

С.А. Виноградов, И.Н. Грицына, канд. техн. наук, доцент, Ю.Н. Сенчихин, канд. техн. наук, доцент (Национальный университет гражданской защиты Украины), А.И. Касьян, канд. техн. наук. (ГУ МЧС Украины в Харьковской обл.)

О ВОЗМОЖНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ГАЗОВЫХ ФОНТАНОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ

Описаны существующие способы, методы и устройства для тушения пожаров газовых фонтанов. Рассмотрена возможность тушения подобных возгораний с помощью высокоскоростных струй жидкости. Описаны устройства, применяемые для получения высокоскоростных струй. Представлена математическая модель внутренней баллистики импульсного водомета. Также предложено для тушения газовых фонтанов использовать импульсный водомет и систему уравнений его внутренней баллистики в квазистационарной постановке, которую возможно использовать для определения рабочих параметров установки тушения газовых фонтанов.

Ключевые слова: высокоскоростная струя жидкости, газовый фонтан, способ тушения, математическая модель.

Постановка проблемы. Главной проблемой при борьбе с пожарами газовых фонтанов является низкая дальность подачи огнетушащих веществ существующими устройствами, следствием чего является опасность для личного состава вследствие высокой излучающей способности факела. Поэтому возможность применения высокоскоростных струй жидкости для тушения подобных пожаров является перспективным и интересным направлением развития науки. Вместе с тем, для экспериментального исследования подобных процессов, необходимо иметь математическую модель, адекватно описывающую процессы, протекающие в устройстве создания высокоскоростных струй жидкости.

Анализ последних исследований и публикаций. На данный момент существуют множество разнообразных методов тушения газовых фонтанов [1-5]. Этими вопросами наиболее активно занимались такие организации, как ООО «ТюменНИИгипрогаз», ООО «Новые импульсные технологии» и др. Наиболее значительный вклад сделали ученые Мамиконянц Г.М. [1], Абдурагимов И.М. [5] и Захматов В.Д. [3]. Работа устройств для получения высокоскоростных струй жидкости описана в [6, 7].

Постановка задания и его решение. На данный момент для тушения газовых фонтанов разработано не менее десятка различных методов, что обусловлено, с одной стороны, сложностью технической проблемы, многофакторностью и разнообразием конкретных ситуаций на таких пожарах, а с другой – ограниченной эффективностью каждого из таких способов.

Все известные способы и устройства тушения горящих факелов базируются на двух принципиально разных подходах – на подавлении горения или на срыве пламени. Примерная классификация способов и методов тушения газовых фонтанов представлена на рис. 1.

В первом случае в зону горения подают охлаждающие и огнетушащие средства – специальные порошки, пену, воду, инертные газы. При этом воздействию подвергается значительная часть горячей массы вещества факела, а механизм тушения сводится к снижению концентрации окислителя в горящем факеле, введению ингибиторов и снижению температуры в зоне горения, что приводит к подавлению реакции горения в факеле. Примерами этого способа тушения является тушение фонтана с помощью автомобилей порошкового тушения (АП-5 и др.), а также получивший наибольшее распространение метод тушения с использованием автомобилей газоводяного тушения (АГВТ-100, АГВТ-200) [1, 4].

Тушение срывом пламени заключается в механическом отрыве пламени от устья скважины мощными водяными струями, взрывной ударной волной. Известны также устройства, генерирующие сверхскоростную струю газа, однако они не получили широкого распространения в силу сложности своей конструкции [2].



Рис. 1. Способы тушения газовых фонтанов

Следует сказать, что главной проблемой, с которой сталкиваются подразделения МЧС при тушении газовых фонтанов перечисленными способами является малое расстояние подачи огнетушащих средств к фонтану. Так, нормативными документами для тушения лафетными стволами и автомобилями ГВТ, установлена оптимальная дальность подачи – 15 м [1, 2, 4]. Однако расчет безопасного расстояния отдаления личного состава от скважины показывает, что уже при дебите фонтана 0,5 млн м³/сутки, оно составляет примерно 50 м. При увеличении дебита этот показатель возрастает и для скважины с дебитом 3 млн куб м/сутки составляет 120 м. Безопасное расстояние определяется как [5]

$$L_{безп} = \sqrt{1,75H_{\phi}^{2,5} - \left(H + \frac{H_{\phi}}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

где H_{ϕ} – высота фонтана, м;

H – расстояние от земли до нижней точки факела фонтана, м.

Во время практических отработок различных способов и устройств тушения газовых фонтанов наиболее эффективным признан комбинированный способ – подача огнетушащей смеси с высокой скоростью.

На данный момент наилучшим образом этот принцип реализуют устройства импульсной подачи специальных огнетушащих порошков – «Импульс-3» и «Импульс-Шторм» [3]. Дальность эффективного тушения подобных установок составляет 50-100 м. Однако широко известно отрицательное воздействие, которое оказывает огнетушащий порошок на экологию.

Исходя из соображений экологической безопасности наилучшим огнетушащим веществом является вода. На сегодняшний день нет устройств, способных подавать воду на тушение горящего газового фонтана с дистанций, безопасных для личного состава.

По нашему мнению, скорости, достаточные для обеспечения отрыва факела газового фонтана, могут обеспечить установки импульсной подачи высокоскоростных струй жидкости (ультраструй). При подаче больших дистанций, струя воды распадается, и позволяет

проводить тушение дополнительно за счет высокой охлаждающей способности и уменьшения концентрации кислорода в зоне горения ниже уровня воспламенения.

Для получения ультраструй применяют импульсный водомет (ИВ) и гидропушку (ГП) [6, 7]. В этих установках реализуются физические принципы: вытеснение жидкости из замкнутого объема через малое отверстие в ИВ и ускорение жидкости при втекании в суживающееся сопло в ГП.

Схематическое изображение ИВ показано на рис. 2, а. Принцип действия заключается в том, что граница раздела 2 (в конструкциях может быть поршень или пыж) под действием пороховых либо сжатых газов 1 разгоняется на достаточно большом пути в стволе 3, и сжимает воду, которая находится в сопле 4. Сжатая вода вытекает из насадка – происходит выстрел. Скорость струи ИВ не превышает 1500 м/с [6].

Схема ГП, в которой реализуется инерционный принцип, приведена на рис. 2, б. Под действием сжатых или пороховых газов 1 поршень 2 ускоряется вместе с водой в стволе 3. Вода достигает сужающегося сопла 4 и вытекает из него, ускоряясь. Ускорение воды происходит за счет перераспределения энергии между частицами нестационарной движущейся жидкости. Достигнув края сопла, вода вытекает из него ультраструей. В ГП присутствуют те же элементы, что и в ИВ. Однако другие физические принципы получения струй приводят к значительным количественным и качественным расхождениям в характеристиках ИВ и ГП.

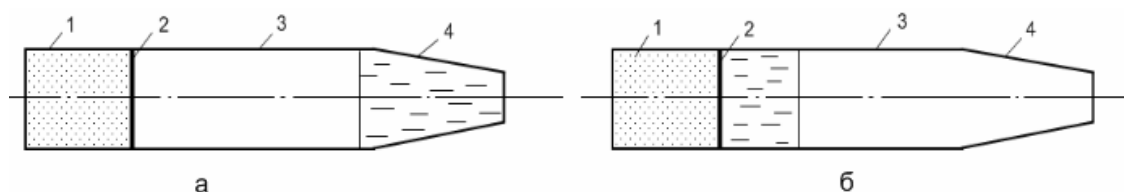


Рис. 2. Устройства импульсной подачи высокоскоростных струй жидкости:

а – импульсный водомет, *б* – гидропушка

Количественной величиной оценивания эффективности устройств импульсной подачи жидкости является добротность [6]

$$D = \frac{P_{0 \max}}{P_{c \max}}, \quad (2)$$

где $P_{0 \max}$ – наибольшее в течение выстрела давление торможения струи, Па;

$P_{c \max}$ – наибольшее давление на стенки установки, Па.

Для ИВ $D = 1$, а максимальное значение добротности для ГП, полученное в теоретических расчетах, составляет 3,5. Из-за этого скорость струи ГП достигает 3000 м/с.

Однако, несмотря на большую скорость истечения, дальность подачи струи ИВ больше, чем ГП [6]. Поэтому импульсный водомет более подходит для тушения газовых фонтанов.

При построении уравнений внутренней баллистики ИВ следует учесть, что процесс его выстрела обладает рядом особенностей, позволяющим сделать допущение о квазистационарности процесса движения жидкости [7, 8]. Для построения системы уравнений внутренней баллистики импульсного водомета примем ряд допущений: изменение параметров воды примем адиабатическими, осредненными по объему ствола, ствол имеет форму цилиндра с плоскими торцами, а истечение происходит через малое отверстие, кинетической энергией частиц воды в стволе пренебрегаем, жидкость примем идеальной, течение будем считать квазиоднородным, отсутствует вращение, конструкция абсолютно жесткая и упругих деформаций нет, течение воды в зазоре между поршнем и стволом отсутствует.

Учитывая сформулированные выше допущения, можно получить уравнения внутренней баллистики импульсного водомета, расчетная схема которого показана на рис. 3 (а и б – положение поршня соответственно перед выстрелом и во время него).

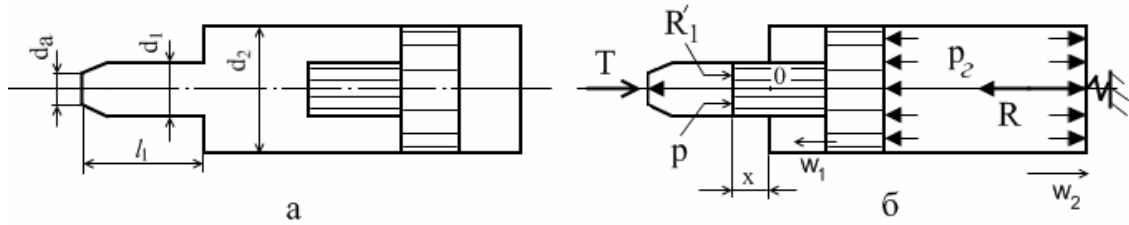


Рис. 3. Расчетная схема импульсного водомета

Масса воды в стволе уменьшается за счет истечения. Секундное ее изменение $dm/dt = -\rho_a u_a F_a$, где ρ_a , u_a и F_a – плотность жидкости, скорость жидкости и площадь поперечного сечения на срезе сопла. Скорость истечения жидкости определяется по формуле [8]

$$u_a = \sqrt{\frac{2}{n-1} \frac{p_o + B}{\rho_o} \left[1 - \left(\frac{p_a + B}{p_o + B} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} \quad (3)$$

где $n = 7,15$ – показатель адиабаты;

p_o – давление торможения жидкости, Па.

Величина ρ_a зависит от характера истечения (до- или сверхзвуковой). Скорость звука при начальном давлении определяется по формуле

$$c_n = \sqrt{\frac{nB}{\rho_n}} \quad (4)$$

где ρ_n – начальная плотность жидкости, кг/м³.

С учетом (2) выражение (1) при условии $p_a = 0$, $\rho_a = \rho_n$ [8] примет вид

$$\frac{dm}{dt} = -F_a \rho_n c_n \sqrt{\frac{2}{n-1} \left[\left(\frac{p+B}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}, \quad (5)$$

Текущее значение массы находим как интеграл этого уравнения, а объем определяем по относительному перемещению ствола и поршня [7]

$$V = F_1 (l_1 - x), \quad (6)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения ствола, м²; l_1 – приведенная длина ствола, м.

Для определения изменения давления жидкости во время выстрела запишем уравнение изохоры в виде

$$(p+B) \left(\frac{V}{m} \right)^n = \text{const}, \quad (7)$$

где V – объем воды в стволе, м³;

m – масса воды, кг;

p – давление воды, Па;

B – энтропийная функция, Па.

Представив (5) в дифференциальной форме и исключив объем получим

$$\frac{dp}{dt} = n(p + B) \left(\frac{1}{m} \frac{dm}{dt} + \frac{1}{l_1 - x} \frac{dx}{dt} \right); \quad (8)$$

В общем случае поршень и корпус водомета подвижны. На систему корпус - поршень кроме внутренних сил, обусловленных давлением воды и газа, действуют две внешние силы (рис. 1, б): реакция амортизатора R и сила реакции струи (сила тяги T). Для определения силы тяги примем параметры в стволе заторможенными и осредненными по объему. Тогда

$$T = \frac{dm}{dt} u_a. \quad (9)$$

С помощью (1), (3) и (9) получим T зависимость $T=f(p)$

$$T = F_a \rho_n c_n^2 \frac{2}{n-1} \left[\left(\frac{p+B}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (10)$$

Для определения силы давления воды на сопло используем теорему об изменении количества движения [7]

$$m_1 \frac{dw_1}{dt} + m_2 \frac{dw_2}{dt} = -T + R, \quad (11)$$

где m_1 и w_1 – масса и скорость поршня;

m_2 и w_2 – масса и скорость корпуса.

Изменение количества движения поршня и корпуса представим в виде

$$m_1 \frac{dw_1}{dt} = F_2 p_2 - F_1 p; \quad (12)$$

$$m_2 \frac{dw_2}{dt} = -F_2 p_2 + R'. \quad (13)$$

где F_2 – площадь поперечного сечения поршня;

p_2 – давление газа;

R' – сила давления воды на сопло.

Введем переменную $w = w_1 - w_2$ – относительная скорость, и пренебрегая членом $(T-R)/m_2$ ввиду его малости [7], из уравнений (11), (13) находим:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{m_1} (F_2 p_2 - F_1 p) \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right). \quad (14)$$

Относительное перемещение x определится как интеграл уравнения

$$\frac{dx}{dt} = w. \quad (15)$$

Таким образом, получим систему уравнений (5), (8), (14) и (15) для определения четырех неизвестных p , m , w , и x .

Выводы. В работе описаны наиболее распространенные способы и методы тушения газовых фонтанов, обоснована основная проблема, с которой сталкиваются подразделения при борьбе с подобными ЧС. Описаны устройства для создания ультраструй. Предложено для тушения газовых фонтанов использовать импульсный водомет и предложена система уравнений его внутренней баллистики в квазистационарной постановке, которую возможно использовать для определения рабочих параметров установки тушения газовых фонтанов.

Список литературы:

1. Мамиконянц Г.М. Тушение пожаров мощных газовых и нефтяных фонтанов. – М.: Недра, 1971. – 95 с.

2. Куцын П.В. Тушение горящих газовых фонтанов большой мощности // Безопасность труда в промышленности – 1985. – №4. – С. 56 – 59.
3. Захматов В., Цікановський В., Кожемякін О. Гасіння газових фонтанів імпульсними установками пожежогасіння // Охорона праці. – 1997. - №5. – С. 38-40.
4. Повзик Я.С. Пожарная тактика: Учебн. пособие. – М.: Спацаавтоматика, 2000. – 413 с.
5. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – Москва: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
6. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер, 2007. – 149 с.
7. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.
8. Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке/Б.В. Войцеховский, Ю.А. Дудин, Ю.А. Николаев и др. // Динамика сплошной среды. – Новосибирск, 1971. – Вып. 9. – С. 7-11.

С.А. Виноградов, І.М. Грицина, канд. техн. наук, доцент, Ю.М. Сенчихін, канд. техн. наук, доцент, (Національний університет цивільного захисту України) О.І. Касьян, канд. техн. наук (ГУ МЧС України в Харківській обл.)

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГАЗОВИХ ФОНТАНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИСОКОШВИДКІСНИХ СТРУМЕНІВ РІДИНИ

Описані існуючі способи, методи та пристрої для гасіння пожеж газових фонтанів. Розглянута можливість гасіння подібних загорянь за допомогою високошвидкісних струменів рідини. Описані пристрої, що застосовуються для отримання високошвидкісних струменів. Представлена математична модель внутрішньої балістики імпульсного водомета. Також запропоновано для проведення гасіння газових фонтанів використовувати імпульсний водомет і систему рівнянь його внутрішньої балістики у квазістаціонарній постановці, яку можна використовувати для визначення робочих параметрів установки для гасіння газових фонтанів.

Ключові слова: високошвидкісний струмінь рідини. Газовий фонтан, спосіб гасіння, математична модель.

S.A. Vinogradov, I.N. Hritsyna, Candidate of Sciences (Engineering), Y.N. Senchikhin, Candidate of Sciences (Engineering) (National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv), A.I. Kasian, Candidate of Sciences (Engineering), (The Main Department of MES in Kharkiv region)

THE POSSIBILITIES OF EXTINGUISHING OF GASEOUS FOUNTAINS BY HIGH-SPEED STREAMS OF LIQUID

The article deals with the existent methods and devices for extinguishing of gaseous fountains. The possibility of extinguishing of similar ignition by high-speed streams of liquid is considered. Devices applied for the of high-speed streams receiving are described. The mathematical model of internal ballistics of hydrocanon is presented. It is also suggested for gas fountains' extinguishing to use impulsive water jet and system of equalizations of his internal ballistics in the quasi-steady rising which is possible for using of operating parameters' determination of extinguishing of gaseous fountains' setting.

Key words: high-speed stream of liquid, gaseous fountains, method of extinguishing, mathematical model

