

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ПОРИСТОЙ САЖИСТОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Селиванов С.Е., Тригуб С.Н.

Херсонская государственная морская академия,

Калинчак В.В., Черненко А.С.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

Работа посвящена актуальной проблеме – профилактике пожарной опасности, связанной с наличием легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на судах, что создает возможность возникновения пожара в результате их воспламенения. Дополнительное присутствие источника зажигания облегчает эту задачу, таким источником зажигания может служить углеродная (сажистая) частица, имеющая способность поглощать тепловое излучение. Именно поглощённое тепловое излучение и определяет критические диаметры самовоспламенения и зажигания углеродных частиц. Цель работы – изучение механизма влияния мощности поглощённого теплового излучения, начального размера и скорости движения углеродной частицы на температуру и время горения, критические диаметры воспламенения и погасания пористой частицы сажи в воздухе комнатной температуры. В результате исследований показана обратная пропорциональная зависимость критического диаметра самовоспламенения от мощности теплового излучения, погасившая углеродная частица не перестаёт нести пожарную опасность.

Ключевые слова: сажистая частица, пожар, воспламенение, зажигание, тепловое излучение.

Введение. Наличие легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей на судах создает возможность возникновения пожара в результате их воспламенения. Дополнительное присутствие источника зажигания облегчает эту задачу. Пожарная опасность образующихся при трении и ударах деталей, сварке с выбросом накалившихся металлических частиц, прежде всего, определяется их температурой, размером и скоростью движения, поэтому необходимо соблюдение техники безопасности при этих работах, особенно при проведении сварочных работ и резке металлов [1, 2].

Другим источником зажигания может служить углеродная (сажистая) частица, имеющая способность поглощать тепловое излучение. Известно, что в воздухе комнатной температуры углеродная частица самопроизвольно не способна перейти на высокотемпературный режим окисления и создать необходимые условия воспламенения газовых смесей, в объеме содержащих пары легковоспламеняющихся жидкостей. Именно поглощённое тепловое излучение и определяет критические диаметры самовоспламенения и зажигания углеродных частиц, выше которых в воздухе комнатной температуры происходит их квазистационарное горение, а затем самопроизвольное погасание [3, 4]. Дополнительное возрастание температуры частицы возможно и за счет гетерогенной каталитической реакции между компонентами газовой смеси.

Обоснование пожарной опасности частицы основано на сравнении времени ее высокотемпературного окисления и времени зажигания паровоздушной смеси ЛВЖ. Для оценки времени зажигания t_c смеси, предполагая частицу неподвижной, используют метод Зельдовича, а в дальнейшем и метод Калинчака-Михеля [5, 6]:

$$t_{\bar{n}} = \frac{1}{\pi \dot{a}_g} \left(\frac{1}{r_{kr}} - \frac{1}{r_s} \right)^{-2} \quad (1)$$

где \dot{a}_g – коэффициент температуропроводности смеси, $\text{м}^2/\text{с}$; r_s – радиус частицы, м ; r_{kr} – критический радиус частицы, м .

Критический размер в данном методе оценивают как

$$r_{kr} = \sqrt{\frac{\lambda_g (T_s - T_g)^2 E}{2Q\rho_g Z_{cop} RT_s^2 k_0} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right)} \quad (2)$$

где T_s – температура поверхности частицы, К; T_g – температура газовой смеси, К; λ_g – коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·К); Q – тепловой эффект реакции на килограмм горючего, Дж/кг; Z_{cop} – относительная массовая концентрация горючего, ρ_g – плотность смеси, кг/м³; k_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с; E – энергия активации реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Как видно, критический радиус частицы, а с ним время зажигания, существенно зависит от температуры поверхности частицы.

Цель работы. Изучить механизм влияния мощности поглощённого теплового излучения, начального размера и скорости движения углеродной частицы на температуру и время горения, критические диаметры воспламенения и погасания пористой частицы сажи в воздухе комнатной температуры.

Результаты исследований. Данное исследование является продолжением работ [3, 7]. Объектом исследования является пористая частица сажи, поглощающая тепловое излучение в воздухе комнатной температуры. В результате нагрева на ее поверхности и внутри пор возрастают скорости параллельных экзотермических реакций {реакция I – $C + O_2 = CO_2$, реакция II – $2C + O_2 = 2CO$ }.

Задачи исследования сводятся: 1 – исследование стадийных закономерностей временных зависимостей диаметра и плотности частицы сажи, скоростей образования угарного газа и углекислого газа, температуры частицы и её производной (для определения характерных температур и длительностей стадий); 2 – исследование критических характеристик самовоспламенения и самопроизвольного погасания; 3 – изучение закономерностей влияния диаметра частицы на период индукции, максимальную температуру и время горения при различных мощностях поглощённого теплового излучения.

В результате совместного действия химического тепловыделения и поглощённого тепла происходит воспламенение частицы сажи, если диаметр частицы больше диаметра воспламенения. Это означает – переход частицы на режим квазистационарного горения (высокотемпературное окисление), который характеризуется не только высокой температурой, но и высокой скоростью реагирования углерода с окислителем воздуха, что способствует значительному уменьшению диаметра и плотности частицы. Уменьшение диаметра частицы в процессе её горения приводит к росту коэффициента теплоотдачи и уменьшению температуры горения. При достижении диаметра и температуры критических значений происходит самопроизвольное погасание – т.е. переход на режим медленного окисления частицы сажи. Период индукции воспламенения (время воспламенения) определяется суммой длительностей двух стадий: 1 – стадия прогрева и самоускорения; 2 – стадия нестационарного горения и достижения квазистационарной температуры горения.

Для выяснения влияния мощности поглощённого теплового излучения на времена воспламенения и горения частицы, температуру высокотемпературного окисления и параметры самопроизвольного погасания необходимо рассмотреть временные зависимости температуры, диаметра и скоростей реакций (рис. 1).

В воздухе комнатной температуры для самовоспламенения частицы необходимо направить на нее излучение с интенсивностью выше некоторого критического значения [1, 3]. Точки – это эксперимент Букатого и Суторихина [6], при $I = 1,6 \cdot 10^7$ Вт/м², $K_\alpha = 0,38$, $q_{h,ads} = K_\alpha I / 4$. Расчеты проводились для частицы сажи: $Q_1 = 12,343$ МДж/кгO₂, $Q_2 = 6,844$ МДж/кгO₂; $E_1 = 167000$ Дж/моль [8, 9]; $F_{v0} = 2 \cdot 10^5$ м⁻¹, $\rho_{real} = 1600$ кг/м³.

Постоянные: $\rho_{g0} = 0.277 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{g0} = 8,19 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c_{g0} = 1110 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $T_0 = 1273 \text{ К}$; $c_c = 780 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_{cb} = 525 \text{ кг/м}^3$; $U_b = 0 \text{ м/с}$, $\varepsilon = 0.78$; $n = 0,75$.

Временные зависимости температуры и диаметра частицы сажи, временной производной температуры и массовых скоростей образования продуктов реакции показаны на рис. 1.

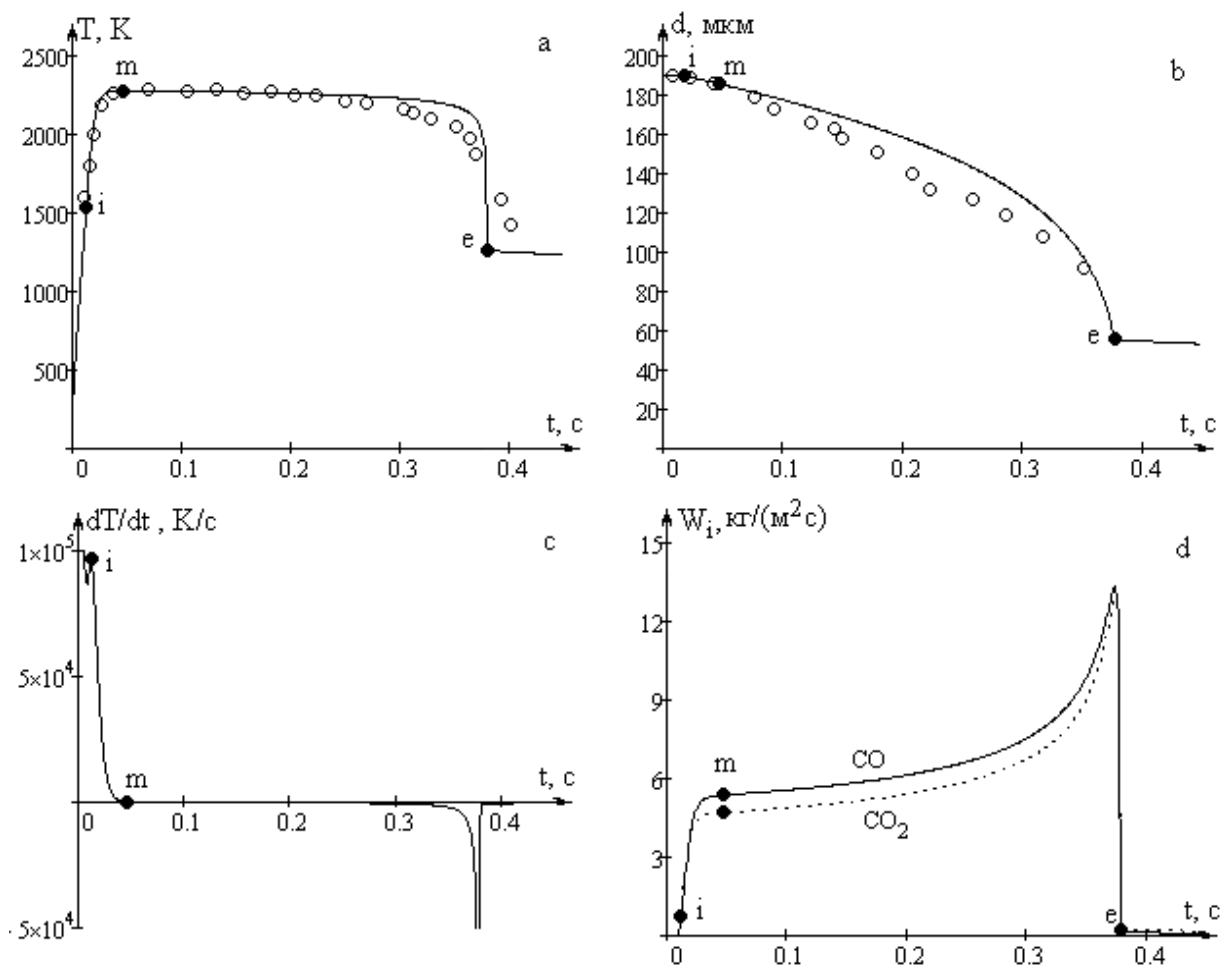


Рис. 1 – Временные зависимости температуры и диаметра частицы сажи, временной производной температуры и массовых скоростей образования продуктов реакции:
 а) $T(t)$, б) $d(t)$, в) $dT/dt(t)$, г) $W_i(t)$

Используемые параметры: $d_b = 190 \text{ мкм}$, $Z_{O_2,\infty} = 0,23$, $U_b = 0 \text{ м/с}$, $T_b = 293 \text{ К}$, $q_{h,ads} = 1,52 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $T_g = T_w = 293 \text{ К}$, о – эксперимент Букатого и Суторихина [6]

Как видно из рис. 1, в общем случае время выхода на высокотемпературный режим можно разбить на несколько стадий, которые условно разделены точками перегиба на временной зависимости температуры частицы. Время достижения первой точки перегиба характеризует время инертного прогрева, когда скорость реакции пренебрежимо мала. Далее с ростом температуры частицы роль химического тепловыделения становится существенной. Достижение второй точки перегиба (точка *i*) можно определить как окончание периода индукции и начало высокотемпературного окисления, когда скорость реакции резко начинает возрастать (рис. 1d). Квасистационарное окисление частицы (малая скорость изменения температуры) наступает спустя некоторое время, которое в случае поглощения теплового излучения можно соотнести с достижением максимальной температуры горения углеродной частицы (точка *m*, рис. 1с).

В дальнейшем в процессе горения с уменьшением диаметра и плотности частицы наблюдается медленное падение квазистационарной температуры горения. Это объясняется возрастанием молекулярно-конвективного теплообмена единицы

поверхности за счет увеличения коэффициента теплообмена с уменьшением диаметра углеродной частицы. В тоже время химическое тепловыделение за счет увеличения коэффициента массопереноса кислорода к единице поверхности частицы возрастает в меньшей степени.

После достижения критических значений d_e и ρ_e резко уменьшалась температура частицы, и пористая углеродная частица самопроизвольно погасала – горение частицы прекращалось, скорость реакций резко уменьшалась, и начиналось её низкотемпературное окисление. Время от окончания воспламенения (точка **i**) до момента самопроизвольного погасания (точка **e**) определялось как время горения частицы. Именно данное время необходимо анализировать для оценки ее пожарной опасности.

На рис. 2 представлено влияние начального размера частицы на период индукции, время горения, максимальную температуру горения и диаметр при самопроизвольном погасании.

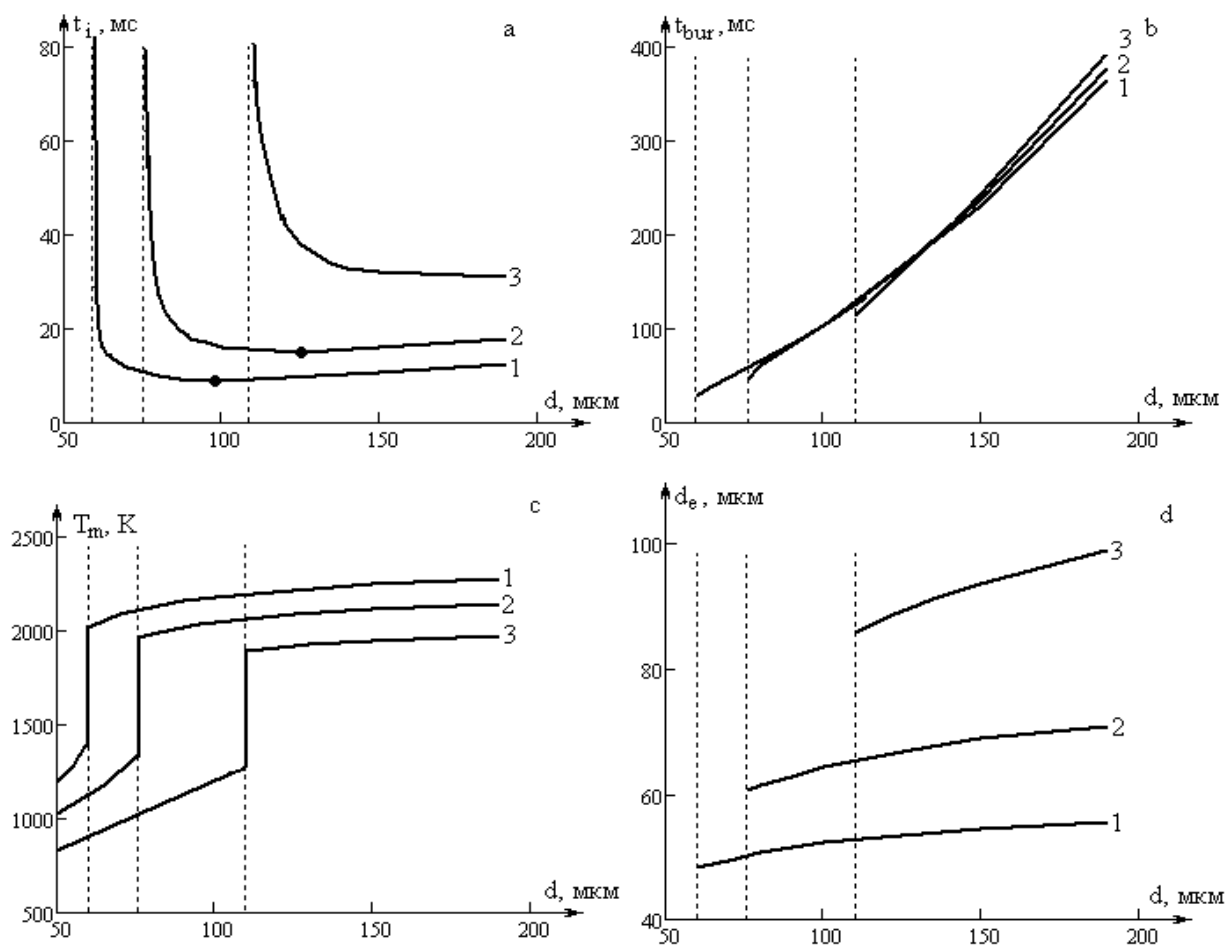


Рис. 2 – Влияние размера углеродной частицы на период индукции, время горения, максимальную температуру горения и диаметр при самопроизвольном погасании

Температура газа $T_g = T_w = 293$ К, $T_b = 293$ К, $Z_{O_2} = 0.23$. Мощность поглощенного теплового излучения $q_{h,ads}$: 1 – $1,52 \cdot 10^6$ Вт/м², 2 – $1,14 \cdot 10^6$ Вт/м², 3 – $0,76 \cdot 10^6$ Вт/м²

Отметим, что на зависимости периода индукции от диаметра частицы наблюдается две характерные особенности. Во-первых, существует некий минимальный (критический) размер частицы (рис. 2а), ниже которого частица не самовоспламеняется в воздухе комнатной температуры при поглощении теплового излучения. Температура частицы при этом существенно ниже, чем для высокотемпературного режима окисления. Наличие критического диаметра объясняется возрастанием теплоотдачи с единицы поверхности частицы к холодному газу при уменьшении размера частицы. Увеличение мощности поглощенного излучения уменьшает не только период индукции, но и обратно пропорционально критический размер воспламенения частицы.

Во-вторых, на зависимости периода индукции от диаметра наблюдается минимум, который смещается в область больших размеров с уменьшением мощности поглощенного теплового излучения. Слева от точки минимума уменьшение периода индукции связано с уменьшением теплоотдачи единицы поверхности частицы с ростом диаметра. Справа от точки минимума небольшое увеличение времени выхода на высокотемпературный режим в связи с возрастанием времени инертного прогрева частицы большего диаметра.

С уменьшением мощности поглощенного теплового излучения практически монотонно уменьшается температура высокотемпературного окисления. Именно это объясняет увеличение среднего диаметра самопроизвольного погасания сажиистой частицы, в результате возрастания относительной роли теплоотдачи от частицы. Поэтому наблюдается слабое влияние мощности поглощенного излучения (рис. 2b) на время горения частицы. Диаметр частицы при самопроизвольном погасании также слабо (изменение до 10 %) зависит от начального размера частицы. Отметим, что погасшая частица продолжает нести пожарную опасность, т.к. поглощение более мощного излучения способна снова воспламениться (рис. 2d).

Высокотемпературное окисление углеродной частицы протекает в переходной, близкой к диффузионной, области (число Семенова больше 3). Поэтому время горения возрастает пропорционально квадрату начального диаметра частицы (рис. 2b).

Ввиду того, что зачастую частицы при попадании в газовую среду, содержащую пары ЛВЖ, являются движущимися, важно проанализировать влияние относительной скорости на рассматриваемые характеристики. Влияние скорости двояко. С одной стороны возрастает роль вынужденной конвекции и, как следствие, теплоотдачи от частицы к газу. С другой стороны увеличивается приток кислорода к единице поверхности, в результате чего возрастает скорость химической реакции при высокотемпературном окислении частицы.

Анализ показал, что для частиц от 50 до 200 мкм наблюдается уменьшение максимальной температуры горения с ростом скорости частицы, что говорит о более сильном ее влиянии на теплоотдачу. Именно поэтому при большем диаметре частицы наблюдается самопроизвольное погасание, что приводит к уменьшению времени горения.

Однако изменение скорости частицы диаметром 100–200 мкм от 0 до 10 м/с незначительное. В момент максимальной температуры (точка m) число Нуссельта возрастает от 2 до 3, что приводит к уменьшению температуры всего лишь в пределах 50 К. В тоже время период индукции меняется в 1,5 раза, а время горения только на 20 %.

Выводы. Поглощение теплового излучения способно привести к устойчивому горению углеродной частицы в газовой смеси комнатной температуры, содержащей кислород. Время и температура высокотемпературного окисления частицы определяется не только мощностью поглощенного теплового излучения, но и диаметром и относительной скоростью углеродной частицы. Показана обратная пропорциональная зависимость критического диаметра самовоспламенения от мощности теплового излучения. Погасшая углеродная частица не перестает нести пожарную опасность. Дальнейшие лабораторные исследования с углеродной частицей в потоке лазерного излучения будут проведены в лаборатории пожарной безопасности и физики горения кафедры БЖД на море Херсонской государственной морской академии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр / Под ред. В. С. Кравченко. – М., Недра. – 1976. – 76 с.
2. Иващенко П. Ф. Исследование механизма искрообразования и поджигающей способности фрикционных искр / П. Ф. Иващенко, В. А. Меньшаков, В. И. Толчинский // Взрывоопасность в строительстве. – М. : МИСИ, 1983. – С. 34-44.
3. Калинин В. В. Влияние поглощенного теплового излучения углеродной частицы на пожарную опасность в рабочей зоне судна / В. В. Калинин, С. Е. Селиванов,

С. Н. Тригуб, А. С. Черненко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 2. – С. 102-110.

4. Букатый В. И. Высокотемпературное горение углеродных частиц в поле интенсивного лазерного излучения / В. И. Букатый, И. А. Суторихин // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, № 3. – С. 9-11.

5. Селиванов С. Е. Воспламенение, зажигание, горение и самопроизвольное погасание углеродной частицы в рабочей зоне / С. Е. Селиванов, С. Н. Тригуб, В. В. Калинин, А. С. Черненко, А. А. Кузьмин // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – № 1. – С. 139-142.

6. Калинин В. В. К стационарной теории гетерогенного воспламенения и потухания частицы в нагретом газообразном окислителе / В. В. Калинин, С. Г. Орловская // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 55, № 2. – С. 232-236.

7. Калинин В. В. Время зажигания паровоздушных легковоспламеняющихся жидкостей фрикционными искрами / В. В. Калинин, М. М. Краснянский, Ю. М. Михель // Физика аэродисперсных систем. – 1983. – № 32. – С. 69-73.

8. Калинин В. В. Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры / В. В. Калинин, А. С. Черненко // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 80-88.

9. Основы практической теории горения : учебное пособие для вузов // В. В. Померанцев. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калинин В.В., Черненко О.С. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРІННЯ ПОРИСТОЇ САЖИСТОЇ ЧАСТИНКИ ПІД ЧАС ПОГЛИНАННЯ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.

Робота присвячена актуальній проблемі – профілактиці пожежної небезпеки, пов'язаної з наявністю легкозаймистих і горючих рідин на судах, що створює можливість виникнення пожежі в результаті їх займання. Додаткова присутність джерела запалювання полегшує це завдання, таким джерелом запалювання може служити вуглецева (сажиста) частка, що має здатність поглинати теплове випромінювання. Саме поглинене теплове випромінювання і визначає критичні діаметри самозаймання та запалювання вуглецевих частинок. Мета роботи – вивчення механізму впливу потужності поглиненого теплового випромінювання, початкового розміру і швидкості руху вуглецевої частинки на температуру і час горіння, критичні діаметри займання і згасання пористої частинки сажі в повітрі кімнатної температури. У результаті досліджень показана зворотна пропорційна залежність критичного діаметра самозаймання від потужності теплового випромінювання, погасла вуглецева частка не перестає нести пожежну небезпеку.

Ключові слова: сажиста частинка, пожежа, займання, запалювання, теплове випромінювання.

Selivanov S.E., Trigub S.N. Kalinchak V.V., Chernenko A.S. COMBUSTION CHARACTERISTICS OF POROUS SOOT PARTICLES DURING ABSORPTION OF THERMAL RADIATION

The paper is devoted to a sore problem - prevention of fire hazards associated with the presence of flammable and combustible liquids on ships, which enhances the risk of fire in case of their inflammation. The additional presence of ignition source increases the possibility mentioned. Carbon (soot) particles having the ability to absorb thermal radiation may easily serve as a source of ignition. Particularly, the absorbed heat radiation determines the critical diameter of the self-ignition and ignition of the carbon particles. The aim of the article is to identify the influence of the power absorbed heat radiation, the initial size and the speed of movement of carbon particles on the temperature and combustion time, the critical diameter of the ignition and extinction of porous particles of soot in the air at a room temperature. The studies have shown inverse proportional dependence of the critical diameter of self-ignition on the power of thermal radiation. The extinguished carbon particle does not cease to bear fire hazard.

Keywords: smoke particles, fire, ignition, ignition, heat radiation.

© Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калинин В.В., Черненко О.С.

Статтю прийнято
до редакції 11.11.14