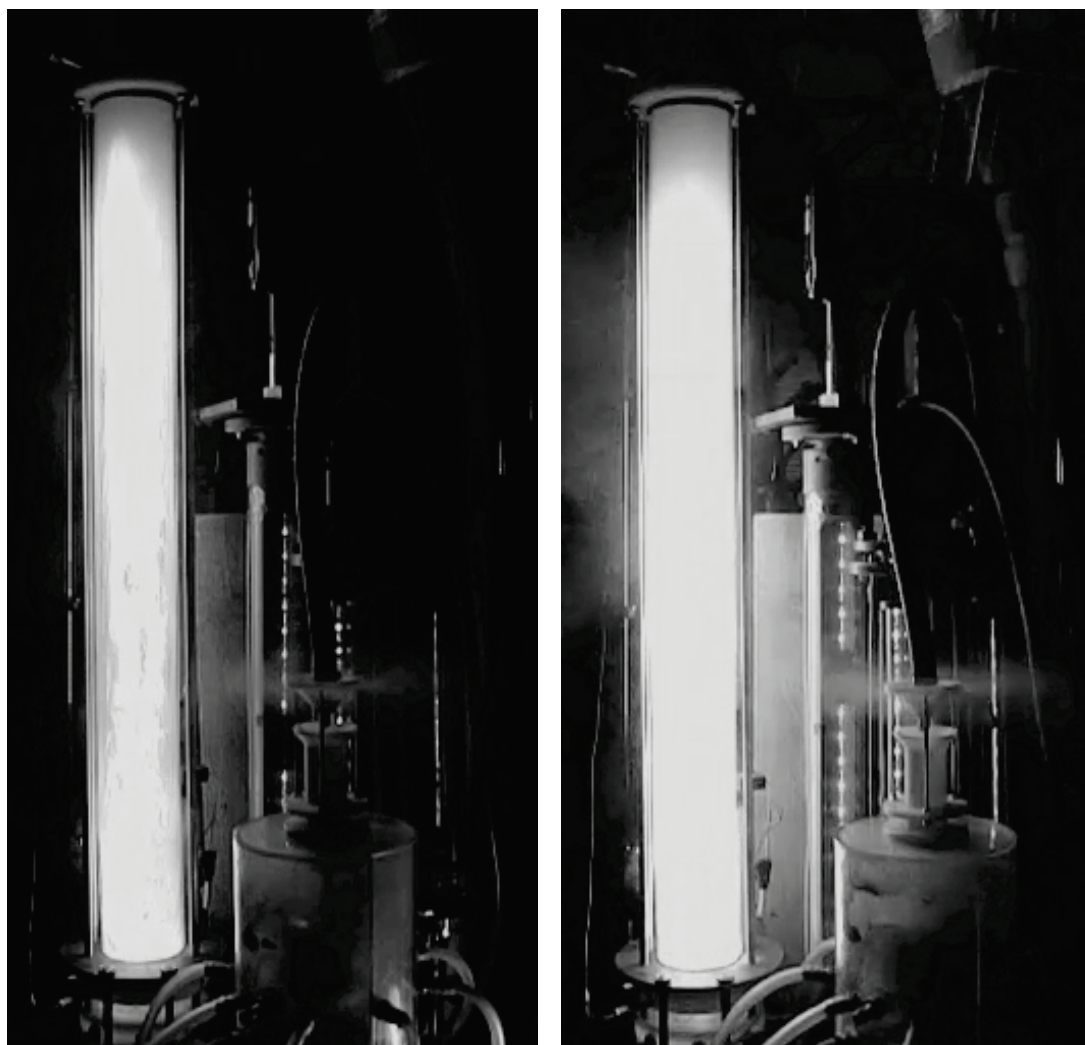
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалось горение древесной пыли фракций от 50 до 100 мкм (1) и менее 50 мкм (2). Устойчивое фронтальное горение обнаружено в области $0,9 \leq \phi \leq 2,4$, при этом скорость горения с ростом ϕ возрастает, а с ростом размера частиц – уменьшается. При близких значениях $\phi \approx 1,36$ максимальные скорости горения для фракции 2 выше в 1,6, а ускорения распространения фронта – в 2,5 раза, чем для фракции 1.

Максимальные достигнутые скорость горения в канале – 25 м/с, ускорение фронта – 1380 м/с^2 . Получены зависимости избыточного давления в конце рабочего канала и скорости его нарастания dP/dt от времени и положения фронта пламени. Максимальные достигнутые значения $\Delta P - 0,125$ бар, $dP/dt - 7,2$ бар/с. Все максимальные параметры получены при горении фракции 2, положении фронта пламени в конце канала и при наибольшем в экспериментах с этой фракцией значении $\phi = 1,37$.

Предложено объяснение причины указанных высоких значений параметров процесса, основанное на том, что за время горения в канале масса частиц в фиксированном объеме свежей смеси практически не изменяется, а масса газовой фазы вследствие формирования волны

сжатия перед фронтом пламени возрастает. Это увеличивает полноту сгорания и тепловыделение, а также снижает за счет сокращения балласта потери тепла в зоне прогрева частиц.

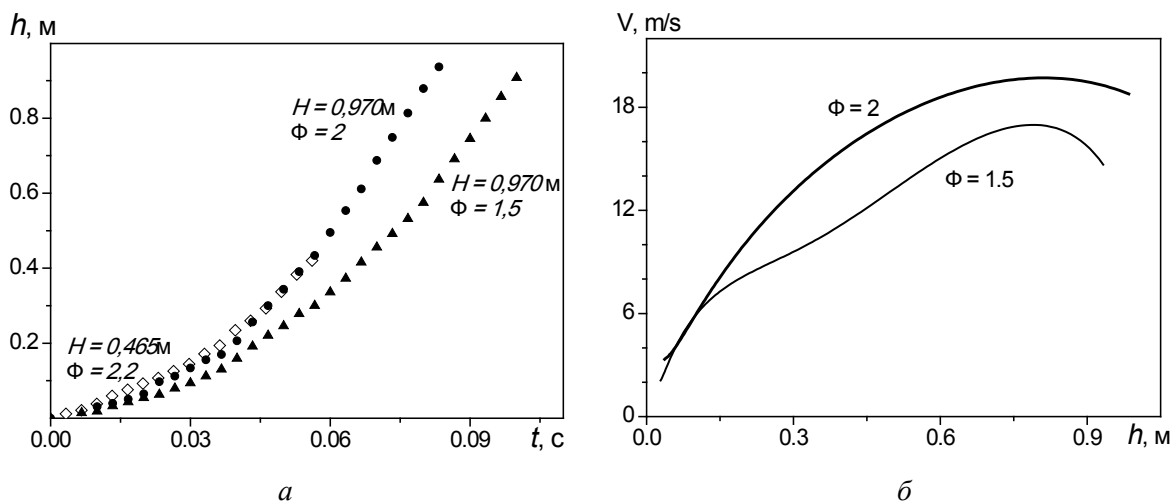


a

б

a – фракция 1, $t = 100,0$ мс, $\phi = 1,5$, $u = 1,15$ м/с; *б* – фракция 1, $t = 73,4$ мс, $\phi = 2$, $u = 1,49$ м/с.

Рисунок 7 – Картины горения пылевоздушных смесей древесной пыли в рабочей секции установки при $H = 0,97$ м



a

б

Рисунок 8 – Положение фронтов горения фракции 1 при разных значениях H (*a*) и распределение скоростей ее горения по высоте h открытого участка для $H = 0,97$ м (*б*)

Полученные результаты могут быть использованы при построении и апробации моделей горения в гетерогенных системах.

Работа выполнена в рамках ГКПНИ «Тепловые процессы» (задание ТП-56).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kauffman, C.W. The DeBruce Grain Elevator Explosion / C.W. Kauffman // Proc. 7th ISHPMIE, St. Petersburg, Russia. 2008. – P. 3–26.
2. Taveau, J. Origins of Correlations for Vented Dust Explosion and Elements for their Application / J. Taveau // Proc. 7th ISHPMIE, St. Petersburg, Russia. 2008. – P. 120–130.
3. Skjold, T. Experimental investigation of the influence of obstacles on flame propagation in propane-air and dust-air suspensions in 3.6 m flame acceleration tube / T. Skjold [etc.] // Proc. 22nd ICDERS. Minsk, 2009. – P. 139–140.
4. Солоухин, Р.И. Ударные волны и детонация в газах / Р.И. Солоухин. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 176 с.
5. Rudinger, G. Some effects of finite particle volume on dynamics of gas-particle mixtures / G. Rudinger // AIAA J. – 1965. – Vol. 3, №. 7. – P. 3–10.