УДК 614.844.621.374

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ СТВОЛА УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

**Дмитриченко А.С., к.т.н., доцент, Иваницкий А.Г.**

*В статье представлены математическая модель процесса истечения огнетушащего вещества из ствола установки импульсного пожаротушения, определено оптимальное соотношение газ-жидкость в стволе, получены формулы для расчёта параметров процесса истечения. Определены границы режима импульсного и квазистационарного истечения из ствола установки импульсного пожаротушения.*

Одним из важнейших условий успешного тушения пожаров является создание условий, позволяющих первому пожарному аварийно-спасательному подразделению прибыть к месту пожара в начальной стадии его развития. В этом случае для проведения спасательных работ, а также работ по ликвидации горения достаточно минимального количества сил и средств. В городах эта задача успешно решается с использованием автомобилей быстрого реагирования (АБР), на которых к месту пожара доставляются установки импульсного пожаротушения. Основные преимущества установок импульсного пожаротушения перед более производительными пожарными стволами:

- сокращение времени прибытия к месту пожара (по статистическим данным среднее время прибытия АБР с боевым расчетом к месту вызова по республике составляет около 7 минут [1]) и, как следствие, более раннее введение ствола на тушение пожара;
- повышение "культуры" тушения вследствие уменьшения ущерба от излишне пролитой воды.

В настоящее время подразделениями МЧС применяются установки импульсного пожаротушения УИП-1и РУПТ "Игла-1-0,4",

В настоящий момент подразделениями МЧС наиболее широко используется установка импульсного пожаротушения УИП-1, выпускаемая РУПП "Витязь" (в подразделениях МЧС на вооружении находится более 70 установок). Данная установка позволяет получать в импульсном режиме тонкораспылённую воду с диаметром капель 100-200 мкм и предназначена для тушения пожаров класса А и В, осаждения паров сильнодействующих ядовитых веществ и снижения температуры в зоне горения [2,3].

Вместе с тем в отдельных отчетных материалах, представленных управлениями МЧС, имеются сведения о том, что при тушении установками УИП-1 наблюдается повторное загорание после ликвидации пожара. В частности, установки УИП-1 не могут ликвидировать очаги пожаров класса А и В площадью около 2 м$^2$, что требует последующего дотушивания с помощью ручного пожарного ствола "Б".

Причиной неэффективности применения установок УИП-1 является отсутствие методических рекомендаций по их использованию. Разработка таких рекомендаций требует изучения процессов, протекающих в устройстве импульсной подачи, механизмов формирования и характеристик тонкораспылённых водяных струй при импульсной подаче.

В данной статье представлены математическая модель и расчёт параметров процесса истечения огнетушащего вещества с целью определения границ режима импульсного и квазистационарного истечения и параметров процесса истечения.

На рис. 1 представлена геометрическая модель ствола для импульсной подачи жидкости. Газ и жидкость находятся в цилиндрическом резервуаре (стволе) диаметром $d_P$ и занимают в начальный момент времени объемы (длиной $1_г$ и $1_ж$), разделенные плоской границей. Далее жидкость вытесняется в цилиндрический насадок диаметром $d_Н$, при этом предполагается, что в процессе вытеснения жидкости граница раздела остается плоской, а ее положение определяется координатой $\hat{z}(t)$.

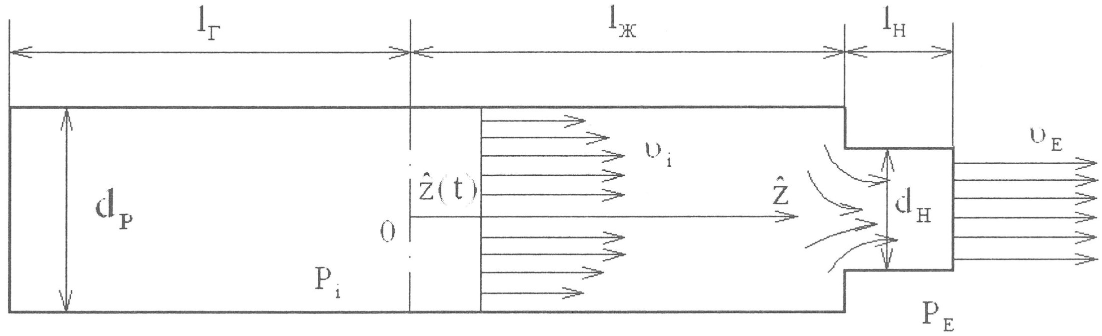



Рис.1. Геометрическая модель ствола для импульсной подачи жидкости.

При определении характеристик истечения условно принято, что граница раздела жидкость - воздух не подвержена неустойчивости Рэлея-Тэйлора и действию других факторов, разрушающих ее структуру.

Уравнение Бернулли, характеризующее поток вытесняемой жидкости в целом:

$$P_i + \frac{\alpha_P \rho v^2{}_i}{2} = P_E + \frac{\alpha_Н \rho v^2{}_E}{2} + P_C + P_И \qquad (1)$$

Перепад давления, связанный с силой тяжести в (1) не учитывается, поскольку в устройствах импульсной подачи он мал по сравнению с перепадом давления газа $\Delta p = p_i - p_E$ составляющим десятки атмосфер.

Приняв модель политропного расширения газа в резервуаре, получим зависимость давления газа внутри резервуара от положения границы раздела фаз:

$$p_i = p_0 l^n_Г / (l_Г + \hat{z})^n \qquad (2)$$

где n - показатель политропы.

Перепад давления, связанный с неустановившимся характером движения:

$$p_и = \alpha_{0P} \frac{S^2_H}{S^2_P} \left( l_ж - \hat{z} + \frac{\alpha_{0H}}{\alpha_{0P}} \frac{l_H S_P}{S_H} \right) \frac{d}{d\hat{z}} \left( \frac{\rho v^2_E}{2} \right) \qquad (3)$$

где $\alpha_{0H}$ $\alpha_{0P}$ -коэффициенты импульса в резервуаре и насадке

$$p_c = \xi' \left( 1 - \frac{S_н}{S_р} \right) \frac{\rho V^2_e}{2}$$ - потери давления на сопротивление. (4)

где $\xi'$ - безразмерный коэффициент, с помощью которого можно учесть влияние различных факторов.

После преобразования уравнение (1) примет вид:

$$\frac{P_0}{(1 + a_1 z)^n} - P_E = b(1 + c - z)\frac{dw_E}{dz} + \xi w_E , \qquad (5)$$

где

$$b = \alpha_{0P} \frac{S^2_H}{S^2_P}, \qquad a_1 = \frac{l_ж}{l_Г}, \qquad z = \frac{\hat{z}}{l_ж}, \qquad 0 < z < 1,$$

$$w_e = \frac{\rho v^2_E}{2}, \qquad \xi = \alpha_H - \frac{\alpha_P S^2_H}{S^2_P} + \xi' \left( 1 - \frac{S_H}{S_P} \right), \qquad c = \frac{\alpha_{0H} S_P l_H}{\alpha_{0P} S_H l_ж}$$

$$\int_0^1 (P_i - P_E)dz = bc\, w_E\big|_{z=1} + (b+\xi)\int_0^1 w_E dz \;, \tag{6}$$

Здесь слагаемым $bcw_E\big|_{z=1}$ для короткого насадка (c→0) можно пренебречь, что позволяет получить выражение для среднего значения плотности кинетической энергии струи в виде:

$$\overline{w}_e = \int_0^1 w_e dz = \frac{1}{b+\xi}\left\{\int_0^1 \frac{p_0 dz}{(1+a_1 z)^n} - \int_0^1 p_e dz - \right\} = \frac{1}{b+\xi}\left\{\frac{p_0\left[1-(1+a_1)^{1-n}\right]}{a_1(n-1)} - p_e - \right\} = \frac{1}{b+\xi} * \frac{A}{S_p l_ж} \tag{7}$$

Отсюда следует, что коэффициент $(b+\xi)^{-1}$ равен отношению кинетической энергии жидкости к работе A, совершенной газом. В частности, для идеальной жидкости, когда $(b+\xi)^{-1} = 1$, работа расширения газа полностью идет на сообщение кинетической энергии жидкости.

Средняя кинетическая энергия $\overline{w_e}$ сама по себе не является показателем эффективности устройства импульсной подачи жидкости. Как следует из (7), максимальное значение $\overline{w_e}$ достигается при $a_1 \to 0$ и равно $\overline{w}_{e\,max} = \dfrac{p_0 - p_e}{b+\xi}$. При заданном объеме жидкости в резервуаре условие $a_1 \to 0$ означает, что объем газа в начальный момент должен во много раз превышать объем жидкости. Таким образом, достижение максимума кинетической энергии всей жидкости при фиксированном ее объеме требует неограниченного увеличения габаритов резервуара. Поэтому в качестве критерия эффективности устройства следует выбрать отношение кинетической энергии ко всему объему резервуара:

$$\tilde{w} = \frac{\overline{w} S_p l_ж}{S_p(l_ж + l_Г)} = \frac{\overline{w} a_1}{1+a_1}, \tag{8}$$

Из условия максимума $\dfrac{d\tilde{w}}{da_1} = 0$ получим оптимальное значение отношения объема жидкости к объему газа:

$$a^*_1 \quad \left(\frac{n}{1 \quad \dfrac{p_e}{p_0}}\right)^{\frac{1}{\;}} -1$$

Отсюда, в частности, для двухатомного газа при адиабатном расширении (n = 1,4), следует $a^*_1 = \dfrac{2{,}32}{(1+0{,}4\dfrac{p_e}{p_0})}$, при $\dfrac{p_e}{p_0} = \dfrac{1}{25}$ имеем: $a^*_1 = 1{,}23$.

После введения новой независимой переменной $x = (1+c-z)a$, где $a = \dfrac{a_1}{1+a_1(1+c)}$, уравнение (5) приводится к ещё более формализованному виду:

$$-x\frac{dw_i}{dx} + mw_i = \frac{p_1}{(1-x)^n} - p_e\ , \quad w_i\big|_{x=x_0} = 0\ , \tag{10}$$

$$x < x_0 = x\big|_{z=0} = a(1+c)\ , \qquad x > x_1 = x\big|_{z=1} = ac\,,$$

где $m = \dfrac{\xi}{b}$, $p_1 = \dfrac{p_0}{\left(1+a_1(1+c)\right)^n}$

Переменная x имеет ясный геометрический смысл в случае исчезающе малой длины насадка ($l_H \to 0$), когда $c \to 0$. В этом случае $a = \dfrac{l_ж}{l_Г + l_ж}$ и $x = \dfrac{l_ж - \hat{z}}{l_Г + l_ж}$ - текущее значение длины столба жидкости в резервуаре, отнесенное к длине резервуара. Смысл $w_i$ и параметров в (10) предельно упрощаются для идеальной жидкости, когда распределение скоростей на границе раздела и в струе можно считать однородными (стержневое течение). В этом случае $b = \dfrac{S^2_н}{S^2_р}$, $\xi' = 0$, $\xi = 1 - b$, $w_i$ - плотность кинетической энергии жидкости в резервуаре (вдали от выходного отверстия).

Путем непосредственной подстановки можно показать, что уравнению (10) и нулевому начальному условию удовлетворяет решение вида:

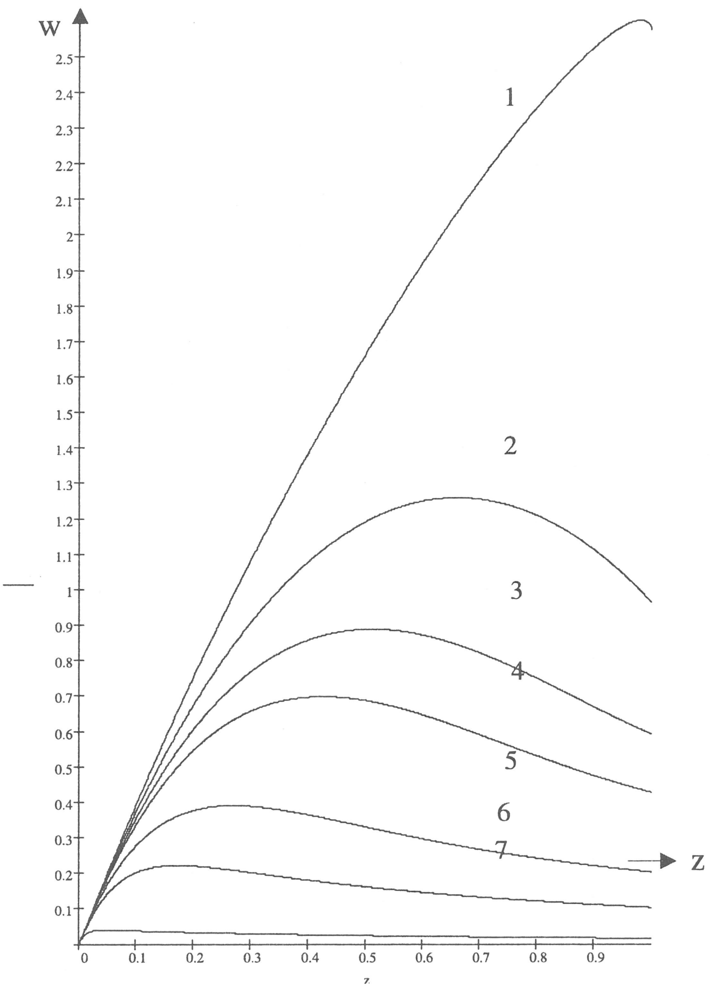
$$w_i = x^m\left(\int_x^{x_0}\frac{p_1 dy}{y^{m+1}(1-y)^n} - \int_x^{x_0}\frac{p_e dy}{y^{m+1}}\right). \tag{11}$$

Уравнение (11) решалось при помощи прикладного пакета MathCAD. Для удобства сравнения плотность кинетической э

$$W:=\frac{1}{b}\cdot\left[\left[(1+c-z)\cdot\left[\frac{a1}{[1+a1\cdot(1+c)]}\right]\right]^{m}\cdot\int_{(1+c-z)\cdot\left[\frac{a1}{[1+a1\cdot(1+c)]}\right]}^{a1\cdot\frac{(1+c)}{[1+a1\cdot(1+c)]}} y^{-(m+1)}\cdot(1-y)^{-n}dy-\frac{pe}{p1}\left[(1+c-z)\cdot\left[\frac{a1}{[1+a1\cdot(1+c)]}\right]\right]^{m}\cdot\int_{(1+c-z)\cdot\left[\frac{a1}{[1+a1\cdot(1+c)]}\right]}^{a1\cdot\frac{(1+c)}{[1+a1\cdot(1+c)]}} y^{-(m+1)}dy\right] \quad (13)$$

где $m=\frac{1}{b}-1$, $b=\left(\frac{d_H}{d_P}\right)^4$, $d_H/d_p=(-\beta+1+k)^{-\frac{1}{4}}$, $k=1, 2, 3...$

Результаты решения для различных значений параметра m приведены на рис.2.




$1-m=0{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}889\right)$; $2-m=1{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}786\right)$; $3-m=2{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}726\right)$; $4-m=3{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}683\right)$;

$5-m=7{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}584\right)$; $6-m=14{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}503\right)$; $7-m=99{,}6\left(\frac{d_H}{d_P}=0{,}316\right)$;

Рис.2. Зависимость безразмерной плотности кинетической энергии струи в резервуаре от

Возрастающий участок на этих зависимостях описывает стадию ускорения жидкости, которая отсутствует в квазистационарном приближении (кривая №7 $m \to \infty$). При m>15 расстояние, которое граница раздела проходит с ускорением, значительно меньше первоначальной длины столба жидкости $l_ж$. В этом случае стадия ускорения слабо влияет на интегральные характеристики истечения, и этот режим можно охарактеризовать как квазистационарный. При m<1,5 жидкость проходит большую половину пути с ускорением, и, следовательно, инерционное запаздывание в этом случае играет определяющую роль (импульсный режим).

Значение m ~ 2,5, при котором расстояние, которое граница раздела проходит с ускорением ~ $l_Ж/2$, является характерным значением, разделяющим квазистационарный и импульсный режимы истечения жидкости. На стадии ускорения частицы, вылетающие из резервуара позже, догоняют частицы вылетевшие раньше. Поэтому на конечной стадии истечения в импульсном режиме скорости вылетевших частиц в результате столкновений должны усредняться и основная масса жидкости может образовать единый объем, движущийся с некоторой усредненной скоростью. В квазистационарном режиме, напротив, происходит дробление объема, поскольку основное время истечения занимает стадия замедленного движения границы, при котором частицы, вылетевшие позже, отстают от частиц, вылетевших раньше.

Скорости движения жидкости в стволе и на выходе из него соответственно:

$$w_i = \frac{\rho v^2{}_i}{2} \qquad v_i = \sqrt{\frac{2w_i}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_1 w}{\rho}} \tag{14}$$

$$v_E = \frac{v_i S_P}{S_H} = \frac{S_P}{S_H}\sqrt{\frac{2P_1 w}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_1 w}{\rho}\frac{S^2{}_P}{S^2{}_H}} = \sqrt{\frac{2P_1 w}{\rho b}} \tag{15}$$

Время истечения жидкости из резервуара:

$$\tau = \int_0^{l_Æ}\frac{d\hat{z}}{v_i} = \int_0^{l_Æ}\frac{d\hat{z}}{\sqrt{\frac{2P_1\overline{w}}{\rho}}} = l_Æ\sqrt{\frac{\rho}{2P_1\overline{w}}} \tag{16}$$

Ускорение жидкости в резервуаре:

$$\frac{dV_i}{dt} = V_i\frac{dV_i}{d\hat{z}} = -\frac{p_1 a}{\rho l_æ}\frac{dw}{dx}\ , \tag{17}$$

Полный импульс струи:

$$P = S_p \int_0^{l_{æ}} \rho V_e d\hat{z} = \left( \frac{2p_1}{\rho b} \right)^{\frac{1}{2}} \overline{w}^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

Время истечения жидкости из резервуара:

$$\tau = \int_0^{l_{æ}} \frac{d\hat{z}}{V_i} = \sqrt{\frac{\rho}{2p_1}} l_{æ} \overline{w}^{-\frac{1}{2}} \tag{19}$$

Средняя сила реакции струи:

$$\frac{P}{\tau} = \frac{2p_1 S_H \overline{w}^{\frac{1}{2}}}{b \overline{w}^{-\frac{1}{2}}} = \frac{2p_1 S_H \overline{w}}{b} \tag{20}$$

С помощью формул (13-20) можно рассчитать характеристики истечения жидкости при различных режимах работы (давлении воздуха в стволе, соотношении газ-жидкость) установки для определения наиболее эффективных параметров её работы (распределение капель по диаметрам, объём двухфазной струи, средний диаметр капель воды, дальность полёта струи).

## ЛИТЕРАТУРА


1. Анализ боевых действий подразделений МЧС РБ за 1999-2004 годы.
2. Руководство по эксплуатации РУПТ "Игла-1-0,4".
3. Руководство по эксплуатации УИП-1.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986.
5. Емцев Б.Т.