

УДК 614.844.2+623.454

А.Н. Семко, д-р техн. наук, проф., М.В. Бескровная, канд. техн. наук, ведущий науч. сотр. ДонНУ, Донецк, С.А. Виноградов, преподаватель, И.Н. Грицына, канд. техн. наук, доцент Национального университета гражданской защиты Украины, Харьков

ТУШЕНИЕ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ СТРУЯМИ ЖИДКОСТИ

Приведены результаты экспериментальных исследований тушения газовых факелов при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости (300...600 м/с), которые генерирует пороховой импульсный водомет. Представлены материалы видеосъемки процесса распространения струи и тушения факела лазерным бесконтактным методом, результаты измерения скорости головной части струи. Показано, что вокруг импульсной струи жидкости высокой скорости в воздухе образуется облако брызг большой площади, которое эффективно сбивает пламя на расстоянии 5...15 м от установки.

Ключевые слова: газовый факел, тушение факела, пороховой импульсный водомет, импульсная струя жидкости, измеритель скорости.

Введение. Общеизвестно, что тушение газовых факелов очень сложно. При таких авариях в атмосферу выбрасывается большое количество диоксида углерода, оксидов углерода, азота и серы. Борьба с пожарами в этом случае требует привлечения огромных материально-технических ресурсов и может длиться неделями. Высокая температура горения, большое теплоизлучение, ощущаемое даже на расстоянии 50...80 м, приводит к деформациям, а иногда и взрывам технологических аппаратов и коммуникаций и значительному расширению площади горения. Высота горящего факела большой мощности достигает 80...100 м, интенсивность тепловыделения в таком факеле – несколько миллионов киловатт.

Для тушения газовых факелов разработано много различных методов [4]: закачивание воды в скважину; импульсная подача огнетушащего порошка специальными установками; водяными струями из лафетных стволов; взрыв заряда ВВ; бурение наклонной скважины и закачивание в нее специального раствора; комбинированный способ и т.д. В Украине и странах СНГ при тушении газовых факелов чаще всего применяют лафетные стволы (гидромониторы), автомобили газоводяного тушения, пневматические порошковые пламеподаватели [1 – 4]. Каждый из перечисленных способов тушения обладает своими преимуществами и недостатками. Однако в настоящее время не разработано универсального эффективного способа тушения газовых факелов.

Один из наиболее распространенных способов тушения газовых факелов – применение тонкораспыленной воды. Основными действующими факторами при тушении факела тонкораспыленной водой является охлаждение горящего материала и образование локализирующего очага горения облака пара. При большой скорости струи жидкости наблюдается отрывное тушение газового факела, при котором струя мелкодисперсных брызг срывает горящий факел. Эксперименты показывают, что срыв диффузионного пламени факела происходит при минимальных скоростях 80...100 м/с.

В настоящей работе представлены некоторые экспериментальные исследования по тушению газовых факелов при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости, создаваемых импульсным водометом. Исследования, выполненные на модельных установках, дали обнадеживающие результаты и показали перспективность этого направления.

Внутренняя баллистика порохового импульсного водомета. Экспериментальные исследования проводили при помощи порохового импульсного водомета, схема которого изображена на рис. 1 [5, 6]. Ствол порохового импульсного водомета, который заканчивается коническим соплом с коллиматором, заполнен водой. Пороховой заряд отделен от водяного заряда пыжом. Для упрочнения самый напряженный участок ствола укреплен бандажом, который посажен на ствол с заданным натяжением. Пороховой заряд в корпусе водомета зафиксирован затвором, внутри которого находится воспламенитель. В начальный момент срабатывает воспламенитель и поджигает пороховой заряд. Пороховые газы, образующиеся при горении пороха, начинают выталкивать водяной заряд через коническое сопло в виде импульсной струи жидкости.

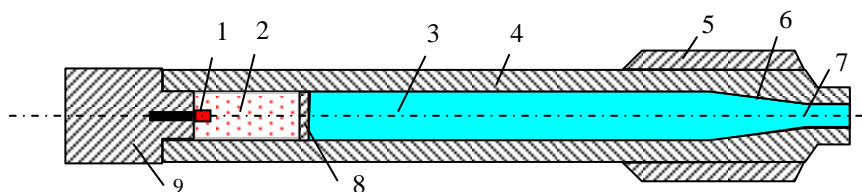


Рис. 1. Схема порохового импульсного водомета:

- 1 – воспламенитель; 2 – пороховой заряд; 3 – водяной заряд; 4 – ствол;
5 – бандаж; 6 – сопло; 7 – коллиматор; 8 – пыж; 9 – затвор

Движение жидкости в пороховом импульсном водомете описывает система уравнений нестационарной газовой динамики в следующей форме [2, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho v F}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \rho v F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2 + p) F}{\partial x} &= p \frac{dF}{dx}; \\ p &= B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где t – время, с;

x – координата, м;

v – скорость, м/с;

$F(x)$ – площадь поперечного сечения проточной части – ствола и сопла, м²;

p и ρ – давление и плотность, Па и кг/м³;

$B = 304,5$ МПа; $n = 7,15$; $\rho_0 = 10^3$ кг/м³ – постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта.

Начальные и граничные условия имеют вид

$$\left. \begin{aligned} v(0, x) = 0; \quad p(0, x) = 0; \quad \rho(0, x) = \rho_0; \quad -L \leq x \leq L_s; \\ p(t, L) = 0; \quad p(t, x_g) = p_g; \quad v(t, x_g) = v_g, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где L и L_s – длина ствола и сопла с коллиматором, м;

x_g – координата контактной поверхности, м;

p_g и v_g – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности, Па и м/с.

Поставленную задачу решали численно. Движение жидкости в импульсном водомете рассчитывали методами С.К. Годунова и А.В. Родионова, а горение пороха – модифицированным методом Эйлера [5, 6]. Ниже приведены некоторые результаты расчетов для порохового импульсного водомета с параметрами: масса водяного заряда 450 г, диаметр сопла и струи 15 мм.

На рис. 2 приведены графики зависимости скорости истечения струи и давления внутри водомета от времени для порохового заряда массой 30 г (штатный режим работы водомета).

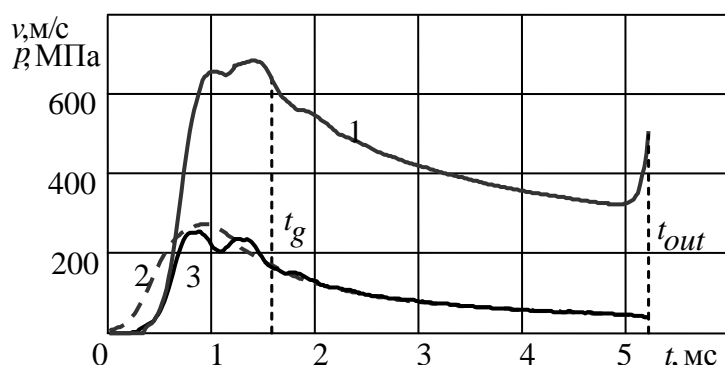


Рис. 2. Графики зависимости скорости истечения струи и давления внутри импульсного водомета:

1 – скорость истечения; 2 – давление пороховых газов; 3 – давление воды в стволе

В табл. 1 приведены результаты расчетов максимальной скорости импульсной струи порохового импульсного водомета для разной массы пороха.

Таблица 1

Расчетная скорость струи порохового импульсного водомета для разной массы пороха

Масса пороха, г	30	25	20	15	10	5
Максимальная скорость струи, м/с	686	600	504	405	298	178

Как видно, максимальная скорость струи достигает 685 м/с, а давление 225 МПа, длительность выстрела – около 5,2 мс.

Экспериментальное оборудование и схема проведения эксперимента.

Экспериментальные исследования тушения газового факела проводили на полигоне НИИГД «Респиратор». В экспериментах использовали пороховой импульсный водомет (рис. 3). Корпус его закреплен на станине, вдоль которой он может перемещаться по ползунам. Станина неподвижно укреплена при помощи штырей на грунте, а между корпусом водомета и станиной установлен резиновый амортизатор, который гасит отдачу водомета при выстреле.

Скорость импульсной струи жидкости измеряли при помощи многоканальной лазерной бесконтактной системы измерения скорости оригинальной конструкции. Система состоит из пяти идентичных портативных независимых блоков «излучатель-приемник» (рис. 4) и позволяет измерять скорость в интервале 50...3000 м/с.

Использование многоканальной системы измерения скорости позволяет за один выстрел водомета проследить динамику изменения скорости импульсной струи жидкости при ее распространении в воздухе. Для этого



Рис. 3. Экспериментальный образец гидроимпульсной установки

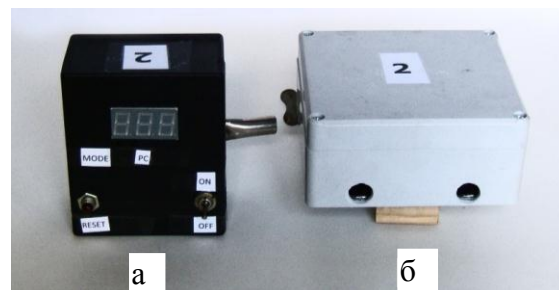


Рис. 4. Модуль системы измерения скорости:
а – приемник; б – излучатель

датчики располагают на заданном расстоянии друг от друга, например, через 1 м, что позволяет проследить изменение скорости головной части струи на расстоянии 4...5 м. Применение многоканальной системы измерения скорости позволяет существенно сократить количество экспериментов для получения необходимого объема информации для статистической обработки результатов измерений.

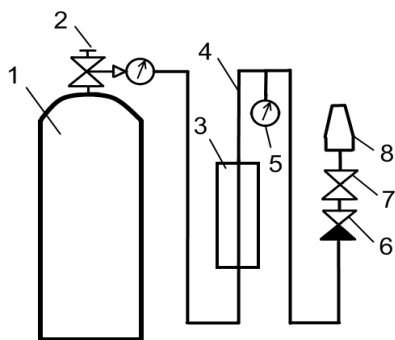


Рис. 5. Схема приспособлений для моделирования газового факела с регулируемой подачей газа:

- 1 – баллон с метаном; 2 – вентиль;
3 – дроссель; 4 – газопровод; 5 – манометр;
6, 7 – редукторы; 8 – сопло

В экспериментах использовали макет газового факела с параметрами: расход газа $Q_0 = 4,8$ л/с, скорость истечения газа из сопла $V = 27,2$ м/с и высота факела $H_\phi \approx 2$ м (рис. 5).

Для измерения скорости струи использовали пять измерительных модулей (рис. 6). Первый модуль располагали на расстоянии 1 м от сопла водомета, остальные – на расстоянии 1 м друг от друга. Расстояние от водомета до мишени равнялось 6 м. Мишенью была стальная плита толщиной 20 мм, которая упиралась

в резиновый амортизатор. Масса водяного заряда 450 г, а масса порохового заряда 12 г.

Для проведения видеосъемки использовали четыре цифровых аппарата с частотой съемки 30 кадров в секунду.



Рис. 6. Приспособления для проведения экспериментов по тушению газового факела:

1 – импульсный водомет; 2 – приемник; 3 – излучатель измерителя скорости

Результаты экспериментальных исследований. Первоначально исследовали зависимость скорости головной части импульсной струи жидкости порохового водомета от расстояния до установки (табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Результаты измерения скорости головной части импульсной струи жидкости

№ модуля	1	2	3	4	5
Расстояние до импульсного водомета, м	1	2	3	4	5
Скорость, м/с	125	366	371	366	349

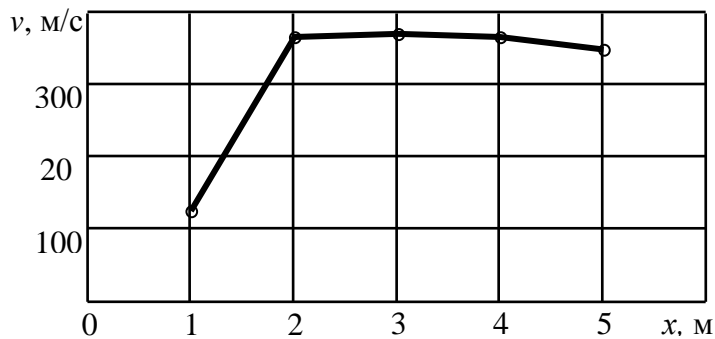


Рис. 7. График зависимости скорости головной части струи от расстояния до импульсного водомета

Видно, что показания 2–5-го модулей близки и заметно отличаются от показания 1-го модуля, который находился ближе всех к импульсному водомету на расстоянии 1 м от установки. Эти различия в показаниях модулей связаны исключительно с особенностями истечения импульсной струи жидкости из импульсного водомета. Струя его начинает истекать

практически с нулевой скорости, которая быстро возрастает, достигает максимума, а затем относительно медленно уменьшается. Поэтому 1-й модуль

регистрирует скорость головной части струи в начале истечения, которая далека от максимума и возрастает в процессе истечения. Скорость головной части струи достигает максимальных значений при подлете ко второму модулю, расстояние до которого 2 м. В дальнейшем скорость головной части струи незначительно уменьшается из-за торможения воздуха. Результаты измерения скорости головной части струи на стационарном участке хорошо согласуются между собой. Максимальная расчетная скорость истечения струи для порохового импульсного водомета в заданном режиме 330 м/с.

При тушении газовых факелов в экспериментах использовали две огнетушащие жидкости – воду и специальную жидкость ФСГ-2 (табл. 3). Результаты исследований скорости струи огнетушащего вещества представлены в табл. 4.

Таблица 3

Характеристики огнетушащих веществ

Огнетушащее вещество	Плотность, г/см ³	Поверхностное натяжение $\tau \cdot 10^{-3}$, Н/м	Вязкость, МПа·с
Вода	0,9982	72,86	1,0020
ФСГ-2	1,0956	27,5	1,4729

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований

Масса пороха, г	Скорость U , м/с, при расстоянии от импульсного водомета до модуля измерения скорости L , м					Примечание	Результат тушения
	1	3	5	7	9		
10	391	350	342	236	152	Огнетушащее вещество – вода, расстояние до факела 10 м	Факел потушен
10	458	348	418	292	-	Огнетушащее вещество – ФСГ-2, расстояние до факела 10 м	То же
10	-	631	137	137	148	Огнетушащее вещество – ФСГ-2, расстояние до факела 15 м	Факел не потушен
10	375	315	254	146	-	Огнетушащее вещество – ФСГ-2, расстояние до факела 10 м	Факел потушен
10	343	316	321	203	311	То же	То же
10	296	268	223	166	57,8	«	«
10	429	265	387	219	-	Огнетушащее вещество – вода, расстояние до факела 10 м	«
20	668	514	528	409	288	Огнетушащее вещество – ФСГ-2, расстояние до факела 10 м	«

На рис. 8 отражен процесс тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости на разных стадиях. Расстояние от импульсного водомета до факела 10 м. Масса пороха 10 г, масса водяного заряда 450 г.

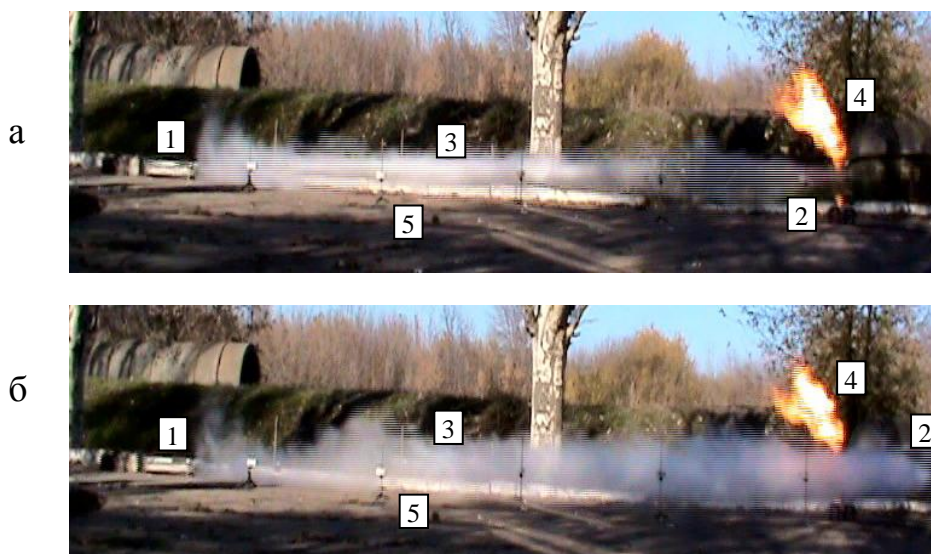


Рис. 8. Тушение газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости:

а – струя достигла факела; б – струя отсекла факел от горелки; 1 – пороховой импульсный водомет; 2 и 3 – импульсная струя жидкости; 4 – газовый факел; 5 – модули измерителя скорости головной части струи

Первая стадия тушения факела (рис. 8, а), – когда головная часть импульсной струи жидкости попадает в основание факела, нацеленная с помощью лазерного прицела, который закрепляли на корпусе импульсного водомета при настройке системы измерения. Распространяясь в воздухе, импульсная струя жидкости, которая при истечении из сопла водомета имеет диаметр 15 мм и скорость около 400 м/с, сильно взаимодействует с окружающей средой и интенсивно обдирается воздухом. Вокруг жидкого ядра струи образуется высокоскоростной ореол мелкодисперсных брызг воды, который на фотографиях выглядит в виде тумана. По предварительным оценкам для данной установки ядро струи имеет длину около 2,5 м. Когда истечение струи заканчивается, то она отрывается от сопла и дальше распространяется в воздухе самостоятельно. Головная часть струи размывается воздухом, ядро струи переходит в ореол брызг и на расстоянии около 15 м от установки полностью исчезает. Остается только ореол брызг, скорость которых быстро уменьшается.

Головная часть струи и окружающий ее ореол брызг отсекают факел от горелки, прекращая доступ горючей смеси в очаг горения (рис. 8, б). Средняя часть струи, представляющая собой остатки ядра струи и окружающего струю ореола брызг, отсекает зону горения факела от источника горючей смеси, что приводит к тушению факела.

Выводы. Проведены экспериментальные исследования тушения модельного газового факела при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости, которые генерирует пороховой импульсный водомет. В экспериментах определяли скорость головной части струи многоканальной

лазерной системой измерения скорости оригинальной конструкции, проводили видеосъемку процесса. Максимальная расчетная скорость импульсной струи в зависимости от энергии заряда равна 300...600 м/с, что хорошо согласуется с измеренными значениями. Показано, что в процессе распространения импульсная струя жидкости высокой скорости интенсивно взаимодействует с воздухом и вокруг нее образуется высокоскоростное облако брызг большого поперечного сечения, которое эффективно сбивает пламя газового факела на расстояниях порядка 5...15 м от установки.

Исследования подтвердили теоретические предположения о возможности тушения газовых факелов с помощью импульсных струй жидкости. Полученные скорости струи для отрыва факела соответствуют известным экспериментальным данным. Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение поля скоростей по длине струи и поля плотностей по поперечному сечению струи.

Скорости полета водяной струи и струи ФСГ-2 на участке 10 м при прочих равных условиях одинаковые. Максимальная эффективная дальность тушения макетного факела водяной струей и струей ФСГ-2 равна 12 м.

Список литературы

1. Карпов В.Л. Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 1. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в неподвижной атмосфере / В.Л. Карпов // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 3. – С. 37 – 43.

2. Карпов В.Л. Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 2. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в подвижной атмосфере / В.Л. Карпов // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 4. – С. 46 – 52.

3. Мамиконянц Г.М. Тушение пожаров мощных газовых и нефтяных фонтанов / Г.М. Мамиконянц. – М.: Недра, 1971. – 22 с.

4. Повзик Я.С. Пожарная тактика / Я.С. Повзик. – М.: ЗАО «Спецтехника», 2004. – 416 с.

5. Семко А.Н. Внутренняя баллистика порохового водомета и гидропушки / А.Н. Семко // Теоретическая и прикладная механика: науч.-техн. сб. / ДонНУ. – Харьков: Основа, 2002. – Вып. 35. – С. 181 – 185.

6. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / А.Н. Семко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.