

УДК 614.843.4; 001.897.576

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА СТВОЛА ПОЖАРНОГО РУЧНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО

Карпенчук И.В. *, Шафранский Д.А. *, Янкевич Н.Г. **

* Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

** Республиканское унитарное предприятие «ПСЗ ОПТРОН»

*e-mail: cheef_85@mail.ru

В статье приведены результаты разработки конструкции отечественной модификации экспериментального образца ствола пожарного ручного универсального СПРУ 50/0,7. Разработана математическая модель движения жидкости в канале пожарного ствола, для определения кривизны дефлектора с целью обеспечения оптимальных характеристик пожарного ствола по дальности подачи огнетушащих веществ, а также расходу. Приведены результаты испытаний экспериментального образца ствола.

The article presents the results of design modification of an experimental sample of the barrel fire manual universal SPRU 50/0,7. A mathematical model of motion of a fluid in a channel fire barrel, to determine the curvature of the baffle to ensure the optimal characteristics of fire barrel range of extinguishing substances, as well as consumption. Test results are given of an experimental sample of the trunk.

(Поступила в редакцию 25 июля 2013 г.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пожарными аварийно-спасательными подразделениями МЧС используются пожарные ручные стволы сплошной струи серии РС, а также пожарные ручные стволы сплошной и распыленной струй серий РСП, СРК, РСКЗ. Данные стволы обеспечивают дальность сплошной струи до 30 м и распыленной до 15 м с расходом от 2 до 7,4 л/с в зависимости от исполнения и вида подаваемой струи.

Обновление средств тушения пожаров в соответствии с мировыми стандартами и научно-техническими достижениями сопровождается появлением на мировом рынке стволов нового поколения.

До настоящего времени задача создания отечественного комбинированного ручного пожарного ствола по тактико-техническим характеристикам и эргономическим показателям, близким к стволам зарубежного производства не реализована. Это можно объяснить тем, что рабочий процесс стволов с насадками данного типа детально не изучен и не регламентирован действующими техническими нормативно-правовыми актами. Таким образом, изучение протекания рабочих процессов, оптимизация гидродинамических параметров, разработка методик расчета гидродинамических параметров, а также разработка и постановка на производство стволов данного типа является актуальной задачей. Поставленная задача решена в рамках задания «Разработка и оптимизация гидродинамических параметров отечественной модификации экспериментального образца ствола пожарного ручного комбинированного» ГПНИ на 2011–2015 годы «Снижение рисков чрезвычайных ситуаций»

Математическая модель

При разработке ствола пожарного ручного универсального отечественной модификации необходимо разработать проточную часть ствола с гидродинамическими

параметрами обеспечивающими минимум гидродинамического сопротивления при максимальных тактико-технических характеристиках (дальность, распыл, защитный экран, снижение силы реакции струи). Для решения поставленной задачи использовалась [1] теория функции комплексной переменной.

Модель движения жидкости в канале ствола с дефлектором представлена на рис. 1. Рассмотрим в комплексной плоскости z симметричное струйное обтекание пластины СДС (дефлектор ствола) потоком жидкости, которая вытекает из канала, ограниченного двумя параллельными стенками.

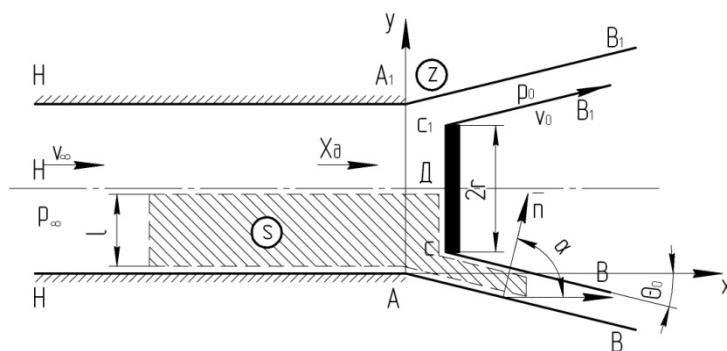


Рисунок 1 – Расчетная схема обтекания дефлектора

Задача решалась методом конформных отображений путем отыскания комплексного потенциала ω и переменной $\Omega = i \ln\left(\frac{1}{v_0} \cdot \frac{d\omega}{dz}\right)$ как функции параметрического комплексного переменного t , изменяющегося в верхней полуплоскости вспомогательной плоскости t [2].

Требуемое отображение осуществлялось с помощью формулы Кристоффеля-Шварца:

$$\omega = C' \int (t-h)^{-1} (t-b)^{-1} dt + C'' = C' \int \frac{dt}{(t-h)(t-b)} + C'', \quad (1)$$

где h и b – значения переменной t соответствующей точкам Н (проточная часть ствола при подходе к распыливающей головке) и В (струя на выходе из ствола).

После интегрирования:

$$\omega = \frac{C'}{h-b} \ln \frac{t-h}{t-b}, \quad C' = Q(b-h) / \pi, \quad (2)$$

где Q – расход жидкости.

Окончательное выражение функция $\omega = \omega(t)$ имеет вид:

$$\omega = \frac{Q}{\pi} \ln \frac{t-h}{t-b}. \quad (3)$$

Комплексная переменная Ω была определена в виде:

$$\Omega = i \ln\left(\frac{1}{v_0} \cdot \frac{d\omega}{dz}\right) = -\frac{1}{2i} \ln \frac{1-\sqrt{1-t}}{1+\sqrt{1-t}}. \quad (4)$$

Откуда

$$\frac{d\omega}{dz} = v_0 \frac{\sqrt{t}}{1+\sqrt{1-t}}. \quad (5)$$

Физический смысл параметров h и b состоит в том, что в точке $t=h$ $\frac{d\omega}{dz} = v_\infty$ и формула (5) приобретает вид:

$$v_\infty = v_0 \frac{\sqrt{h}}{1 + \sqrt{1-h}}. \quad (6)$$

Исследование области течения методом конформных отображений позволило получить уравнение:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{q(h-b)}{\pi \cdot v_0} \cdot \frac{1 + \sqrt{1-t}}{(t-h) \cdot (t-b)\sqrt{t}}, \quad (7)$$

решение которого дает зависимость для определения радиуса дефлектора

$$r = \frac{q}{\pi \cdot v_0} \left\{ 2\sqrt{\frac{b-1}{b}} \ln(b + \sqrt{b-1}) + \sqrt{\frac{1-h}{h}} \left[\frac{\pi}{2} \arcsin(2h-1) \right] + \pi \left(\frac{1}{\sqrt{h}} - \frac{1}{\sqrt{b}} \right) \right\}. \quad (8)$$

Получена зависимость для определения координаты расположения дефлектора

$$x_\partial = \frac{q}{\pi \cdot v_0} \left(\pi \sqrt{\frac{b-1}{b}} + \frac{1}{\sqrt{b}} \ln \frac{\sqrt{b}-1}{\sqrt{b}+1} - \frac{1}{\sqrt{h}} \ln \frac{1-\sqrt{h}}{1+\sqrt{h}} \right). \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$$f_1(h, b) = \left\{ 2\sqrt{\frac{b-1}{b}} \ln(b + \sqrt{b-1}) + \sqrt{\frac{1-h}{h}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin(2h-1) \right] + \pi \left(\frac{1}{\sqrt{h}} - \frac{1}{\sqrt{b}} \right) \right\}, \quad (10)$$

$$f_2(h, b) = \left(\pi \sqrt{\frac{b-1}{b}} + \frac{1}{\sqrt{b}} \ln \frac{\sqrt{b}-1}{\sqrt{b}+1} - \frac{1}{\sqrt{h}} \ln \frac{1-\sqrt{h}}{1+\sqrt{h}} \right). \quad (11)$$

С учетом сделанных обозначений формулы (8) и (9) примут вид:

$$r = \frac{q}{\pi \cdot v_0} f_1(h, b), \quad (12)$$

$$x_\partial = \frac{q}{\pi \cdot v_0} f_2(h, b). \quad (13)$$

Поскольку $q = v_\infty \cdot l$, используя формулу (6) получим:

$$q = v_0 \frac{\sqrt{h}}{1 + \sqrt{1-h}} \cdot l. \quad (14)$$

Откуда определяем радиус выходного отверстия канала

$$l = \frac{q}{v_0} \cdot \frac{1 + \sqrt{1-h}}{\sqrt{h}}. \quad (15)$$

Тогда формулы (12) и (13) с учетом (15) примут вид:

$$\frac{r}{l} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{h}}{1 + \sqrt{1-h}} f_1(h, b) \quad (16)$$

и

$$\frac{x_\partial}{l} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{h}}{1 + \sqrt{1-h}} f_2(h, b). \quad (17)$$

Определим силу сопротивления дефлектора F . Используем закон сохранения количества движения, применив его к массе жидкости, ограниченной поверхностью S (заштрихована на рис. 1). Примем движение жидкости в канале ствола установившимся. Тогда проекция на ось абсцисс изменения количества движения этой массы жидкости в единицу времени равно:

$$\Delta W = \rho \cdot q \cdot v_0 \cos \theta_0 - \rho \cdot q \cdot v_\infty. \quad (18)$$

Поскольку $q = v_\infty \cdot l$ и $p_\infty - p_0 = \frac{\rho}{2}(v_0^2 - v_\infty^2)$ получим:

$$F = \rho \cdot v_\infty^2 \cdot l \cdot \left(\frac{v_0^2}{v_\infty^2} - 2 \frac{v_0}{v_\infty} \cos \theta_0 + 1 \right). \quad (19)$$

Сила сопротивления дефлектора по формуле Ньютона равна:

$$F = C_x 2r \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} = C_x r \cdot \rho \cdot v_\infty^2. \quad (20)$$

Отношения $\frac{l}{r}$ и $\frac{v_0}{v_\infty}$ выражается через параметры h и b и определяются по формулам (16) и (6)

$$\frac{l}{r} = \frac{\pi \cdot (1 - \sqrt{1-h})}{\sqrt{h} \cdot f_1(h,b)}, \quad (21)$$

$$\frac{v_0}{v_\infty} = \frac{1 + \sqrt{1-h}}{\sqrt{h}}. \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \theta_0 = -\sqrt{b-1}; \quad \cos \theta_0 = \frac{1}{\sqrt{b}}. \quad (23)$$

Формулы (20), (21), (22) и (23) позволяют построить графики зависимости коэффициента сопротивления C_x от $\frac{r}{l}$ при различных значениях $\frac{x_0}{2l}$ (рис. 2).

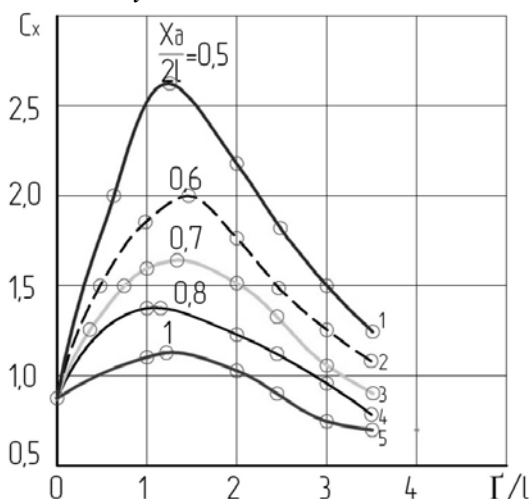


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента сопротивления дефлектора в канале ствола от геометрических характеристик области течения

Рассмотрим работу ствола пожарного ручного универсального на различных режимах. В режиме «распыленная струя» ствол будет работать с максимальным потреблением энергии потока, т. к. процесс дробления и диспергирования жидкости

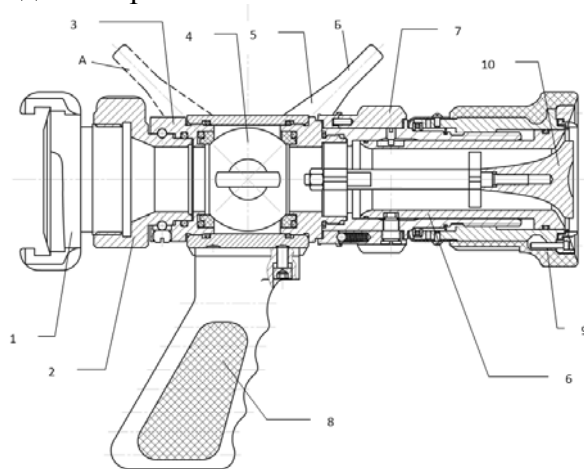
особенно при получении мелкодисперсной воды (размер капель < 100 мкм), очень энергоемким. Следовательно, в режиме «распыление» коэффициент сопротивления дефлектора должен иметь максимальное значение. Анализ графиков рис. 2 показывает, что функция $C_x = f\left(\frac{r}{l}\right)$ имеет экстремум, который лежит в интервале $1 \leq \frac{r}{l} \leq 2$. С другой стороны гидродинамическое сопротивление ствола должно быть минимизировано. Этому соответствует значение $C_x = 0,88$ [1] при уменьшении $\frac{r}{l}$ до нуля, что физически не возможно (дефлектор будет нулевым) поэтому оптимальным можно считать интервал $0,5 \leq \frac{r}{l} \leq 1$.

При работе в режиме «компактная струя» дефлектор передвигается вглубь канала ствола, соотношение $\frac{x_0}{2l}$ уменьшается, коэффициент сопротивления возрастает, а расход уменьшается по сравнению с режимом «распыленная струя». Это хорошо подтверждается многочисленными результатами испытаний различных дефлекторных стволов. Оптимальным интервалом для данного режима можно считать $-0,5 \leq \frac{x_0}{2l} \leq 0$ (т. к. дефлектор входит в канал и x_0 имеет отрицательное значение).

В режиме «защитный экран» кроме распыла струи ее необходимо развернуть на максимально возможный угол, т. е. $\theta \rightarrow -\frac{\pi}{2}$, дефлектор выдвигается вперед, коэффициент сопротивления уменьшается, расход увеличивается. Это тоже хорошо подтверждается многочисленными испытаниями. И оптимальным интервалом характеристик области течения будут соответствовать кривые, для которых $x_0 > 0$ и отношение $\frac{x_0}{2l}$ лежит в интервале $0 \leq \frac{x_0}{2l} < 0,1$.

Одним из важных этапов разработки ствола стало определение формы криволинейной поверхности дефлектора, для этого рассмотрим трехмерный симметричный относительно оси поток перед дефлектором.

Схема ствола приведена на рис. 3.



1 – головка соединительная ГЦ 50; 2 – вращающийся переходник; 3 – корпус; 4 – перекрывное устройство; 5 – рукоятка управления; 6 – механизм регулирования; 7 – дозатор; 8 – удерживающая рукоятка; 9 – насадок; 10 – дефлектор

Рисунок 3 – Схема устройства ствола пожарного ручного универсального

С целью минимизации гидравлических потерь зададим форму криволинейной поверхности дефлектора, совпадающую с линиями тока. При такой форме будет отсутствовать вихреобразование, а течение жидкости можно считать потенциальным. Потенциальное течение жидкости описывается уравнением Лапласа [3, 4]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (24)$$

где φ – потенциал скоростей.

$$U_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad U_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad U_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (25)$$

Выражение для потенциала скоростей:

$$\varphi = \frac{1}{2}(Ax^2 + By^2 + Cz^2). \quad (26)$$

где А, В, С – коэффициенты.

Подставим это выражение в уравнение (24):

$$\frac{\partial^2 (Ax^2 + By^2 + Cz^2)}{2\partial x^2} + \frac{\partial^2 (Ax^2 + By^2 + Cz^2)}{2\partial y^2} + \frac{\partial^2 (Ax^2 + By^2 + Cz^2)}{2\partial z^2} = 0. \quad (27)$$

$$\frac{\partial 2Ax}{2\partial x} + \frac{\partial 2By}{2\partial y} + \frac{\partial 2Cz}{2\partial z} = 0, \quad (28)$$

$$A + B + C = 0. \quad (29)$$

Следовательно, для того чтобы функция (26) удовлетворяла уравнению Лапласа, коэффициенты А, В и С должны удовлетворять уравнению (29). Это уравнение можно выполнить, приняв:

$$B = A, \quad C = -2A. \quad (30)$$

Тогда получим:

$$\varphi = \frac{A}{2}(x^2 + y^2 - 2z^2), \quad (31)$$

откуда найдем составляющие скорости течения:

$$\left. \begin{aligned} U_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial A(x^2 + y^2 - 2z^2)}{2\partial x} = Ax \\ U_y &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial A(x^2 + y^2 - 2z^2)}{2\partial y} = Ay \\ U_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial A(x^2 + y^2 - 2z^2)}{2\partial z} = -2Az \end{aligned} \right\}. \quad (32)$$

Поток жидкости, определяемый этим потенциалом, симметричен относительно оси вращения, совпадающей с осью z . Линии тока в плоскости yz , где $x = 0$, определяется уравнением:

$$\frac{dz}{dy} = \frac{U_z}{U_y} = -\frac{2z}{y}. \quad (33)$$

Проинтегрировав получим:

$$\ln z = \text{const} - 2 \ln y, \quad (34)$$

или

$$y^2 z = \text{const}. \quad (35)$$

Это уравнение так называемой кубической параболы, для оси x и y являются асимптотами.

Исходя из вышеизложенного, форму криволинейной поверхности дефлектора (текущий радиус) предлагается определять по формуле:

$$R_i = \sqrt{\frac{\eta}{b_{\text{деф.}} + L_i}}, \quad (36)$$

где R_i – текущий радиус дефлектора;

η – постоянная, зависящая от требуемых параметров ствола (для ручных стволов может приниматься 1 000–2 000);

$b_{\text{деф.}}$ – толщина дефлектора;

L_i – текущая длина дефлектора.

Результаты испытаний экспериментального образца ствола ручного пожарного универсального

С использованием разработанной математической модели движения жидкости в канале пожарного ствола с дефлектором, а также методики расчета параметров проведен расчет рабочих характеристик и изготовлен экспериментальный образец ствола пожарного ручного универсального с дефлектором СПРУ-50/0,7 (рис. 4).

На базе «Испытательно-исследовательского полигона учреждения Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь проведены его испытания.



Рисунок 4 – Внешний вид ствола СПРУ-50/0,7

Результаты испытаний показали, что при рабочем давлении 0,7 МПа: минимальный расход огнетушащего вещества составил 1,24 л/с; максимальный расход огнетушащего вещества составил 13 л/с;

максимальная дальность подачи компактной струи огнетушащего вещества составила 45 м;

максимальная дальность подачи распыленной струи огнетушащего вещества составила 25 м;

угол факела распыленной струи составил 20-90°;

угол факела защитной водяной завесы 122°;

диаметр факела 3,4-3,8 м. в зависимости от положения дозатора.

На рис. 5,6 приведены внешний вид компактной струи и графики зависимости расхода и дальности струи от давления на стволе на различных положения регулятора расхода.



Рисунок 5 – Внешний вид компактной струи

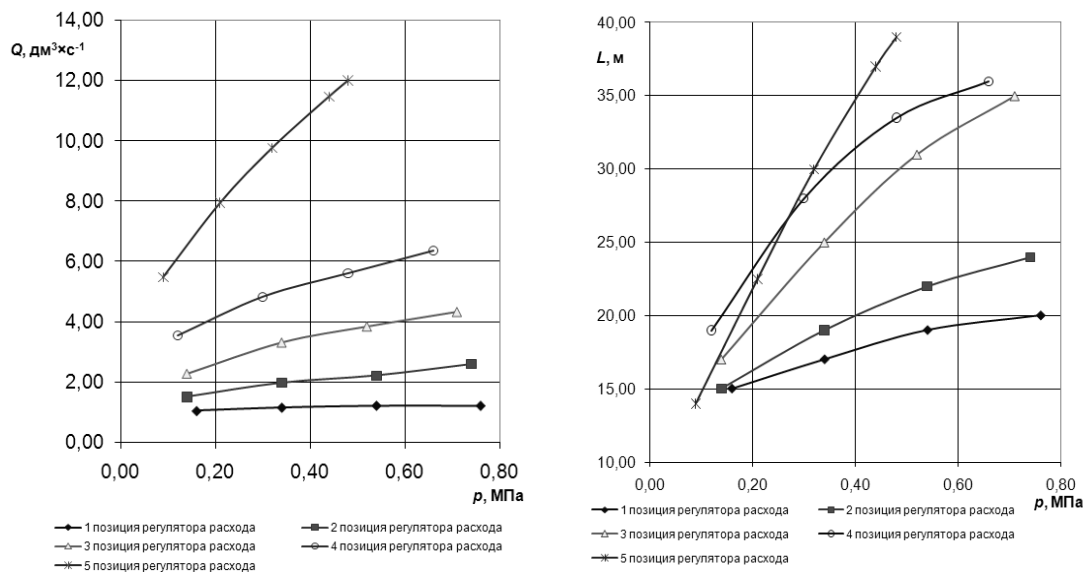


Рисунок 6 – График зависимости расхода и дальности струи от давления на стволе на различных положениях регулятора расхода

На рис. 7,8 приведены внешний вид распыленной струи и графики зависимости расхода и дальности струи от давления на стволе на различных положениях регулятора расхода.



Рисунок 7 – Внешний вид распыленной струи

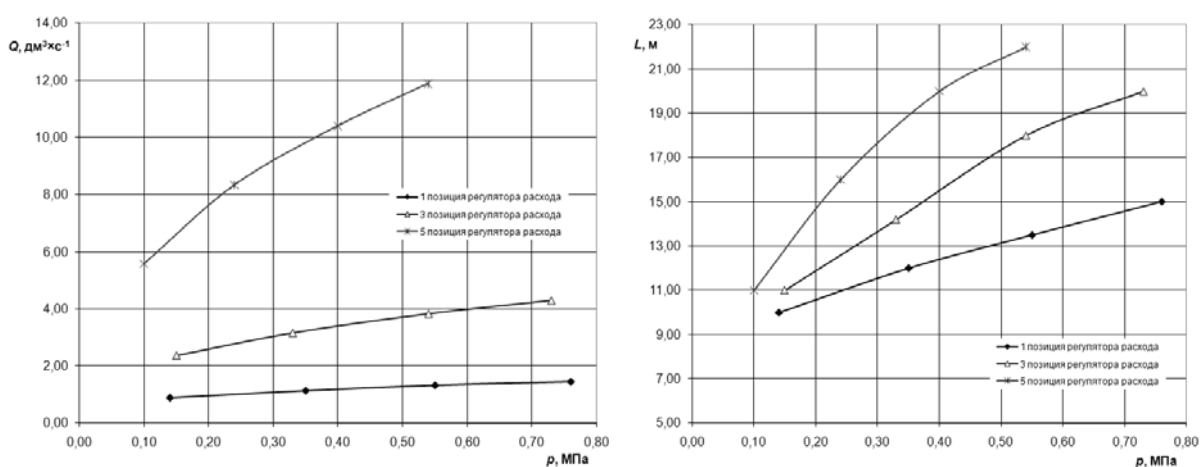


Рисунок 8 – Графики зависимости расхода и дальности от давления на стволе на различных положениях регулятора расхода

На рис. 9 приведен внешний защитного экрана.



Рисунок 9 – Внешний вид защитного экрана

Испытания показали, что экспериментальный образец СПРУ-50/0,7 соответствует требованиям СТБ 11.13.14 «Системы стандартов пожарной безопасности. Стволы пожарные ручные. Общие технические условия». Тактико-технические характеристики ствола обеспечат эффективное тушение пожаров и ликвидацию чрезвычайных ситуаций.

Результаты практической эксплуатации и многочисленных экспериментов показали так же то, что необходимо уменьшить вес ствола, чтобы облегчить работу с ним. Для этого была изменена форма удерживающей рукоятки и рукоятки управления.

В сравнение с большинством пожарных стволов, стоящих на вооружении органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь пожарный ствол СПРУ 50/0,7 обеспечивает дальность подачи на 20 % больше, расход на 10 % больше. Кроме этого сочетает в себе возможность изменения расхода и вида факела струи, в отличие от остальных приборов подачи огнетушащих веществ используемых в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Сравнение показателя при рабочем давлении в 0,45 МПа и переключении стволов в позицию максимального расхода показывает, что экспериментальный образец ствола имеет показатель расхода огнетушащего вещества в 11,6 л/с, а ствол Phantom SFM-HPG – 10,25 л/с. При этом, экспериментальный образец ствола СПРУ-50/0,7 расход на 10 % больше чем у пожарного ствола Phantom SFM-HPG.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель механики движения жидкости в пожарном ручном универсальном стволе позволяет рассчитывать геометрические характеристики области течения в канале ствола и определять гидродинамические параметры на различных режимах работы.

Использование методики расчета параметров ствола позволяет определить его оптимальные геометрические характеристики (диаметр выходного отверстия, диаметр дефлектора, диаметр канала ствола перед дефлектором, форма криволинейной поверхности дефлектора) для ручного перекрывного ствола с дефлектором, добившись оптимальных характеристик по дальности подачи огнетушащих веществ, расходу воды из ствола, форме струи, дисперсности капель.

Результаты испытаний показали, что проведенные теоретические исследования движения жидкости в канале пожарного ствола и определение параметров проточного тракта, кривизны поверхности дефлектора экспериментального образца ствола пожарного ручного универсального верны и могут использоваться для определения характеристик проточного тракта других пожарных стволов с дефлектором.

Результаты разработки внедрены в производство. Осуществляется серийное производство стволов СПРУ 50/0,7. МЧС Республики Беларусь приобрело более 2 000 шт. Стволы поставлены на вооружение в подразделениях. С учетом стоимости зарубежного аналога ~ 800\$ США, а отечественного ~ 200\$ США, экономический эффект от внедрения разработки составил более 10 миллиардов рублей. Лицензионные отчисления КИИ МЧС Республики Беларусь по результатам внедрения составили более 227 млн. рублей при стоимости разработки по заданию ГПНИ 120 млн. рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев, М.А. Методы теории функции комплексного переменного/ М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва: Наука, 1973. – 749 с.
2. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика/ Б.Т. Емцев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 463 с.
3. Карпенчук, И.В. Математическая модель движения жидкости в канале пожарного ствола / И.В. Карпенчук, В.В. Пармон, Д.А. Шафранский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.– 2011. –№ 2. – С. 133–145
4. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.