

**А. Л. ДУШКИН**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)

**С. Е. ЛОВЧИНСКИЙ**, инженер, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: Lovchinskiy@inbox.ru)

**Н. Н. РЯЗАНЦЕВ**, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: n-r-60@mail.ru)

УДК 614.841

## ЭКРАНИРОВАНИЕ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЖАРА

Освещены результаты теоретического и экспериментального исследования экранирующих свойств капельного потока тонкораспыленной воды, применяемого для защиты объекта от теплового излучения на пожаре. Показано, что эффективность защиты противопожарной завесой в меньшей степени зависит от температуры очага пожара, а в большей — от диаметра водяных капель и расхода воды. Показано также, что относительно эффективная и экономичная по расходу воды завеса создается при диаметре генерируемых капель менее 200 мкм, а при размере более 500 мкм инфракрасное излучение пожара экранируется менее чем на 25 %. Экспериментальными исследованиями установлено, что увеличение коэффициента затенения инфракрасного излучения связано с повышением объемной концентрации капель (расход завесы), с уменьшением среднего медианного диаметра (дисперсности потока капель).

**Ключевые слова:** тепловое излучение; экранирование; тонкораспыленная вода; пожар; водяная завеса.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59

### Введение

Распыленная вода различной степени дисперсности находит широкое применение в качестве агента пожаротушения. В связи с этим возникают вопросы, связанные с экранирующими свойствами капель при противопожарной защите различных технологических объектов от теплового излучения. Использование дренчерных водяных завес как средства для предотвращения распространения пожара становится все более актуальным [1]. Противопожарная функция водяной завесы совмещает различные защитные функции, снижая действие опасных факторов пожара (ОФП) на людей и материальные ценности (ослабление лучистого и конвективного тепловых потоков, осаждение дыма и вредных продуктов горения, охлаждение воздуха и твердых поверхностей). Применение завес предусматривается ст. 37 “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности” (Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ).

При достаточном нормативном обосновании функционирования водяных завес весьма скудны в информационном плане документы, регламентиру-

ющие их применение [2]. Нормативные документы трактуют водяную завесу как поток воды или ее растворов, препятствующий распространению через него пожара и/или способствующий предупреждению прогрева технологического оборудования до предельно допустимых температур. Водяные завесы выполняют функции охлаждения и предотвращения распространения пожара и его опасных факторов через оконные, дверные и технологические проемы, за пределы защищаемого оборудования, зоны или помещений, а также обеспечения безопасных условий для эвакуации людей из горящих помещений.

Обзор научных публикаций по теме водяных завес и источников их создания по России показал недостаточную изученность этого вопроса [3]. Создание методов и расчетных методик определения экранирующих свойств водяных завес достаточно интенсивно в последнее время происходит за рубежом [4–11].

При прохождении теплового излучения через различные преграды происходит его поглощение и рассеяние, что приводит, как правило, к снижению

его мощности. Энергия инфракрасных лучей при этом преобразуется в другие формы энергии, чаще всего в тепловую. Чистый и сухой воздух практически не поглощает тепловых лучей. При наличии в воздухе многоатомных газов (например, углекислого газа), как правило генерируемых в ходе окислительно-восстановительных реакций процесса горения, происходит уменьшение прозрачности газовой среды. Наличие в воздухе паров и капель воды селективно увеличивает степень поглощения и уменьшает пропускание в пределах длин волн 2,24...3,27, 4,8...8,7 и 12...25 мкм. С уменьшением длины волны рассеяние излучения увеличивается, так как оно обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Оптические свойства воды (прозрачность, коэффициенты преломления и отражения) позволяют использовать ее для экранирования инфракрасного излучения. Водяные завесы применяются при интенсивности излучения 350...1400 Вт/м<sup>2</sup>. Воду используют в качестве теплозащитного фильтра, так как ее пленка толщиной несколько сантиметров непрозрачна для инфракрасного потока с длинами волн более 1 мкм.

### Цели и задачи

Из анализа публикаций можно увидеть, что эффективность защиты противопожарной завесы в меньшей степени зависит от температуры очага пожара, а в большей — от диаметра водяных капель и расхода воды. Относительно эффективная и экономичная по расходу воды в случае однократного рассеяния завеса создается при диаметре генерируемых капель менее 200 мкм. При размере капель более 500 мкм инфракрасное излучение пожара экранируется менее чем на 25 %. Цель экспериментального исследования заключается в определении возможности более высокой степени экранирования лучистых потоков тонкораспыленной водой — до 80 % (пропускание 20 %) в условиях многократного рассеяния и в нахождении зависимости степени ослабления их мощности от параметров капельного потока.

При расчете устройств генерирования водяных завес, как правило, учитываются геометрические размеры защищаемых объектов, их пространственное расположение, суммарный и удельный расход воды и погонная интенсивность орошения. При этом не учитываются параметры завес, определяющие их защитные свойства, такие как коэффициент экранирования, диаметр капель и их концентрация. На основании имеющихся данных лишь весьма условно можно выбрать тип оросителей, их количество и пространственное расположение, геометрические размеры трубопроводов и давление подачи воды. Кроме того, техническая документация на

оросители не содержит параметров генерируемого капельного потока, определяющего параметры создаваемых ими завес.

В связи с вышесказанным для определения экранирующих свойств капельных потоков возникает задача установления взаимосвязи их параметров (диаметров и концентрации капель в потоке) со степенью ослабления мощности лучистых потоков, а также уточнения коэффициента экстинкции.

### Теория и расчеты

В среде, рассеивающей излучение, пропускание его на длине пути  $x$  соответствует закону Бугера – Ламберта – Бера, полученному для однократного рассеяния ( $I/I_0 \approx 0,6...0,7$ ):

$$I/I_0 = e^{-\pi n k r^2 x}, \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность излучения, прошедшего путь  $x$ ;  
 $I_0$  — интенсивность излучения источника;  
 $n$  — счетная концентрация капель в единице объема;  
 $k$  — эффективный коэффициент экстинкции или экранирования излучения за счет рассеяния и поглощения его каплями;  
 $r$  — радиус капель.

Коэффициент рассеяния складывается из эффектов отражения, преломления и дифракции и в сумме равен 2. При этом при больших по сравнению с длиной волны излучения  $\lambda$  каплях коэффициент дифракции равен единице. Однако дифрагированный свет сосредоточен в конусе с половиной угла раствора, равного  $\theta = 10\lambda/(2\pi r)$ . Так, при  $r = 30$  мкм и  $\lambda = 2$  мкм (длина волны излучения очага возгорания) значение  $\theta$  составляет 6°, поэтому для таких частиц в реальных условиях дифрагированный свет частично или полностью попадает на окружающие предметы за капельным экраном. Тогда коэффициент рассеяния может быть принят равным 1, как в работе [4].

При многократном рассеянии оно происходит по всем направлениям, а степень экранирования возрастает вплоть до полного интерференциального гашения, что и наблюдается в зоне тумана большой протяженности [12]. Отметим, что даже при сильном дожде этого гашения не происходит. Приведенные наблюдения однозначно говорят о сильном влиянии размера капель на явление рассеяния излучения. В тумане радиусы капель лежат в диапазоне 0,5...80 мкм, а минимальный радиус капель дождя составляет 250 мкм [12]. Однократность рассеяния для тонкораспыленной воды при радиусе капель  $r = 20$  мкм и их счетной концентрации  $n = 10^{10}$  м<sup>-3</sup> возможна на длине в несколько сантиметров.

Закон Бугера – Ламберта – Бера (1) записан для монодисперсной капельной среды. Для полидисперс-

ного потока этот закон можно записать с использованием заутеровского диаметра  $d_{32}$  и объемной доли капель  $c_V$ :

$$d_{32} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i}; \quad c_V = \frac{4}{3} \pi r_i^3 n_i, \quad (2)$$

где  $r_i = d_i/2$ .

После алгебраических преобразований окончательно получим для полидисперсной среды в условиях многократного рассеяния:

$$\frac{I}{I_0} = \exp - \frac{1,5 c_V x k}{d_{32}}. \quad (3)$$

Реальный капельный поток из распылителя имеет коническую форму с различным объемом, занятым каплями. По этой причине объемная доля частиц  $c_V$  на длине луча излучения, перпендикулярного оси факела, будет изменяться от сечения к сечению. Очевидно, количество капель  $N$  на пути луча, например, цилиндрической симметрии будет оставаться неизменным, несмотря на то что длина пути в капельном объеме (длина цилиндра) будет меняться (увеличиваться). Однако дополнительного притока капель в область рассеяния при этом происходить не будет, а количество капель может только несколько уменьшиться за счет уноса с граничной поверхности при турбулентном взаимодействии с окружающим воздухом. Можно считать, что размер капель существенно не изменится за счет коагуляции и дробления. К тому же заутеровский диаметр полидисперсного потока мало чувствителен к таким изменениям. Суммируя все вышесказанное, естественно предположить, что  $c_V x \approx \text{const}$ . Это положение позволяет при инструментальном измерении капельного потока на начальном расстоянии  $L = 0,2 \dots 0,3$  м от среза сопла распылителя знать необходимые параметры  $c_V$ ,  $d_{32}$  на участке завесы при фиксированной длине луча, равной диаметру (хорде) факела распыления.

Дисперсный капельный поток существует до объемной доли жидкости  $c_V < 0,1$ , а при превышении ее поток жидкости преобразуется в пузырьковый или эмульсионный. В рассмотрении задачи экранирования существенную роль играет средний заутеровский диаметр  $d_{32}$ , и в первую очередь при многократном рассеянии, как будет показано в дальнейшем. Поглощение молекулами воды излучения сплошного спектра, которое характерно для очагов горения, с учетом излучения с нагретых поверхностей различных материалов носит селективный характер в узких областях длин волн излучения (1,4...1,9; 1,9...2,7; 2,7...4,3; 4,3...5,9 мкм). В результате большинства процессов горения образуются углекислый газ и пары воды. При температуре пламени 1000 °C максимальному излучению непосредственно пламени соответствует полоса 4,38 мкм, а при температу-

ре 600 °C — полоса 4,34 мкм [12]. Спектры многих различных пламен мало различаются: для всех характерна сильная полоса излучения  $\lambda = 4 \dots 6$  мкм (углекислый газ) и более слабая полоса  $\lambda < 3$  мкм (водяной пар и углекислый газ). Соответственно, эффект поглощения из-за селективности вносит небольшой вклад (10...15 %) в суммарный эффект экранирования распыленной водой. По этой причине при практическом использовании экранирования капельным ансамблем можно игнорировать конкретное селективное поглощение, так как спектр пожара наперед неизвестен. Использование мелких капель с  $d_{32} < 100$  мкм сопряжено с некоторыми особенностями течения такого потока. Это относится также к выходному соплу распылителя, диаметр которого сильно влияет на размер образующихся капель: чем меньше диаметр сопла, тем меньше средний заутеровский диаметр капель в факеле распыла [13]. Кроме того, прослеживается сильная зависимость диаметра капель от выходной скорости жидкости из сопла распылителя, которая при взаимодействии с окружающим воздухом преобразуется в капельный поток; при этом чем больше выходная скорость жидкости, тем меньше размер капель. Преобразование в капли конечного диаметра может происходить в несколько этапов с последовательным уменьшением их диаметра при дроблении. Выходная скорость жидкости по уравнению Бернулли зависит от давления подачи, поэтому при генерировании мелкодисперсной завесы-экрана требуется, как правило, повышенное давление подачи  $\Delta P > 1,0$  МПа. Необходимо отметить динамическую особенность тонкораспыленного потока воды, заключающуюся в экспоненциальном падении скорости  $V$  капель размером до 100 мкм [14]:

$$V = V_0 e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau$  — постоянная времени для частиц с  $R_e \leq 1$ ;

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{\rho_p}{\rho_r \nu_r} d^2;$$

$\rho_p, \rho_r$  — плотность соответственно капель и воздуха;

$\nu_r$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$$R_e = V_0 d / \nu_r;$$

$V_0$  — начальная скорость капель.

Например, для капель диаметром  $d = 50$  мкм  $\tau = 7,34 \cdot 10^{-3}$  с. Стационарная скорость осаждения мелких капель  $V_s$  не превосходит нескольких сантиметров в секунду в соответствии с выражением

$$V_s = g\tau, \quad (5)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Путь, проходимый каплей от сопла до расстояния, определенного только начальной скоростью  $V_0$

(без учета силы тяжести), составляет до десятка сантиметров и может быть найден по интегральному выражению

$$L = \int_0^{\infty} V_0 e^{-t/\tau} dt = V_0 \tau. \quad (6)$$

Так, для капель, имеющих диаметр  $d = 50$  мкм и начальную скорость  $V_0 = 100$  м/с,  $L = 0,73$  м.

Таким образом, на стабилизированном участке капельного экрана скорость капель близка к скорости осаждения  $V_s$ . Это обстоятельство позволяет оценить объемную концентрацию капель  $c_V$ , если из характеристик распылителя известна интенсивность орошения  $q$  (объемный расход на единицу площади орошения). Объемная концентрация капель при высоте подвеса распылителя  $H > L$  определяется по выражению

$$c_V = q/V_s. \quad (7)$$

Результатом такого расчета может быть величина только первого приближения, так как для реального полидисперсного потока с каплями разных размеров значения параметров  $q_i$  и  $V_{si}$  различны, а интегральные значения, отнесенные к среднему диаметру  $d_{32}$ , только приблизительно отражают действительную ситуацию. Характерно в этом отношении определение объемной концентрации частиц  $c_V$  оптическими методами по пропусканию  $I$ , вычисляемому из формулы (3), при известном из дифракционной картины малоуглового рассеяния Фраунгофера диаметре  $d_{32}$ . Однако даже без оптических измерений можно оценить концентрацию  $c_V$  в соответствии с выражениями (3) и (7), если  $d_{32}$  определять по известным критериальным или иным зависимостям.

### Методы исследования

Экспериментальные исследования способности тонкораспыленного потока экранировать тепловое излучение проводились в два этапа:

- на первом этапе определялись средний зауровневый размер  $d_{32}$  капельного потока и его концентрация  $c_V$ , а также произведение объемной концентрации на длину  $c_V x$  (аналог слоя осажденной воды), где  $x$  — путь длины измерения в приборе (для Malvern Insittec System равен 12 мм), перпендикулярный оси потока капель (постоянная величина). При этом согласно ISO 1332 использовался измерительный комплекс Malvern Insittec System RTS 5424 (STR 5649), который проводит измерения на одной длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм;
- на втором этапе измерения проводились на установке с использованием неселективного источника теплового инфракрасного (ИК) излучения со степенью черноты не менее 0,77.

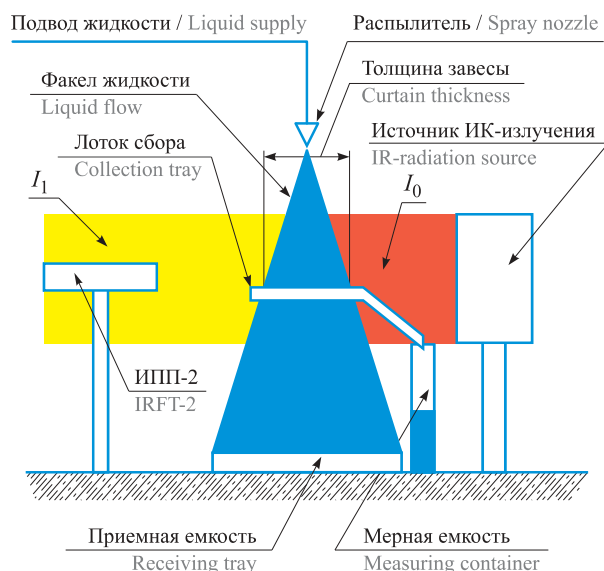


Рис. 1. Установка для определения свойств экранирующих завес

Fig. 1. Screening curtain feature determination set

Для определения способности водяных капельных потоков поглощать ИК-излучение была создана установка с измерителем плотности потока ИК-излучения, представленная на рис. 1.

Установка включает в себя источник излучения — спиральную электропанель с нихромовой проволокой и приемник ИК-излучения — измеритель плотности потока ИПП-2, расположенный на расстоянии 1,5...2,0 м от излучающей поверхности панели. ИПП-2 измеряет интенсивность ИК-излучения через воздушный зазор. В экспериментальном исследовании между приемником и источником излучения устанавливается распылитель — источник водяных капель экранирующей завесы. Факел распыленного потока воды направляется в приемную емкость для отвода в ливневую канализацию. На уровне оптической оси ИПП-2 устанавливается лоток для сбора воды для замера интенсивности капельного потока. Собранная за определенный период времени  $t$  вода из лотка направляется в мерную емкость. Интенсивность подачи  $q$  в экспериментах определяется по формуле

$$q = Q/(tF) = c_V V, \quad (8)$$

где  $Q$  — объем воды, собранной в мерную емкость за время  $t$ ;

$F$  — площадь приемного торца лотка;  $F = hl$ ;

$h$  — ширина лотка; в эксперименте  $h = 0,03$  м;

$l$  — ширина завесы в месте оптической оси ИПП-2, определяемая с помощью линейки в процессе работы распылителя.

Интенсивность орошения пропорциональна объемной концентрации капель и меняется только



с шириной завесы (длиной пути)  $x$ , которая зависит в свою очередь от скорости при постоянном расходе.

Коэффициент ослабления ИК-излучения  $j$  при пропускании между источником и приемником излучения водяной завесы с различной интенсивностью и разными размерами капель факела распыла определялся по формуле

$$j = I_1/I_0, \quad (9)$$

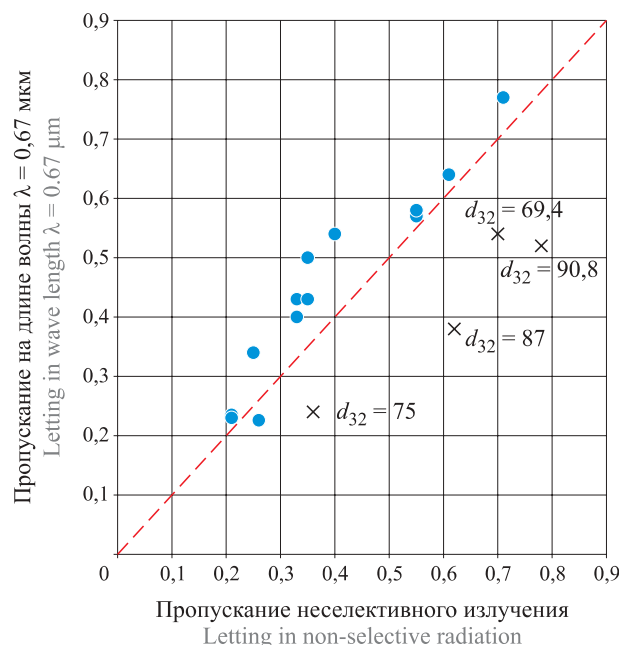
где  $I_1$  — интенсивность ИК-излучения, ослабленная водяной завесой.

Для замера размера капель согласно ISO 1332 в процессе экспериментального исследования использовался измерительный комплекс Malvern Insittec System RTS 5424 (STR 5649). Приборные системы Malvern/INSITEC “Концентрация и размер частиц ансамбля” (EPCS) измеряют распределения размеров частиц через рассеянный свет, а также начальную концентрацию капель  $c_V$  для монохроматического излучения  $\lambda = 0,67$  мкм.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и в таблице приведены результаты экспериментального исследования по ослаблению лучистых потоков водяными тонкодисперсными завесами, созданными с помощью различных распылителей.

На графике рис. 2 приведено пропускание монохроматического излучения  $S = I/I_0$  на длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм (прямая линия), измеренное оптиче-



**Рис. 2.** Сравнение экспериментальных данных по пропусканию на длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм и неселективному излучению

**Fig. 2.** Experimental data agreement for letting in by wave length  $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$  and for non-selective radiation

ским комплексом Malvern Insittec System и соответствующее закону (3) при  $k = 2$ , а также пропускание  $j = I/I_0$  неселективного теплового излучения, определенное на установке (экспериментальные точки) в предположении  $c_V x \approx \text{const}$ . Во всех измерениях слой осажденной воды  $c_V x$  считался постоянным для конкретного капельного потока. Как видно из представленных экспериментальных данных, монохроматическое излучение на длине  $\lambda = 0,67$  мкм экранируется хуже, чем излучение нихромовой панели, что объясняется отсутствием поглощения молекулами воды излучения при  $\lambda = 0,67$  мкм вплоть до толщин  $c_V x = 10^{-3}$  м и поглощением ИК-излучения при длине волны  $\lambda > 1,5$  мкм. При этом превышение экранирования ИК-излучения за счет поглощения не превышает в среднем 15 %.

Результаты экспериментального исследования  
Experimental investigation results

$d_{32}$ , мкм $d_{32}$ , $\mu\text{m}$	$S$	$c_V x \cdot 10^6$ , м $c_V x \cdot 10^6$ , m	$x$ , м $x$ , m	$d_{1,0}$ , мкм $d_{1,0}$ , $\mu\text{m}$	$q$ , $q$ , $\text{м/с} \cdot 10^3$ $\text{m/s} \cdot 10^3$	$j$
58,6	0,235	27	0,8	17,9	0,125	0,21
62,9	0,23	30	0,4	18,5	0,317	0,21
56,9	0,226	27,6	0,35	15,5	0,178	0,26
54,4	0,64	7,69	0,65	15,3	0,06	0,61
58,6	0,57	10,7	0,65	22,3	0,068	0,55
46,7	0,43	12,3	0,65	12,1	0,096	0,33
45,7	0,4	13,6	0,55	14,3	0,139	0,33
40,9	0,34	14,06	0,5	8,8	0,189	0,25
69,4	0,77	5,62	0,5	33,7	0,033	0,71
55,1	0,58	6,51	0,8	23,3	0,033	0,55
49,6	0,54	9,9	0,65	15,8	0,063	0,4
44,5	0,5	10	0,6	14,1	0,1	0,35
36,2	0,43	9,7	0,5	8	0,13	0,35

**Примечание.**  $d_{32}$  — средний объемно-поверхностный диаметр капель, который является среднеповерхностной величиной (зауэровский средний диаметр);  $d_{1,0}$  — средний арифметический диаметр капель;  $d_{1,0} = \sum d_i n_i / \sum n_i$  (при нормально логарифмическом законе распределения размеров (Колмогорова) после соответствующих преобразований:  $\ln d_{1,0} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$ );  $j$  — пропускание неселективного излучения на расстоянии  $L = 0,5$  м от среза форсунки;  $S$  — пропускание на длине волны  $\lambda = 0,67$  мкм на расстоянии  $L = 0,2$  м от среза форсунки.

**Note.**  $d_{32}$  — mean volumetric-surface droplet diameter, which is a mean-surface value (Zaüter mean diameter);  $d_{1,0}$  — arithmetic mean droplet diameter;  $d_{1,0} = \sum d_i n_i / \sum n_i$  (under normal logarithm size distribution law (Kolmogorov) after corresponding transformations:  $\ln d_{1,0} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$ );  $j$  — letting in non-selective radiation at the distance  $L = 0.5$  m from nozzle edge;  $S$  — letting in at wave length  $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$  at the distance  $L = 0.2$  m from nozzle edge.

Кроме того, на графике нанесены результаты измерения интенсивности ослабления более крупными каплями (кресты) диаметром  $d_{32} = 69,4; 75,8; 87,9; 90,8$  мкм. Как видно из него, в случае крупных капель ослабление излучения значительно меньше, что свидетельствует о неприменимости закона (3) при  $k = 2$ .

Сильное экранирование можно объяснить только многократностью рассеяния, при этом коэффициент экстинкции  $k = 2,3$  (средняя величина). Столь эффективное экранирование (значительно более высокое, чем для слоя осажденной воды не более  $30 \cdot 10^{-6}$  м) даже для сильно поглощающих длин волн позволяет рекомендовать применение водокапельных экранов с диаметром капель  $d_{32} = 69 \dots 36$  мкм ( $d_{10} = 23 \dots 8$  мкм).

### Заключение

Экспериментально выявлена применимость закона Бугера – Ламберта – Бера для полидисперсных потоков капель при экранировании неселективного источника ИК-излучения в условиях многократного рассеяния. При этом средний коэффициент экстинкции равен 2,3, что объясняется поглощением в отдельных областях излучения от нагретого до 1000 К источника.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что увеличение коэффициента затенения инфракрасного излучения тонкораспы-

ленной водой одновременно связано с повышением объемной концентрации капель (расход завесы)  $c_{VX} \geq 27 \cdot 10^{-6}$  м (толщина пленки осажденной воды 27 мкм), с уменьшением среднего заутеровского диаметра (дисперсности потока капель) до значения не выше  $d_{32} = 50 \dots 60$  мкм. Столь высокое экранирование лучистых потоков тонкораспыленной водой — до 80 % начального излучения позволяет использовать ее в целях:

1) защиты от зажигания лучистыми потоками ценных предметов, например картин, выставочных витрин, ценной мебели, сейфов и т. д., при пожаре в окружающем помещении, причем тонкодисперсный водяной экран не только экранирует излучение, но и понижает температуру в месте защиты, тем самым локально подавляя возгорание;

2) экранирования технологических линий производства легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ, например серы;

3) экранирования электротехнического и компьютерного оборудования при сигнале соответствующих извещателей и датчиков.

Водяное экранирование наиболее мобильно по сравнению с противопожарными перегородками. Экраны не загромождают проходов и путей эвакуации. Для больших по высоте объектов может быть с успехом реализована многоярусная конструкция экранов, когда трубопроводы с распылителями расположены один над другим.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаров С., Зархин А., Митрофанова М. Дренчерные завесы: теория и практика // Безопасность. Достоверность. Информация. — 2006. — № 5(68). — С. 24–28. URL: <http://mx1.algoritm.org/arch/?id=22@a=547> (дата обращения: 10.04.2017).
2. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : приказ МЧС РФ от 25.03.2009 № 175; введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
3. Бородин А. Н., Леончук П. А., Лицкевич В. В., Шамонин В. Г. Проблемы численного моделирования водяных завес, создаваемых оросителями : обзор публикаций // Пожарная безопасность. — 2009. — № 4. — С. 92–105.
4. Виноградов А. Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 74–84.
5. Först M., Möller K. Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 55. — P. 182–196. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.10.005.
6. Monod B., Collin A., Parent G., Boulet P. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, Issue 1. — P. 88–95. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.009.
7. Zhu Pei, Wang Xishi, Wang Zhigang, Cong Haiyong, Ni Xiaomin. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain // Journal of Fire Sciences. — 2015. — Vol. 33, Issue 4. — P. 269–289. DOI: 10.1177/0734904115585796.
8. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. Shielding of fire radiation with the use of multi-layered water mist curtains: preliminary estimates // Computational Thermal Sciences: An International Journal. — 2016. — Vol. 8, Issue 4. — P. 371–380. DOI: 10.1615/ComputThermalScien.2016017601.
9. Turco M., Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Investigation into the use of a water curtain over openings to prevent fire spread // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 46. — Article No. 04001. — 11 p. DOI: 10.1051/matecconf/20164604001.

10. Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield // Numerical Heat Transfer. Part A: Applications. — 2010. — Vol. 57, Issue 8. — P. 537–553. DOI: 10.1080/10407781003744722.
11. Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M. S., Sahnoune K. Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain // International Journal of Thermal and Environmental Engineering. — 2010. — Vol. 2, No. 2. — P. 91–98. DOI: 10.5383/ijtee.02.02.005.
12. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Пер. с англ. — М. : Мир, 1972. — 534 с.
13. Чохонелидзе А. Н., Галустов В. С., Холманов Л. П., Приходько В. П. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 608 с.
14. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. — М. : Наука, 1981. — 174 с.

*Материал поступил в редакцию 18 апреля 2017 г.*

**Для цитирования:** Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Экранирование тонкораспыленной водой излучения от пожара // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 52–59. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59.

English

## FINELY-DISPERSED WATER FIRE RADIATION SCREENING

**DUSHKIN A. L.**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation)

**LOVCHINSKIY S. E.**, Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail: Lovchinskiy@inbox.ru)

**RYAZANTSEV N. N.**, Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail: n-r-60@mail.ru)

### ABSTRACT

The theoretical and experimental study results of finely-dispersed water droplet flow features screening fire heat radiation are shown. Water curtains offer cooling and fire with its danger factor spread prevention (OFP) through window, door and technological openings, outside protected equipment, area or rooms, as well as safe people escape provision from rooms on fire. In designing water curtain generation devices, as a rule, there aren't taken into account curtain parameters defining their protection features, such as screening factor, droplet diameter and their concentration. Fire protection curtain efficiency depends to a lesser extent on fire temperature but to a greater extent it depends on water droplet diameter and water flow rate. A relatively efficient and water flow-rate-effective curtain can be designed with sprayer generated droplets of less than 200  $\mu\text{m}$  diameter. With droplet size of more than 500  $\mu\text{m}$  the infra-red fire radiation is screened by less than 25 %. Single-fold dispersion for finely-dispersed water with  $r = 20 \mu\text{m}$  droplet radius and  $n = 10^{10} \text{ m}^{-3}$  droplet calculated concentration is possible in a few centimetre length. In considering screening curtain features the average Zauter diameter  $d_{32}$  plays an essential role, particularly it refers to a multiple dispersion that considerably (by 4...5 fold) decreases radiation falling onto the screen. Fine droplets usage  $d_{32} < 100 \mu\text{m}$  in diameter is connected with certain features of that flow. This also relates to an output sprayer nozzle, the diameter of which greatly effects the size of generated droplets: the less the nozzle diameter, the less average Zauter diameter of the droplets in the spray cone. A great droplet diameter dependence follows from output sprayer nozzle liquid velocity value that turns into a droplet flow while interacting with the ambient air, thereby the greater an output liquid velocity, the smaller the droplets. The experimental data analysis shows that infra-red radiation shade coefficient increase is connected with volumetric droplet concentration (curtain flow rate), and average median diameter decrease (droplet flow dispersion).

**Keywords:** heat radiation; screening; finely-dispersed water; fire; water curtain.

## REFERENCES

1. Zharov S., Zarkhin A., Mitrofanova M. Drencher curtains: theory and practice. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiya / Security. Reliability. Information*, 2006, no. 5(68), pp. 24–28 (in Russian). Available at: <http://mx1.algortm.org/arch/?id=22@a=547> (Assessed 10 April 2017).
2. *Set of rules 5.13130.2009. Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2009 (in Russian).
3. Borodkin A. N., Leonchuk P. A., Lickevich V. V., Shamonin V. G. Problems of numerical modeling of water spray curtains produced by sprinklers: the publication review. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2009, no. 4, pp. 92–105 (in Russian).
4. Vinogradov A. G. Heat radiation shielding by the polydisperse water curtains. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 74–84 (in Russian).
5. Försth M., Möller K. Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 55, pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.10.005.
6. Monod B., Collin A., Parent G., Boulet P. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, issue 1, pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.009.
7. Zhu Pei, Wang Xishi, Wang Zhigang, Cong Haiyong, Ni Xiaomin. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain. *Journal of Fire Sciences*, 2015, vol. 33, issue 4, pp. 269–289. DOI: 10.1177/0734904115585796.
8. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. Shielding of fire radiation with the use of multi-layered water mist curtains: preliminary estimates. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, 2016, vol. 8, issue 4, pp. 371–380. DOI: 10.1615/ComputThermalScien.2016017601.
9. Turco M., Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Investigation into the use of a water curtain over openings to prevent fire spread. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 46, article no. 04001. 11 p. DOI: 10.1051/mateconf/20164604001.
10. Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, 2010, vol. 57, issue 8, pp. 537–553. DOI: 10.1080/10407781003744722.
11. Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M. S., Sahnoune K. Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 91–98. DOI: 10.5383/ijtee.02.02.005.
12. Hudson R. D. *Infrared systems engineering*. New York, Wiley–Interscience, 1969 (Russ. ed.: Hudson R. *Infrakrasnyye sistemy*. Moscow, Mir Publ., 1972. 534 p.).
13. Chokhonelidze A. N., Galustov V. S., Kholpanov L. P., Prikhodko V. P. *Spravochnik po raspylivayushchim, orositelnym i kapleulavlivayushchim ustroystvam* [Reference-book on spray, sprinkle and droplet trapping devices]. Moscow, Energoatomizdat, 2002. 608 p. (in Russian).
14. Mednikov E. P. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozley* [Turbulent aerosol transfer and deposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 174 p. (in Russian).

**For citation:** Dushkin A. L., Iovchinskiy S. E., Ryazantsev N. N. Finely-dispersed water fire radiation screening. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 52–59 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59.