

УДК 533.6.011

ТЛЕЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ ПЫЛИ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

С. А. Эль-Сэид, Т. М. Хасс

Университет г. Загазиг, Эль-Шаркия, Египет, shamad53@hotmail.com

На нагреваемых поверхностях оборудования, такого, например, как шлифовальные машины, сушильные аппараты, горячие подшипники и т. д., скапливаются горючие пыли, которые при достаточно высокой температуре поверхности могут стать причиной воспламенения и пожара. Экспериментально определены минимальная температура поверхности нагрева, необходимая для воспламенения пыли, температура воспламенения самой пыли и время ее воспламенения. Изучено влияние диаметра частиц пыли и размера образца (толщины слоя пыли) на параметры воспламенения. Высокая точность определения границы между условиями воспламенения и невоспламенения достигнута путем проведения большого количества экспериментов. Результаты показывают, что с увеличением толщины слоя пыли минимально необходимая для ее воспламенения температура нагрева пластины уменьшается.

Ключевые слова: рисовая шелуха, температура поверхности нагрева, температура и время задержки воспламенения, размер частиц пыли, размеры образца.

ВВЕДЕНИЕ

Опыты по воспламенению слоя пыли имеют целью определение минимальной температуры, при которой происходит воспламенение слоя определенной толщины, лежащего на поверхности нагрева. В проведенных ранее исследованиях изучалось влияние природы пыли, толщины ее слоя и размера частиц на температуру воспламенения пыли. В работе [1] измеряли температуру воспламенения пыли, помещая ее на поверхность нагрева заданной температуры. В работе [2] на примере древесных опилок изучено влияние глубины слоя различной насыпной плотности и размера частиц на параметры воспламенения; проведено сравнение с результатами расчета по приближенной модели Франк-Каменецкого. В [3] определено соотношение между минимальной температурой воспламенения и толщиной слоя муки, который был нанесен на пластину нагрева, расположенную в камере. В работе [4] на примере дитионита натрия проведен расчет определяющих параметров по численной и аналитической моделям саморазогрева. В [5] для различных типов пыли определена их минимальная температура воспламенения на поверхности нагрева, а для некоторых из рассмотренных пылей изучено влияние размера частиц и

толщины слоя на температуру воспламенения. Теоретическое исследование нагрева и возможного воспламенения слоя горючей пыли на поверхности нагрева выполнено в [6]. Результаты были сопоставлены с данными экспериментов других авторов. В работе [7] исследована минимальная температура воспламенения слоя горючей пыли при постоянных температуре и тепловом потоке. В [8] построена простая одномерная модель воспламенения слоя пыли, расположенного на нагретой пластине, и проведено сравнение с экспериментом. В [9] определены температуры самовоспламенения образцов пыли на поверхности нагрева и в контейнере термокамеры и установлена связь между ними. Комитет Национальной академии наук (НАН) по оценке производственных рисков рекомендовал для определения минимальной температуры воспламенения слоя пыли на поверхности нагрева использовать тест нагретой пластины [10]. Весьма сходный тест предложен Международной электротехнической комиссией [11], здесь при проведении тестов на нагретой пластине воспламенение определяется как начало горения в исследуемом материале. При этом, согласно рекомендациям НАН, полагается, что воспламенение происходит при минимальной температуре нагретой пластины, при которой реализуется одно из нижеперечисленных событий:

- (1) имеется видимое доказательство горения,

- такое как красное свечение либо пламя;
- (2) наклон кривой температура — время для термопары, расположенной в центре слоя пыли, продолжает расти;
 - (3) в слое пыли температура повышается на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с температурой нагретой пластины;
 - (4) пыль плавится.

Образование шлака и/или возникновение дыма, не сопровождающиеся минимальным ростом температуры, не являются достаточным доказательством воспламенения.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Основная цель данной работы — определение минимальной температуры поверхности нагрева, необходимой для воспламенения пыли. Другим аспектом этой задачи является определение температуры и времени задержки воспламенения самой пыли. Последние два параметра определяются как значения, при которых возникает изгиб или изменяется наклон температурно-временной зависимости. Изучалось также влияние размеров образца и частиц на параметры воспламенения.

Использованная в опытах рисовая шелуха была сортирована по размеру частиц: $75 \div 106$, $106 \div 120$ и $120 \div 150$ мкм. Для сравнения использовались смешанные пыли в неотсортированном виде ($75\text{ мкм} \div 1.8\text{ мм}$).

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Слой рисовой шелухи размещали на пластине, изготовленной из чистого алюминия, ее диаметр около 20 см, толщина 2 см. Диск нагреватель мощностью 750 Вт того же диаметра, что и пластина, выполнен в виде плотно расположенных спиралей для обеспечения достаточно равномерного распределения температуры по поверхности алюминиевой пластины. Температуру измеряли хромель-алюмелевыми термопарами. Первая термопара вставлена в отверстие, просверленное с нижней стороны алюминиевой пластины таким образом, что место соединения находится на расстоянии 1 мм над дисковым нагревателем. Эта термопара соединена с терморегулятором (точностью $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) для управления температурой пластины нагрева и поддержания нужной температуры в заданной точке на протяжении эксперимента. Вторая термопара установлена в центре пластины на середине

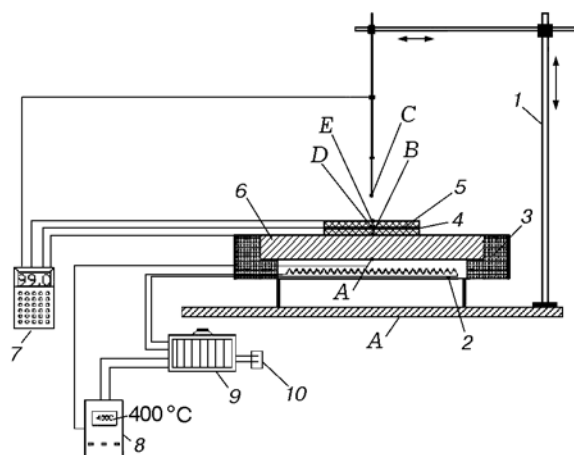


Рис. 1. Схема установки и измерительные инструменты:

1 — стойка для перемещения термопары, 2 — дисковый электронагреватель, 3 — асбест для изоляции, 4 — кольцо для формирования слоя, 5 — пыль рисовой шелухи, 6 — алюминиевый диск, 7 — цифровой термометр, 8 — устройство управления температурой, 9 — трансформатор переменного тока (220/240 В), 10 — вилка прибора, А, В, С, D, E — термопары

толщины слоя пыли. В случае необходимости ее можно перемещать вдоль центральной линии образца на различную высоту при помощи механического приспособления. Данная термопара используется для регистрации температуры образца в зависимости от времени с помощью высокочувствительного и точного цифрового термометра с запоминающим устройством (точностью $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), благодаря которому температура записывается и сохраняется каждые две минуты. Третья термопара находится в центре пылевого слоя на расстоянии 1 мм от внешней поверхности образца. Четвертая термопара расположена над поверхностью образца пыли, и ее положение по вертикали может быть отрегулировано при помощи подвижного сочленения. Температура окружающей среды записывается с помощью ртутного термометра, а атмосферное давление — посредством барометра. Для формирования слоев исследуемой пыли применяются тонкие металлические кольца различной высоты ($h = 10, 15, 19$ и 28 мм) и различного диаметра ($D = 50, 100$ и 150 мм). Термопары калибруются в пределах точности $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для стабилизации входного напряжения дискового нагревателя используется регулируемый трансформатор. Во время испытаний измерялась темпера-

тура нагреваемой пластины. Погрешность измерений составляет менее $\pm 1^\circ\text{C}$. Нагреваемая пластина изолирована по бокам слоем асбеста толщиной 30 мм и высотой 20 мм во избежание потерь тепла. Приборная погрешность экспериментальной установки удовлетворяет требованиям ASTM (Международная организация стандартов).

Все оборудование подключается к сети, и на пульте управления задается требуемая температура (равномерные по поверхности температурные условия). С пульта управления ведется наблюдение за термопарами. Когда температура пластины достигает нужного значения и стабилизируется, запускается программное обеспечение для записи температуры и заготовленная пыль осторожно засыпается в алюминиевое кольцо. Количество пыли определяется заранее: масса загружаемой пыли замеряется трижды и берется среднее этих значений, как требуется по стандартам ASTM. Тем не менее при проведении данной процедуры ожидается наличие незначительной экспериментальной погрешности. Уплотнение слоя не производится. Поверхность пыли разглаживается при помощи небольшого куска пластиковой рейки. Расположение термопар внутри пылевого слоя определяется перед каждым экспериментом, и каждый раз имеется небольшое отличие. Это различие в расположении спая термопары может привести к слабым различиям регистрируемой температуры. Внешние условия испытаний также являются источником погрешности эксперимента. Было проведено более 150 экспериментов. Вблизи поверхности нагреваемой пластины ток воздуха снижался до минимума и устранялись любые источники воздушных струй. По окончании каждого опыта нагреватель пластины отключался, вскоре после этого убрали алюминиевые кольца и пыль. Поскольку термопары в опытах находятся вблизи поверхности нагрева, докритические максимумы температуры могут слегка превышать установленную температуру пластины. В общем случае воспламенение приводит к тлеющему горению, распространяющемуся по всему слою. Эксперименты повторяли при различных температурах пластины (материал каждый раз обновлялся), до тех пор пока критическая температура воспламенения не была определена с желаемой точностью.

ПАРАМЕТРЫ ИСПЫТУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Для заданного количества пыли (185 г) была измерена насыпная плотность при изменении объема образца от 400 до 200 мл без уплотнения слоя. Средняя плотность для частиц размером $75 \div 106$ мкм составляет 332 кг/м^3 , для $106 \div 120$ мкм — 394 кг/м^3 , для $120 \div 150$ мкм — 421 кг/м^3 . Смешанная шелуха с размером частиц от 75 мкм до 1.8 мм имеет плотность 461 кг/м^3 . Средняя для всех пылей плотность равна $\approx 402 \text{ кг/м}^3$. Для распределения частиц по размерам использовали гранулометрический (ситовый) анализ. Состав образцов пыли рисовой шелухи определяли при помощи химического анализа. Анализ был выполнен в компании FOSS (Инфрасофт Интернэшнл, США), и получены следующие результаты: твердый углерод в пределах $14.26 \div 17.99\%$, влажность $9.2 \div 9.69\%$, жир $10.11 \div 11.89\%$, белок $10.13 \div 10.53\%$, крахмал $15.88 \div 22.03\%$, зола $10.62 \div 12.29\%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показано изменение температуры пластины и слоя рисовой шелухи с изменением размера частиц в диапазоне $d_p = 75 \div 106$ мкм при толщине слоя $h = 28$ мм и диаметре кольца $D = 50$ мм. Как видно из рисунка, в интервале времени до 35 мин по мере роста температуры пластины пыль начинает терять влагу. При этом конечная температура нагреваемой пластины поддерживается постоянной. В интервале $t = 35 \div 95$ мин, в течение ко-

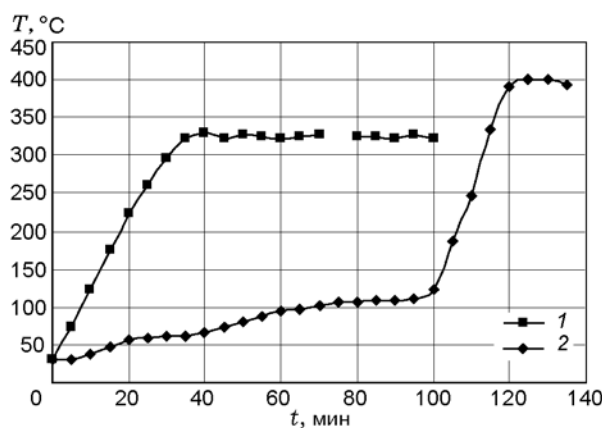


Рис. 2. Температурно-временные зависимости для пластины нагрева (1) и слоя пыли (2) (размер кольца 5×2.8 см, $d_p = 75 \div 106$ мкм)

того поддерживается постоянная температура поверхности, реализуется стационарная волна горения, характеризующаяся выцветанием несгоревшей пыли, что вызвано реакциями пиролиза. Продуктами пиролиза являются летучие, которые выходят в окружающую среду, и твердое вещество, которое формирует зону горения. Кислород проникает в зону горения и возникает температурная неустойчивость, что отражено на рисунке. Критическая температура воспламенения пыли составляет $\approx 122^\circ\text{C}$, время воспламенения 95 мин.

Было выполнено несколько серий экспериментов: (1) исследование влияния размера частиц на температуру (T_{ign}) и время воспламенения (τ) пыли, (2) исследование влияния размера образца (диаметра кольца и его высоты) на значения T_{ign} и τ , (3) исследование минимальной температуры поверхности нагрева, необходимой для воспламенения пыли, которая определяется как самая низкая температура нагретой, свободно стоящей поверхности, способной воспламенить слой пыли, (4) исследование образца неотсортированной полевой шелухи и порошка из оболочек рисовых зерен с позиций параметров воспламенения.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют влияние высоты образца h , т. е. глубины слоя пыли ($h = 1$ и 1.5 см, $D = 10$ см), на характеристики воспламенения пыли для частиц определенного размера. Сравнивая эти два рисунка, можно отметить, что при увеличении глубины слоя пыли h время воспламенения растет, а температура воспламенения падает. Это означает, что при увеличении количества пыли требуется больше времени для ее осушения на этапе нагрева образца. Поэтому скорость реакции пиролиза растет и в зону горения проникает больше кислорода, что приводит к уменьшению температуры воспламенения. Было исследовано влияние площади поверхности, подверженной нагреву, т. е. диаметра кольца D , на характеристики процесса воспламенения пыли для определенных размеров частиц. Обнаружено, что при увеличении диаметра образца (увеличение площади, подверженной поступающему теплу) время и температура воспламенения возрастают. Также было исследовано влияние размера частиц ($d_p = 75 \div 106$, $106 \div 120$ и $120 \div 150$ мкм) образца тех же размеров (D и h), что и выше, на характеристики воспламенения пыли. Найдено, что при разных температурах поверхности нагрева по мере увеличе-

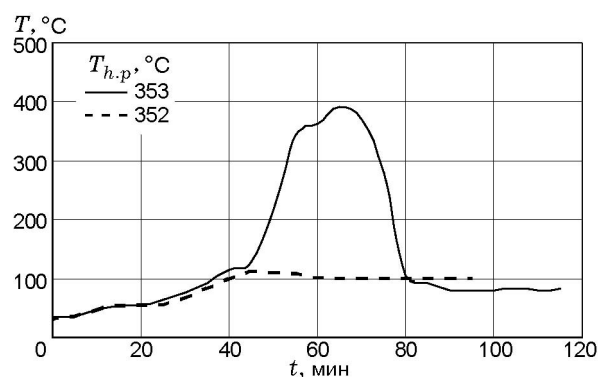


Рис. 3. Температурно-временные зависимости для случаев без воспламенения (штриховая линия) и с воспламенением слоя пыли (сплошная линия) глубиной 1 см ($D = 10$ см, $d_p = 106 \div 120$ мкм, $T_{h.p}$ — температура нагретой пластины)

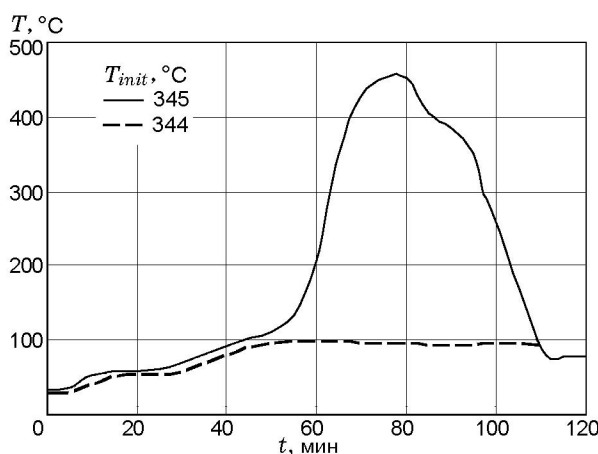


Рис. 4. Температурно-временные зависимости для случаев без воспламенения (штриховая линия) и с воспламенением слоя пыли (сплошная линия) глубиной 1.5 см ($D = 10$ см, $d_p = 106 \div 120$ мкм)

ния размера частиц время и температура воспламенения уменьшаются. Это противоречит ожидаемому, так как большие частицы требуют больше тепла и больше времени для воспламенения. Из кривой воспламенения на рис. 4 видно, что после возникновения воспламенения на очень коротком промежутке времени имеется скачок (температурная неустойчивость), достигающий максимальной температуры и затем с течением времени снижающийся до температуры, близкой к первоначальной.

На рис. 5 показаны зависимости температуры и задержки воспламенения пыли от глубины слоя пыли при диаметре кольца $D = 5$ см.

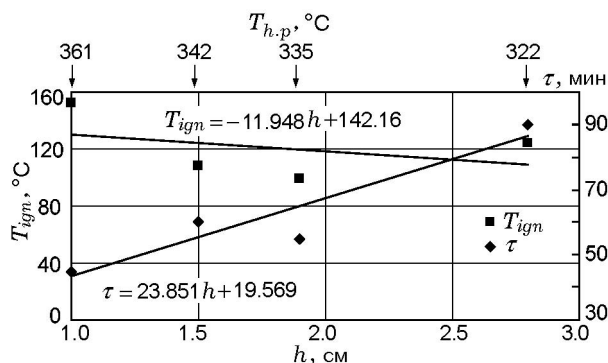


Рис. 5. Соотношения между температурой и временем задержки воспламенения слоя пыли в зависимости от глубины слоя ($D = 5$ см, $d_p = 106 \div 120$ мкм)

Видно, что по мере роста глубины слоя температура воспламенения уменьшается, как и время задержки. Представлена эмпирическая формула, ошибка корреляции между расчетными и измеренными значениями лежит в интервале $\pm 2.8\%$ для температуры воспламенения и $\pm 10\%$ для времени задержки воспламенения.

На рис. 6 приведены температурно-временные профили для неотсортированной шелухи с размерами частиц от 75 мкм до 1.8 мм при диаметре кольца 5 см. Видно, что с увеличением температуры пластины температура и время задержки воспламенения растут. Сравнение этих профилей с полученными для сортированных по размеру частиц, как, например, на рис. 3, указывает на более высокие значения температуры и времени задержки воспламенения для неотсортированной шелухи. Это может

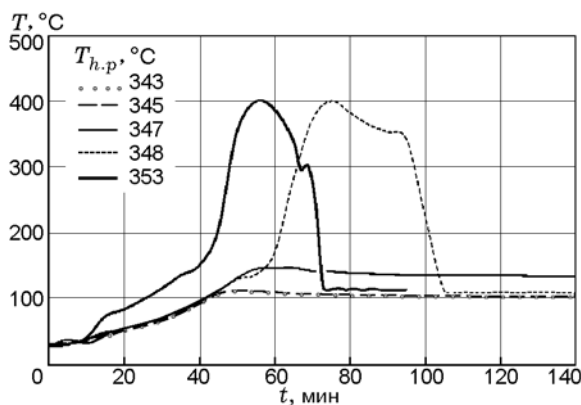


Рис. 6. Температурно-временные зависимости для случаев без и с воспламенением шелухи риса, не отсортированной по размерам ($d_p = 75$ мкм \div 1.8 мм, размер кольца 5 \times 1 см)

быть обусловлено типом распределения частиц по размеру и плотностью насыпки. Рис. 6 иллюстрирует также влияние начальной температуры поверхности нагрева пластины на параметры воспламенения пыли. При более высокой температуре поверхности требовалось меньше времени для инициирования фазы ускоренного нагрева и достижения максимальной температуры внутри слоя. Существуют границы между режимами воспламенения (термическая нестабильность) и невоспламенения (саморазогрев). Обнаружено, что при снижении температуры нагретой пластины на 1°C воспламенение не происходит и пыль разогревается до определенной температуры без возгорания. Температурно-временные зависимости для невоспламенившихся слоев сходны между собой независимо от толщины слоев. Наблюдается медленный рост до температуры, которая в большинстве случаев ниже температуры поверхности нагрева, затем температура падает и, наконец, стабилизируется. Время, требуемое для достижения этого последнего этапа, растет при увеличении толщины слоя.

Зависимости температуры и времени задержки воспламенения пыли от диаметра образцов и высоты слоя показаны на рис. 7 для частиц одной фракции (75 \div 100 мкм). Влияние глубины слоя пыли на температуру и время задержки воспламенения пыли с различными размерами частиц иллюстрируют рис. 8 и 9. На рисунках приведены эмпирические соотношения для T_{ign} и τ в зависимости от h . Можно отметить, что с ростом глубины слоя пыли увеличиваются температура и время задержки воспламенения.

Температура воспламенения пыли на поверхности нагрева означает минимальную температуру поверхности, при которой возможно воспламенение слоя определенной толщины. На температуру воспламенения пыли на поверхности нагрева влияют физические параметры: высота слоя, размер частиц, размер образца (диаметр кольца), плотность материала частиц, теплота реакций и т. д. Минимальная температура нагретой поверхности, необходимая для воспламенения слоев различной площади поверхности (диаметров кольца) при фиксированной толщине слоя и для воспламенения слоев пыли разной толщины при фиксированной площади поверхности, показана на рис. 10 и 11. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на минимальную для воспламе-

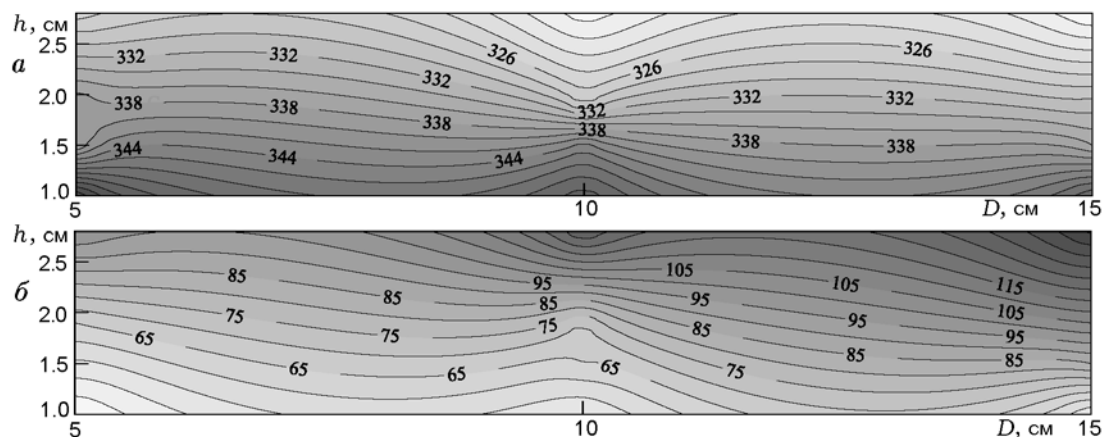


Рис. 7. Изолинии минимальной для воспламенения пыли температуры ($^{\circ}\text{C}$) поверхности нагрева (а) и времени (мин) задержки воспламенения пыли (б) при различных диаметрах и высотах кольца ($d_p = 75 \div 106$ мкм)

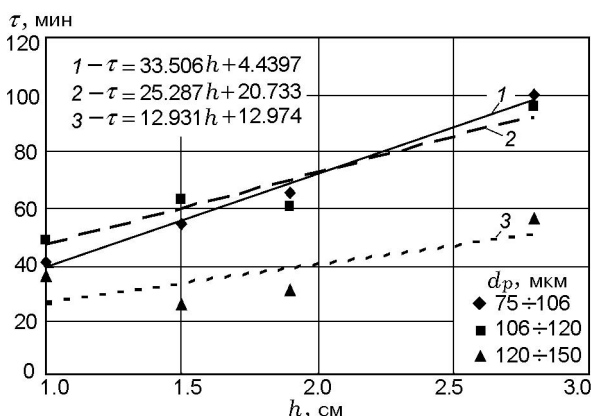


Рис. 8. Соотношения между временем задержки воспламенения и глубиной слоя пыли с частицами различных размеров при диаметре кольца 5 см

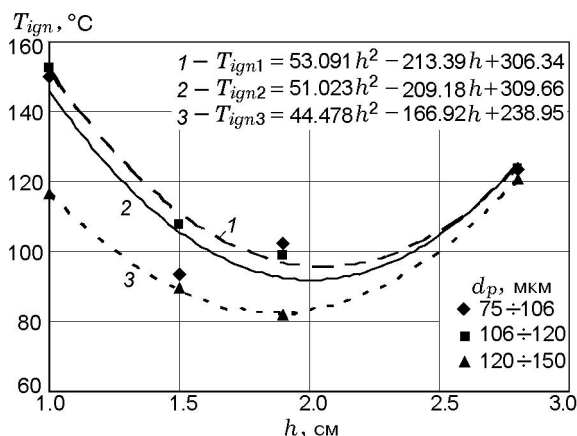


Рис. 9. Соотношения между температурой воспламенения пыли и глубиной слоя пыли с частицами различных размеров при диаметре кольца 5 см

нения пыли температуру поверхности нагрева, является толщина слоя. Размер частиц пыли и площадь поверхности, находящейся под воздействием тепла, оказывают меньшее влияние.

Из рисунков видно, что чем толще слой, тем ниже температура воспламенения. В толстых слоях верхняя их часть изолирует центральную. В результате градиент температуры в слое пыли становится меньше, что снижает теплоперенос. Это приводит к локальному повышению температуры, к экзотермической реакции и воспламенению при более низких температурах пластины. В тонких слоях теплопотери высоки и необходима более горячая поверхность, чтобы нагреть слой и добиться воспламенения.

Теплоемкость и теплопроводность материала пыли, сочетание толщины слоя и, например, температуры поверхности нагрева определяют тепловую мощность испытываемого слоя и, таким образом, накопление полезного тепла внутри него. Слои с более высокими скоростями теплопотерь требуют намного более высокой температуры поверхности нагрева, которая обеспечивает большую тепловую мощность, позволяющую покрыть потери (см. рисунки). Скорость теплоотдачи также воздействует на механизм и кинетику разложения и окисления испытываемых материалов.

При увеличении диаметра кольца минимальная для воспламенения пыли температура поверхности нагрева уменьшается. Посколь-

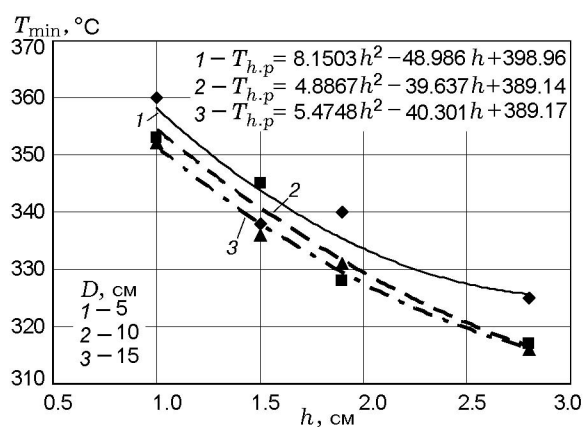


Рис. 10. Влияние глубины слоя пыли на минимальную для воспламенения пыли температуру поверхности нагрева при различных диаметрах кольца ($d_p = 75 \div 106$ мкм)

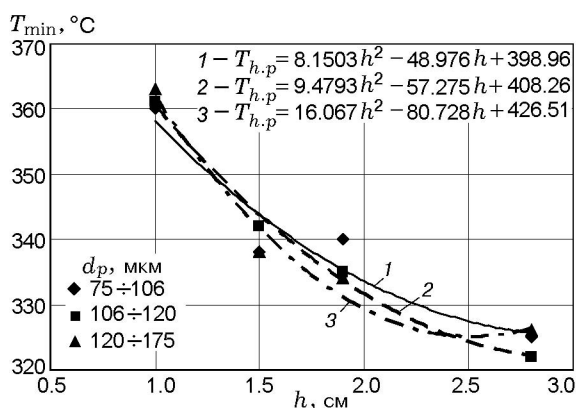


Рис. 11. Влияние глубины слоя пыли и размера ее частиц на минимальную для воспламенения пыли температуру поверхности нагрева ($D = 5$ см)

ку слоем пыли поглощается больше тепла, воспламенение происходит при более низких температурах поверхности нагрева. Однако рисунки показывают, что и с ростом диаметра частиц пыли минимальная для воспламенения температура поверхности нагрева также уменьшается. Этот результат оказался неожиданным. Возможно, он обусловлен развитием ранних трещин и разрушений на поверхности слоя пыли, что влияет на положение термопары и регистрируемые ею данные. Некоторые из этих экспериментов были воспроизведены повторно, и наблюдалось почти полное сохранение тенденции и результатов.

Соотношение между температурой воспламенения и временем задержки воспламенения

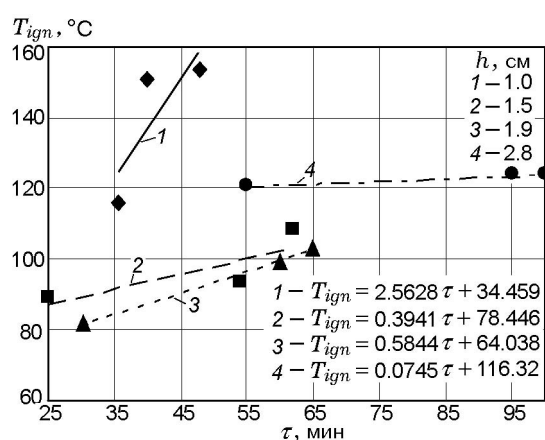


Рис. 12. Соотношения между температурой и временем задержки воспламенения слоя пыли различной глубины:

$D = 5$ см, $d_p = 75 \div 106, 106 \div 120$ и $120 \div 150$ мкм соответственно для каждой точки слева направо на каждой линии

ния слоев пыли различной толщины представлено на рис. 12. Там же приведена эмпирическая формула, связывающая эти величины. Высокие значения температуры воспламенения пыли получены при больших временах задержки воспламенения. По мере уменьшения размеров частиц увеличивается время достижения температурной неустойчивости. Общая эмпирическая формула для задержки воспламенения пыли может быть записана в виде

$$\tau = (-0.07222D^2 + 3.172D + 20.642)(h + 0.05803)$$

с максимальной погрешностью +10 % и суммарной ошибкой 0.626 %, для температуры воспламенения — в виде

$$T = (-0.0165D^2 + 0.146D + 1.402) \times$$

$$\times (h^3 - 2.064h^2 - 2.236h + 38.115)$$

с максимальной погрешностью +9.269 % и суммарной ошибкой 1.9 %. Эти соотношения применимы для частиц размером от 75 мкм до 1.8 мм.

ВЫВОДЫ

1. На экспериментальных зависимостях температуры от времени наглядно показаны примеры температурной неустойчивости в случае воспламенения (сверхкритический случай) и саморазогрева без воспламенения (докритический случай).

2. Все кривые воспламенения демонстрируют постепенный рост температуры и затем внезапный резкий скачок, обусловленный воспламенением (таким образом можно определить температуру воспламенения). Воспламенение возникает в точке изгиба либо изменения наклона кривой до того, как достигается максимальная температура пыли.

3. Показано, что по мере роста начальной температуры поверхности пластины нагрева максимальная температура воспламенения горючей пыли увеличивается, а время задержки уменьшается.

4. Во всех описанных в работе экспериментах наблюдалось уменьшение минимальной необходимой для воспламенения пыли температуры при увеличении толщины слоя. Аналогичные результаты приведены в литературе для материалов, способных к тлеющему горению, включая различные виды топлив и пыли промышленного и сельскохозяйственного происхождения. В толстых слоях верхняя часть слоя изолирует центральную. В результате тепло, генерируемое в центральной части слоя за счет экзотермического окисления нагреваемого материала, неохотно покидает слой. И наоборот, в тонких слоях потери тепла большие и требуется более горячая поверхность, чтобы нагреть слой до точки воспламенения. Толстые слои пыли опасны не только потому, что воспламеняются при более низкой температуре, но и потому, что процесс тлеющего горения развивается внутри слоя и не всегда виден. Другая опасность толстых слоев пыли состоит в их способности изолировать горячую поверхность, что ведет к росту температуры поверхности [5].

5. В опытах минимальная для воспламенения пыли температура поверхности нагрева уменьшается для мелких частиц ($d_p = 75 \div 106$ мкм) при глубине слоя 1 см, что вполне закономерно. Но она уменьшается и для более толстых слоев с крупными частицами, что является неожиданным. Минимальная температура воспламенения для крупнозернистой пыли ненамного ниже, чем для мелкозернистой. Возможным объяснением может быть наличие многочисленных трещин, возникающих во время горения пыли, и участков обугленных слоев, оторвавшихся с поверхности нагрева, что дает воздуху доступ ко всей поверхности. В результате достигаются высокие температуры. По мере увеличения глубины слоя пыли тем-

пература ее воспламенения уменьшается.

6. Тепловые потери и наличие кислорода в слое зависят от его формы и размера. В опытах с пластиной нагрева отношение диаметра к толщине слоя описывает его форму; для ограничения тепловых потерь по внешней границе предпочтительным является отношение, равное по меньшей мере значению 5. Отношение диаметра к толщине в наших экспериментах варьировалось от 5 до 15 для различных исследованных слоев. Слой, оговоренный в экспериментальной процедуре, рекомендуемой НАН, имеет 100 мм в диаметре и 12.7 мм в высоту, т. е. отношение диаметра к толщине равно 7.9. Опыты показывают, что минимальная для воспламенения пыли температура поверхности нагрева уменьшается при увеличении диаметра кольца (или росте отношения диаметра к толщине слоя). Это происходит вследствие того, что тепловой поток в направлении слоя (перенос тепла от поверхности нагрева на единицу площади) более интенсивный и воспламенение реализуется легче.

7. Представлены эмпирические формулы, связывающие минимальную для воспламенения пыли температуру поверхности нагрева, температуру воспламенения и время задержки воспламенения пыли с размерами образца и частотой.

Отвественный исполнитель признателен Университету г. Загазиг за финансовую поддержку, оказанную в рамках гранта третьей стадии исследовательских проектов 391-15-6-2009. Авторы благодарят инженера Мохамеда Лотфи и технического инженера Мохамеда Рейди за содействие и помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Palmer K. N., Tonkin P. S.** The ignition of dust layers on a hot surface // *Combust. Flame.* — 1957. — V. 1, N 1. — P. 14–18.
2. **Bowes P. C., Townshend S. E.** Ignition of combustible dusts on hot surfaces // *Brit. J. Appl. Phys.* — 1962. — V. 13, N 3. — P. 105.
3. **Synnott E. C., Glyonn J. B., Duane T. C.** Minimum ignition temperature of a self-raising flour on a standard hot-plate // *J. Food Eng.* — 1984. — V. 3, N 2. — P. 151–160.
4. **Tyler B. J., Henderson D. K.** Spontaneous ignition in dust layers: Comparison of experimental and calculated values // *ICHEME Symp. Ser.* — 1987. — N 102. — P. 45–59.
5. **Miron Y., Lazzara C. P.** Hot-surface ignition temperatures of dust layers // *Fire and Mater. J.* — 1988. — V. 12, N 3. — P. 115–126.

6. **Hawing C. C., Litton C. D.** Ignition of combustible dust layers on a hot surface // Fire Safety Sci. — 1991. — V. 3. — P. 187–196.
7. **Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A., Sliz J.** Ignition temperature of a combustible dust layer at constant temperature and constant heat flux // J. Phys. IV (France). — 2002. — T. 12, N 7. — P. 47–51.
8. **Dyduch Z., Majcher B.** Ignition of a dust layer by a constant heat flux transport in the layer // J. Loss Prev. Process Ind. — 2006. — V. 19, N 2. — P. 233–237.
9. **Janes A., Carson D., Accorsi A., Chainiaux J., Tribouilloy B., Morainvillers D.** Correlation between self-ignition of a dust layer on a hot surface and in baskets in an oven // J. Hazard. Mater. — 2008. — V. 159, N 2–3. — P. 528–535.
10. **National Academy of Sciences, Committee on Evaluation of Industrial Hazards, Classification of Combustible Dusts Relative to Electrical Equipment in Class I // Hazardous Locations, NMAB 353-4.** — Washington, DC: Nat. Acad. Press, 1982.
11. **International Electro-technical Commission, Technical Committee N 31: Electrical Apparatus for Explosive Atmospheres: Sub-committee 31H: Apparatus for Use in the Presence of Ignitable Dust. Methods for Determining the Minimum Ignition Temperature of Dusts, Part 1; Dust Layer on a Heated Surface at a Constant Temperature,** April 1982.

*Поступила в редакцию 21/IX 2011 г.,
в окончательном варианте — 3/VII 2012 г.*
