

ТУШЕНИЕ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ ИМПУЛЬСНЫМИ СТРУЯМИ ЖИДКОСТИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ

*А.Н. Семко, М.В. Бескровная, Ю.Д. Украинский,
С.А. Виноградов*, И.Н. Грицына**

Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина

**Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина*

Резюме

Проведены экспериментальные исследования тушения газового факела при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости, которые генерируются пороховым импульсным водометом. Скорость импульсной струи в зависимости от энергии заряда в экспериментах достигала 300 - 600 м/с. При помощи лазерного бесконтактного измерителя скорости измерялась скорость головы струи непосредственно перед факелом, проводилось фотографирование струи. Показано, что вокруг импульсной струи жидкости высокой скорости в воздухе образуется высокоскоростное облако брызг большого поперечного сечения, которое эффективно сбивает пламя газового факела на расстояниях 5 – 20 м от установки.

Введение. Пожары газовых факелов являются одними из наиболее сложных видов промышленных аварий на нефтегазовых месторождениях. При таких авариях в атмосферу выбрасывается громадное количество двуокси углерода, оксидов углерода, азота и серы. Борьба с такими пожарами требует привлечения огромных материально-технических ресурсов и может длиться неделями. Высота горящего факела большой мощности достигает 80–100 м, интенсивность тепловыделения в таком факеле составляет несколько миллионов киловатт.

Для тушения пожаров нефтегазовых факелов разработано много различных методов [1]: закачка воды в скважину; импульсная подача огнетушащего порошка специальными установками; водяные струями из лафетных стволов; взрыв заряда ВВ; бурение наклонной скважины и закачка в нее специального раствора; комбинированный способ и т.д. На Украине и в странах СНГ при тушении пожаров газовых факелов чаще всего применяются лафетные стволы (гидромониторы), автомобили газовойодяного тушения, пневматические порошковые пламеподаватели [2, 3]. Каждый из перечисленных способов тушения обладает своими преимуществами и недостатками. Однако, в настоящее время не разработано универсального эффективного способа тушения газовых факелов.

Одним из наиболее распространенных способов тушения газовых факелов является 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 скоростях 80-100 м/с.

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

1. Внутренняя баллистика порохового импульсного водомета. Схема порохового ИВ, при помощи которого проводились экспериментальные исследования, изображена на рис. 1 [4, 5]. Ствол 4 порохового ИВ, который заканчивается коническим соплом 6 с колли-

матором 7, заполнен водой 3. Пороховой заряд 2 отделен от водяного заряда 3 пыжом 8. Для упрочнения самый напряженный участок ствола укреплен бандажом 5, который посажен на ствол с заданным натягом. Пороховой заряд 2 в корпусе водомета зафиксирован затвором 9, внутри которого находится воспламенитель 1. В начальный момент срабатывает воспламенитель 1 и поджигает пороховой заряд 2. Пороховые газы, образующиеся при горении пороха, начинают выталкивать водяной 3 заряд через коническое сопло 6 в виде импульсной струи жидкости. Истечение струи жидкости начинается с небольшой скоростью, которая быстро возрастает по мере увеличения давления пороховых газов.

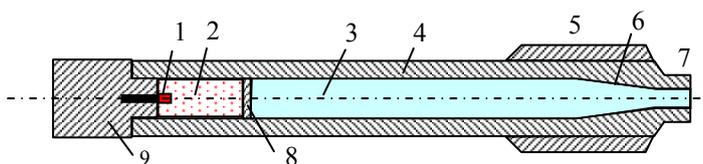


Рис. 1.

Для построения математической модели выстрела порохового ИВ делаются следующие допущения. Жидкость считается идеальной и сжимаемой, вязкостью, теплопроводностью и влиянием пыжа можно пренебречь. Профиль сопла предполагается плавным, и радиальные компоненты потока не учитываются. За начало процесса принят момент воспламенения пороха. Начало координат совпадает с входом в сопло.

В принятой постановке квазиодномерное течение идеальной сжимаемой жидкости в водомете описывается системой уравнений нестационарной газовой динамики в следующей форме

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

где t - время; x - координата; v - скорость; $F(x)$ - площадь поперечного сечения проточной части - ствола и сопла; p и ρ - давление и плотность; $B = 304,5$ МПа, $n = 7,15$, $\rho_0 = 10^3$ кг/м³ - постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта.

Начальные и граничные условия имеют вид

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

где L и L_s - длина ствола и сопла с коллиматором; x_g - координата контактной поверхности; p_g и v_g - давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

Горение пороха рассматривается в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии.

2. Анализ результатов расчетов. Поставленная задача решалась численно. Движение жидкости в импульсном водомете рассчитывалось методами Годунова и Родионова, а горение пороха – модифицированным методом Эйлера [6]. Ниже приведены некоторые результаты расчетов для порохового ИВ 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 ИВ от времени для порохового заряда массой 30 г (штатный режим работы ИВ). Кривая 1 – скорость истечения, 2 – давление пороховых газов, 3 – давление воды в стволе ИВ.

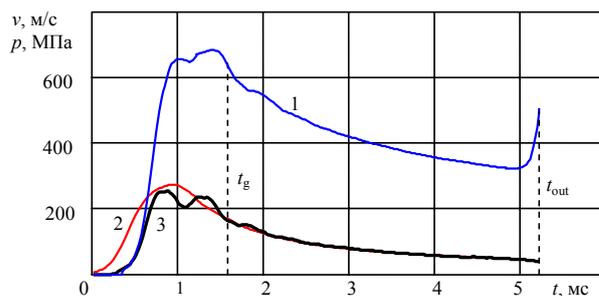


Рис. 2.

Как видно, истечение струи порохового

ИВ начинается с нулевой скорости. По мере сгорания пороха скорость истечения быстро возрастает и достигает максимального значения 685 м/с через 1,5 мс с начала выстрела. После сгорания пороха скорость истечения медленно уменьшается до 320 м/с. Истечение струи заканчивается к моменту времени $t_{out} = 5,2$ мс выбросом малой порции воды пороховыми газами с более высокой скоростью.

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

Таблица 1. Расчетная скорость струи порохового ИВ для разной массы пороха

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

Специфический характер зависимости скорости истечения струи ИВ от времени (быстрое увеличение в начале истечения от нуля до максимума, а в дальнейшем уменьшение практически до нуля), определяет закономерности распространения импульсной струи. В начале истечения более быстрые частицы вытекающей из сопла ИВ жидкости пробиваются через более медленные, вытекшие ранее. В результате в струе возникает радиальное течение, которое приводит к увеличению поперечного сечения струи [7, 8]. Радиальное течение вызывает утолщение струи и образование вокруг нее ореола брызг, который движется со скоростью, незначительно меньше скорости ядра струи. В дальнейшем скорость головы струи уменьшается из-за торможения воздухом и струя распадается, прекращая свое существование.

В экспериментах скорость головы струи ИВ измерялась бесконтактным лазерным измерителем скорости на разных расстояниях от установки. Измеренные значения скорости хорошо согласуются с расчетными данными.

3. Эксперименты по тушению модельного газового факела при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости.

На рис. 3 приведена схема проведения эксперимента по тушению газового факела и экспериментальная установка при полевых испытаниях на полигоне. Здесь 1 – пороховой ИВ, 2 – импульсная струя жидкости, 3 – газовый факел, 4 – измеритель скорости, 5 – блок лазеров, 6 – лучи лазеров.

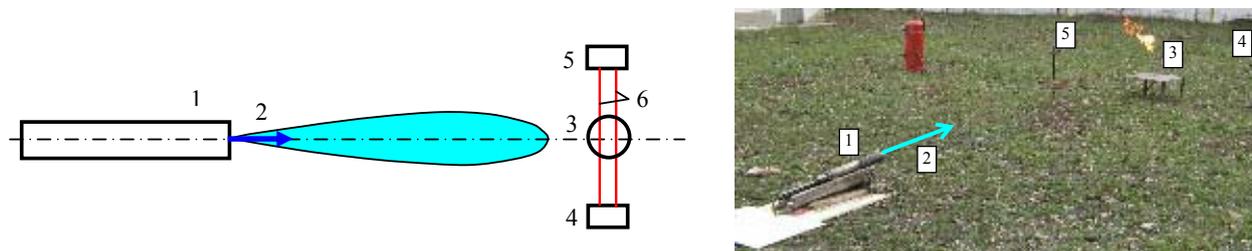


Рис. 3.

В экспериментах варьировалось расстояние от ИВ до факела и величина порохового заряда, от которого зависит скорость импульсной струи жидкости. Расстояние от установки до факела измерялось рулеткой, а прицеливание осуществлялось при помощи специального лазерного прицела, который закреплялся на стволе импульсного водомета.

На рис. 4 приведены фрагменты видеосъемки процесса тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости. Здесь 1 – импульсная струя жидкости, 2 – газовый факел, 3 – модули измерителя скорости.

На рис. *a*), *b*) и *c*) представлены начальная, средняя и конечная стадии тушения газового факела, а на рис. *d*) – размеры факела. На заднем плане фотографий видна полоса из темного материала с делениями. Расстояние между большими метками равно 1 метру, а между маленькими – 0,5 м. Расстояние от установки до факела 10 м. На фотографиях так же видны модули измерителя скорости 3, установленные на расстоянии два метра друг от друга.

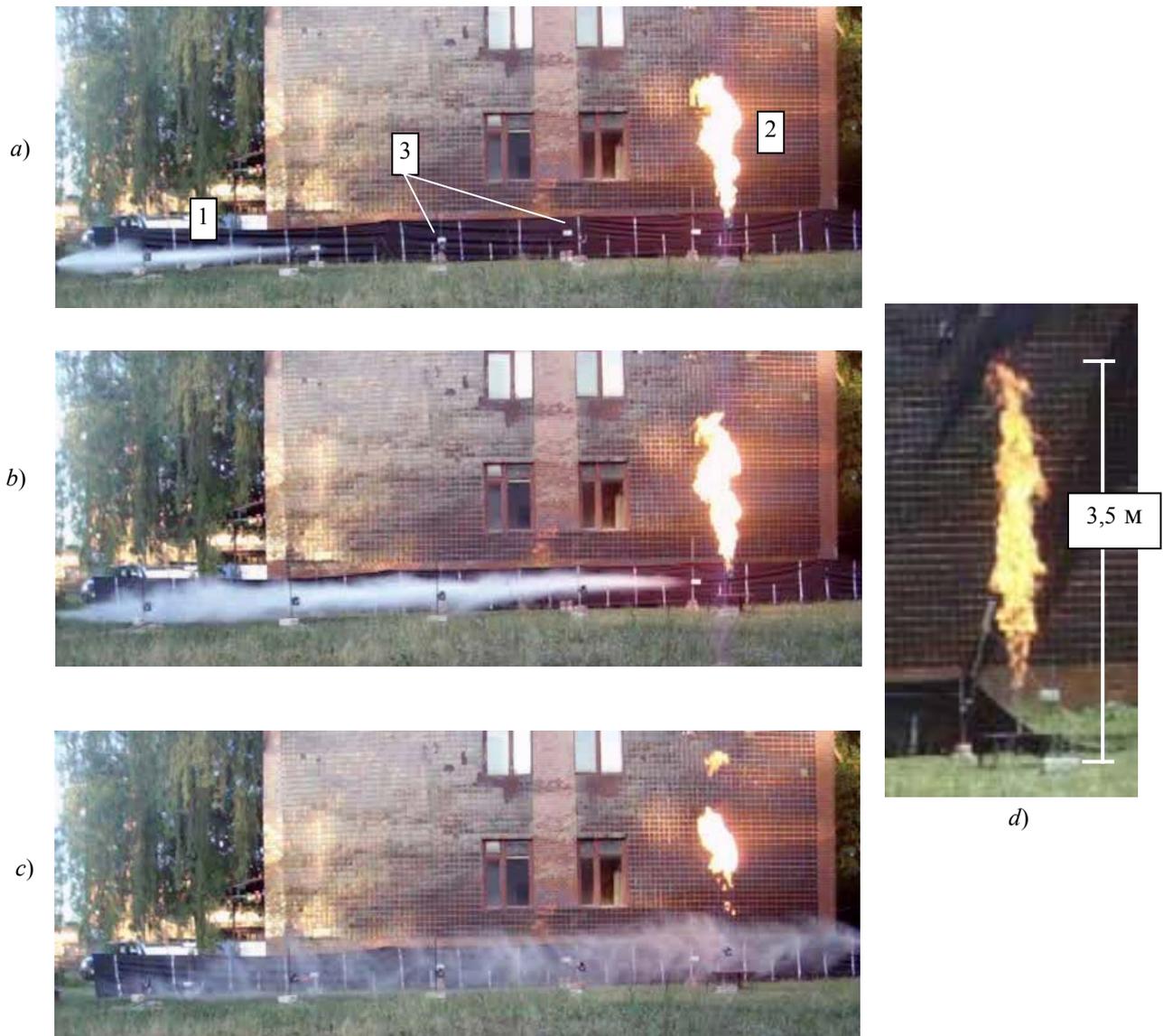


Рис.4.

На первой фотографии *a*) струя пролетела 3,5 м. Форма струи на этот момент соответствует средней фазе распространения. Хорошо видна головная часть струи и пелена брызг в задней части, поперечное сечение которых во много раз превышает диаметр струи.

На второй фотографии *b*) струя пролетела около 9 м. Хорошо видна головная часть струи, которая находится на расстоянии около метра от факела. Вся струя окружена пеленой брызг, поперечные размеры которых в отдельных местах достигают 0,5 м. Головная часть струи имеет заостренную форму и интенсивно размывается воздухом.

На третьей фотографии *c*) струя отсекает факел от скважины и прекращает подачу горючей смеси, что приводит к тушению факела. Верхняя часть факела еще догорает, а нижняя часть сорвана импульсной струей жидкости. Скорость импульсной струи жидкости значи-

тельно превышает скорость поступления газа из скважины в зону горения факела, что способствует срыву пламени и прекращению горения факела.

Проведенные эксперименты показали, что импульсная струя жидкости порохового ИВ может тушить горящий газовый факел модели скважины на расстоянии 10 м и более. На расстоянии около 20 м от струи останется только облако брызг, которое не в состоянии погасить факел. Дальность действия установки существенно зависит от режима ее работы и конструкции. Изменяя конструкцию и режим работы, можно увеличить дальность установки до 50 м и более.

Выводы. Проведены экспериментальные исследования тушения модельного газового факела при помощи импульсных струй жидкости высокой скорости, которые генерируются пороховым импульсным водометом. В экспериментах варьировалась величина порохового заряда и расстояние от установки до факела. При помощи лазерного бесконтактного измерителя скорости измерялась скорость головы струи непосредственно перед факелом, проводилось фотографирование струи. Максимальная расчетная скорость импульсной струи в зависимости от энергии заряда составляла 300 - 600 м/с, что хорошо согласуется с измеренными значениями. Показано, что в процессе распространения импульсная струя жидкости высокой скорости «обдирается» воздухом и вокруг нее образуется высокоскоростное облако брызг большого поперечного сечения, которое эффективно сбивает пламя газового факела на расстояниях порядка 5 – 20 м от установки.

Проведенные экспериментальные 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов С.А. Анализ способов ликвидации пожаров нефтегазовых фонтанов / Виноградов С.А., Грицына И.Н. // Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників, 20-21 вересня 2011 р. – Київ, 2011. – С. 202-205.
2. Боевой устав противопожарной службы (утвержден приказом Председателя Комитета по государственному контролю и надзору в области чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан от 27.12.05 г. № 373)
3. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание / В.П. Михеев - Л.: Недра, Ленингр. отделение, 1966. – 327 с.
4. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / Александр Ниоклаевич Семко - Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.
5. Семко А.Н. Внутренняя баллистика порохового водомета и гидропушки / Александр Ниоклаевич Семко // Теорет. и прикл. механика. – Харьков: Основа, - 2002. - Вып. 35. – С. 181 - 185.
6. Решетняк В. В. Применение метода Родионова для расчета квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости / Решетняк В. В., Семко А.Н. // Прикладная гидромеханика. - 2009. - Т. 9 (81). № 3. - С. 56 –64.
7. Черменский Г.П. Избыточное давление в импульсной струе жидкости / Г.П. Черменский // ПМТФ, 1970. - № 1. – С. 174 – 176.
8. Dunne B. Velocity discontinuity instability of liquid jet / Dunne B., Cassen B. // J. Applied Phys., Vpl. 27, No 6, June 1956. – P. 577 – 582.