

УДК 614.844.2.: 303.833.72.:53.082.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ СТВОЛА УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

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

*В статье проанализировано влияние диаметра выходного отверстия на режимы истечения жидкости из ствола СП-И УИП-1. Приведены результаты проведенных экспериментальных исследований режимов истечения и выполнен их анализ. Подтверждены теоретические предположения о «поршневом» режиме вытеснения жидкости из ствола, влиянии диаметра выходного отверстия на режимы истечения жидкости из ствола и работоспособность разработанной математической модели.*

Вода на настоящий момент является самым распространенным огнетушащим средством. Известно, что до 90 % всех пожаров ликвидируется именно водой, и это наиболее простой, экологически чистый и дешевый способ [1,2]. В настоящее время все большее применение находит метод тушения огня тонкораспыленными водяными струями [2], для получения которых используются стационарные, мобильные, переносные системы и установки, работающие в непрерывном или импульсном режиме подачи воды.

По статистическим данным за 1999—2006 гг., более 80 % всех пожаров в Республике Беларусь произошло в жилых зданиях (рисунок 1), причем половина из них в городах. В среднем по стране площадь одного пожара не превышает 25 м<sup>2</sup> (на городские жилые дома приходится около 70 % таких пожаров) [3]. Ежегодно в Республике Беларусь на пожарах гибнет более 1100 человек (в том числе более 50 детей) и получают травмы более 400 человек (в том числе более 30 детей) [4]. Значительные материальные и людские потери при данных пожарах во многом связаны с недостаточной оперативностью применения традиционных средств пожаротушения. Для повышения оперативности применения огнетушащих средств в настоящее время широко используются переносные установки пожаротушения (рисунок 2). За рубежом данные установки широко представлены разработками фирмы «IFEX», в нашей стране — установками импульсного пожаротушения УИП-1 и ранцевыми установками пожаротушения РУПТ-1-0,4 «Игла».

Для оптимизации гидродинамических и конструкционных параметров установок УИП-1 разработана математическая модель, базирующаяся на уравнении Бернулли для нестационарного движения жидкости, и выведена зависимость кинетической энергии струи в стволе от положения границы раздела жидкость — газ внутри ствола [5]:

$$w_i = x^m \left( \int_x^{x_0} \frac{P_1 \cdot dx}{(1-x)^n \cdot x^{m+1}} - \int_x^{x_0} \frac{P_E \cdot dx}{x^{m+1}} \right), \quad (1)$$

где  $x$  — переменная, зависящая от произведения координаты границы раздела сред и соотношения длины газового и водяного столба в стволе в начальный момент времени;

$m$  — величина, зависящая от отношения внутреннего диаметра водяной камеры ствола к диаметру отверстия истечения;

$n$  — показатель политропы вытесняющего жидкость газа;

$P_1$  — давление, зависящее от начального давления и вида газа в воздушной камере ствола, внутреннего диаметра водяной камеры ствола, диаметра отверстия истечения и соотношения длины газового и водяного столба в стволе в начальный момент времени;

$P_E$  — давление среды, в которую происходит истечение жидкости.

### Динамика изменения количества пожаров в Республике Беларусь

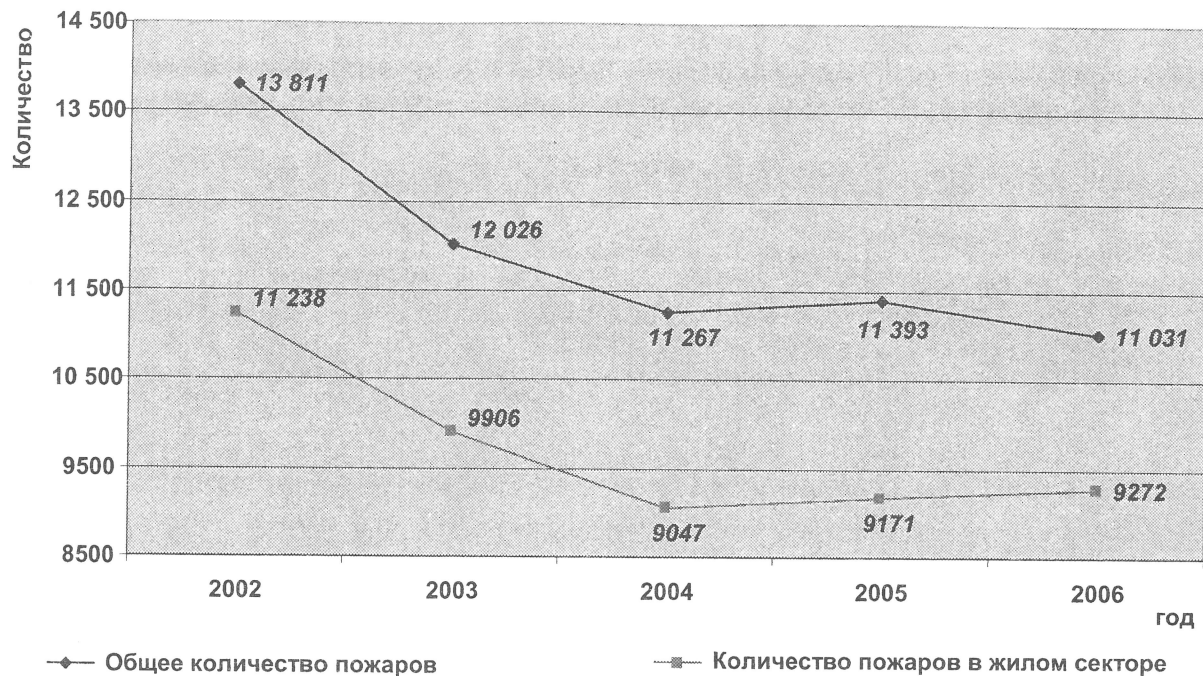


Рисунок 1 — Динамика изменения количества пожаров в Республике Беларусь

Результаты решения для различных значений параметра  $m$  при прочих равных условиях приведены на рисунке 3.

Через переменную  $w_i$  и  $P_1$  можно перейти к скорости истечения на срезе ствола:

$$v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot P_1 \cdot w_i \cdot d_p^2}{\rho \cdot d_H^2}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность вытесняемой жидкости;

$d_p, d_H$  — соответственно диаметр водяной камеры и отверстия истечения.

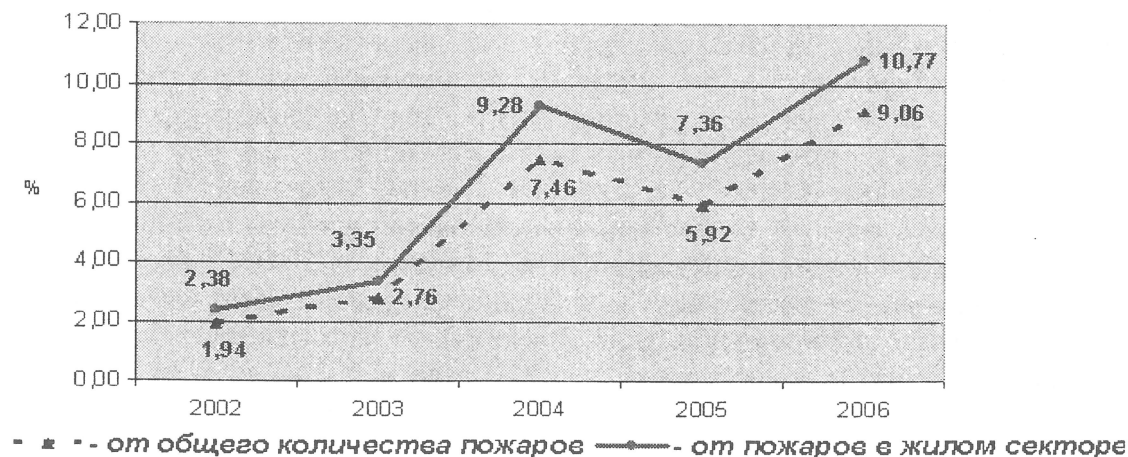
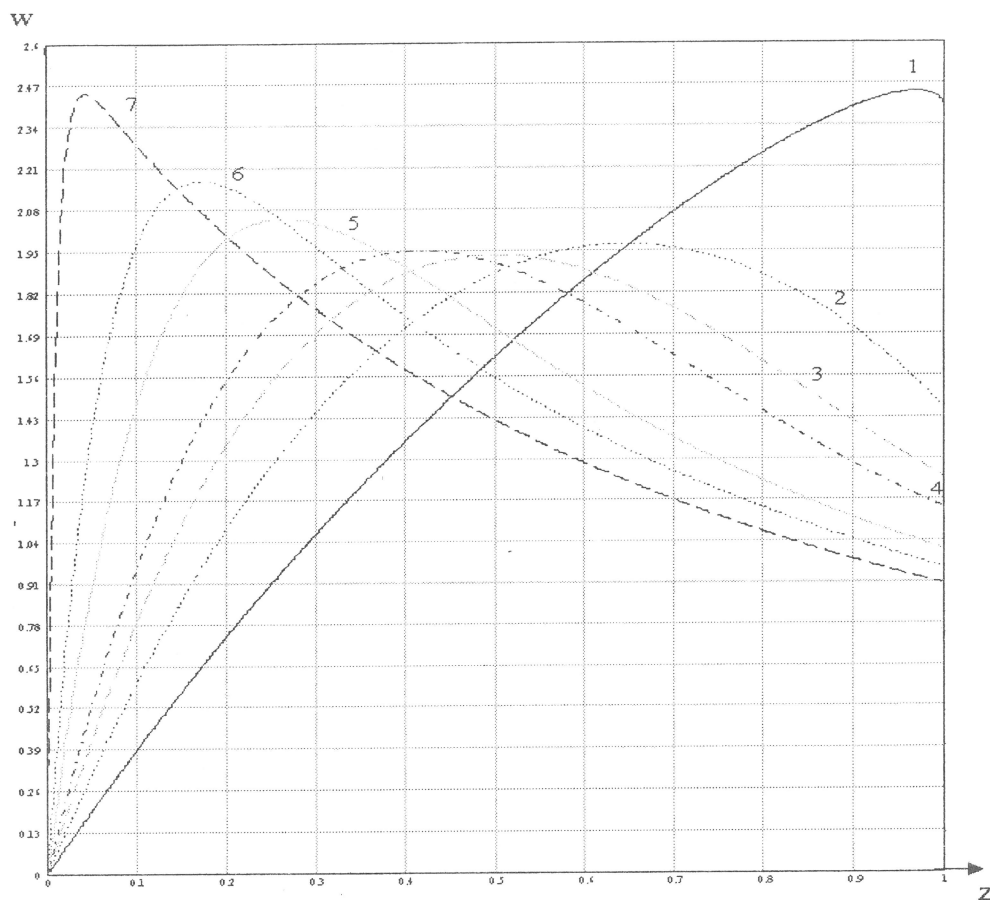


Рисунок 2 — Процентное отношение количества пожаров, потушенных с применением УИП-1



$$1 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,889 \right); 2 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,786 \right); 3 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,726 \right); 4 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,683 \right); 5 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,584 \right); 6 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,503 \right); 7 - \left( \frac{d_H}{d_p} = 0,316 \right)$$

**Рисунок 3 — Зависимость кинетической энергии струи в резервуаре от координаты  $z$**

При разработке математической модели использовались следующие допущения: перепад давления, связанный с силой тяжести при возможном отклонении продольной оси ствола от горизонтали, не учитывался, процесс расширения газа в воздушной камере политропный, длина насадка, через который происходит истечение, стремится к нулю, вода обладает свойствами идеальной жидкости (распределение скоростей на границе раздела и в струе однородно), граница раздела в течение всего процесса истечения остается плоской («поршневое» вытеснение).

В отличие от разработанной модели при проектировании установки УИП-1 [6] и систем защиты самолетов установками импульсного пожаротушения в США [7] процесс истечения жидкости из ствола рассматривался без учета инерционного запаздывания жидкости.

Для экспериментального подтверждения модели были изготовлены шайбы с калиброванными отверстиями (рисунок 4) диаметром 19,1; 20,2; 24,0; 30,0; 32,2; 33,3; 34,0; 34,7; 35,5; 36,4; 37,4; 38,5; 39,9; 41,6; 43,7; 46,5; 50,4; 56,9; 62,5 мм, что соответствует параметру  $k$  [5], равному соответственно 125; 100; 50; 20; 15; 13; 12; 11; 10; 9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2; 1; 0,5. Наибольшее значение в ряду диаметров выбиралось из условия равенства диаметра отверстия истечения внутреннему диаметру водяной камеры, а минимальное — из соблюдения условий безопасности оператора. Шайбы выполнялись толщиной, равной толщине распылителя, внутренняя поверхность полировалась с целью уменьшения трения.

Шайбы устанавливались вместо резинового распылителя на срезе ствола СП-И УИП-1 и закрывались быстроразрушаемой мембраной. При такой установке распыливание жидкости происходит за счет разности скорости истечения и плотностей жидкости и воздуха (среды, в которую происходит истечение) [8, 9], и характеристики распыла зависят от величины и характера изменения давления истечения во времени. В этом случае по форме и длине струи можно судить о том, зависит ли режим истечения жидкости от диаметра отверстия истечения.

С целью уменьшения влияния внешних факторов на характеристики формы распыла, выстрелы производились в закрытом помещении.

Обработка записей выстрелов из установки УИП-1 показала, что при диаметре отверстия истечения, равном внутреннему диаметру водяной камеры ствола, распыленная струя имеет наименьшую длину и наибольшее поперечное сечение. При уменьшении диаметра происходит формирование компактной части струи (рисунок 5, б-г). При этом площадь поперечного сечения струи уменьшается, а дальность ее подачи увеличивается. Принимая во внимание то, что основным фактором, влияющим на гидравлическое распыливание жидкости в данном случае, является скоростной напор, можно сделать вывод о том, что с уменьшением диаметра отверстия истечения в стволе СП-И УИП-1 изменяется режим истечения.

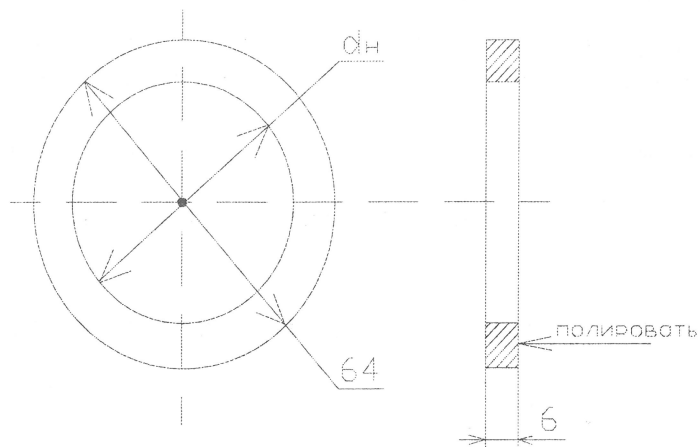
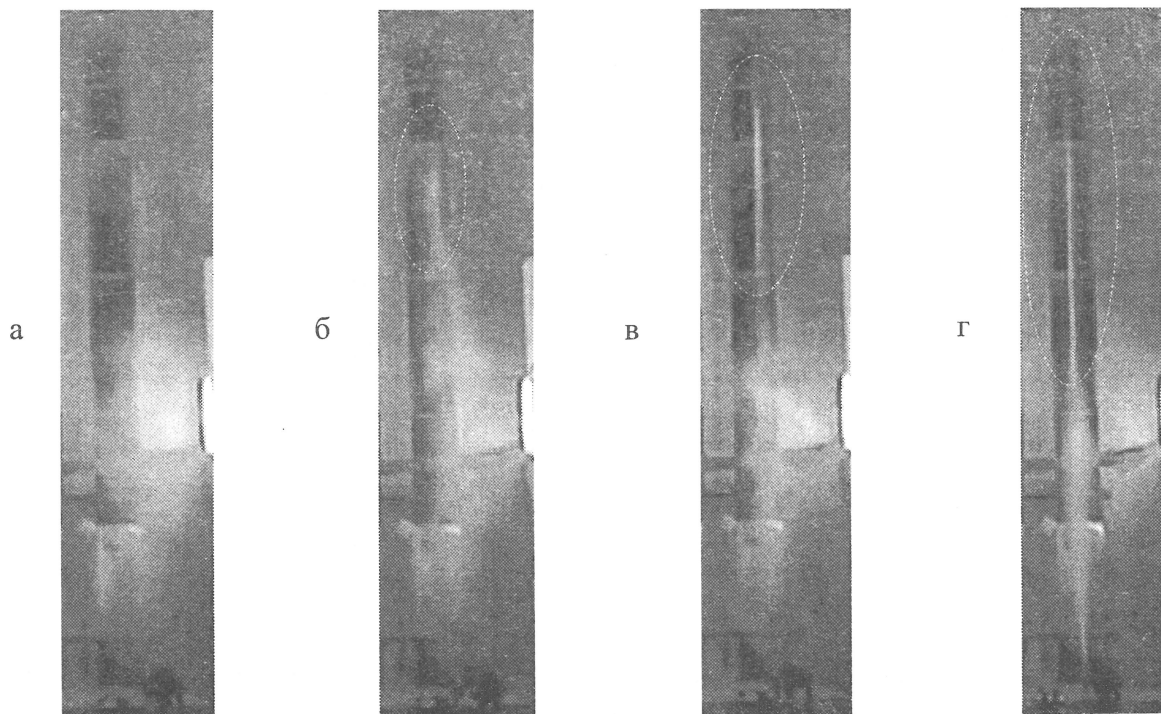


Рисунок 4 — Шайба с калиброванным отверстием



а —  $d_H = 56,9$  мм; б —  $d_H = 46,5$  мм; в —  $d_H = 32,2$  мм; г —  $d_H = 19,1$  мм

Рисунок 5 — Форма струи жидкости, истекающей из ствола СП-И УИП-1 при различных диаметрах отверстия истечения  $d_H$

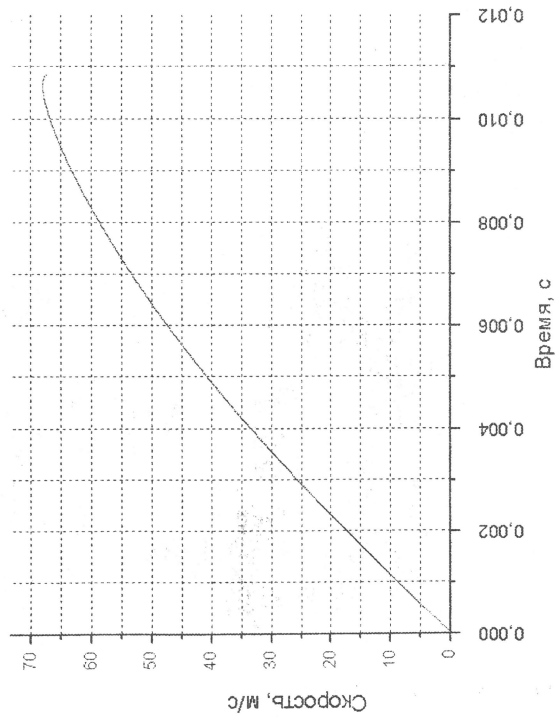
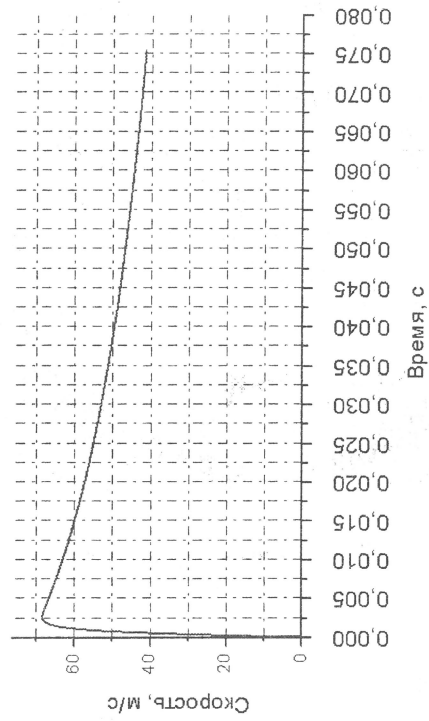
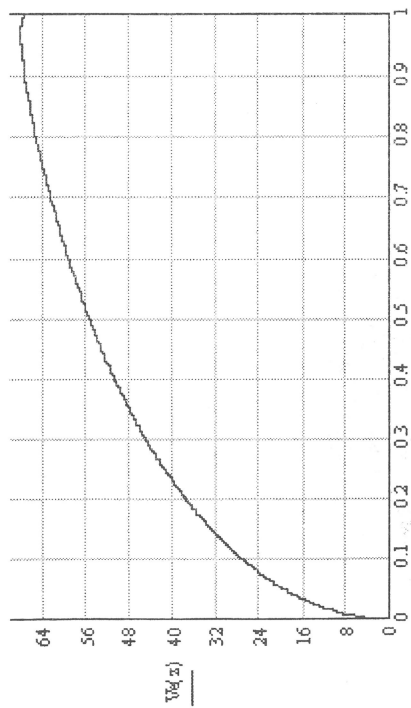
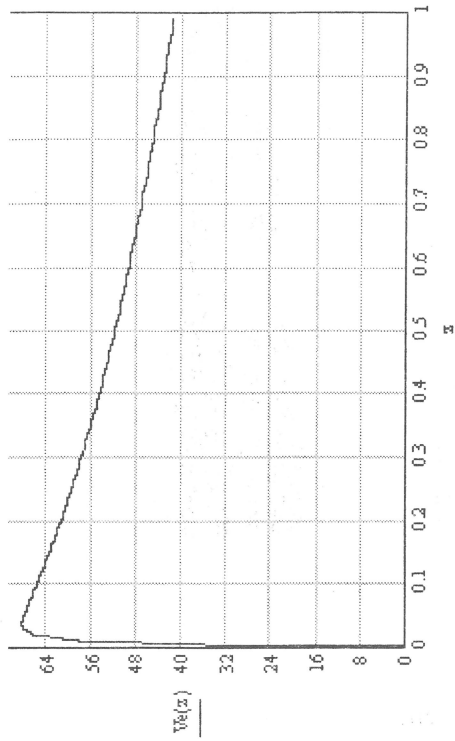
Следует отметить, что в разработанной модели получена зависимость скорости истечения от положения границы раздела сред жидкость — газ  $v_i = f(z)$ . Так как аппаратно можно контролировать зависимость скорости (давления) от времени, для сопоставления теоретических расчетов с экспериментальными данными была получена зависимость  $v_E = f(\tau)$ . Для этого график  $v_i = f(z)$  разбивался на элементарные участки  $dz$  и определялись скорости  $v_i$  для начала и конца участка  $dz$ . Приняв, что в пределах элементарного участка  $dz$  скорость  $v_i$  стремится к постоянной величине, средняя скорость на участке  $dz$  вычислялась как полу-сумма конечных значений. Выполнив данную операцию по всей длине графика и объединив полученные участки  $dv_i = f(dt)$ , получим зависимость  $v_i = f(t)$ . Из уравнения неразрывности имеем  $dv_e = f(dt) = \frac{dv_i \cdot d_P^2}{d_H^2}$ . Результаты расчета для  $l_{ж} = 0,348$  м, для  $dz = 0,0001$  приведены в таблице 1, пример пересчета приведен на рисунке 6.

Таблица 1 — Зависимость времени истечения от диаметра отверстия истечения  $d_H$ 

$k$	$d_H$ , мм	Время истечения, с
0,5	62,5	0,010023242
1	56,9	0,010851420
2	50,4	0,012531485
3	46,5	0,014116497
4	43,7	0,015583159
5	41,6	0,016943625
6	39,9	0,018213778
7	38,5	0,019407589
15	32,2	0,027190025
20	30	0,031097652
50	24	0,048324130
100	20,2	0,067836610
125	19,1	0,075247951

Для изучения параметров быстропротекающих процессов наибольшее распространение нашли пьезоэлектрические датчики [10]. Для экспериментальных исследований использовался пьезоэлектрический преобразователь (рисунок 7), который крепился к стволу с помощью специального приспособления (рисунок 8).

Как правило, калибровка пьезопреобразователей производится с помощью баллистического маятника [10] или с использованием воздушных камер избыточного давления [11].



б)  $d_H = 19,1 \text{ мм}$

а)  $d_H = 56,9 \text{ мм}$

Рисунок 6 — Сопоставительные графики изменения скорости на выходе ствола СП-И УИП-1

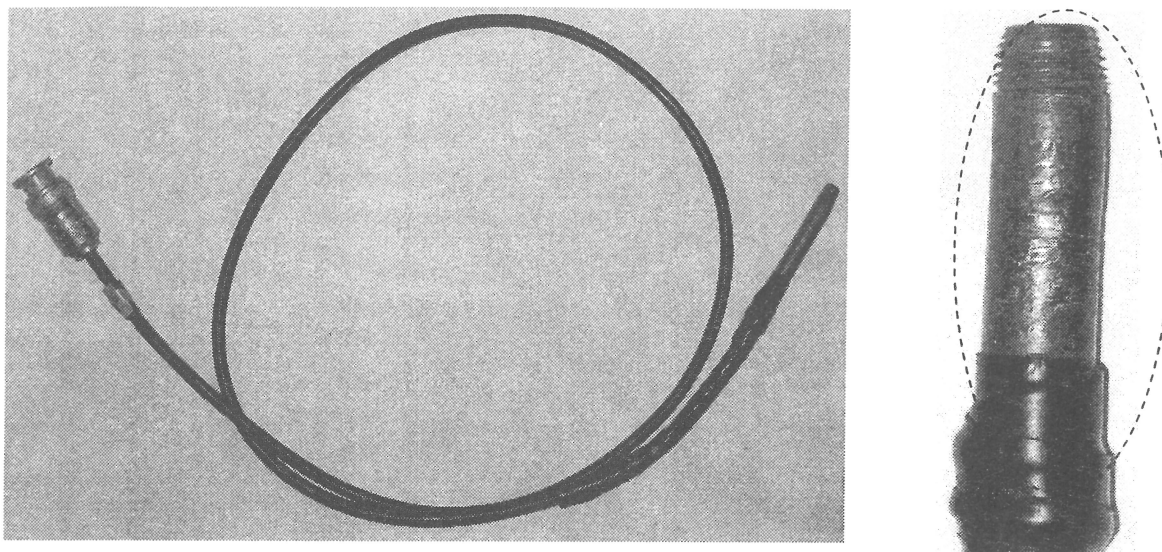


Рисунок 7 — Пьезоэлектрический преобразователь давления

Использование указанных способов калибровки в данном случае нецелесообразно ввиду их относительно большой погрешности и небольших разностей между максимальными давлениями в процессе истечения жидкости из ствола СП-И УИП-1 при разных диаметрах отверстия истечения. В связи с тем, что качественно интерпретировать регистрируемое с помощью имеющегося пьезоэлектрического преобразователя напряжение представляется затруднительным, в качестве измеряемого параметра выбрано время истечения жидкости из ствола.

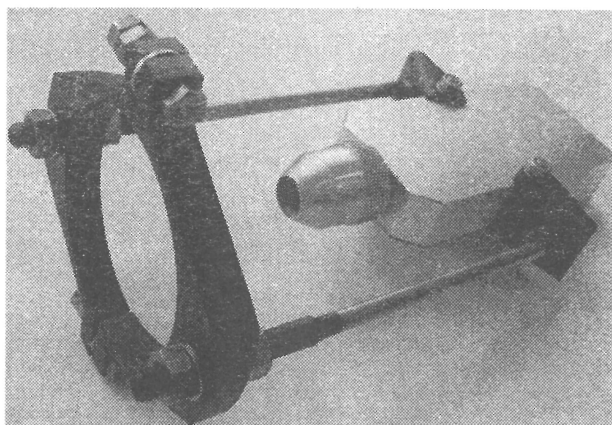
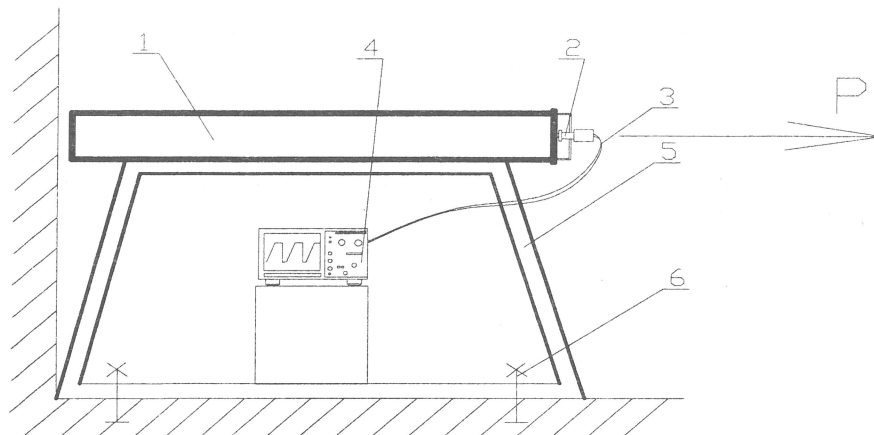


Рисунок 8 — Устройство крепления пьезоэлектрического преобразователя давления к стволу СП-И

Для регистрации сигнала от пьезоэлектрического преобразователя использовался цифровой запоминающий осциллограф С8-40. Принципиальная схема испытательного стенда приведена на рисунке 9.



1 — ствол СП-И УИП-1; 2 — устройство крепления пьезоэлектрического преобразователя давления; 3 — линия связи; 4 — цифровой запоминающий осциллограф С 8-40; 5 — рама для крепления ствола; 6 — анкерные болты для неподвижного крепления рамы

Рисунок 9 — Принципиальная схема испытательного стенда ствола СП-И УИП-1

Экспериментальное определение контролируемых параметров производилось при следующих настройках осциллографа: масштаб по времени — 5,0 мс/деление; масштаб по напряжению — 5,0 В/деление; синхронизация — 0 В; частота дискретизации — 20 000 выборок/с; длина окна записи — 0,819 с.

Для каждой шайбы с калиброванным отверстием проводилась серия испытаний из 5 выстрелов. Осциллограммы обрабатывались посредством программного обеспечения, входящего в комплект поставки цифрового запоминающего осциллографа, и сводились на одну координатную сетку (рисунок 10).

Как видно, на осциллограмме присутствует два всплеска давления: первый — изменение давления в момент начала истечения жидкости из ствола, второй — изменение давления в конце истечения жидкости при ударе воздушной струи, что подтверждает принятое допущение о «поршневом» вытеснении жидкости.

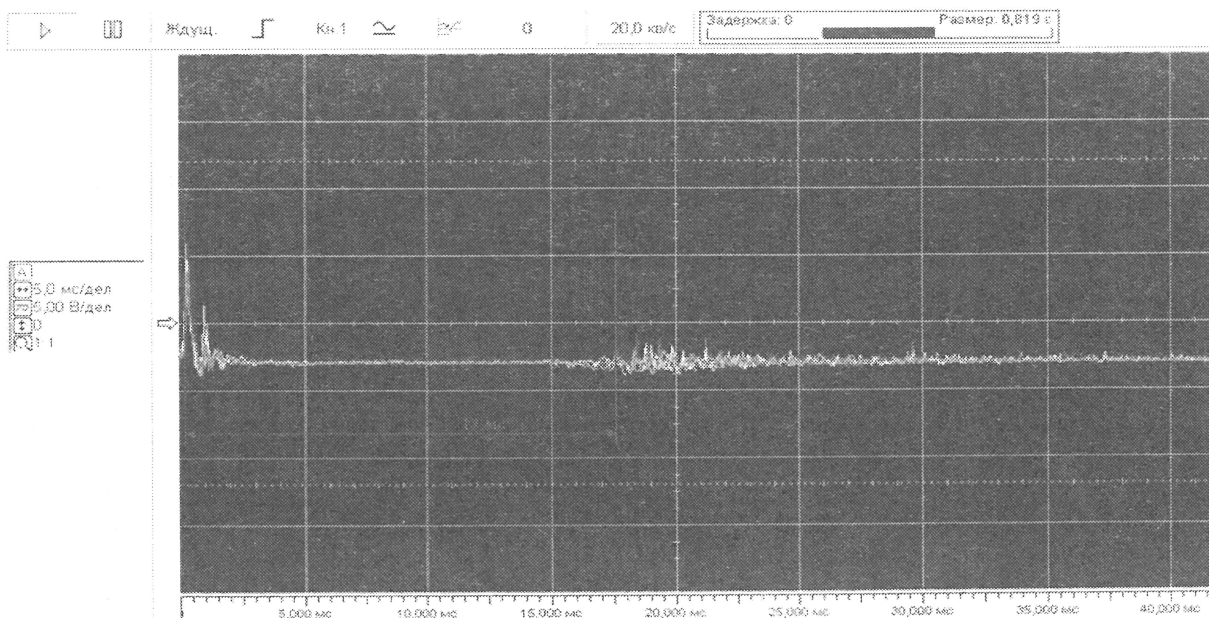


Рисунок 10 — Пример сводной осциллограммы изменения давления при выстреле из ствола СП-И УИП-1 ( $d_H = 41,6$  мм)



При обработке результатов за время истечения принималось время от момента начала роста давления до начала устойчивых (отличных от шумового фона) колебаний второго всплеска. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Зависимость времени истечения и максимального давления при различных диаметрах отверстия истечения  $d_H$

$k$	$d_H$	Время истечения, с	
		теория	опыт
0,5	62,5	0,010023242	0,010
1	56,9	0,010851420	0,011
2	50,4	0,012531485	0,012
3	46,5	0,014116497	0,013
4	43,7	0,015583159	0,014
5	41,6	0,016943625	0,017
6	39,9	0,018213778	0,017
7	38,5	0,019407589	0,018
15	32,2	0,027190025	0,026
20	30	0,031097652	0,030
50	24	0,048324130	0,046
100	20,2	0,067836610	0,063
125	19,1	0,075247951	0,072

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что в установках импульсного пожаротушения с применением в качестве рабочего тела сжатых газов, хранящихся в баллоне, диаметр выходного отверстия существенным образом влияет на режим истечения жидкости и, как следствие этого, на характеристики распыла и огнетушащую эффективность подаваемых водяных струй. Параметры истечения жидкости из ствола, определенные с помощью разработанной математической модели [5], отличаются по модулю от определенных в ходе проведения экспериментальных исследований не более чем на 10 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корольченко, А.Я. Технология импульсного водяного пожаротушения IFEX 3000 / А.Я. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. — 2001. — № 2. — С. 3—5.
2. Дауэнгауэр, С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С.А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. — 2004. — № 6. — С. 78—81.
3. Анализ боевой работы подразделений МЧС за 2002—2006 годы.
4. Статистические сведения МЧС за 2002—2006 гг.
5. Иваницкий, А.Г. Математическая модель движения жидкости в стволе установки импульсного пожаротушения / А.Г. Иваницкий, А.С. Дмитриченко // Сб. науч. тр. / Акад. гражд. защиты Украины. — Харьков, 2005. — Вып. 18: Проблемы пожарной безопасности. — С. 38—44.
6. Разработать теорию, устройство и технологию импульсной подачи воды в зону горения: отчет о НИР (заключ.) / РНПЦ ПБ ГУВПС МВД Респ. Беларусь; рук. темы Н.А. Тычина. — Минск, 1997. — 316 с. — № ГР 1997760.
7. Grosshandler, W.L. Evaluation of Alternative In-Flight Fire Suppressants for Full-Scale Testing in Simulated Aircraft Engine Nacelles and Dry Bays. Section 3 NIST SP 861/ W.L. Grosshandler, R.G. Gann, W.M. Pitts; Editor(s) National Institute of Standards and Technology, W.L. Grosshandler. — MD., 1994. — P. 37—343.
8. Пажи, Д.Г. Распылители жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. — М.: Химия, 1979. — 216 с.

9. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам / Чохонелидзе А.Н. [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 608 с.
10. Воронель, Е.С. Измерение импульсного давления на мишенях при образовании светозрительного факела / Е.С. Воронель [и др.] // Сибирский физико-технический журнал. — 1991. — № 2 — С. 75—79.
11. Разработать методику и испытательную установку по определению избыточного давления вскрытия заполнений проемов вертикальных строительных конструкций: отчет о НИР (заключ.) / НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси; рук. темы А. М. Усов. — Минск, 2007. — 86 с. — № ГР 200667.

*Поступила в редакцию 22 мая 2007 г.*