

УДК 614.84

## ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА КАПЕЛЬ ОГNETУШАЩИХ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

Шаршанов А.Я., к.ф.-м.н, доцент, Абрамов Ю.А., д.т.н., профессор,  
Киреев А.А., к.х.н, доцент

Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина

e-mail: kireev53@mail.ru

*Проведено математическое моделирование поведения капель компонентов огнетушащих гелеобразующих систем при пролете ими области горения. Для этого рассмотрена задача об испарении капли водного раствора соли в горячей газовой среде. На основании разработанной модели оценен минимальный начальный размер капель, обеспечивающих надежное гелеобразование на обрабатываемых поверхностях. Минимальные начальные значения диаметра капли были получены в результате анализа численных решений системы уравнений при помощи компьютерной математической среды «Matlab». При скорости движения капель  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  минимальный начальный диаметр составил 1,1 мм, а при скорости  $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  0,8 мм.*

*Mathematical modeling of the behavior of droplets of gel-forming fire extinguishing systems in their flight through combustion area was carried out. For this purpose, the problem of evaporation of a droplet of water saline solution in the hot gas environment was considered. Basing on the model developed, an estimate was made of the minimal initial diameter of droplets ensuring reliable gel formation on the surfaces under treatments. The minimal initial droplet diameter values were obtained as the result of analysis of numerical solutions of equation systems using «Matlab» software. At the droplets movement rates of  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the minimal initial diameters are 1.1 mm and 0.8 mm respectively.*

(Поступила в редакцию 24 апреля 2013 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Существенным недостатком жидкостных огнетушащих веществ являются большие потери их за счет стекания при обработке вертикальных и наклонных поверхностей. В большинстве случаев при подаче воды компактными струями потери основного огнетушащего вещества – воды превышают 90 %. При подаче воды в распыленном состоянии потери за счет стекания существенно уменьшаются, однако увеличиваются потери за счет уноса мелких капель восходящими конвективными потоками.

Еще одним недостатком жидкостных огнетушащих веществ является низкий теплосъем с нагретых поверхностей за счет эффекта пленочного кипения. А именно, охлаждение твердых горящих поверхностей является необходимым условием прекращения горения твердых горючих материалов (ТГМ) [1].

Ранее для повышения эффективности пожаротушения и оперативной огнезащиты были предложены огнетушащие и огнезащитные гелеобразующие системы (ГОС) [2-3]. Они представляют собой два отдельно хранимых и отдельно-одновременно подаваемых состава. Первый состав представляет собой раствор гелеобразующего компонента. Второй состав – раствор катализатора гелеобразования. При одновременной подаче двух растворов они смешиваются на горящих или защищаемых поверхностях. Между компонентами растворов происходит взаимодействие, приводящее к образованию стойкого геля. Гель образует на поверхности нетекучий огнезащитный слой, который надежно удерживается на вертикальных и наклонных поверхностях.

Преимущество ГОС перед водой заключается в существенном уменьшении потерь

огнетушащего вещества за счет отсутствия стекания с наклонных и вертикальных поверхностей. Это позволяет не только уменьшить расход огнетушащих веществ, но и уменьшить убытки от залива низлежащих этажей.

Одно из условий успешного использования ГОС является подача его компонентов в распыленном виде. Максимальный диаметр капель компонентов ГОС не должен превышать 1,5 мм. Увеличение размера капель сверх этой величины ухудшает условия смешения компонентов, что приводит к частичному стеканию непрореагировавших жидкостей [4-5]. С другой стороны, малый размер капель компонентов ГОС может привести к полному испарению всей жидкости из раствора или к преждевременной коагуляции гелеобразователя (полисиликата натрия) при прохождении ими через область горения. Это приведет к невозможности гелеобразования при смешении компонентов на твердых поверхностях. Вопрос о наименьшем размере капель компонентов ГОС до настоящего времени не был рассмотрен.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью работы является установление нижней границы начального размера капель компонентов ГОС, который надежно обеспечит процесс гелеобразования на поверхности ТГМ. Для этого необходимо рассмотреть задачу об испарении капли водного раствора соли в горячей газовой среде. Для случая чистой воды эта задача давно решена [6]. Будем действовать аналогично, используя только уравнения баланса масс и энергии, заменяя уравнения движения газовых компонент условием изобарности процесса, фактически рассматривая процесс испарения как квазиравновесный.

Написание соответствующих уравнений баланса требует умения рассчитывать потоки массы водяного пара и тепла между поверхностью капли и внешней средой. Решение этой проблемы в приближении сферически симметричного пограничного слоя изложено, например, в монографии [6]. Согласно этим представлениям с каплей воды связано два приповерхностных пограничных слоя: диффузионный (толщиной  $\Delta_D$ ) и температурный (толщиной  $\Delta_T$ ) (рис. 1).

Диффузионный слой содержит избыток водяного пара, парциальное давление которого на внешней границе слоя совпадает с его атмосферным значением  $P_{n0}$ , а давление пара на внутренней границе слоя (непосредственно у поверхности капли) равно  $P_{c.s}(T_k, g_c)$ , где  $P_{c.s}(T, g_c)$  – зависимость давления насыщенного пара воды над поверхностью водного раствора соли от его абсолютной температуры  $T$  и массовой доли соли в растворе  $g_c$ , Па;  $T_k$  – температура поверхности капли, К.

В реализующемся в нашей ситуации квазистационарном режиме испарения поток массы водяного пара  $J_n$  ( $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ ) от капли в газовую среду описывается соотношением

$$J_n = 2\pi \cdot r_k \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_v \cdot P}{R \cdot T} \cdot (\text{Nu}_D + 2) \cdot \ln \left( \frac{P - P_{n0}}{P - P_{c.s}(T_k, g_c)} \right), \quad (1)$$

где  $r_k$  – радиус капли, м;

$R = 8,314 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  – универсальная газовая постоянная;

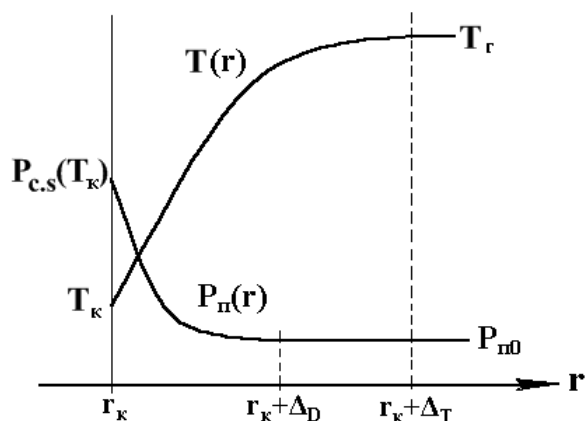


Рисунок 1 – Схема зависимости температуры газовой среды и парциального давления водяного пара от расстояния от центра капли

$\mu_6 = 18 \cdot 10^{-3}$  кг·моль<sup>-1</sup> – молярная масса воды;

$P$  – общее атмосферное давление, Па;

$\bar{T}$  – среднее значение абсолютной температуры газовой среды в диффузионном слое, а усредненное значение коэффициента диффузии пара в газовой среде  $\bar{D}$  определяется формулой

$$\bar{D} = \frac{\bar{T}}{\frac{r_k \cdot (r_k + \Delta_D)}{\Delta_D} \int_{r_k}^{r_k + \Delta_D} \frac{T(r)}{D(T(r)) \cdot r^2} dr}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1},$$

в которой переменная интегрирования  $r$  представляет собой расстояние от центра капли.

Величина  $Nu_D$  называется диффузионным критерием Нуссельта (другое название – критерий Шервуда (Sh)). Она связывает ширину диффузионного слоя  $\Delta_D$  с характерным расстоянием задачи ( $2 \cdot r_k$ ) соотношением

$$\Delta_D = \frac{2 \cdot r_k}{Nu_D}.$$

В квазистационарном режиме испарения согласно [6] поток энергии  $Q$  (Вт) между каплей и внешней средой описывается соотношением:

$$Q = J_n \cdot \left[ h_n(T_k) - \frac{h_n(T_a) - h_n(T_k)}{\exp(B) - 1} \right]. \quad (2)$$

Здесь символом  $B$  обозначена безразмерная величина

$$B \equiv \frac{J_n \cdot c_{pn}}{2\pi \cdot r_k \cdot \bar{\lambda} \cdot (Nu_T + 2)}. \quad (3)$$

Величина  $\bar{\lambda}$  – среднее по температурному слою значение коэффициента теплопроводности парогазовой среды, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. При выводе соотношения (2) предполагалась линейная зависимость удельной массовой энтальпии образования водяного пара  $h_n$ , Дж·кг<sup>-1</sup>, от температуры:

$$h_n(T) = h_n(T_k) + c_{pn} (T - T_k), \quad (4)$$

где  $c_{pn}$  – удельная массовая изобарная теплоемкость пара, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Величина  $Nu_T$  называется критерием Нуссельта. Последний связывает ширину переходного температурного слоя  $\Delta_T$  с характерным расстоянием задачи ( $2 \cdot r_k$ ) соотношением

$$\Delta_T = \frac{2 \cdot r_k}{Nu_T}.$$

Уравнения (1) и (2) связывают между собой пять величин –  $Q$ ,  $J_n$ ,  $g_c$ ,  $r_k$  и  $T_k$ . Недостающими тремя уравнениями, замыкающими систему, являются соотношения, отображающие балансы масс двух компонент раствора в капле и энтальпии капли. Рассмотрим эти соотношения.

Масса капли раствора  $m_k$  складывается из масс воды  $m_b$  и соли  $m_c$ :  $m_k = m_b + m_c$ . Считая,

что в процессе испарения масса соли в капле остается неизменной ( $m_c = const$ ), из закона сохранения вещества получаем

$$\frac{dm_k}{d\tau} = \frac{dm_b}{d\tau} = -J_{\pi}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что скорость изменения массовой доли соли в капле раствора удовлетворяет соотношению

$$\frac{dg_c}{d\tau} \equiv \frac{d}{d\tau} \left( \frac{m_c}{m_b + m_c} \right) = -\frac{m_c}{(m_b + m_c)^2} \frac{dm_b}{d\tau} = g_c \cdot \frac{J_{\pi}}{m_k} = g_c \cdot \frac{J_{\pi}}{\rho \cdot V_k}, \quad (6)$$

где  $\rho(g_c)$  – известная плотность раствора капли,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$  (зависимость  $\rho(T)$  не рассматривается ввиду относительной малости соответствующих изменений);  
 $V_k$  – объем капли,  $\text{м}^3$ .

Для получения скорости изменения размера капли рассмотрим скорость изменения ее массы:

$$\frac{dm_k}{d\tau} = \frac{d(\rho \cdot V_k)}{d\tau} = \frac{d\rho}{d\tau} \cdot V_k + \rho \cdot \frac{dV_k}{d\tau} = \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{dg_c}{d\tau} \cdot V_k + \rho \cdot \frac{dV_k}{d\tau}. \quad (7)$$

Из соотношений (5)-(7) следует, что

$$\rho \cdot \frac{dV_k}{d\tau} = -J_{\pi} \cdot \left( 1 + \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{g_c}{\rho} \right). \quad (8)$$

Последним из уравнений баланса является первый закон термодинамики, в соответствии с которым в рассматриваемом изобарном процессе тепловой поток сквозь поверхность капли обеспечивается за счет изменения ее энтальпии, то есть

$$Q = -\frac{d}{d\tau} [h(T_k, g_c) \cdot m_k] = -\left[ \frac{\partial h}{\partial g_c} \cdot \frac{dg_c}{d\tau} + \frac{\partial h}{\partial T} \cdot \frac{dT_k}{d\tau} \right] \cdot m_k - h \cdot \frac{dm_k}{d\tau} = \\ = -c_p \cdot m_k \cdot \frac{dT_k}{d\tau} + J_{\pi} \cdot \left[ h - \frac{\partial h}{\partial g_c} \cdot g_c \right], \quad (9)$$

где  $h(T, g_c)$  – удельная массовая энтальпия образования раствора соли,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$c_p(T, g_c) = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$  – удельная массовая изобарная теплоемкость раствора,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

(При преобразованиях уравнения (9) использовались соотношения (5) и (6)).

Объединив формулы (2), (9), используя разложение (4), можно получить уравнение, задающее скорость изменения температуры капли:

$$m_k \cdot c_p \cdot \frac{dT_k}{d\tau} = J_{\pi} \cdot \left[ -\Delta h + \frac{c_{p,\pi} \cdot (T_{\Gamma} - T_k)}{\exp(B) - 1} \right], \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta h &\equiv h_{\text{п}}(T_{\text{к}}) - h(T_{\text{к}}, g_{\text{с}}) + \frac{\partial h}{\partial g_{\text{с}}} \cdot g_{\text{с}} \approx \\ &\approx h_{\text{п}}(T_{\text{к}}) - h(T_{\text{к}}, 0) = h_{\text{п}}(T_{\text{к}}) - h_{\text{в}}(T_{\text{к}}) \equiv \Delta h_{\text{п}}, \end{aligned} \quad (11)$$

а  $h_{\text{в}}$  и  $\Delta h_{\text{п}}$  представляют собой удельную энтальпию образования жидкой фазы воды и теплоту парообразования воды, соответственно, Дж·кг<sup>-1</sup>. Из соотношений (11) прямо следует, что отличие теплоты образования водяного пара из раствора соли и из чистой воды

$$\Delta h - \Delta h_{\text{п}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial g_{\text{с}}^2} \cdot g_{\text{с}}^2 + o(g_{\text{с}}^2)$$

является величиной не ниже второго порядка по  $g_{\text{с}}$ , т. е. является существенным только при значительных концентрациях соли в растворе.

Для однозначного решения задачи уточним некоторые из зависимостей. В дальнейшем будем считать, что раствор соли ведет себя как идеальный. В этом случае концентрация насыщенных паров воды над поверхностью раствора пропорциональна мольной доли воды в растворе ( $g_{\text{μ.в}}$ ), последняя в массовых долях представима в виде

$$g_{\text{μ.в}} = 1 - \frac{g_{\text{с}} \cdot \mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{с}} - (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{в}}) \cdot g_{\text{с}}},$$

где  $\mu_{\text{с}}$  – молярная масса соли (отметим, что в случае CaCl<sub>2</sub> молярная масса равна  $\mu_{\text{с}} = 0,111$  кг·моль<sup>-1</sup>, в случае Na<sub>2</sub>O·2·7·(SiO<sub>2</sub>) –  $\mu_{\text{с}} = 0,224$  кг·моль<sup>-1</sup>).

Это позволяет связать давление насыщенного пара воды над поверхностью раствора  $P_{\text{с.с}}(T, g_{\text{с}})$  с известной величиной давления насыщенного пара воды над чистой водой  $P_{0,\text{с}}(T)$ :

$$P_{\text{с.с}}(T, g_{\text{с}}) = \left[ 1 - \frac{g_{\text{с}} \cdot \mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{с}} - (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{в}}) \cdot g_{\text{с}}} \right] \cdot P_{0,\text{с}}(T). \quad (12)$$

Решение задачи требует определения величин критериев подобия Шервуда ( $Nu_D$ ) и Нуссельта ( $Nu_T$ ), которые тесно связаны с характером обтекания капли газовой средой. Воспользуемся тем, что вследствие подобия явлений диффузии вещества и энергии зависимость критерия Шервуда от критериев Рейнольдса (Re) и Шмидта (Sc) и зависимость критерия Нуссельта от критериев Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr) совпадают. В дальнейшем, используя незначительное отличие критериев Шмидта (Sc) и Прандтля (Pr) в газовой среде, будем оценивать критерии подобия Шервуда и Нуссельта одинаковым критериальным уравнением (см. [6]):

$$Nu_T = Nu_D = \begin{cases} 2 \cdot (1 + 0.08 \cdot Re^{2/3}), & Re \leq 200 \\ 0.54 \cdot Re^{1/2}, & Re > 200 \end{cases}. \quad (13)$$

Здесь критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{w \cdot (2 \cdot r_{\text{к}})}{\nu_{\text{г}}}, \quad (14)$$

где  $w$  – скорость движения капли относительно газовой среды, м·с<sup>-1</sup>;  
 $\nu_{\text{г}}$  – коэффициент кинематической вязкости газовой среды, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Отметим сразу, что следствием совпадения диффузионного и теплового критериев Нуссельта ( $Nu_D = Nu_T$ ) является упрощение вида параметра  $B$  (3), сопровождающееся исчезновением зависимости  $B$  от размеров капли.

Уравнения (6), (8), (10) (с учетом соотношений, описывающих связи величин) при условии задания начальной массы и температуры капли, а также концентрации соли в растворе, однозначно описывают процесс испарения капли раствора. Для дальнейшего анализа процесса испарения капель трансформируем эти уравнения. В качестве искомой неизвестной величины вместо радиуса капли возьмем площадь ее поверхности  $s = 4\pi \cdot r_c^2$ , и для сокращения записи введем функцию

$$G(T_k, s, g_c) \equiv 2 \frac{J_n}{\rho \cdot r_c} = 4\pi \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_b \cdot P}{\rho \cdot R \cdot T} \cdot (Nu_D + 2) \cdot \ln \left( \frac{P - P_{n0}}{P - P_{c,s}(T_k, g_c)} \right), \quad (15)$$

являющуюся характерной скоростью изменения площади поверхности капли. В результате уравнения (8), (10) примут вид:

$$\frac{ds}{d\tau} = -G \cdot \left( 1 + \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{g_c}{\rho} \right), \quad (16)$$

$$s \cdot \frac{dT_k}{d\tau} = \frac{3}{2 \cdot c_p} \cdot G \cdot \left[ -\Delta h + \frac{c_{p,n} \cdot (T_r - T_k)}{\exp(B) - 1} \right]. \quad (17)$$

Вместо уравнения (6) используем неизменность массы соли в капле при испарении. Действительно

$$m_c = g_c \cdot m_k = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot V_k = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r_k^3 = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot \frac{s^{3/2}}{6 \cdot \sqrt{\pi}} = const.$$

Отсюда следует, что

$$s = s_0 \cdot \left( \frac{g_{c,0} \cdot \rho(g_{c,0})}{g_c \cdot \rho(g_c)} \right)^{2/3}, \quad (18)$$

где  $s_0$  и  $g_{c,0}$  – значения  $s$  и  $g_c$  в некоторый фиксированный момент времени.

Отметим, что в выражении в квадратных скобках в правой части уравнения (17) отсутствует явная зависимость от размера капли. Кроме того, это выражение при малом содержании соли в растворе (согласно соотношениям (11) и (12)) практически не зависит от  $g_c$ . Это означает, что, пока концентрация соли в растворе остается малой, процесс испарения в соответствии с формулой (17) выходит и далее длится при постоянной температуре капли  $T_k = T_{ст}$ . Значение  $T_{ст}$  является корнем уравнения

$$-\Delta h + \frac{c_{p,n} \cdot (T_r - T_k)}{\exp(B) - 1} = 0, \quad (19)$$

при решении которого можно брать значение  $g_c = 0$ . В этом режиме площадь поверхности капли раствора в соответствии с уравнением (16) убывает практически линейно по закону

$$s(\tau) = s_0 - G(T_{ст}, s_0, 0) \cdot \tau, \quad (20)$$

где символом  $s_0$  обозначена площадь поверхности капли в начале стационарного температурного режима.

На завершение аналитической части исследования отметим, что, используя соотношение (3) и то, что предел  $g_c = 0$  соответствует чистой воде, уравнение (19) удобнее представить в виде:

$$\ln\left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_{0,s}(T_{cr})}\right) = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{D} \cdot c_{pn}} \cdot \frac{R \cdot \bar{T}}{\mu_v \cdot P} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{pn} \cdot (T_r - T_{cr})}{\Delta h_{п}(T_{cr})}\right). \quad (21)$$

Уравнение (21) можно, зная зависимость  $T_s(P_{п})$  (абсолютной температуры насыщенного водяного пара от его давления  $P_{п}$ ), решать стандартными методами (например, методом последовательных приближений). Полученное значение  $T_{cr}(T_r)$  позволяет оценить величину скорости уменьшения площади поверхности капли:

$$G(T_{cr}, s, 0) = 4\pi \cdot (\text{Nu}_D + 2) \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\rho_v \cdot c_{pn}} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{pn} \cdot (T_r - T_{cr})}{\Delta h_{п}(T_{cr})}\right), \quad (22)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Знание величины  $G(T_{cr}, s, 0)$  позволяет оценить время  $\Delta\tau$  достижения критического значения концентрации соли  $g_{c,кр}$ . В соответствии с формулами (18), (20)

$$\Delta\tau = \frac{s_0}{G(T_{cr}, s_0, 0)} \cdot \left[1 - \left(\frac{g_{c,0}}{g_{c,кр}}\right)^{2/3}\right]. \quad (23)$$

При записи последней формулы предполагалось малое отличие плотностей раствора  $\rho(g_{c,0})$  и  $\rho(g_{c,кр})$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

При численном оценивании минимального начального размера капель брались типичные при пожаротушении значения параметров процесса: общее давление –  $P = 1,0 \cdot 10^5$  Па; парциальное давление водяного пара в газовой среде –  $P_{п0} = 0$  Па; удельная теплоемкость водяного пара –  $c_{pn} = 2,0 \cdot 10^3$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>; удельная теплота парообразования –  $\Delta h_{п} = 2,3 \cdot 10^6$  Дж·кг<sup>-1</sup>; коэффициент кинематической вязкости газовой среды –  $\nu_r = 3,5 \cdot 10^{-5}$ , м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>; скорость капли относительно газовой среды –  $w = 10,0$  м·с<sup>-1</sup>; температуры газовой среды –  $T_r = 1273$  К; предполагались температурные зависимости  $\bar{\lambda} = 8,6 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{T}$ , Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>, и  $\bar{D} = 4,9 \cdot 10^{-9} \cdot \bar{T}^{1,5}$ , м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Также были приняты значения начальной и критической (конечной) концентраций соли равные соответственно  $g_{c,0} = 0,1$  и  $g_{c,кр} = 0,5$  (в мольных долях), а путь капли в области горения 10 м.

Минимальные начальные значения диаметра капли были получены в результате анализа численных решений системы уравнений (16)-(18) при помощи компьютерной математической среды «Matlab». При скорости движения капель 10 м·с<sup>-1</sup> минимальный начальный диаметр составил 1,1 мм, а при скорости 20 м·с<sup>-1</sup> – 0,8 мм.

Для небольших по площади пожаров можно принять путь капли в области горения меньше принятых выше 10 м. Тогда, соответственно, можно использовать большую дисперсность капель огнетушащего раствора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, позволяющая оценить минимальный начальный размер капель компонентов ГОС, который обеспечивает условия гелеобразования на защищаемой поверхности ТГМ. При тушении пожаров большой площади, он должен быть не менее 1,1 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
2. Патент 2264242. Российская федерация. МПК7 А62 С 5/033. Способ тушения пожара и состав для его осуществления / П.Ф. Борисов, В.Е. Росоха, Ю.А. Абрамов, А.А. Киреев, А.В. Бабенко. – Заявка № 2003237256/12. Заявл. 23.12.2003, опубл. 20.11.10.2005, Бюл. № 32.
3. Кіреєв, О.О. Обґрунтування вибору систем для дослідження явища гелеутворення при розробці нових рідинних засобів пожежогасіння / О.О. Кіреєв, О.В. Бабенко // Проблеми пожежної безпеки. – 2002. – вып.12. – С.107-110.
4. Киреев, А.А. Исследование концентрационных областей быстрого гелеобразования в огнетушащих системах на основе силиката натрия / А.А. Киреев, В.Н. Романов, Г.В. Тарасова // Проблеми пожежної безпеки. – 2004. – Вып. 15. – С. 107-110.
5. Киреев, А.А. Определение областей быстрого гелеобразования в огнетушащих системах:  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 - \text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 - \text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  / А.А. Киреев, В.Н. Романов, А.В. Александров // Проблеми пожежної безпеки. – 2004. – Спеціальний випуск. – С. 34-37.
6. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике (2-е издание) / Д.А. Франк-Каменецкий – М.: Наука, 1967. – 492 с.