

УДК 614. 842

И.В.Карпенчук, к.т.н., доц., П.В.Максимов,
ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ОГNETУШАЩЕЙ СМЕСИ

Представлена методика расчёта газодинамического охладителя по типу сопла Лавала огнетушащей смеси в аэрозольных установках пожаротушения.

Ключевые слова: генератор огнетушащего аэрозоля, аэрозолеобразующие огнетушащие составы, сопло Лавала.

Постановка проблемы. Проблема обеспечения пожарной безопасности объектов является весьма актуальной. Ее успешное решение во многом связано с созданием и использованием эффективных огнетушащих веществ, надежных и экономичных установок пожаротушения.

В этой связи весьма перспективными являются направления работ, связанных с внедрением новой разновидности экологически безопасных средств объемного пожаротушения-твердотопливных аэрозолеобразующих огнетушащих составов (АОС). Современные аэрозольные средства по огнетушащим и технико-эксплуатационным показателям превосходят все средства, ранее используемые для тушения пожара.

Под твердотопливными составами понимаются специальные рецептурные композиции, основой которых являются гетерогенные смеси кислородосодержащих и горючих компонентов с добавками (или без них). Смеси такого типа широко используются в пиротехнике, производстве порохов, твердых ракетных топлив. В нормальных условиях твердотопливные составы обладают химической стабильностью, но при нагреве (от электроспирали, пиропатронов.) способны интенсивно реагировать (гореть) и обеспечивать получение веществ с требуемыми свойствами.

В общем виде процесс горения различных составов можно условно разделить на три стадии: иницирование, воспламенение (горение по всей поверхности) и непосредственно горение (распространения в глубину). Для начала горения состава требуется внешнее тепловое воздействие (иницирование), то есть нагревание хотя бы части состава до температуры воспламенения. После воспламенения (горения по всей поверхности) состава нет необходимости в дальнейшем нагревании, так как количества теплоты, выделяющееся при этом, достаточно для протекания самоподдерживающейся реакции горения.

Процесс горения твердотопливных составов представляет собой комплекс экзотермических химических реакций. Реакции горения начинаются на поверхности состава, а заканчиваются в газовой фазе (в пламени). Соединения металлов, получаемые в процессе химических реакций в пламени в газообразном или парообразном состоянии, попадая в окружающую среду, охлаждаются. При этом происходит их конденсация с образованием в потоке выделившегося газа субмикронных размеров твердых частиц, например, различных соединений щелочных и щелочноземельных металлов. Получаемую в процессе реакции горения двухфазную систему (смесь газов и твердых частиц) называют твердофазным аэрозолем.

Вместе с тем анализ эксплуатации установок аэрозольного пожаротушения выявил специфические особенности их практического применения. Незнание или неучет выявленных особенностей может привести к тому, что аэрозольные установки автоматического пожаротушения могут не только не обеспечивать тушение пожара, но и являться его источником или способствовать его развитию.

В настоящее время для противопожарной защиты объектов в Республике Беларусь находят все большее распространение системы автоматического пожаротушения на основе генераторов огнетушащего аэрозоля (ГОА).

В качестве источника огнетушащего вещества в них используются аэрозолеобразующие огнетушащие составы (АОС), которые представляют собой специальные твердотопливные или пиротехнические композиции, способные к самостоятельному горению без доступа воздуха с образованием инертных газов, высокодисперсных солей и окислов щелочных металлов. Смесь этих продуктов обладает высокой огнетушащей способностью. Однако, при работе ГОА имеет место образование высокотемпературных зон за счет продуктов, нагретых до высокой температуры. Многие из генераторов не оснащены устройством для эффективного снижения температуры образующейся аэрозольной смеси. Поэтому при их работе температура продуктов на выходе из генератора может превышать 1000-1200 °С, что является источником дополнительной пожарной опасности.

Анализ последних достижений и публикаций. В последнее время внедряются генераторы "холодного" аэрозоля. Снижение температуры аэрозольной смеси в генераторах "холодного" аэрозоля достигается либо за счет изменения химического состава АОС, либо в результате применения специальных охлаждающих насадок. В последнем случае масса охлаждающего состава может в 1,5-2,0 раза превышать массу заряда АОС, находящегося в генераторе. В результате применения охладителей удастся снизить температуру газоаэрозольных продуктов на выходе генератора до 200-600°С.

Постановка задачи и ее решение. Реализацию поставленной задачи предлагаем осуществить с использованием охладителя выполненного по типу сопла Лаваля. При движении в сопле Лаваля, газ, проходя критическое сечение, приобретает скорость, равную местной скорости звука, и далее, проходя диффузор, при расширении газ ускоряется до сверхзвуковых значений скоростей. При этом плотность газа резко уменьшается, и в соответствии с уравнением Менделеева – Клапейрона резко уменьшается температура газа [1].

Выделение нерешённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья.

Истечение струи огнетушащего газа с температурой 150 – 200 °С и более, может привести к возгоранию древесно – клееных и синтетических конструкций. Следовательно, возникает необходимость еще большего охлаждения струи огнетушащего газа до температур ниже температуры воспламенения строительных конструкций, в первую очередь из древесины. В статье предлагаем устройство для охлаждения огнетушащей смеси и методику расчёта рассматриваемого охладителя.

Выкладка основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.

Последовательность расчета охладителя огнетушащего газа, выполненного по типу сопла Лаваля, с учетом специфики рассматриваемой системы пожаротушения заключается в следующем:

Задаемся исходными параметрами, а именно:

p_1 – давление на входе в сопло (может быть определено по параметрам горения источника огнетушащего вещества).

$T_1 = t + 273$ – абсолютная температура.

Q – объемный расход.

1. Расчет входного сечения.

Плотность газа во входном сечении может быть определена из уравнения состояния газа.

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1}, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная.

Массовый расход газа равен:

$$m = \rho_1 \cdot Q, \quad (2)$$

где ρ_1 – плотность огнетушащего состава.

Диаметр входного сечения d_1 будет определяться конкретными монтажными условиями (следовательно, в каждом конкретном случае необходим расчет, учитывающий особенности данной схемы).

2. Расчет критического сечения.

Рассмотрим критическое сечение, в котором скорость газа достигает значения местной скорости звука, т. е. число Маха $M=1$.

Плотность в критическом сечении можно определить:

$$\rho_* = \rho_1 \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты смеси газов.

Критическое давление в критическом сечении:

$$p_* = \beta \cdot p_1, \quad (4)$$

где ρ_1 – плотность огнетушащего состава.

Температура газа в критическом сечении равна:

$$T_* = T_1 \frac{2}{k+1}. \quad (5)$$

Определяем скорость в критическом сечении, которая равна скорости звука при данных условиях:

$$V_* = \varphi \cdot \sqrt{k \frac{p_*}{\rho_*}}, \quad (6)$$

где φ - коэффициент скорости (в данных условиях можно принять, как для коноидального насадка, т. е. $\varphi=0,97$).

Так как из закона сплошности массовый расход равен:

$$m = \rho \cdot V \cdot S = \rho_* \cdot V_* \cdot S_*, \quad (7)$$

Тогда площадь критического сечения будет равна:

$$S_* = \frac{m}{\rho_* V_*}. \quad (8)$$

Очертание проточной части от входного сечения (рисунок 1) можно построить по формуле Витошинского:

$$r = \frac{r_*}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_*}{r_0} \right)^2 \right] \frac{\left(1 - \frac{3\tilde{\sigma}^2}{\ell'^2} \right)^2}{\left(1 + \frac{\tilde{\sigma}^2}{\ell'^2} \right)^2}}}, \quad (9)$$

где r_0 - радиус входного сечения;

r_* - радиус критического сечения;

$\ell' = \frac{\ell}{\sqrt{3}}$, где ℓ - длина рассчитываемого участка.

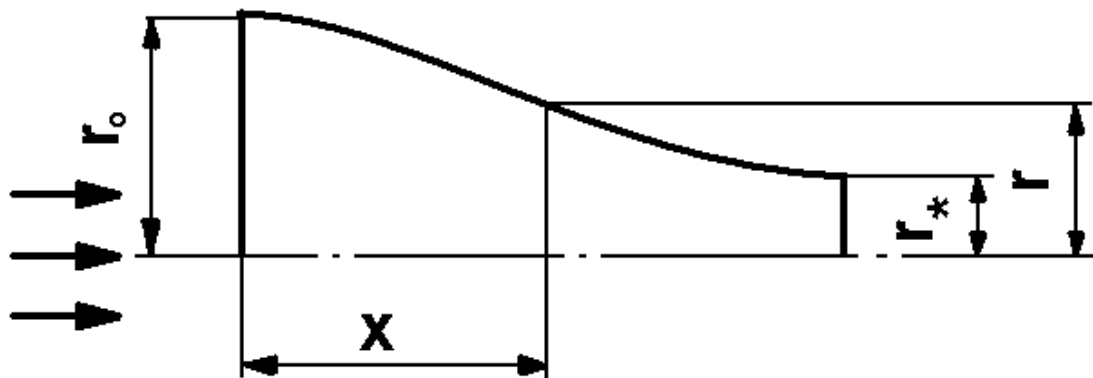


Рисунок 1 - Построение сужающейся части.

3. Расчет выходного сечения.

Для нормальной работы сопла необходимо, чтобы давление в выходном сечении было равно внешнему давлению окружающей среды. Если давление в выходном сечении будет больше внешнего, то это означает, что газ еще не полностью расширился и еще не достигнуто максимально возможное понижение температуры истекающего газа при данных условиях. Если давление в выходном сечении будет меньше внешнего, то в сопле произойдет прямой скачок уплотнения, связанный с большими гидравлическими потерями энергии и торможением потока газа, которое вызывает повышение температуры. Плотность и температура в выходном сечении определяется по уравнениям адиабаты и газового состояния.

$$\frac{p}{\rho^k} = const, \quad (10)$$

$$\frac{p}{\rho} = RT. \quad (11)$$

Константу можно определить по параметрам газа в критическом сечении:

$$\text{const} = \frac{P_*}{\rho_*^k}; \quad R = \frac{Ri}{M},$$

где Ri – универсальная постоянная для смеси газов, M – молярная масса смеси газов.

Тогда определим плотность смеси и температуру в критическом сечении:

$$\rho_2 = \left(\frac{P_2}{\text{const}} \right)^{\frac{1}{k}} \text{ и } T_2 = \frac{P_2}{\rho_2 R}.$$

Скорость в выходном сечении определится в соответствии с уравнением Сен-Венана:

$$v_2 = \varphi_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (12)$$

где $\varphi_{\bar{n}}$ - коэффициент сопла, который можно определить по формуле:

$$\varphi_{\bar{n}} = \sqrt{1 - \frac{2}{k-1} \frac{1}{M_{2t}} \left(\frac{1}{E_0} - 1 \right)}, \quad (13)$$

где M_{2t} - теоретическое значение числа Маха в выходном сечении;

$E_0 = \frac{P_{02}}{P_{01}}$ - отношение давлений торможения на выходе и на входе в сопло;

В рассматриваемом процессе p_{01} можно принять $p_{01} = p_1$; а p_{02} – можно определить из выражения

$$\frac{p_{02}}{p_1} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Коэффициент $\varphi_{\bar{n}}$ можно также определить по графикам [1].

Площадь выходного сечения сопла определяется:

$$S_2 = \frac{m}{\rho_2 v_2}; \quad d_2 = 2 \sqrt{\frac{S_2}{\pi}}.$$

Угол диффузора можно принимать равным $\alpha_{\partial} = 10-12^\circ$, как оптимальный для расходящихся насадков, тогда длина диффузорной части будет равна:

$$L = \frac{d_2 - d_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\partial}}{2}}.$$

Для расчета конкретных условий работы и параметров охладителя, выполненного по типу сопла Лавалья применяемого для охлаждения пожаротушающей смеси, задаваясь необходимой температурой, можно находить необходимое давление на входе в сопло, т. е. рассчитывать массу исходного компонента.

Выводы: Данная методика расчета сопла позволяет сконструировать охладитель, значительно снижающий температуру огнетушащего газа ГОА, обеспечивая охлаждение горящих веществ и понижение температуры в защищаемом объеме, наряду с объемным механизмом тушения огнетушащим аэрозолем (аналогичного механизму действия огнетушащих порошковых составов на основе солей щелочных металлов).

Перспективы дальнейших исследований. Непосредственный интерес представляет возможность расчета охладителей огнетушащей смеси, это наиболее актуально при конструировании генераторов огнетушащего аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика / Дейч Михаил Ефимович. - Москва: Госэнергоиздат, 1961, 670 с.