

УДК 533.6:534.2:536.46:621.374

## УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕН В ДРЕВЕСНЫХ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКОМУ КАНАЛУ

*Пенязьков О.Г., Миронов В.Н.*

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова  
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь*

**Введение.** Одной из задач профилактики и уменьшения ущерба от чрезвычайных ситуаций является обеспечение мероприятий, снижающих пожаро-взрывоопасность технологических производств и хранилищ [1]. В регионах, имеющих деревообрабатывающие производства, актуальна разработка профилактических мероприятий для двухфазных 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 искровые разряды способны вызвать ее воспламенение и при дальнейшем развитии горения – дефлаграционный взрыв.

Важным элементом профилактики таких ситуаций является предотвращение возможности заметного ускорения фронта горения в технологических каналах. Решение задачи может быть получено с помощью компьютерного моделирования, основанного на экспериментальном исследовании механизмов распространения и ускорения двухфазных пламен, количественных характеристик этих процессов и их зависимостей от параметров воздушно-пылевых сред [2].

**Экспериментальная установка.** Подробное описание конструкции установки для изучения горения двухфазных сред, системы управления и методики проведения экспериментов представлены в работе [3]. Здесь мы кратко остановимся на общей схеме установки, отдельных ее узлах и системах. Общий вид установки показан на рис. 1, принципиальная схема – на рис. 2.

Рабочая секция 1 установки представляет собой канал круглого сечения внутренним диаметром 90 мм, выполненный из кварцевого стекла. Высота открытого участка рабочей секции  $H = 0,97$  м. Пылевоздушная смесь приготавливается в камере взвихрения, содержащей узел инжектора 4 и веерное сопло 3. Подача смеси в рабочую секцию осуществляется через коллектор 2 с восемью штуцерами. Частичное выравнивание полей скоростей потока, необходимое в силу дискретной подачи воздуха в кольцевую полость коллектора (форкамеру), осуществляется с помощью металлической сетки, полностью перекрывающей выходное сечение внутреннего профилированного кольцевого сопла и выполняющей одновременно функцию огнепреградителя. Для повышения однородности потока в цилиндрическом канале выше области взаимодействия восьми сходящихся струй кольцевого коллектора дополнительно установлены три выравнивающие сетки с уменьшающимся размером ячеек, а под коллектором размещен демпфирующий объем с перфорированной границей (на рис. 2 не показаны).

Двухфазная смесь и продукты сгорания удаляются из рабочей секции с помощью системы откачки. Она состоит из предварительного теплосъемника 23, в котором продукты сгорания охлаждаются в слое медной стружки; защищаемого

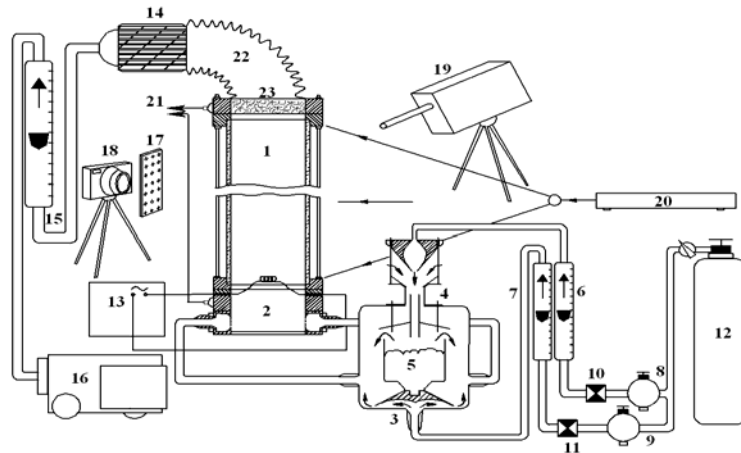


Рис. 1. Установка для исследования двухфазного горения.

им от оплавления канала из гофрированного материала 22; основного тепло-съемника 14 (массивного медного цилиндра с системой гексагонально расположенных сужающихся каналов), обеспечивающего охлаждение продуктов сгорания до безопасной для их откачки через пылесос 16 температуры, а также ротаметра 15 для определения расхода смеси через рабочую секцию. Элементы системы откачки могут рассматриваться как модели местных сопротивлений технологических каналов (участков сужения, поворота и т. п.).

Систему синхронизации установки обеспечивает контроллер ECC-PNAL2-24MR-D (на рис. 1 внизу на переднем плане), который через систему сильноточных реле времени PCS-516U осуществляет последовательный или параллельный запуск и выключение ее узлов и элементов в заданные моменты времени.

Пылевоздушная смесь поджигается нихромовой спиралью, установленной во входном сечении кварцевого канала. Однородность распределения дисперсной фазы по каналу контролируется по интенсивности рассеяния излучения на частицах в плоскости лазерного ножа, формируемого с помощью лазера 20. Луч лазера расширяется в вертикальной плоскости с помощью цилиндрической оптики (стержня из оптического стекла со специальным профилем показателя преломления), что обеспечивает в секторе его распространения, проходящем через



1 – рабочая секция; 2 – кольцевой входной коллектор со спиралью поджига; 3 – веерное сопло; 4 – узел инжектора камеры взвихрения; 5 – кювета с дисперсной фазой; 6 и 7 – ротаметры; 8 и 9 – редукторы; 10 и 11 – пневмораспределители EVT-317-500 трактов сопла инжектора и веерного сопла соответственно; 12 – баллоны со сжатым воздухом (до 15 МПа); 13 – блок поджига; 14 – основной теплоъемник; 15 – ротаметр РМФ6; 16 – пылесос с центробежной сепарацией SAMSUNG VCC8451; 17 – светофильтр НС-10; 18 – цифровая видеочка 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.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

диаметральное сечение рабочей секции, достаточно равномерное распределение интенсивности излучения. Так как диаметр частиц, на которых рассеивается излучение на два порядка больше его длины волны, индикатриса рассеяния существенно вытянута вперед [4]. Поэтому наблюдение рассеяния необходимо осуществлять под малым углом к плоскости распространения расходящегося пучка.

Регистрация рассеянного на частицах излучения, а также картин горения в рабочей секции осуществляется с помощью цифровой камеры Casio EX-F1, установленной под углом  $60^\circ$  к плоскости лазерного ножа. На этот же кадр производится регистрация положений поплавков ротаметров, что позволяет рассчитать расход и среднюю по сечению канала скорость потока смеси, а также расходы воздуха в трактах сопел установки. Частота видеорегистрации – 300 кадр/с.

Для изучения структуры зоны горения в ряде экспериментов часть поля зрения камеры закрывалась нейтральным светофильтром 17 со средней оптической плотностью  $D = 1,83$ . Измерение давлений в начале и конце рабочей секции производилось пьезодатчиками РСВ 103В12 Piezotronics (21).

**Результаты исследования.** Эксперименты проводились с древесной (сосновой) пылью фракции от 50 до 100 мкм в богатых горючих смесях. Параметры экспериментов и основные результаты представлены в таблице 1. В интервале коэффициентов стехиометрии  $1,4 \leq \phi \leq 2,5$  наблюдается устойчивое горение, первоначально очаговое, а после достижения пламенем стенок канала – фронтальное. С ростом  $\phi$  процесс горения интенсифицируется, при этом возрастают как скорости распространения фронта пламени, так и достигаемые давления в канале. В области меньших  $\phi$  максимум скорости достигается не в конце рабочей части, а несколько ранее, то есть происходит замедление потока. При  $\phi_{\max} \approx 2,5$  время горения максимально. Вероятная причина этого будет указана ниже.

Таблица 1. экспериментальные данные

№ эксп		1	2	3	4	5	6
Время горения, с		0,089	-	0,128	0,103	0,130	0,091
$V_{\text{потока}}$ , м/с		1,2	1,3	1,1	1,0	1,2	1,3
$\phi$		1,8	1,4	1,6	1,4	>2,50	2,2
$P_{\text{н}}$	В	2,594	1,094	1,984	1,359	2,703	2,234
	кПа	12,04	5,08	9,21	6,31	12,54	10,73
$P_{\text{в}}$	В	-	0,338	0,588	0,419	0,781	0,675
	кПа	-	5,25	9,14	6,51	12,14	10,49
$V_{\text{max}}$ , м/с		25,6	-	11,7	14,5	23,7	19,2
$t_{V_{\text{max}}}$ , с		0,089	-	0,093	0,084	0,130	0,083

На рис. 3 представлены кадры видеозаписи процесса горения при максимально достигнутом значении  $\phi$  (эксперимент №5). 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 31 мс фронт горения еще не достиг стенок канала, т.е. проходит по радиусу менее 40 мм. Тем более впечатляет динамика его дальнейшего распространения по каналу. За последующие 64 мс фронт горения проходит в вертикальном направлении в шесть раз большее расстояние, чем за первые 31 мс. Полную длину области наблюдения (0,97 м) фронт горения проходит менее чем за 0,13 с.

Таким образом, в распространяющейся вверх по каналу богатой смеси древесной пыли с воздухом ( $\phi \geq 1,8$ ) при принудительном воспламенении по центру нижней части канала после фазы медленного роста очага, близкого по форме к сферической, с достижением фронтом горения стенок канала начинается быстрое ускорение пламени в направлении вверх по потоку.

На рис. 4 представлены полученные из видеозаписей зависимости распространения фронтов горения от времени. Отметим, что в эксперименте №4 (при  $\phi_{\text{min}} = 1,4$ ) возникновение очага пламени произошло не вблизи спирали, а на некотором расстоянии, что обусловлено низким энерговыделением в начале химической реакции. Это связано с тем, что в первую очередь в реакцию вступают частицы с меньшим размером, концентрации которых недостаточно для быстрого прогрева окружающей область реакции объема исходной смеси. Фактически, мы имеем дело с задержкой воспламенения, обусловленной недостатком способного к развитию реакции горючего. Таким образом, в полидисперсной двухфазной смеси номинальное превышение стехиометрического количества горючего недостаточно, в отличие от случая монодисперсной твердой фазы, для гарантированного воспламенения смеси, даже нагретой до температуры самовоспламенения. Отметим, что в эксперименте с  $\phi \geq 2,5$  малая скорость распространения фронта реакции на начальной стадии также связана с особенностями кинетики двухфазной реакции. В данном случае медленное развитие процесса связано с большим количеством балластного горючего, на нагрев которого идет ощутимая часть выделяющегося в результате реакции тепла. Из рис. 4 видно, что экспериментальные точки удовлетворительно аппроксимируются выбранными полиномиальными кривыми. Это позволяет для определения скоростей распро-

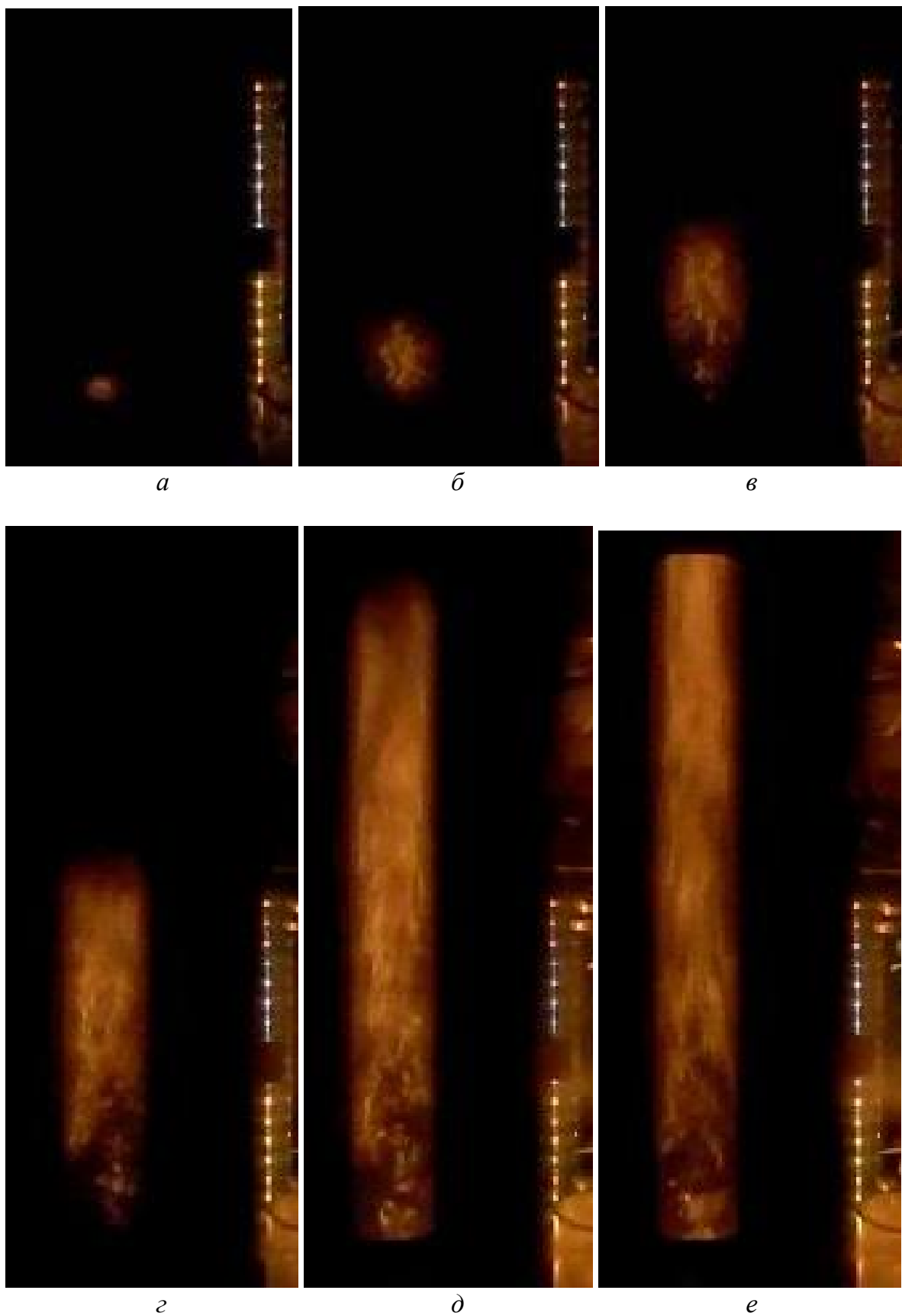
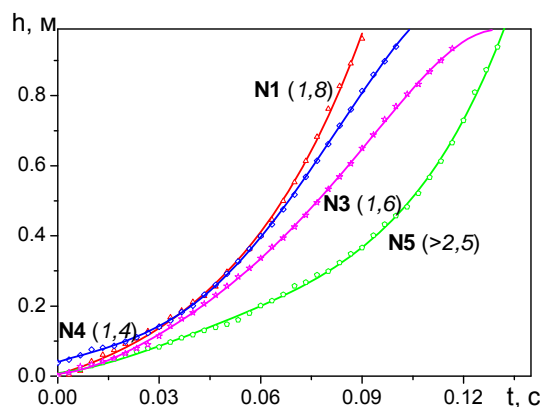


Рис. 3. Кадры видеозаписи процесса воспламенения и распространения горения богатой пыле-воздушной смеси древесной пыли в рабочем канале установки; времена с момента принудительного воспламенения пыли, мс: *a* – 7; *b* – 31, *в* - 64; *г* – 95; *д* – 119; *e* – 135



Точки соответствуют данным измерений, линии – кривым 5-го порядка, аппроксимирующим экспериментальные зависимости

Рис. 4. Зависимости расстояний вверх от спирали, проходимых фронтами горения, от времени сгорания фронта горения произвести их численное дифференцирование. Результаты представлены на рис.5, а. Поведение фронтов горения во времени для пылевоздушных смесей с разными коэффициентами стехиометрии различно. Как уже отмечалось, в области меньших  $\phi$  максимум скорости горения достигается не в конце рабочей части, а несколько ранее, то есть происходит некоторое замедление его фронта. Для того чтобы объяснить возможную причину этого, рассмотрим распределение скорости пламени по высоте канала (рис. 5, б).

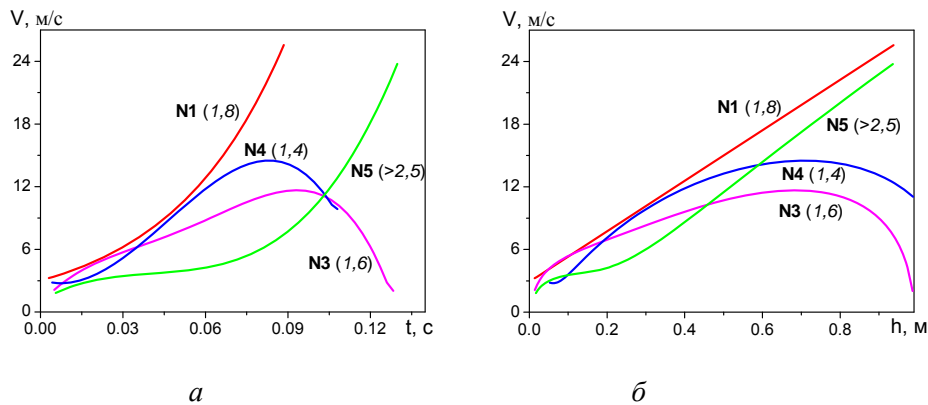


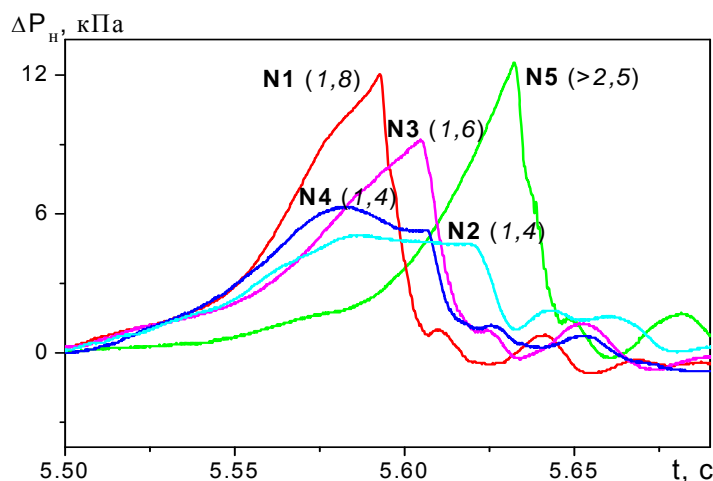
Рис. 5. Зависимости скоростей фронтов горения от времени (а) и их распределение по высоте канала (б)

В начале процесса рост скорости горения пыли с низким коэффициентом ( $\phi = 1,4$ ) сопоставим с ростом скорости с высоким коэффициентом. Однако при малых  $\phi$  уже в первой половине канала начинается заметное уменьшение темпа роста скорости горения, что в последующем, после достижения максимума (на высоте около 0,7 м), приводит к ее падению. На наш взгляд, это связано с теплопотерями из зоны горения в цилиндрическую стенку кварцевого канала. Как отмечалось, на первой фазе горение носит очаговый характер. При этом фронт пламени близок к сферическому пока он не достигнет стенки канала. Из-за того, что тепловыделение при указанных  $\phi$  в силу полидисперсности твердой фазы невелико, температура фронта вблизи стенки уменьшается, что приводит к за-

медленнию реакции. Фронт горения, как видно из видеозаписей, приобретает «параболический» профиль, что приводит к дальнейшему возрастанию теплопотерь, снижению температуры и тепловыделения.

Итак, в области  $1,4 \leq \phi \leq 2,5$  с момента, когда фронты очагового пространственного горения по типу сферического достигают стенки канала, наблюдается фронтальное распространение пламени вверх по потоку. Из видеозаписей следует, что фронты горения достигают границы канала на высоте  $S \approx 0,1$  м. С этого момента распространяющееся пламя становится аналогом полупроницаемого поршня, вызывающего волну сжатия и турбулизацию течения перед фронтом [5], что при  $1,8 \leq \phi \leq 2,5$  приводит к интенсификации горения в канале и нарастанию скорости его фронта по всей высоте канала (рис. 4). Максимальные скорости горения на длине всего 1 м составляют 25, 6 и 23,7 м/с при  $\phi = 1,8$  и  $\geq 2,5$  соответственно, при этом ускорение достигает  $600 \text{ м/с}^2$ .

Полученные в экспериментах зависимости давления от времени с момента запуска процессора представлены на рис. 6. Наблюдаемое повышение давления



Цифры рядом с кривыми – номера экспериментов; в скобках – коэффициенты избытка горючего (коэффициенты стехиометрии)

Рис. 6. Кривые давления в начале рабочего канала (на 30 мм ниже спирали поджига) при горении богатых пылевоздушных смесей

(примерно в 5,5 с) связано с развитием процесса горения. Три наибольших максимума соответствуют достижению фронтом горения предварительного теплоъемника в экспериментах с  $1,6 \leq \phi \leq 2,5$ . Менее выраженные главные максимумы кривых соответствуют экспериментам с  $\phi = 1,4$ , при этом падение давления начинается до достижения фронтом пламени предварительного теплоъемника (последнему моменту соответствует резкое падение давления в интервале  $5,61 \leq t \leq 5,63$ ). Последующие колебания давления связаны с прорывами пылевоздушной смеси в рабочий канал после запираания входного коллектора системы подачи смеси повышенным давлением, обусловленным горением.

На рис. 7 представлены зависимости видимой скорости горения и давления от положения фронта горения при  $\phi = 1,4$  и  $\phi \geq 2,5$ . Такое представление результатов позволяет сделать вывод, что характер нарастания давления в канале определяется, главным образом, распределением по его высоте скорости горе-



ния. Чем выше скорость фронта, тем выше массовая скорость горения и тепловыделение. Однако, наличие проницаемых границ (открытая в атмосферу камера взвихрения и теплоемники системы откачки), обеспечивают возможность сброса давления из канала при снижении интенсивности процесса горения.

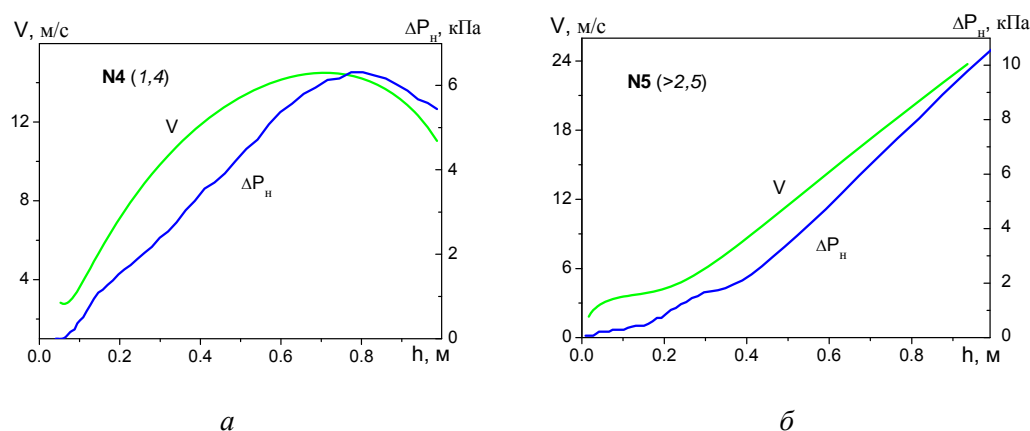


Рис. 7. Зависимости скорости видимых фронтов горения и давления от положения фронта горения при  $\phi = 1,4$  (а),  $\phi \geq 2,5$  (б)

**Выводы.** Исследованы процессы горения богатых пылевоздушных смесей, дисперсной фазой которых являлась сосновая пыль размером от 50 до 100 мкм с начальной влажностью 1%. Установлено, что распространение двухфазного пламени в вертикальном канале является достаточно динамичным процессом. При высоте канала 1 м максимальная видимая скорость горения – 25,6 м/с, ускорение фронта достигает  $600 \text{ м/с}^2$ , а прирост давления – 12,5 кПа.

Обнаружено, что в интервале коэффициентов стехиометрии  $1,4 \leq \phi \leq 2,5$  наблюдается устойчивое горение пылевоздушной смеси, первоначально очаговое, а после достижения пламенем стенок канала – фронтальное. С ростом  $\phi$  процесс горения интенсифицируется, при этом возрастают как скорости распространения фронта пламени, так и достигаемые давления в канале.

В результате совместного анализа зависимостей скорости фронтов горения и давления от положения фронта горения при  $\phi = 1,4$  и  $\phi > 2,5$  показано, что характер нарастания давления определяется, главным образом, распределением по высоте канала скорости распространения фронта горения.

### Литература

1. Taveau J. Origins of Correlations for Vented Dust Explosion and Elements for their Application. Proc. 7th ISHPMIE, St. Petersburg, Russia. 2008. Pp. 120-130.
2. T.Skjold, I.B.Kalvatn, G.A.Enstad, R.K.Eckhoff/ Experimental investigation of the influence of obstacles on flame propagation in propane-air and dust-air suspensions in 3.6 m flame acceleration tube. Proceedings of 22nd ICDERS. Minsk, Belarus, 2009, pp. 139-140.
3. Игнатенко Д.Г., Миронов В.Н., Пенязьков О.Г., Скилондъ А.В. Горение древесной пылевоздушной смеси в цилиндрическом канале // Вестник Командно-инженерного института МСЧ РБ. 2012. № 1(15). С.58–67.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М. Наука. 1970. 856 с.
5. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз. 1963. 176 с.