

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТВОЛОВ УСТАНОВОК ИМПУЛЬСНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Иваницкий А.Г.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: A.Ivanitski@gmail.com

Представлены обзор состояния проблемы использования приборов подачи огнетушащего вещества, а также результаты исследования гидродинамических характеристик стволов установок импульсного пожаротушения. Обсуждены результаты исследования движения жидкости в проточном тракте ствола СП-И УИП-1 и капель распыленной струи в воздухе, полученные на основе математического моделирования и экспериментов. Представлены методика определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротушения, ее программная реализация, а также экспериментальная проверка.

An overview of the problem of the use of extinguishing agent devices, and the results of the study the hydrodynamic characteristics of trunks of the fire extinguishing pulse installation are presented. Results of the study of fluid motion in the TFE-P trunk FPI-1 flow path and moving drops of spray jet in the air, derived from mathematical modeling and experimental study are discussed. A method for determining the hydrodynamic characteristics of liquid discharge from the trunks of fire extinguishing pulse installation, its software implementation, and experimental verification are also presented.

(Поступила в редакцию 15 июня 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

По статистическим данным более 80 % всех пожаров в Республике Беларусь происходит в жилых зданиях, из них 70 % – в городах, причем в среднем по стране площадь одного пожара не превышает 25 м². При тушении таких пожаров, как правило, используется вода, подаваемая чаще всего в виде компактных струй. Пожаротушение компактными струями требует привлечения значительного количества сил и средств и наносит дополнительный материальный ущерб от пролитой воды. Поэтому в настоящее время все большее внимание уделяется повышению эффективности тушения за счет применения распыленной воды и составов на ее основе. Анализ статистических данных о боевой работе аварийно-спасательных подразделений показал, что до 40 % пожаров, происходящих в жилом секторе, тушится с применением переносных установок (РУПТ «Игла 1-0,4», «IFEX-3000» и «УИП-1»). В некоторых случаях установки импульсного пожаротушения УИП-1 используются недостаточно эффективно. В отдельных отчетных материалах имеются сведения о том, что при тушении установками УИП-1 наблюдается повторное загорание после ликвидации пожара. Установки в некоторых случаях не могут ликвидировать очаги пожаров классов А и В относительно небольшой площади, что требует последующей проливки с помощью ручных пожарных стволов. Это происходит по причине неизученности процессов истечения и механизмов формирования распыленных водяных струй при импульсной подаче, оценить которые невозможно без исследования гидродинамических характеристик стволов УИП.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существовавшие подходы к описанию параметров работы стволов УИП имеют ряд недостатков. Анализ работ [1, 2] показал, что в них приведены зависимости, не учитывающие инерционные потери давления при движении жидкости в проточном тракте ствола. До настоящего момента не было представленных зависимостей, описывающих изменение скорости истечения жидкости из стволов УИП с учетом инерционного напора. Отсут-

ствие таких зависимостей не позволяло проводить работы по исследованию быстродействия и интенсивности подачи огнетушащих веществ УИП и оценивать эффективность их использования ([3], п. 3.2, 3.8). Быстродействие работы УИП характеризуется общим временем истечения, а интенсивность подачи – геометрией формируемой распыленной струи и скоростью истечения основной части огнетушащего вещества. Для адекватного определения параметров работы ствола УИП-1 необходимо разработать математическую модель процесса истечения жидкости из ствола на основании решения уравнения Бернулли для неустановившегося движения жидкости. Основное назначение этой модели – описание характера изменения во времени скорости истечения жидкости в зависимости от параметров ствола УИП.

В результате решения уравнения Бернулли для неустановившегося движения жидкости с учетом инерционных потерь давления при истечении жидкости из геометрической модели типового ствола УИП получена зависимость скорости истечения жидкости на срезе ствола:

$$v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot x^{(m-1)} \cdot m \cdot P_1 \cdot \int_x^{x_0} \frac{dx}{(1-x)^n \cdot x^m} \cdot \frac{P_E \cdot \left(1 + l_{Ж}/l_{Г} \cdot \left(1 + \frac{(d_p^2 \cdot l_H)}{(d_H^2 \cdot l_{Ж})} \right) \right)^n}{P_0} \cdot \int_x^{x_0} \frac{dx}{x^m}}{P_{Ж}}}, \quad (1)$$

где $x = \left(1 + \frac{d_p^2 \cdot l_H}{d_H^2 \cdot l_{Ж}} - \frac{\hat{z}}{l_{Ж}} \right) \cdot \frac{l_{Ж}/l_{Г}}{1 + l_{Ж}/l_{Г} \cdot \left(1 + \frac{(d_p^2 \cdot l_H)}{(d_H^2 \cdot l_{Ж})} \right)}$;

$$P_1 = \frac{P_0}{1 + l_{Ж}/l_{Г}}; \quad m = \frac{d_p^4}{d_H^4};$$

$l_{Ж}$ – длина водяной камеры ствола;

$l_{Г}$ – длина воздушной камеры ствола;

n – показатель адиабаты рабочего газа;

P_E – давление окружающей среды;

P_0 – начальное давление в воздушной камере ствола;

d_H – диаметр насадка ствола;

d_p – внутренний диаметр водяной камеры ствола;

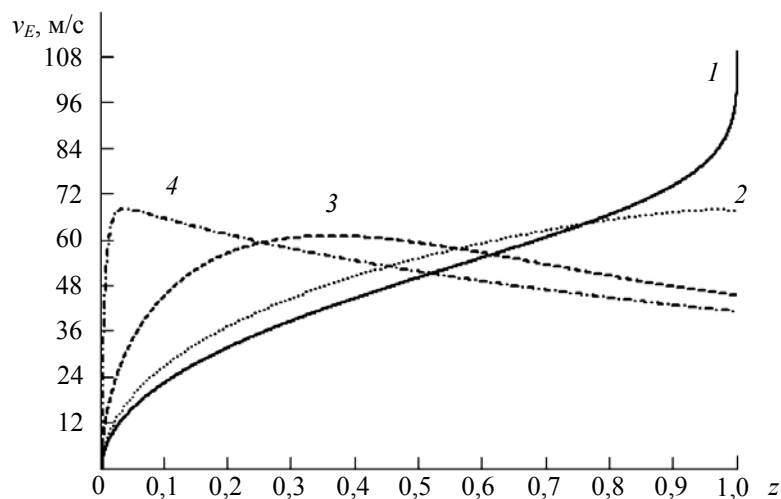
l_H – длина насадка ствола;

\hat{z} – координата границы раздела сред.

Уравнение (1) решалось численным методом с учетом неразрывности потока истекающей несжимаемой жидкости при условии, что длина выходного насадка стремится к нулю. Результаты решения представлены на рис. 1.

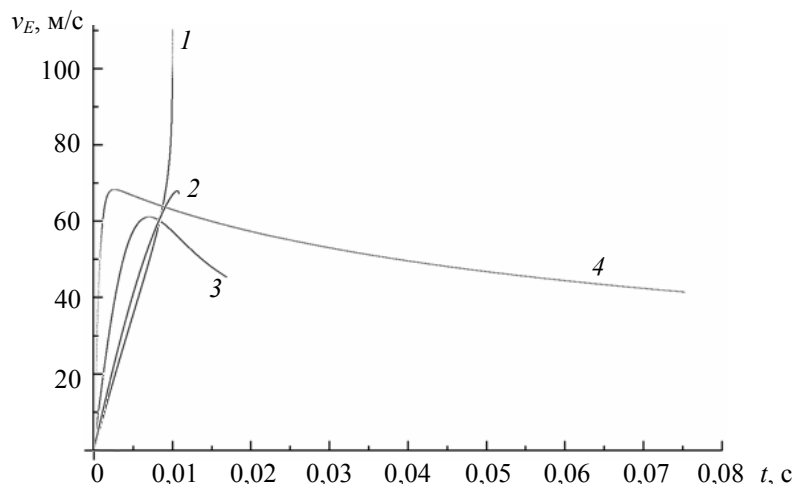
Для обеспечения возможности определения времени полного истечения уравнение (1) преобразовано графоаналитическим методом в зависимость скорости истечения от времени. Указанный метод позволяет преодолеть трудности, возникающие при интегрировании неполных бета-функций Эйлера. Результаты преобразования приведены на рис. 2. Нестационарное истечение соответствует режиму, когда граница раздела сред при вытеснении основной части жидкости перемещается при постоянном ускорении. Квазистационарное истечение наблюдается при перемещении границы раздела при малых ускорениях. Анализ решений (см. рис. 2) показал постоянное увеличение скорости истечения жидкости для $d_H = 62,5$

и 56,9 мм, что позволяет отнести эти режимы истечения к нестационарным. При уменьшении d_H происходит образование экстремума скорости (см. рис. 2, графики 3, 4) который смещается к начальному положению границы раздела сред при уменьшении d_H . Режим истечения из нестационарного начинает переходить в квазистационарный. Максимальное значение скорости истечения жидкости при $19,1 \text{ мм} \leq d_H \leq 50,4 \text{ мм}$ находится в диапазоне от 60 до 70 м/с. Последние точки приведенных на рисунке 2 графиков соответствуют времени полного истечения жидкости из ствола. Как видно, время истечения значительно зависит от диаметра отверстия истечения, который влияет на характер изменения во времени скорости движения жидкости в стволе.



Диаметры отверстий истечения:
 1 – $d_H = 62,5 \text{ мм}$; 2 – $d_H = 56,9 \text{ мм}$; 3 – $d_H = 41,6 \text{ мм}$; 4 – $d_H = 19,1 \text{ мм}$

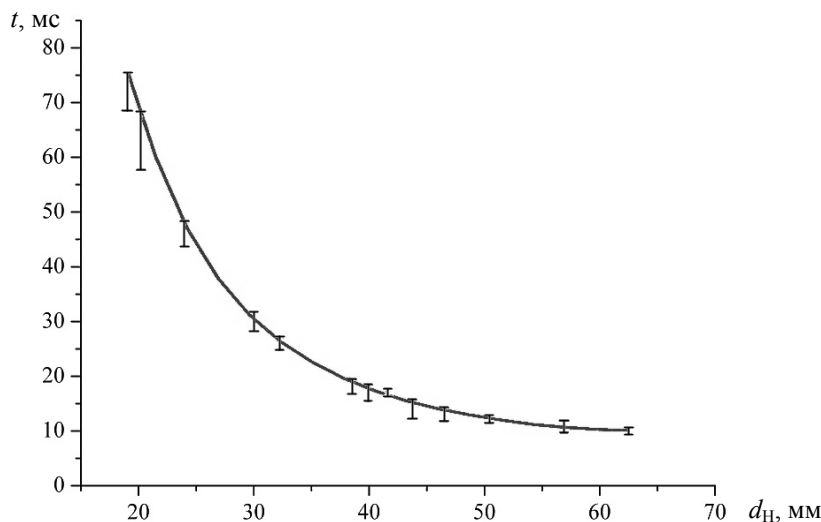
Рисунок 1 – Зависимость скорости истечения жидкости v_E из ствола СП-И от безразмерной координаты положения границы раздела сред z



Диаметры отверстий истечения:
 1 – $d_H = 62,5 \text{ мм}$; 2 – $d_H = 56,9 \text{ мм}$; 3 – $d_H = 41,6 \text{ мм}$; 4 – $d_H = 19,1 \text{ мм}$

Рисунок 2 – Зависимость скорости истечения жидкости v_E из ствола СП-И от времени t

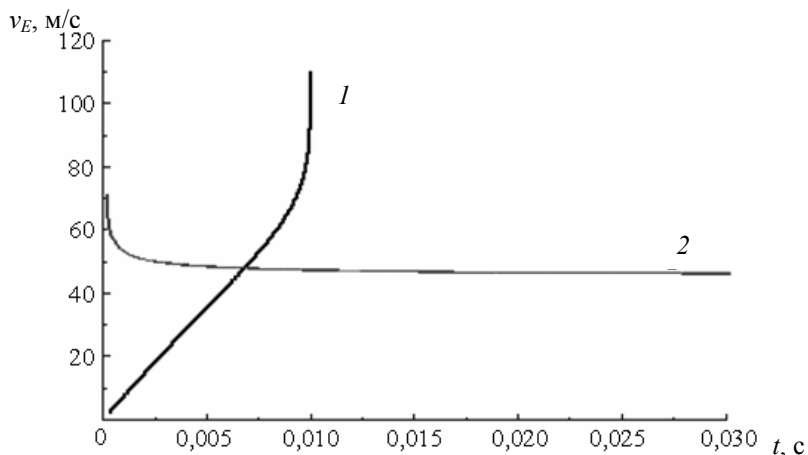
Для проверки полученных результатов моделирования были проведены экспериментальные измерения времени истечения основной части жидкости из ствола СП-И УИП-1; в качестве оборудования использовались дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь давления и цифровой запоминающий осциллограф С8-40. Результаты эксперимента подтвердили полученное при расчете критическое значение отношения диаметра отверстия истечения к внутреннему диаметру водяной камеры $d_H / d_P = 0,788$, разделяющее нестационарный и квазистационарный режимы истечения жидкости. Расчетные значения времени истечения отличаются от экспериментально определенных не более чем на 10 % (рис. 3).



I – границы доверительного интервала результатов измерений; — — — — — расчетное время истечения жидкости

Рисунок 3 – Результаты измерения времени истечения жидкости t из СП-И УИП-1

Таким образом, разработанная математическая модель истечения жидкости более точно описывает работу ствола УИП-1 (рис. 4), чем существовавшие до настоящего времени модели (погрешность последних превышает 100 %).



1 – разработанная математическая модель; 2 – существовавшая ранее математическая модель [2]

Рисунок 4 – Зависимость скорости истечения жидкости v_E из СП-И УИП-1 ($d_H = 62,5$ мм) от времени t

В процессе истечения, на выходе из ствола жидкость проходит резиновый распылитель, который может оказать влияние на параметры истечения и характеристики формируе-

мой распыленной струи. Для определения влияния жесткости лепестков резинового распылителя на процесс распыливания жидкости разработана модель деформации элементов распылителя с учетом возникновения значительных углов прогиба.

Принято, что давление жидкости одинаково по площади элемента. Для определения формы отверстия истечения установлена зависимость величины прогиба элемента распылителя от давления истекающей жидкости. С учетом симметричности формы распылителя изгиб одного элемента распылителя рассматривался как изгиб консольно заделанной балки (рис. 5).

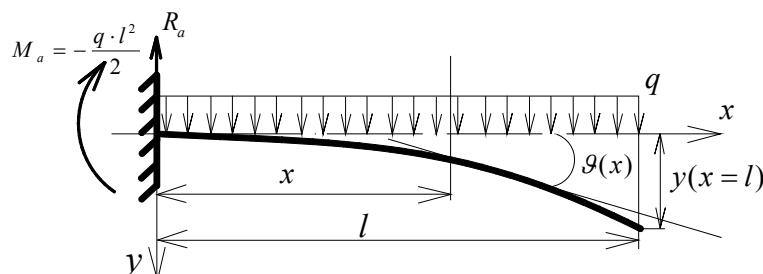


Рисунок 5 – К расчетной схеме изгиба элемента распылителя СП-И УИП-1

Зависимость между радиусом кривизны плоской кривой и координатами x и y ее точек имеет вид [4, с. 291–293]:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI(x)} \left(-\frac{ql^2}{2} + \frac{qx^2}{2} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1,5}. \quad (2)$$

Как правило, при решении задач строительной механики используется допущение о том, что деформации строительных конструкций вследствие большого значения модуля упругости, незначительны. По этой причине слагаемым $(dy/dx)^2$ в (2) обычно пренебрегают [4]. В нашем случае резиновая смесь обладает значительно меньшим модулем упругости, чем у строительных материалов, следовательно, возникает необходимость решения (2) без упрощений.

В результате интегрирования уравнения (2) с учетом геометрии элемента распылителя получена зависимость тангенса угла прогиба ϑ элемента распылителя от координаты x :

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{dy}{dx} = \frac{1}{\sqrt{4E^2 \operatorname{tg}^2 \chi h^6 / \left[9 \left(\frac{\rho_{\text{ж}} v_E^2 \pi d_H}{4} \right)^2 (x^2 + 2xl)^2 \right]} - 1}. \quad (3)$$

Определение перемещения точек, лежащих на оси симметрии поверхности элемента распылителя, по оси y производится интегрированием уравнения (3) с учетом следующих граничных условий: $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0$; $y(x=0) = 0$; $x \in 0..l$; $y \in 0..l$. Полученная зависимость (3)

позволяет определить положение элементов распылителя (форму отверстия истечения) в каждый момент времени при известном значении скоростного напора истекающего огнегасящего вещества. Модуль Юнга резиновых смесей для (3) определялся экспериментально методом, учитывающим взаимосвязь относительной линейной деформации, геометрических

параметров испытуемого образца и приложенной нагрузки при растяжении. Опытные образцы изготавливались из резиновых смесей той же группы, что и распылители для УИП-1: марки 7-4161, 7-НО-68, 7-В-14. Определяющим фактором при выборе марок являлась твердость по Шору А [5]. По результатам испытаний модуль Юнга составил: смесь 7-4161 – 2,29 МПа, смесь 7-НО-68 – 3,29 МПа; смесь 7-В-14 – 5,14 МПа. Экспериментально определенные значения модуля Юнга резиновых смесей позволили расчетным методом определить форму, размер и площадь d_3 отверстия истечения в любой момент времени при известной скорости движения жидкости (рис. 6).

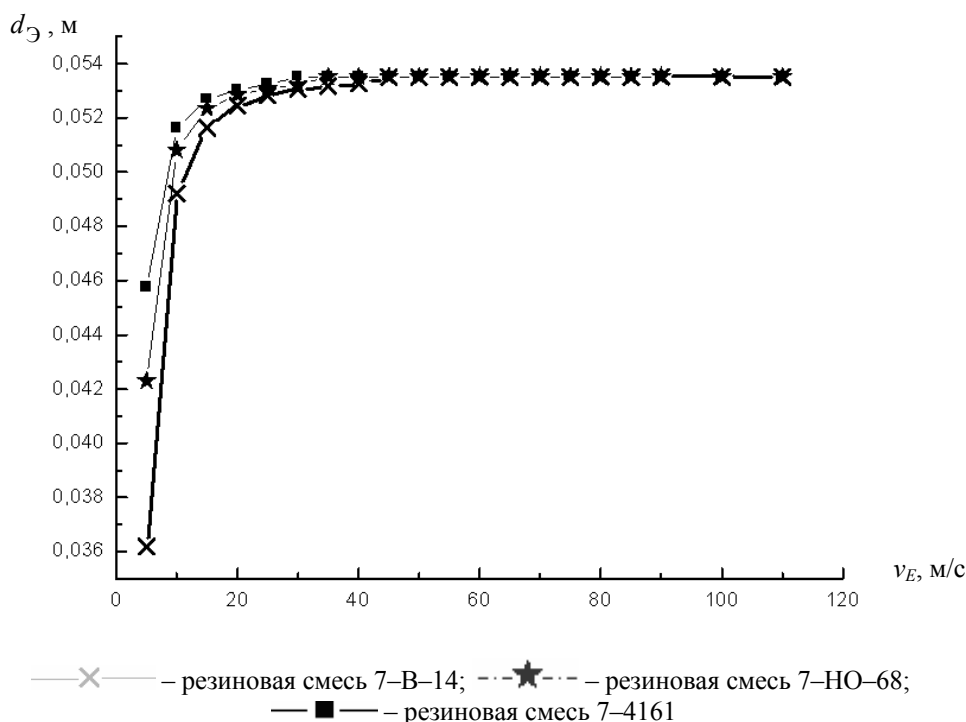
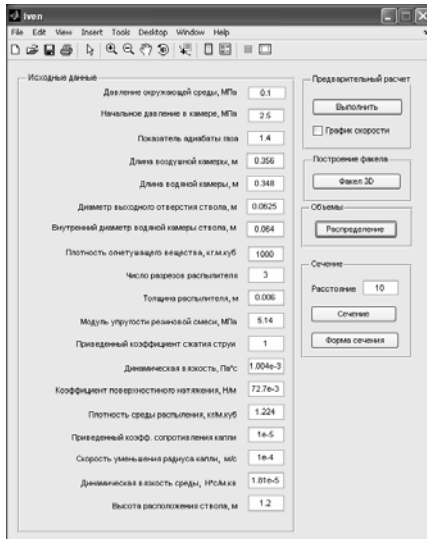


Рисунок 6 – Зависимость эквивалентного диаметра d_3 отверстия истечения при использовании распылителя от скорости истечения жидкости

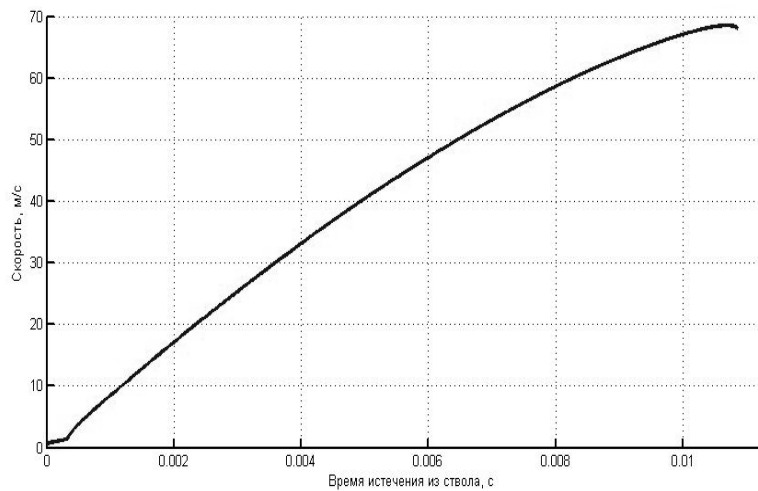
Как видно, площадь d_3 практически не зависит от материала резиновой смеси распылителя. Сопоставление расчетных данных с результатами обработки видеоизображения процесса выстрела из ствола подтверждает факт истечения основной части жидкости при полностью отогнутых лепестках распылителя. Таким образом, характеристики истечения и параметры струи преимущественно зависят от давления в воздушной камере ствола, соотношения длины воздушной и водяной камер, диаметра отверстия истечения и практически не зависят от марки III группы резиновой смеси распылителя.

С целью оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров ствола СП-И УИП-1 разработана методика определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротушения [6, 7]. Методика обобщает результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических характеристик ствола УИП-1, использующего для вытеснения жидкости сжатые газы, хранящиеся в баллоне. В основу методики положены гидродинамическая модель истечения, разработанная на основании решения уравнения Бернулли для нестационарного движения жидкости; модель деформации элементов резинового распылителя, устанавливаемого на выходе из ствола; имеющиеся в литературных источниках зависимости, описывающие распад струй и движение капель в воздухе [8, 9]. Методика позволяет определять оптимальное соотношение длины воздушной и водяной камер ствола, скорость и режим истечения жидкости из ствола, быстродействие ствола, распределение объемов жидкости, истекающей в различных

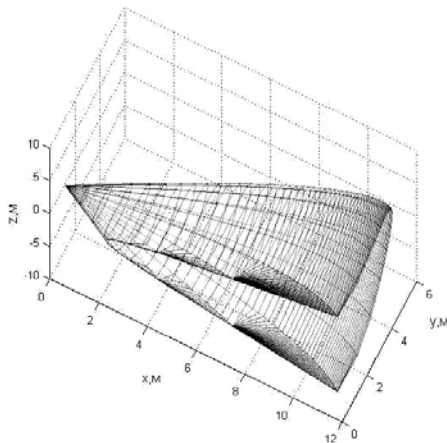
интервалах скоростей, дисперсный состав распыленной струи, ее геометрию, интенсивность подачи на заданном расстоянии от места установки ствола и оптимальную область использования установки импульсного пожаротушения. Для автоматизации, повышения точности и сокращения времени на проведение расчета гидродинамических характеристик ствола и формируемой распыленной струи на основании [6, 7] разработано программное средство расчета. Для программирования использовалась система автоматизации математических расчетов *MATLAB*. Внешний вид интерфейса программы для ввода исходных данных и примеры вывода результатов расчета приведены на рис. 7.



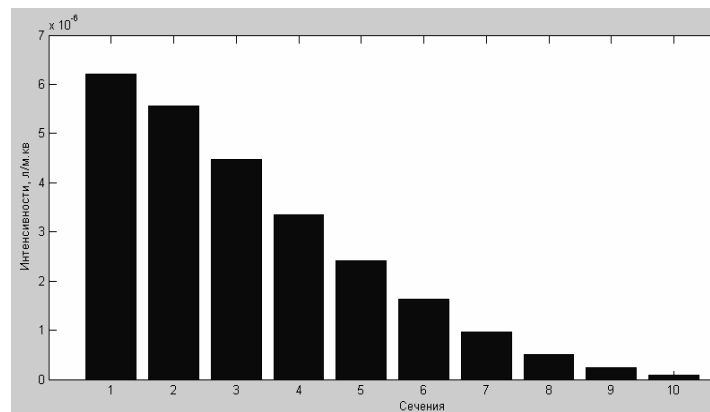
а



б



в



г

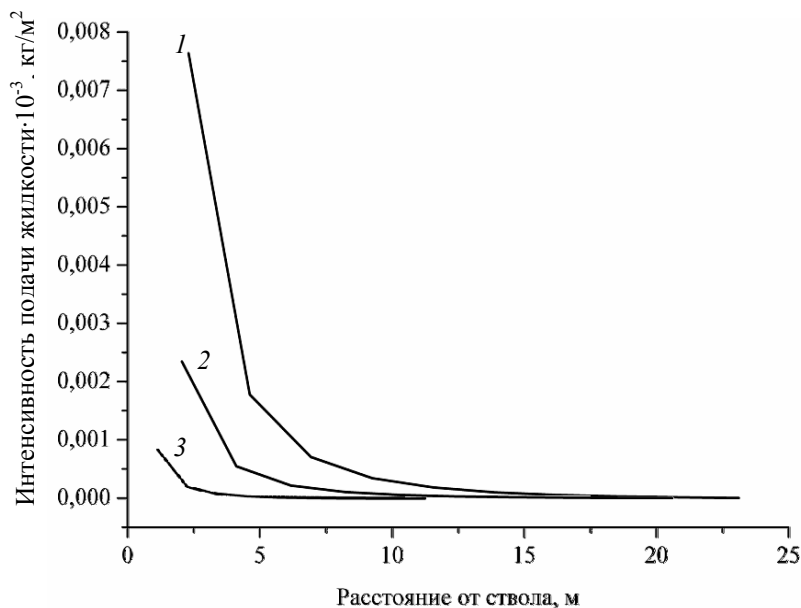
а – окно ввода исходных данных; б – расчетная зависимость скорости истечения от времени; в – форма факела распыла; г – распределение интенсивности подачи жидкости по длине факела

Рисунок 7 – Интерфейс программы и примеры вывода результатов

Результаты расчета, полученные с использованием программного средства, дают возможность определять интенсивность подачи огнетушащего вещества, площадь поперечного сечения струи на различном удалении от места установки ствола, дальность подачи огнетушащего вещества и среднюю дисперсность капель (рис. 8–11).

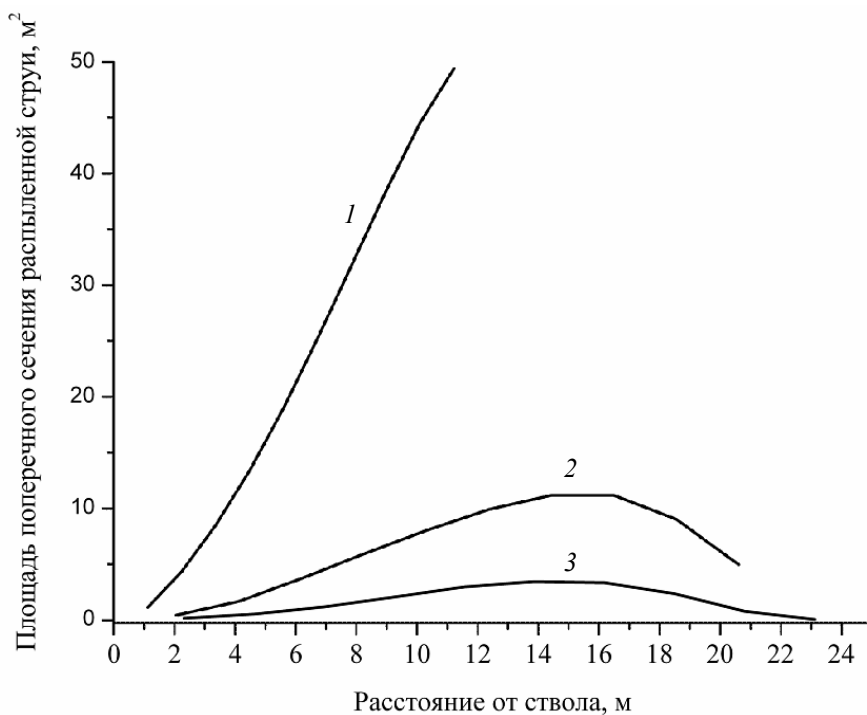
Для проверки соответствия результатов моделирования с использованием разработанной теории и эксплуатационных параметров СП-И УИП-1 проводилось экспериментальное определение среднего арифметического диаметра капель формируемой распыленной

струи огнетушащего вещества. Измерение диаметра капель производилось на базе НИИ ПБиЧС прямым методом с помощью стереоскопического микроскопа МБС-10 при искусственном освещении (лампа РН8-20-1) в отраженном свете [10].



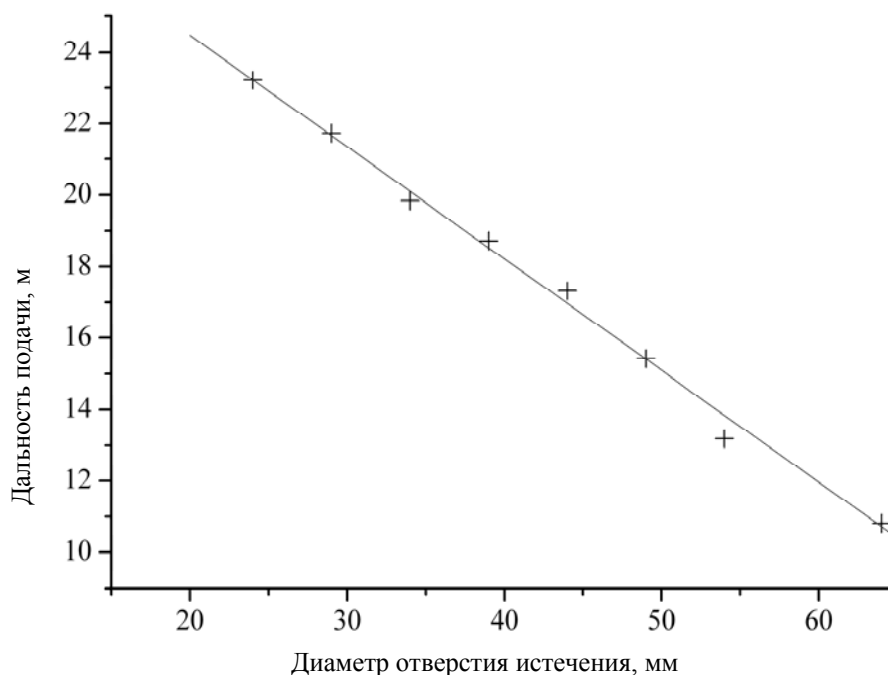
диаметры отверстия истечения: 1 – $d_H = 24,0$ мм; 2 – $d_H = 32,2$ мм; 3 – $d_H = 56,9$ мм

Рисунок 8 – Изменение интенсивности подачи воды для ствола СП-И УИП-1 при диаметрах отверстия истечения



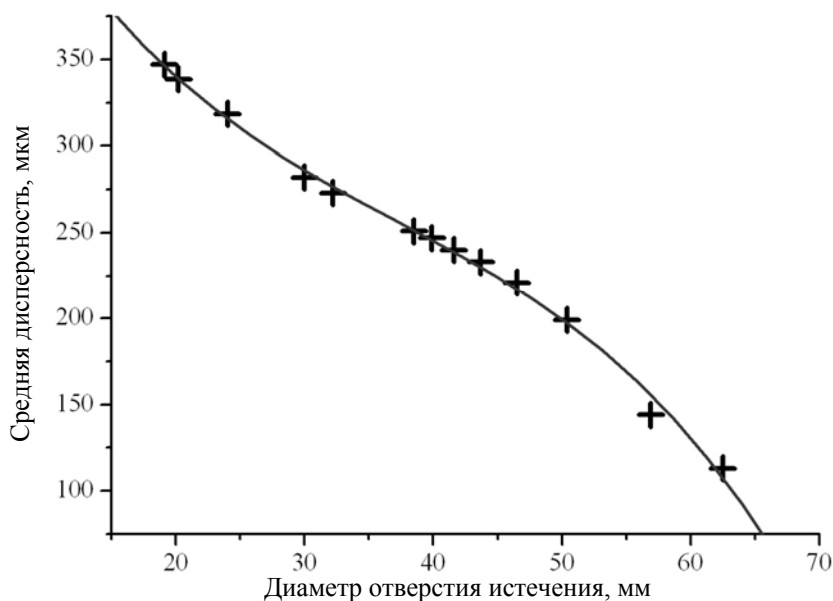
диаметры отверстия истечения: 1 – $d_H = 24,0$ мм; 2 – $d_H = 32,2$ мм; 3 – $d_H = 56,9$ мм

Рисунок 9 – Изменение площади поперечного сечения распыленной струи, формируемой стволом СП-И УИП-1 при диаметрах отверстия истечения



⊕ – расчетные значения; — — — — — аппроксимационная прямая

Рисунок 10 – Зависимость расчетной предельной дальности подачи огнетушащего вещества от диаметра отверстия истечения



⊕ – расчетные значения; — — — — — аппроксимационная кривая

Рисунок 11 – Зависимость средней дисперсности от диаметра отверстия истечения

Капли распыленной СП-И струи улавливались кюветой, в которой в качестве иммерсионной среды заливалась смесь индустриального масла и вазелина в соотношении 4:1. После этого с помощью микроскопа определялись размеры капель. Каждое испытание проводилось не менее трех раз, измерение размеров проводилось для всех капель, попавших в видимую область рабочего поля окуляра микроскопа. Кювета перемещалась по спиралевидной траектории с целью фиксации максимального количества капель.

Для оценки линейных размеров капель использовался окуляр 8^{\times} . В качестве шкалы использовалось калибрование линейных размеров видимой области рабочего поля с использованием поверенного средства измерения. Фиксация линейных размеров капель проводилась при полученном резком изображении измеряемых объектов методом преобразования видеоизображения, формируемого установленной на посту измерения видеокамерой SCC-B2005P, с помощью персонального компьютера. После получения набора растровых изображений проводилось измерение диаметров капель, а затем определялось среднее значение размера капель для каждого испытания. В результате обработки полученных экспериментальных данных установлено, что средняя арифметическая дисперсность капель распыленной струи, формируемой СП-И УИП-1, составляет около 190 мкм.

Еще одной характеристикой распыла является дальнобойность факела. Согласно Л.В. Кулагину дальнобойность факела может характеризоваться как дальность полета наиболее крупных капель, имеющих максимальную кинетическую энергию ([11], с. 20). Такой подход был выбран как наиболее приемлемый с точки зрения удобства аппаратного контроля геометрии факела распыла. Экспериментальные исследования дальнобойности факела проводились в помещении учебно-тренировочного комплекса Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. За дальнобойность факела принималось максимальное расстояние, на котором фиксировалось падение капель распыленной струи огнетушащего вещества, формируемой СП-И УИП-1. Для фиксации места падения капель использовалась уложенная на пол покрытие, выполненное из белой бумаги. Для облегчения позиционирования места падения капель воды применялся краситель – перманганат калия. Результаты проведения экспериментальных исследований и сравнение с результатами теоретических расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительные результаты дальнобойности факела из СП-И УИП-1

Параметр	d_H , мм			
	19,1	32,2	46,5	56,9
Длина струи, м:				
расчетная	24,8	20,6	16,2	12,0
экспериментальная	25,5	19,0	17,5	11,0
Модуль относительного отклонения, %	3	8	7	9

Как видно, расчетные и экспериментальные характеристики СП-И УИП-1 отличаются не более чем на 10 %. Таким образом, разработанная методика описывает параметры работы СП-И УИП-1 более точно, чем существовавшие до настоящего времени модели и может быть использована при проведении инженерных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом данных по быстрдействию и интенсивности подачи огнетушащего вещества представляется возможным определить эффективную площадь воздействия распыленной струи и возможную площадь тушения. Таким образом, полученные данные могут быть использованы для определения оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров стволов УИП и, следовательно, наиболее эффективных приемов тушения пожаров с различной геометрией очага и характеристиками пожарной нагрузки. По результатам обработки данных, полученных с использованием программного средства, разработана защищенная патентами конструкция модифицирующего устройства, позволяющая при работе установки изменять режим истечения жидкости, параметры распыленной струи и расширить область использования установки [12, 13]. Кроме этого, установлена область эффективного использования стволов УИП-1 и подготовлены рекомендации по тушению пожаров с использованием УИП-1 [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Grosshandler, W.L. Evaluation of alternative in-flight fire suppressants for full-scale testing in simulated aircraft engine nacelles and dry bays (NIST SP 861) / W.L. Grosshandler, R.G. Gann, W.M. Pitts. – Springfield, VA : National institute of standards and technology, 1994. – 859 p.
2. Разработать теорию, устройство и технологию импульсной подачи воды в зону горения : отчет о НИР (заключ.) / РНПЦ ПБ ГУВПС МВД Республики Беларусь ; рук. темы Н.А. Тычина. – Минск, 1997. – 316 с. – № ГР1997760.
3. Пожарная безопасность. Общие требования : ГОСТ 12.1.-91 [Введ. 01.07.92]. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.
4. Дарков, А.В. Сопротивление материалов : учеб. для ВТУЗов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – 4-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1975. – 654 с.
5. Резина. Метод определения твердости по Шору А : ГОСТ 263–75 [Введ. 01.01.1977]. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 7 с.
6. Иваницкий, А.Г. Алгоритм определения характеристик распыленной струи, формируемой стволами установок импульсного пожаротушения / А.Г. Иваницкий // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 1 (7). – С. 63–73.
7. Вислович, А.Н. Рекомендации по оценке влияния параметров стволов установок импульсного пожаротушения на гидродинамические характеристики процесса истечения жидкости / А.Н. Вислович, А.Г. Иваницкий, А.С. Дмитриченко ; Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2008. – 35 с.
8. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учеб. для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 413 с.
9. Ольшанский, В.П. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – № 4. – С. 67–70.
10. Заневская, Ю.В. Методы определения дисперсности распыленной водной струи / Ю.В. Заневская, С.Г. Петуховский // Чрезвычайные ситуации : предупреждение и ликвидация : сб. тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–8 июня 2007 г. : в 3 т. / НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси ; редкол. : Э.Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2007. – Т.2. – С. 45–47.
11. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам / А.Н. Чохонелидзе [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 608 с.
12. Ранцевая установка импульсного пожаротушения : пат. 4600 Респ. Беларусь, МПК(2006) А 62С 15/00 / А.Г. Иваницкий, В.В. Самойлов, А.С. Лебедев ; заявитель РУПП «Витязь». – № u 20080093 ; заявл. 12.02.08 ; опубл. 30.08.08 // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4 (63). – С. 162.
13. Ранцевая установка импульсного пожаротушения : пат. 89397 Российская Федерация, МПК(2006) А 62С 15/00 / А.Г. Иваницкий, В.В. Самойлов, А.С. Лебедев ; заявитель РУПП «Витязь». – № u 20080093 ; заявл. 18.02.08 ; опубл. 10.12.09 // Офиц. бюллетень : [Электронный ресурс]. – Изобретения. Полезные модели (с полными описаниями изобретений и патентов) (700 Мб). – Федеральный ин-т пром. собственности России, 2009. – № 34 (8/13808). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Дмитриченко, А.С. Рекомендации по тушению пожаров с использованием УИП-1 / А.С. Дмитриченко, А.Г. Иваницкий ; Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 12 с.