

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ И ИХ АГЛОМЕРАЦИИ НА МИНИМАЛЬНУЮ ВЗРЫВООПАСНУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ И СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКАХ

K. Ichinose, T. Mogi, R. Dobashi

Токийский университет, Токио, Япония, k_ichinose@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

Исследуется характер распространения пламени и влияние агломерации частиц полиметилметакрилата при изменении размера. Используются частицы с очень узким распределением по размерам. Показано, что при уменьшении размера частиц минимальная взрывоопасная концентрация увеличивается, скорость распространения пламени также увеличивается. Таким образом, минимальная взрывоопасная концентрация и скорость распространения пламени зависят от размера частиц противоположным образом. Предполагается, что минимальная взрывоопасная концентрация может сильно зависеть от расстояния между частицами, в то время как скорость распространения пламени определяется удельной площадью поверхности частиц. Следует подчеркнуть, что сила взрыва может быть значительной в случае очень малых частиц, несмотря на то, что минимальная взрывоопасная концентрация достаточно велика.

Ключевые слова: взрыв пыли, размер частиц, агломерация, распространение пламени.

DOI 10.15372/FGV20200405

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв пыли развивается, если в облако горючих частиц в воздухе вносится достаточная для зажигания энергия, обусловленная, например, статическим электричеством. По мере распространения пламени давление существенно возрастает, что создает значительную опасность как людям, так и инфраструктуре.

Взрыв пыли — сложное явление распространения пламени в гетерогенной среде: материал частиц подвергается нагреву, испарению, пиролизу, происходят смещение летучих с окислителем, воспламенение, горение и погасание пламени. Можно ожидать, что с уменьшением размера частиц возрастет риск потенциального взрыва, поскольку увеличение удельной площади поверхности повышает реакционную способность пылевого облака [1]. В результате облегчается воспламенение облака, давление растет быстрее и увеличивается риск взрыва пыли [2]. Однако снижение размера частиц до десятков микрометров способствует агломерации и изменяет условия рассеивания частиц [3]. Чтобы адекватно оценить риск возникновения взрыва пыли с очень малым размером частиц, нужно изучить соотношение между ха-

рактером распространения пламени и такими особенностями дисперсной фазы, как размер частиц и их агломерация.

В ранее выполненном исследовании [4] распространение пламени по облаку частиц 1-октадеканола было в основном поддержано горением малых частиц. Предполагалось, что опасность взрыва такой смеси определяется среднеповерхностным диаметром [5]. Было доказано, что именно размер частиц пыли наиболее сильно влияет на распространение пламени и подавление взрыва [6]. Установлено также, что характер распространения пламени отличается для разных распределений частиц по размерам, даже если среднеповерхностный диаметр остается неизменным [7]. При этом отмечалось, что наличие агломератов могло существенно влиять на характеристики взрыва [8]. В работе [9] наблюдали увеличение скорости распространения пламени по мере уменьшения диаметра частиц алюминия от микро до нанометров. Сообщалось также о значительном увеличении риска взрыва пыли при уменьшении диаметра частиц порошка магния в микронном диапазоне. Напротив, в нанометровом диапазоне при уменьшении диаметра частиц указанный риск уменьшался [10].

Цель данной работы — исследовать влияние размера частиц и их агломерации на характер распространения пламени в облаках пыли.

Минимальная взрывоопасная концентрация частиц рассматривается в качестве индикатора возможности взрыва, а скорость распространения пламени — в качестве индикатора силы взрыва.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

1.1. Частицы ПММА

Использовались сферические частицы полиметилметакрилата (ПММА) с очень узким распределением по размерам. В порошке не было агломерации частиц. Рассмотрено шесть порошков с разным размером частиц. Среднеобъемные диаметры частиц составляли $d_{30} = 9.1, 20.5, 34.1, 40.0, 48.5, 107.4$ мкм. Изображение частиц ПММА диаметром $d_{30} = 48.5$ мкм показано на рис. 1.

1.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для измерения минимальной взрывоопасной концентрации (МВК) представляет собой трубу Хартмана, состоящую из цилиндрической взрывной трубки 1 объемом 0.0012 м^3 , воздушных патрубков и искровых электродов 2 (рис. 2). Частицы ПММА помещались в нижнюю часть взрывной трубки и распылялись сжатым воздухом (избыточное давление 0.06 МПа) для образования пылевого облака. Через 200 мс происходил разряд неоновый трансформатора 3 (15 кВ) с образованием искры между двумя

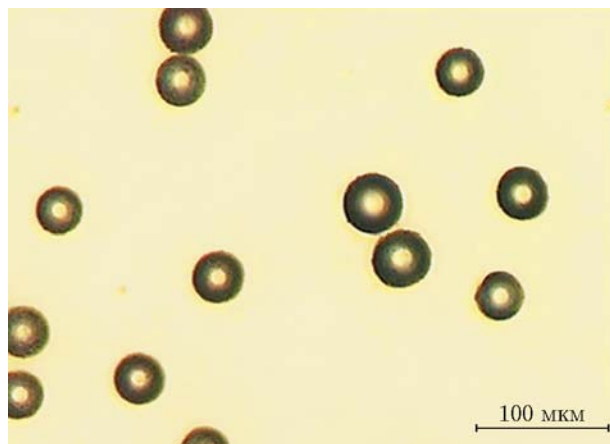


Рис. 1. Изображение частиц ПММА со среднеобъемным диаметром 48.5 мкм

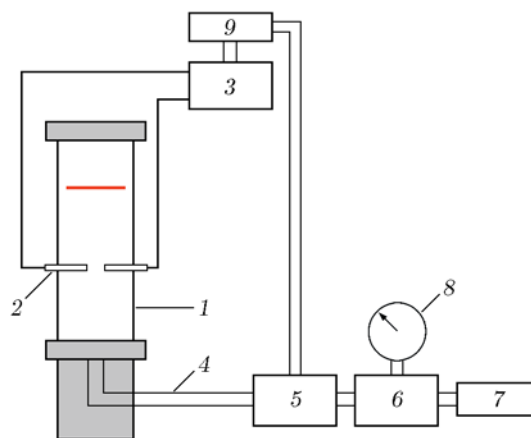


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения минимальной взрывоопасной концентрации:

1 — взрывная трубка, 2 — искровые электроды, 3 — неоновый трансформатор, 4 — воздуховод, 5 — вентиль, 6 — резервуар с воздухом, 7 — компрессор, 8 — манометр, 9 — таймер

вольфрамовыми электродами, которая поджигала пылевое облако в центре взрывной трубки. К моменту разряда облако частиц становилось однородным и устойчивым. Межэлектродное расстояние равно 2 мм . Процесс распространения пламени регистрировался видеокамерой.

Экспериментальная установка для измерения скорости распространения пламени (v_f) состоит из цилиндрической взрывной трубки объемом 0.0013 м^3 , воздушных патрубков и искровых электродов (рис. 3). На верхней части трубы закреплялась сетка, которая препятствовала вылету частиц. Частицы ПММА помещались в нижнюю часть взрывной трубки и распылялись сжатым воздухом (0.09 МПа) для формирования облака. Через 500 мс происходил разряд неоновый трансформатора (15 кВ) с образованием искры между двумя железными электродами, которая поджигала пылевое облако. В данной установке облако частиц становилось однородным и устойчивым к моменту разряда. За 200 мс до поджига удалялись фиксаторы соленоидов и средняя часть трубы опускалась, открывая пространство вокруг очага воспламенения. Длительность воспламенения задавалась импульсным генератором (Quantum Composer Sapphire 9200 Series). Распространение пламени в открытом пространстве в отсутствие стенок трубы регистрирова-

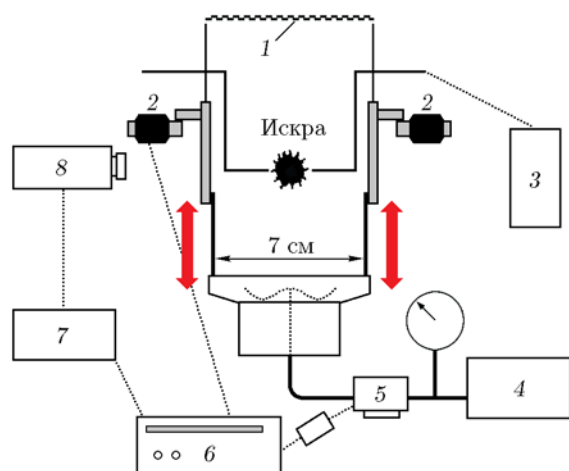


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения скорости распространения пламени:

1 — взрывная трубка, 2 — соленоид, 3 — воспламенитель, 4 — воздушный резервуар, 5 — вентиль, 6 — импульсный генератор, 7 — компьютер, 8 — видеокамера

лось высокоскоростной видеокамерой Photron Fastcam SA2.

Перед воспламенением диспергированные частицы собирали и анализировали с помощью оптического микроскопа Keyence VH-5000. Распределение составляющих облако частиц по размерам измеряли методом лазерной дифракции и рассеяния с помощью измерительного прибора Sysmex Spraytec.

1.3. Минимальная взрывоопасная концентрация

Минимальная концентрация пыли, при которой она становится горючей, называемая минимальной взрывоопасной концентрацией, — это один из индикаторов возможности взрыва. Эксперименты выполнялись в соответствии с промышленным стандартом Японии Z 8818 [11]. Для каждой концентрации пыли было выполнено пять измерений. Взрыв считался состоявшимся, если хотя бы однажды пламя распространялось на высоту 10 см над точкой зажигания, т. е. до взрывной линии, показанной на рис. 4. Другими словами, если пылевое облако не взрывалось в пяти опытах подряд, соответствующая концентрация пыли считалась невзрывоопасной. С помощью видеокамеры проверяли, было ли пылевое облако однородным и распространялось ли пламя выше взрывной линии. Эксперименты выполнялись для всех рассмотренных размеров частиц $d_{30} =$

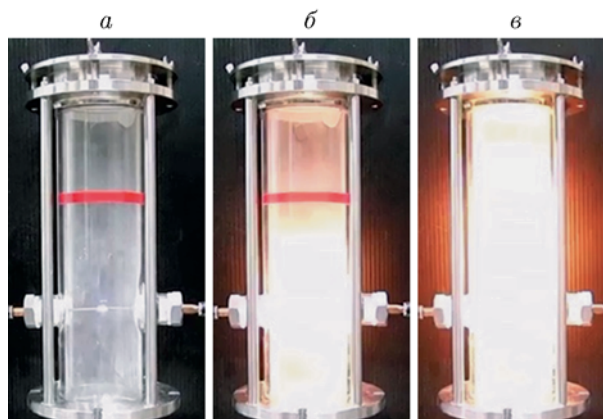


Рис. 4. Распространение пламени в трубе Хартмана

9.1, 20.5, 34.1, 40.0, 48.5, 107.4 мкм, в результате чего была измерена зависимость МВК от диаметра частиц.

1.4. Скорость распространения пламени

Средняя скорость распространения пламени v_f является индикатором силы взрыва. В наших экспериментах ее определяли по углу наклона зависимости радиуса пламени R_f от времени. Значение R_f измерялось как половина горизонтального расстояния между фронтами пламени с интервалом 1 мс. Эксперименты выполнялись для частиц ПММА диаметром $d_{30} = 9.1, 20.5, 34.1, 40.0, 48.5, 107.4$ мкм при их концентрациях 155, 230, 385 и 575 г/м³. Распространение пламени в облаке пыли с диаметром частиц 34.1 мкм и концентрацией 385 г/м³ иллюстрирует рис. 5, а соответствующая зависимость радиуса пламени R_f от времени показана на рис. 6, из которого следует, что радиус линейно растет со временем по истечении начального переходного периода.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Минимальная взрывоопасная концентрация

Измеренная зависимость МВК C_{\min} от диаметра частиц показана на рис. 7. Штриховая линия иллюстрирует тенденцию снижения МВК при уменьшении диаметра частиц из-за увеличения удельной поверхности и вызванного этим роста реакционной способности облака. Однако в области диаметров $d_{30} < 50$ мкм результаты данной работы указывают на увеличение МВК при уменьшении диаметра. Эта

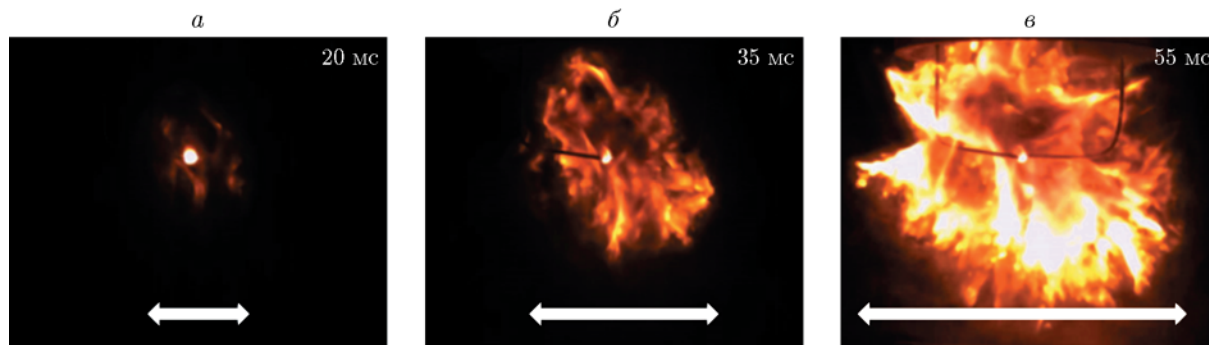


Рис. 5. Распространение пламени в облаке пыли с диаметром частиц 34.1 мкм и концентрацией 385 г/м³

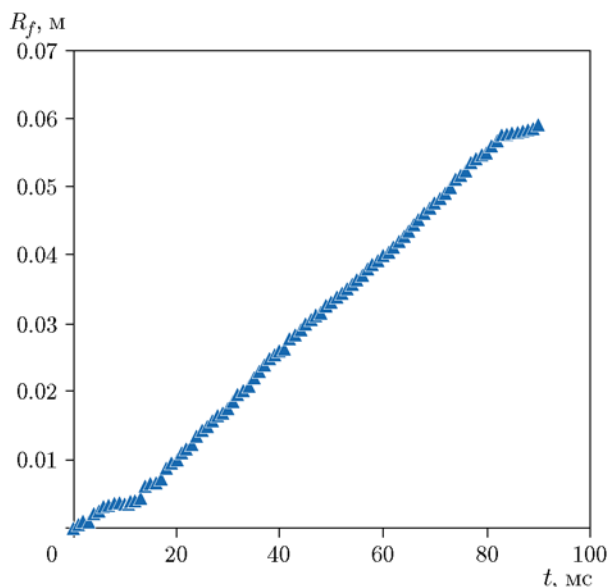


Рис. 6. Зависимость радиуса пламени от времени при распространении пламени в облаке пыли с диаметром частиц 34.1 мкм и концентрацией 385 г/м³

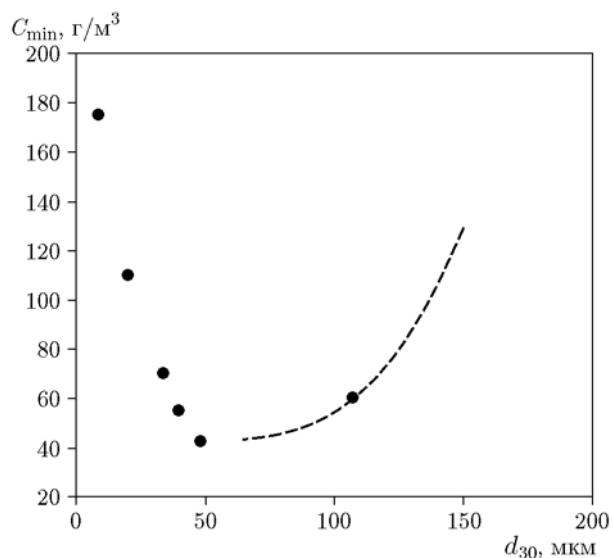


Рис. 7. Измеренная зависимость минимальной взрывоопасной концентрации от диаметра частиц:

штриховая линия показывает возрастание МВК при увеличении диаметра частиц

тенденция оказалась противоположной результатам предыдущих исследований. Указанную зависимость можно объяснить агломерацией частиц. В самом деле, при меньшем размере взаимодействие между частицами усиливается. Поэтому мелкие частицы при столкновении легче образуют большие агломераты. Это подтверждается тем, что в области $d_{30} < 50$ мкм распределение частиц по размерам содержит большое количество частиц, размер которых превышает исходный диаметр (рис. 8, а, б). Напротив, в случае $d_{30} > 50$ мкм доля больших агломератов в измеренном распределении по размерам мала (рис. 8, в, г). Таким образом,

уменьшение размера частиц способствует их агломерации. Микрофотография на рис. 9 также подтверждает формирование агломератов из нескольких частиц малого диаметра.

Важным параметром, влияющим на концентрационный предел воспламенения, является расстояние между частицами. Поскольку счетная концентрация частиц уменьшается в результате агломерации, расстояние между агломератами оказывается больше, чем расстояние между отдельными частицами до агломерации. Это может затруднить непрерывное распространение пламени. В результате можно сделать заключение, что МВК растет по ме-

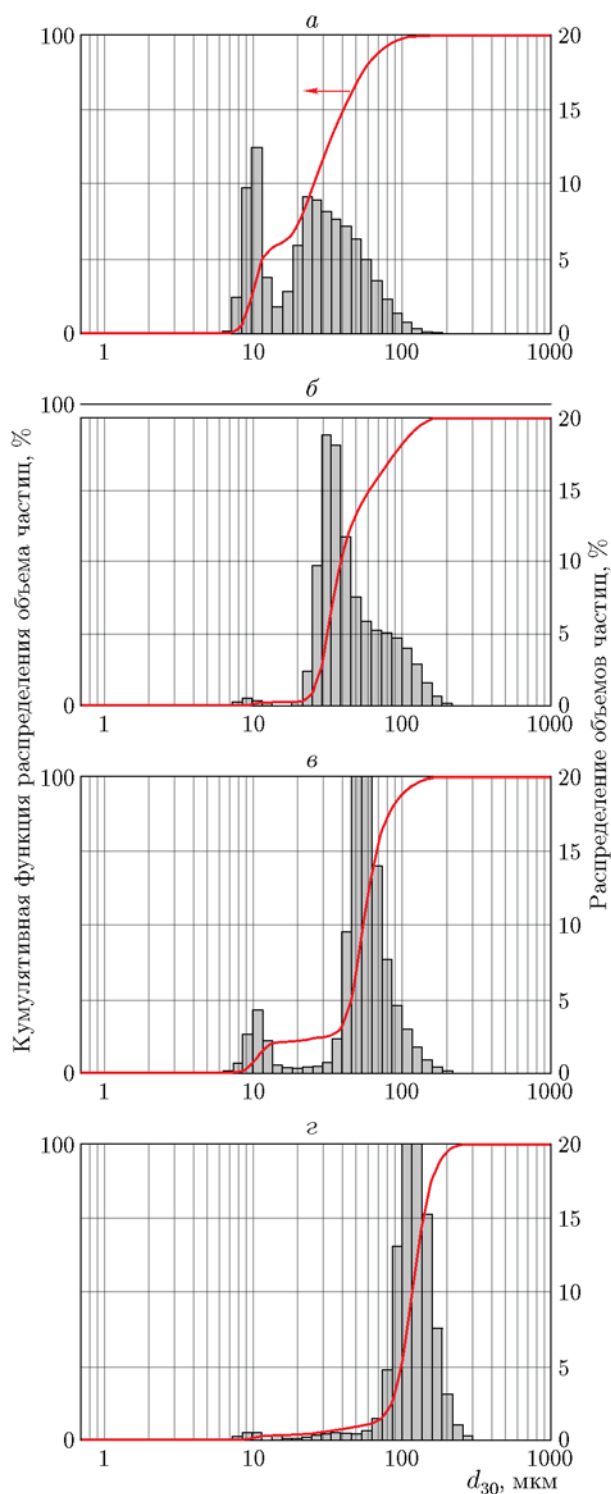


Рис. 8. Распределение частиц в облаке по размерам:

диаметр исходных частиц: *a* — 9.1 мкм, *б* — 34.1 мкм, *в* — 48.5 мкм, *г* — 107.4 мкм

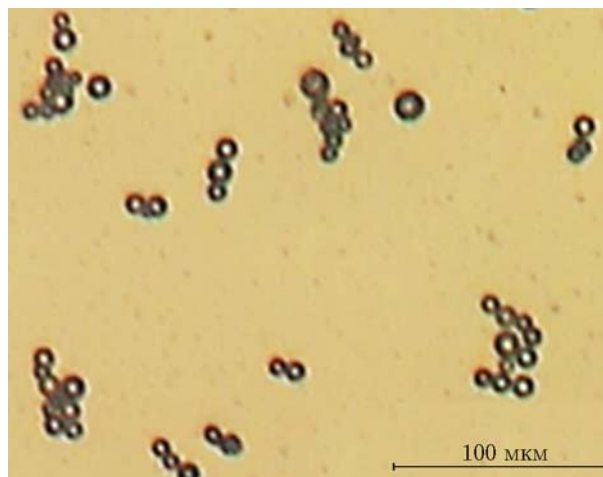


Рис. 9. Агломераты, образованные частицами ПММА диаметром 9.1 мкм

ре измельчения частиц, если диаметр исходных частиц достаточно мал.

2.2. Скорость распространения пламени

Зависимости v_f от размера частиц при их концентрации 155, 230, 385 и 575 г/м³ показаны на рис. 10, *a*. При концентрации 155 г/м³ распространение пламени не происходит, если диаметр частиц меньше 40 мкм. Это связано с тем, что концентрация частиц оказывается ниже МВК. С другой стороны, если концентрация пыли существенно превышает МВК (230, 385 и 575 г/м³), то скорость распространения пламени увеличивается при уменьшении размера частиц. Это согласуется с общепринятой тенденцией, характерной для взрыва пыли. В случае большой концентрации частиц возможно непрерывное распространение пламени несмотря на развитие агломерации. Удельная площадь поверхности агломератов больше удельной площади сферических частиц такого же размера. Развитая удельная поверхность способствует ускоряющемуся распространению пламени.

Измеренные зависимости v_f от концентрации пыли с разными диаметрами частиц показаны на рис. 10, *б*. Горение более крупных частиц слабее зависит от концентрации, в то время как для мелких частиц скорость распространения пламени быстро уменьшается по мере приближения к МВК. В случае низкой концентрации вызванные агломерацией уменьше-

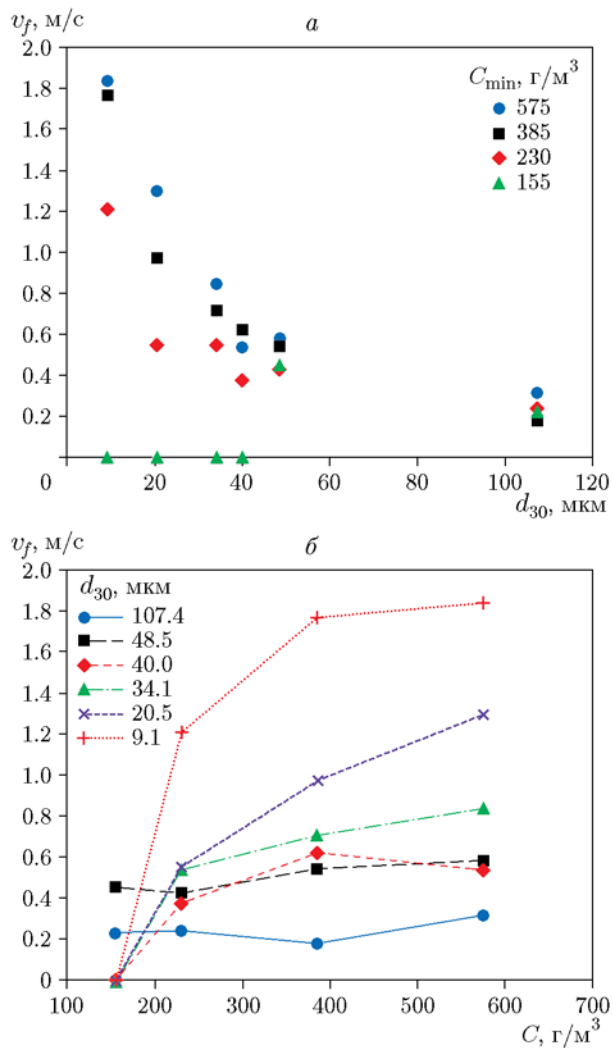


Рис. 10. Результаты измерения скорости пламени в зависимости от диаметра частиц (а) и концентрации пыли (б)

ние счетной концентрации и увеличение межчастичного расстояния затрудняют непрерывное распространение пламени. Это значит, что в случае малых частиц значение v_f также может зависеть от их агломерации вблизи МК. При концентрации, близкой к МК, для мелких частиц скорость распространения пламени сильно зависит от концентрации.

Можно заключить, что минимальная взрывоопасная концентрация определяется межчастичным расстоянием, в то время как скорость распространения пламени сильно зависит от удельной площади поверхности. Следует подчеркнуть, что сила взрыва может быть особенно большой в случае мелких ча-

стиц, несмотря на то что вероятность такого взрыва снижается из-за увеличения МК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние размера мелкодисперсных частиц ПММА на минимальную взрывоопасную концентрацию и скорость распространения пламени. При диаметре частиц меньше 50 мкм минимальная взрывоопасная концентрация увеличивается при уменьшении их диаметра. Это объясняется агломерацией частиц, которая приводит к уменьшению счетной концентрации частиц и увеличению межчастичного расстояния, что затрудняет непрерывное распространение пламени. С другой стороны, скорость распространения пламени увеличивается при уменьшении размера частиц в случае большой концентрации, поскольку невелико влияние агломерации. Это связано с тем, что удельная поверхность не изменяется при агломерации частиц. В то же время скорость распространения пламени быстро уменьшается при приближении к минимальной взрывоопасной концентрации. Когда концентрация пыли снижается и приближается к минимальному пределу, вызванное агломерацией увеличение межчастичного расстояния затрудняет непрерывное распространение пламени. В результате оказывается, что минимальная взрывоопасная концентрация и скорость пламени зависят от диаметра частиц противоположным образом: концентрация определяется межчастичным расстоянием, а скорость — удельной площадью поверхности. Сила взрыва оказывается особенно большой в случае мелких частиц, несмотря на то что увеличение минимальной взрывоопасной концентрации снижает вероятность взрыва.

Авторы выражают искреннюю благодарность Negami Chemical Industrial Co., Ltd. за предоставленные для экспериментов порошки ПММА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Eckhoff R. K.** Dust Explosions in the Process Industries. — 3rd ed. — Gulf Publ. Co., 2003.
2. **Dobashi R.** Risk of dust explosions of combustible nanomaterials // J. Phys.: Conf. Ser. — 2009. — V. 170. — 012029.
3. **Ichinose K., Mogi T., Dobashi R.** Effects of particle size and agglomeration on flame propagation behavior in dust clouds // Proc. of the

- 9th Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). — Peter the Great St. Petersburg Polytech. Univ. Press, 2019. — P. 411–417.
4. **Chen J. L., Dobashi R., Hirano T.** Mechanisms of flame propagation through combustible particle clouds // J. Loss Prev. Process Ind. — 1996. — V. 9, N 3. — P. 225–229.
 5. **Castellanos D., Carreto-Vazquez V. H., Mashuga C. V., Trottier R., Mejia A. F., Mannan M. S.** The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust // Powder Technol. — 2014. — V. 254. — P. 331–337.
 6. **Harris M. L., Sapko M. J., Zlochower I. A., Perera I. E., Weiss E. S.** Particle size and surface area effects on explosibility using a 20-L chamber // J. Loss Prev. Process Ind. — 2015. — V. 37. — P. 33–38.
 7. **Yuzuriha Y., Gao W., Mogi T., Dobashi R.** Effects of particle size distributions on flame propagation behavior through clouds of PMMA // J. Loss Prev. Process Ind. — 2017. — V. 49. — P. 852–858.
 8. **Mogi T., Sugiura A., Usuba S., Nifuku M., Matsunaga T., Dobashi R.** Dust explosion characteristics of ultrafine polymethylmethacrylate (PMMA) particles // Bull. Jap. Association Fire Sci. Eng. — 2017. — V. 67, N 2. — P. 87–92.
 9. **Huang Y., Risha G. A., Yang V., Yetter R. A.** Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air // Combust. Flame. — 2009. — V. 156, N 1. — P. 5–13.
 10. **Mittal M.** Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders // J. Loss Prev. Process Ind. — 2014. — V. 27. — P. 55–64.
 11. **Nifuku M., Matsuda T., Enomoto H.** Recent development of standardization of testing methods for dust explosion in Japan // J. Loss Prev. Process Ind. — 2000. — V. 13, N 3-5. — P. 243–251.

*Поступила в редакцию 09.01.2020.
Принята к публикации 19.02.2020.*
