

*А. Н. СЕМКО*, д-р техн. наук, проф., ДонНУ, Донецк;  
*М. В. БЕСКРОВНАЯ*, канд. техн. наук, с.н.с., ДонНУ, Донецк;  
*Ю. Д. УКРАИНСКИЙ*, канд. техн. наук, с.н.с., ДонНУ, Донецк;  
*С. А. ВИНОГРАДОВ*, препод., НУГЗУ, Харьков;  
*И. Н. ГРИЦЫНА*, канд. техн. наук, доцент, НУГЗУ, Харьков

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ**

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.

**Ключевые слова:** газовый факел, импульсная струя, пороховой водомёт, внутренняя баллистика.

**Введение.** Пожары газовых факелов являются одними из наиболее сложных видов промышленных аварий на нефтегазовых месторождениях. При таких авариях в атмосферу выбрасывается громадное количество двуокиси 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 струи из лафетных стволов; взрыв заряда взрывчатого вещества; бурение наклонной скважины и закачка в нее специального раствора; комбинированный способ, и так далее. На Украине и в странах СНГ при тушении пожаров газовых факелов чаще всего применяются лафетные стволы (гидромониторы), автомобили газовой воды тушения, пневматические порошковые пламеподавители [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 от-

рывное 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.

**Внутренняя баллистика порохового импульсного водомета.** Схема порохового импульсивного водомета, при помощи которого проводились экспериментальные исследования, изображена на рис. 1 [4, 5]. Ствол 4 порохового ИВ, который заканчивается коническим соплом 6 с коллиматором 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 заряд 3 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.

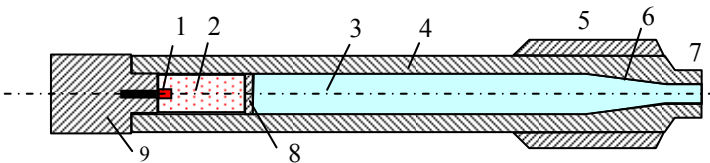


Рис. 1 – Схема порохового импульсного водомета.

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. В качестве начала 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

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

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

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$v(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0, \quad -L \leq x \leq L_s;$$

$$p(t, L) = 0, \quad p(t, x_g) = p_g, \quad v(t, x_g) = v_g, \quad (2)$$

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.

**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 такими параметрами: масса водяного заряда 450 г, диаметр сопла и струи 15 мм.

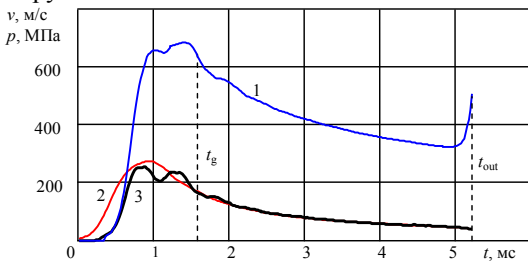


Рис. 2 – графики зависимости скорости истечения струи и давления внутри ИВ.

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.

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, имеющими более высокую скорость.

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 меньшей 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. Метод измерения описывается в следующем пункте. Измеренные значения скорости хорошо согласуются с расчетными данными.

**Измерение скорости головы импульсной струи жидкости.** Для измерения скорости головы импульсной струи жидкости использовался бесконтактный лазерный измеритель скорости. Его выбор обусловлен высокой точностью, простотой конструкции и мобильностью, что позволяет проводить измерения в полевых условиях.

Идея метода состоит в том, что используются две оптические пары (лазер – фотодиод), которые расположены на некотором расстоянии и образуют один модуль измерителя скорости. Лучи лазеров модуля параллельны. Блоки излучателя и приемника модуля могут располагаться на произвольном расстоянии. При выстреле импульсная струя пересекает по очереди лучи лазеров модуля, которые генерируют сигналы. Контроллер по заданной программе пересчитывает эти сигналы в скорость струи. Модули питаются от автономных источников питания и могут работать в полевых условиях при отсутствии прямого солнечного освещения.

На базе отдельных модулей измерителя скорости разработана и изготовлена многоканальная система измерения скорости головы импульсной струи жидкости. Использование многоканальной системы измерения скорости позволяет за один выстрел ИВ проследить динамику изменения скорости импульсной струи жидкости при ее распространении в воздухе. Для этого датчики располагаются на заданном расстоянии друг от друга, например, через 1 метр, что позволяет проследить изменение скорости головы струи на расстоянии 4 – 5 метров. Применение многоканальной системы измерения скорости позволяет существенно сократить количество экспериментов для получения необходимого объема информации для статистической обработки результатов измерений.

Были проведены полевые испытания измерителя скорости, схема которых приведена на рис. 3. В эксперименте использовалось 5 измерительных модулей. Первый модуль располагался на расстоянии 1 м от сопла ИВ. Остальные модули располагались на расстоянии 1 м друг от друга. Расстояние от ИВ до мишени равнялось 6 м. Мишенью была стальная плита толщиной 20 мм, которая упиралась в резиновый амортизатор. Масса водяного заряда составляла 450 г, а масса порохового заряда – 12 г.

В табл. 2 приведены показания модулей измерителя скорости, а на рис. 4 изображен график зависимости скорости головы струи от расстояния до

установки. Видно, что показания 2 – 5 модулей близки и заметно отличаются от показаний 1-го модуля, который находился ближе всех к ИВ на расстоянии 1 м от установки. Эти различия в показаниях модулей связаны исключительно с особенностями истечения импульсной струи жидкости из ИВ. Струя ИВ начинает истекать практически с нулевой скорости, которая быстро возрастает, достигает максимума, а затем относительно медленно уменьшается. Поэтому 1-й модуль регистрирует скорость головы струи в начале истечения, которая далека от максимума и возрастает в процессе истечения. Скорость головы струи достигает максимальных значений при подлете ко второму модулю, расстояние до которого 2 м. В дальнейшем скорость головы струи незначительно уменьшается из-за торможения воздуха. Результаты измерения скорости головы струи на стационарном участ-

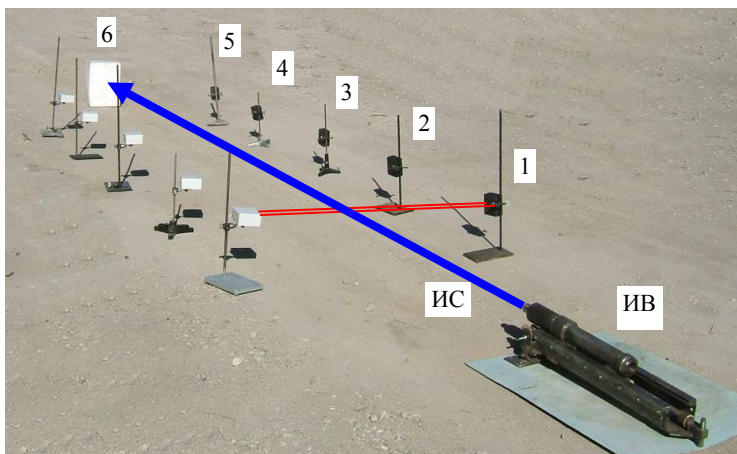


Рис. 3 – Измерение скорости головы импульсной струи жидкости.  
 ИВ – импульсный водомет, ИС – импульсная струя,  
 1 – 5 модули измерителя скорости, 6 – мишень.

ке хорошо согласуются между собой. Максимальная расчетная скорость истечения струи для порохового ИВ в заданном режиме составляет 330 м/с.

Таблица 2 – Результаты измерения скорости головы импульсной струи жидкости

№ модуля	1	2	3	4	5
расстояние до ИВ, м	1	2	3	4	5
скорость, м/с	125	366	371	366	349

На рис. 5 и 6 приведены фотографии тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости на разных стадиях процесса. Испытания проводились на полигоне НИИГД «Респиратор». Здесь 1 – пороховой ИВ, 2 и 3 – голова и тело импульсной струи жидкости, 4 – газовый факел, 5 – модули измерителя скорости головы струи. Расстояние от ИВ до факела составляло 10 м. Масса пороха 10 г, масса водяного заряда 450 г.

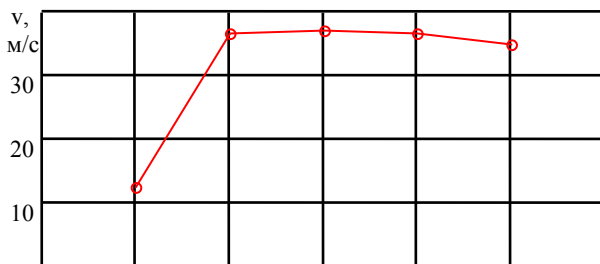


Рис. 4 – График зависимости скорости головы струи от расстояния до импульсного водомета.

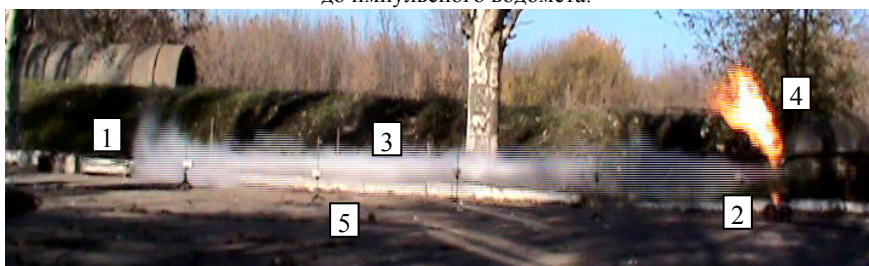


Рис. 5 – Фотография тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости. Струя достигла факела.

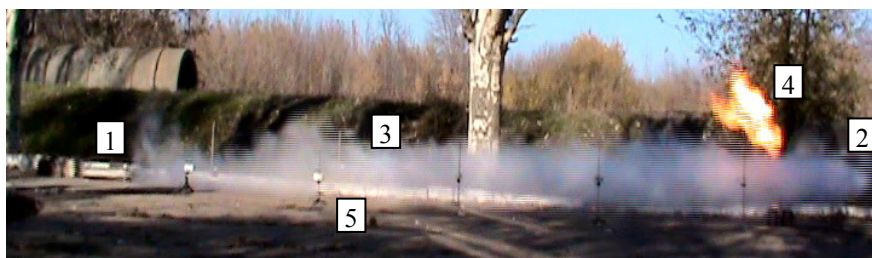


Рис. 6 – Фотография тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости. Струя отсекала факел от горелки.

На рис. 5 изображена стадия тушения факела, когда голова импульсной струи жидкости попадает в основание факела, куда производилось прицеливание при помощи лазерного прицела, который закреплялся на корпусе ИВ при настройке системы измерения. При распространении в воздухе импульсная струя жидкости, которая при истечении из сопла ИВ имеет диаметр 15 мм и скорость около 400 м/с, сильно взаимодействует с окружающей атмосферой 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.

На рис. 6 видно, что головная часть струи и окружающий ее ореол брызг отсекают факел от горелки, прекращая доступ горючей смеси в очаг горения. Средняя часть струи, представляющая собой остатки ядра струи и окружающую 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 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. отд-ние, 1966. – 327 с. 4. *Семко А.Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления / А. Н. Семко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 5. *Семко А.Н.* Внутренняя баллистика порохового водомета и гидропушки / А. Н. Семко // Теорет. и прикл. механика. – Харьков: Основа, - 2002. - Вып. 35. – С. 181 - 185. 6. *Решетняк В.В.* Примененные метода Родионова для расчета квазидномерных 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.

*Поступила в редколлегию 07.02.2013*