

# ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ РАСПЫЛЕНИЕМ

**А.Ю. Андрюшкин, кандидат технических наук, доцент;**

**М.Т. Пелех, кандидат технических наук.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Предложен способ сверхзвукового газодинамического распыления воды. Проведен анализ распылителей с внутренним перемешиванием потоков жидкости и газа. Представлены выражения для определения параметров тонкораспыленной воды при сверхзвуковом газодинамическом распылении.

*Ключевые слова:* распыление, тонкодисперсная вода, пожаротушение

## RECEPTION OF THE SMALL DROP OF WATER BY GAS SPRAYING

A.Y. Andryushkin; M.T. Peleh.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The Offered way of the supersonic spraying of water by gas. The Organized analysis of the sprayers with internal melange flow to liquids and gas. The Presented expressions for determination parameter small drop of water when spraying by gas.

*Key words:* spraying, small water, stewing fire

Применяемые в настоящее время конструкции спринклерных и дренчерных распылителей реализуют в основном гидравлический, механический, иногда пневматический способы диспергирования. Традиционные распылители имеют низкую эффективность транспортирования воды к очагу горения, а также низкую дисперсность получаемых капель. Непосредственно на тушение очага горения расходуется 10–30 % воды. Диспергирование воды гидравлическим или механическим способом позволяет получать капли порядка  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  м. Такие крупные капли имеют маленькую удельную наружную поверхность, то есть поверхность контакта между каплями и газообразными реагентами процесса горения мала, что обуславливает низкую эффективность тушения. Эти недостатки компенсируют увеличением подачи воды и времени работы распылителя.

Пневматический способ распыления воды позволяет значительно повысить эффективность диспергирования жидкости, в том случае, если распыление проводят в высокоскоростном потоке газа. Особенно высокая дисперсность капель  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  м достигается при распылении воды в сверхзвуковом потоке газа. Тонкораспыленная вода (ТРВ) состоит из капель с размерами менее 100 мкм, что существенно меняет механизм тушения огня. ТРВ имеет высокую проникающую и охлаждающую способность, расход воды и время тушения минимально. Поэтому исследование и разработка систем пожаротушения ТРВ является актуальной задачей.

### Получение тонкораспыленной воды

Анализ распылителей, реализующих пневматический способ диспергирования, показал, что наиболее рационально использовать для получения ТРВ схему внутреннего перемешивания потоков воды и газа (рис. 1) [1–4]. Внутреннее перемешивание потоков воды и газа происходит внутри распылителя, и из него истекает струя газовой смеси, представляющая собой поток капель в высокоскоростном потоке газа.

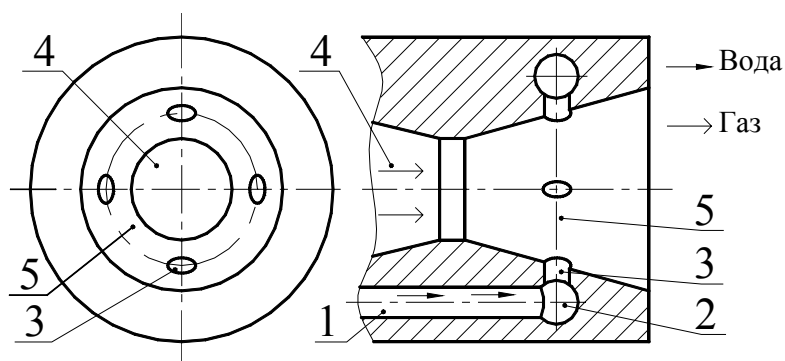


Рис. 1. Схема распылителя внутреннего перемешивания потоков жидкости и газа для получения ТРВ: 1 – канал подачи воды; 2 – коллекторная полость; 3 – жиклер; 4 – канал подачи газа; 5 – сверхзвуковое сопло (сопло Лаваля)

Воду по каналу 1 подают в коллекторную полость 2, где поток воды стабилизируется. Далее воду через жиклеры 3, выполненные в сверхзвуковой части сопла 5, струями направляют в поток газа, движущийся по каналу 4. В сверхзвуковой части сопла происходит перемешивание потоков жидкости и газа. Струи жидкости дробятся на крупные капли, которые затем распадаются на более мелкие капли в сверхзвуковом потоке газа.

В качестве распыливающего газа используют инертные газы и воздух. Ряд исследователей для тушения нефтепродуктов предлагают использовать газоводяную смесь, состоящую из 60 % ТРВ и 40 % воздуха [5].

При сверхзвуковом истечении газовой смеси происходит ее охлаждение за счет адиабатического расширения газа, при определенных условиях возможно замораживание воды. Этот эффект используется в установках для получения искусственного снега [2]. Пониженная температура положительно влияет на тушение пожара. Отбирается большое количество энергии при испарении капель, попадающих в очаг горения. Больше высокодисперсных капель долетает до очага горения, а не испаряются по пути.

Пожаротушение ТРВ, полученной сверхзвуковым газодинамическим распылением, имеет следующие достоинства:

- генерация ТРВ с размером капель 10...100 мкм;
- широкий диапазон регулирования расхода воды без значительного изменения среднего диаметра капель;
- охлаждение и транспортировка капель в очаг горения;
- минимальная интенсивность орошения водой;
- большой радиус действия.

К недостаткам можно отнести необходимость в распыливающем газе, что усложняет конструкцию распылителя и требует дополнительного оборудования для его хранения.

### Определение параметров ТРВ при сверхзвуковом газодинамическом распылении

Дисперсность капель зависит от параметров потоков жидкости и газа, а также от конструктивно-технологической организации узла распыления. К основным параметрам можно отнести:

- $U_{ж}$ ;  $U_{г}$  – скорость потоков жидкости и газа, м/с;
- $\rho_{ж}$ ;  $\rho_{г}$  – плотность жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;
- $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе газ-жидкость, Н/м;
- $\mu_{ж}$ ;  $\mu_{г}$  – вязкость жидкости и газа, Па·с;
- $d_{кж}$ ;  $d_{кг}$  – диаметры каналов подачи жидкости и газа, м.

При адиабатном установившемся течении газа увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения его энтальпии, а, следовательно, и внутренней энергии. Увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры (рис. 2) [6].

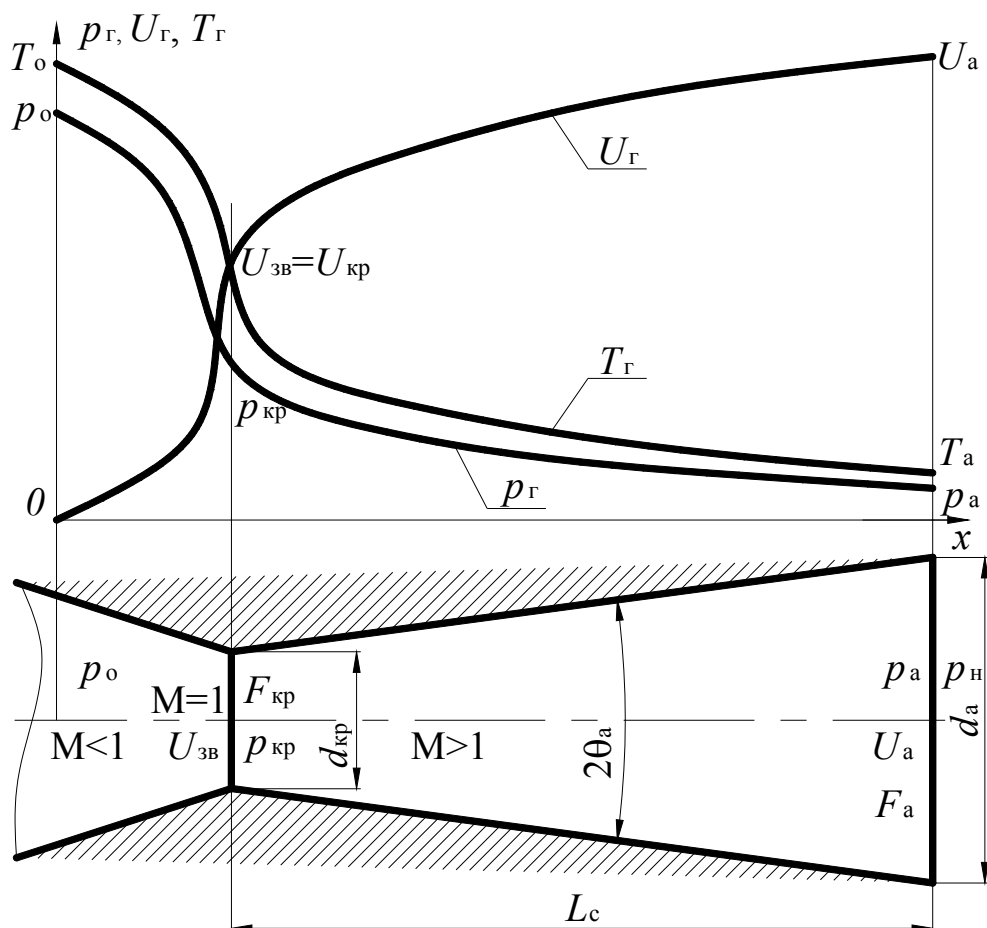


Рис. 2. Схема сверхзвукового сопла

Отношение давлений  $\beta_{кр}$  при достижении звуковой (критической) скорости истечения определяется по формуле:

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (1)$$

где  $p_0$  – полное давление газа в трубопроводе подачи газа (ресивере), Па;  $p_{кр}$  – критическое давление, при котором достигается звуковая скорость газа, Па;  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Для одноатомных газов  $\gamma=1,66$ ,  $\beta_{кр}=0,490$ ; для двухатомных газов  $\gamma=1,40$ ;  $\beta_{кр}=0,528$ ; для трехатомных газов  $\gamma=1,30$ ,  $\beta_{кр}=0,546$ . Скорость истечения газа из сверхзвукового сопла можно определить по формуле:

$$U_a = \sqrt{\left( \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot R \cdot T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_H}{p_0} \right)^{\left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right]}, \quad (2)$$

где  $p_H$  – статическое давление окружающей среды, Па;  $T_0$  – температура газа в трубопроводе, °К;  $R$  – газовая постоянная для газа, Дж/(кг\*°К);  $U_a$  – скорость истечения газа в выходном сечении сопла, м/с.

Скорость истечения газа при критическом отношении давлений  $\beta_{кр}$ , то есть скорость звука  $U_{зв}$  (м/с), находят из выражения:

$$U_{зв} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma + 1} \cdot R \cdot T_0} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma + 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0}}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность газа в трубопроводе подачи (ресивере), кг/м<sup>3</sup>.

Массовый расход газа  $G_\Gamma$  (кг/с) определяют по формуле:

$$G_\Gamma = F_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \cdot p_0 \cdot c_0 \cdot \left( \left( \frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{2}{\Gamma}} - \left( \frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{\Gamma + 1}{\Gamma}} \right)}, \quad (4)$$

где  $F_{кр}$  – критическое (минимальное) сечение сопла, м<sup>2</sup>.

При скорости истечения равной скорости звука  $U_\Gamma = U_{зв}$ , массовый расход газа максимален  $G_{\Gamma max}$  (кг/с), его определяют по формуле:

$$G_{\Gamma max} = F_{кр} \cdot \sqrt{\Gamma \cdot \left( \frac{2}{\Gamma + 1} \right)^{\frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}} \cdot p_0 \cdot c_0}. \quad (5)$$

Расчет сверхзвукового сопла при заданном секундном расходе газа сводится к определению диаметра критического сечения сопла  $d_{кр}$  (м) (так как оно определяет секундный расход газа), диаметра выходного сечения сопла  $d_a$ , а также длины сверхзвуковой части сопла  $L_c$ .

Формула для расчета критического сечения сопла  $F_{кр}$  (м<sup>2</sup>) имеет вид:

$$F_{кр} = \frac{G_\Gamma}{U_{зв} \cdot \rho_{кр}^{1/\Gamma}}. \quad (6)$$

Для воздуха параметры в критическом сечении сопла (давление  $p_{кр}$ ; плотность воздуха  $\rho_{кр}$ ; температура  $T_{кр}$ ) можно определить по формулам:

$$p_{кр} = 0,528 \cdot p_0; \quad \rho_{кр} = 0,634 \cdot \rho_0; \quad T_{кр} = 0,833 \cdot T_0. \quad (7)$$

Длина сверхзвуковой части сопла  $L_c$  (м) определяется по формуле:

$$L_c = \frac{d_a - d_{кр}}{2 \cdot \operatorname{tg}(\theta_a)}, \quad (8)$$

где  $\theta_a$  – угол полураствора сопла, град.

При расчетах с учетом сопротивления протеканию газа действительная скорость истечения газа будет меньше расчетной вследствие трения струи о стенки сопла, что учитывается коэффициентом скорости  $\phi_c$ ; кроме того, сечение струи на выходе может быть меньше выходного сечения сопла, что учитывается коэффициентом сужения струи  $\alpha_c$ . Исходя из этого, действительный объемный расход газа  $Q_\Gamma$  (м<sup>3</sup>/с) можно найти по формуле:

$$Q_{\Gamma} = \alpha_c \cdot \varphi_c \cdot F_a \cdot U_a = \alpha_c \cdot F_a \cdot U_a, \quad (9)$$

где  $\varphi_c$  – коэффициентом скорости струи;  $\alpha_c$  – коэффициентом сужения струи;  $\eta_c$  – коэффициент расхода;  $F_a$  – площадь выходного сечения сопла, м<sup>2</sup>.

Массовый расход газа  $G_{\Gamma}$  (кг/с) связан с объемным расходом  $Q_{\Gamma}$  (м<sup>3</sup>/с):

$$G_{\Gamma} = Q_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}. \quad (10)$$

Объемный расход жидкости:

$$Q_{\text{ж}} = F_{\text{кж}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{\text{ж}} - p_{\text{н}})}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (11)$$

где  $F_{\text{кж}}$  – суммарная площадь поперечного сечения каналов подачи жидкости (жиклеров), м<sup>2</sup>;  $p_{\text{ж}}$  – давление в магистрали подачи жидкости, Па.

Выражения (1–11) позволяют определить основные параметры распылителя для получения ТРВ.

В результате эмпирической обработки опытного материала в работе [6] приводится выражение для определения зависимости среднего диаметра капель, образовавшихся в высокоскоростном потоке газа:

$$d_{\text{к}} = \frac{585}{U_{\Gamma}} \cdot \sqrt{\frac{y \cdot 10^3}{\rho_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}}} + 597 \cdot \left( \frac{(\mu_{\text{ж}} \cdot 10)^2}{(y \cdot 10^3) \cdot (\rho_{\text{ж}} \cdot 10^{-3})} \right)^{0,225} \cdot \left( \frac{1000 \cdot Q_{\text{ж}}}{Q_{\Gamma}} \right)^{1,5}. \quad (12)$$

Отметим, что в выражении (12) учитывается влияние на диаметр капель соотношения расходов жидкости и газа, что существенно сказывается на эффективности пожаротушения.

### Выводы

1. По сравнению с традиционными водяными системами пожаротушения системы пожаротушения ТРВ имеют высокую эффективность.
2. Анализ распылителей показал, что для получения высокодисперсных капель необходимо использовать сверхзвуковое газодинамическое распыление.
3. Рационально формировать сверхзвуковую струю газводяной смеси в распылителях с внутренним перемешиванием потоков жидкости и газа.
4. Приведены выражения для определения основных параметров распылителя, применяемого для формирования ТРВ сверхзвуковым газодинамическим распылением.

### Литература

1. Душкин А.Л. Мобильные и стационарные системы пожаротушения тонкораспыленной водой. Крупные пожары: предупреждение и тушение: материалы XVI науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО, 2001. С. 30–33.
2. Осодоев М.Т. Снегогенераторы и область их применения. Якутск: Якутский научный центр СО АН СССР, 1990. 72 с.
3. Терпигорьев В.С. Особенности пожаротушения тонкораспыленной жидкостью. Крупные пожары: предупреждение и тушение: материалы XVI науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО, 2001. С. 33–35.
4. Цариченко С.Г. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения: учеб.-методич. пособ. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2002. 413 с.

5. Молчанов В.П. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: ООО Издательский дом «Калан», 2002. 448 с.
6. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.