

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА НАСАДКОВ К СТВОЛУ ПОЖАРНОМУ РУЧНОМУ СПРУ-50/0,7 ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПАКТНОЙ СТРУИ ОГNETУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА

Рябцев В.Н., Лихоманов А.О., Навроцкий О.Д., Морозов А.А., Камлюк А.Н., Ильюшонок А.В., Гончаренко И.А., Шкиндер О.В.

Цель. Разработать экспериментальные образцы съемных последовательно соединяемых насадков с диаметром выходного отверстия 19 (тип А) и 13 мм (тип Б) к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 и оптимизировать геометрию их проточного тракта по дальности и расходу компактной струи огнетушащего вещества, а также оценить соответствие образцов требованиям СТБ 11.13.14 по данным параметрам.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических методов исследования (анализ, синтез, сравнение). Расчет геометрических параметров проточного тракта насадков проводился путем численного моделирования в программном обеспечении Ansys с помощью метода конечных элементов. Дальность и расход компактной струи огнетушащего вещества определялись экспериментально с использованием метода испытаний, описанного в СТБ 11.13.14.

Результаты. При численном моделировании проточного тракта насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 установлено, что для обеспечения наибольшей скорости и сохранения энергии струи воды при заданных давлении (0,45 МПа), диаметрах входного (40 мм) и выходного (13 мм) отверстий проточный тракт должен постепенно сужаться по всей длине без участков цилиндрической формы, при этом длина тракта не должна превышать 200 мм.

Экспериментально определены дальность компактной струи и расход воды для шести разработанных комплектов экспериментальных образцов насадков различной геометрии. Все образцы обеспечивают нормативную дальность компактной струи и расход воды в соответствии с СТБ 11.13.14. Также установлено, что на каждую единицу расхода воды наибольшая дальность компактной струи достигается при использовании: комплекта, состоящего из последовательно соединенных насадков типа А и Б с коноидальным проточным трактом длиной 50 мм каждый – для обеспечения расхода не менее 2,7 л/с с диаметром выходного отверстия 13 мм; насадка типа А с коническим проточным трактом длиной 100 мм – для обеспечения расхода не менее 7,4 л/с с диаметром выходного отверстия 19 мм. Вместе с тем показано, что вместо комплекта коноидальных насадков длиной по 50 мм на практике целесообразно применять конические аналоги той же длины ввиду незначительной разницы между соотношениями «дальность компактной струи / расход воды» (около 3 %).

Область применения исследований. Разработка и оптимизация насадков к пожарным стволам для подачи компактной струи.

Ключевые слова: пожарный ствол, насадок, проточный тракт, компактная струя, моделирование движения жидкости, расход, дальность струи.

(Поступила в редакцию 12 октября 2023 г.)

Введение

Для формирования и направления компактных или распыленных струй воды, пены различной кратности, а также для перекрытия потока огнетушащего вещества (ОТВ) используются пожарные стволы. Обновление пожарной техники в соответствии с уровнем мировых стандартов и научно-технических достижений сопровождается появлением на мировом рынке пожарных стволов нового поколения.

Одним из таких стволов является ствол пожарный ручной СПРУ-50/0,7¹ (рис. 1), разработанный Университетом гражданской защиты и производящийся ОАО «Приборостроительный завод ОПТРОН». Эксплуатация данного ствола в подразделениях по чрезвычайным ситуациям показала его хорошие тактико-технические характеристики и высокую надежность. Данные стволы позволяют подавать воду и водные растворы ОТВ в широком диапазоне расходов и давлений, формируют спектр различных видов струй и их комбинаций с различным углом факела распыла [1–4].



1 – переключатель конфигурации струи (насадок-распылитель); 2 – шаровый кран с рукояткой;
3 – входной крепеж с муфтовой головкой; 4 – рукоять пистолетного типа

Рисунок 1. – Ручной пожарный ствол СПРУ 50/0,7 [4]

С целью дальнейшего совершенствования СПРУ-50/0,7 и расширения области его применения запланирована разработка дополнительных съемных насадков для формирования компактной струи с расходом не менее 2,7 и 7,4 л/с и дальностью ее подачи не меньше, чем это требуется в соответствии с отечественным государственным стандартом СТБ 11.13.14. Разработка и оптимизация геометрии проточного тракта и гидродинамических параметров съемных насадков позволит улучшить тактико-технические характеристики ручного пожарного ствола СПРУ-50/0,7. Использование съемных насадков нескольких типоразмеров позволит при необходимости изменять расход воды через пожарный ствол в зависимости от оперативной обстановки на пожаре. Благодаря своему конструктивному исполнению такие насадки должны снизить вероятность засорения ствола при тушении пожаров с применением воды из открытых источников, а также будут иметь возможность присоединения к стволу заземляющего устройства при тушении электроустановок под напряжением.

На данный момент за рубежом пользуются популярностью так называемые гладкие насадки (от англ. smooth bore) на стволы пожарные компании Elkhart Brass² (рис. 2). Такие насадки практически полностью сохраняют удельную энергию потока жидкости за счет продуманной геометрии их проточного тракта (рис. 2б), который фактически не содержит местных сопротивлений и предотвращает возникновение областей повышенной турбулентности. На выходе из гладких насадков получается плотная компактная струя ОТВ, которая может быть подана на большее расстояние по сравнению с пожарными стволами с изменяемым расходом, в которых в качестве насадка используется насадок-распылитель (рис. 1). Изменение расхода ОТВ в пожарных стволах с использованием гладких насадков возможно путем подбора насадка с необходимым диаметром выходного отверстия либо путем изменения давления перед пожарным стволом. При этом производителем технически реализована возможность последовательного соединения насадков с различными диаметрами

¹ Ствол пожарный ручной комбинированный: пат. на полез. модель ВУ 8319 / Г.Ф. Ласута, И.В. Карпенчук, И.И. Полевода, В.В. Пармон, С.М. Палубец, М.Ю. Стриганова, Д.А. Шафранский. – Оpubл. 30.06.2012.

² Каталог компании Elkhart Brass (США) [Электронный ресурс] / Elkhart Brass. – Режим доступа: <http://www.elkhartbrass.com/>. – Дата доступа: 10.10.2023.

рами. В результате этого получается один цельный насадок, состоящий из комплекта меньших по длине насадков. В процессе тушения может понадобиться увеличить расход ОТВ, для этого имеется возможность отсоединить ненужные насадки и оставить подходящий по диаметру выходного отверстия вариант.

Подобного рода насадки позволяют формировать компактную струю ОТВ при использовании в составе ствола СПРУ 50/0,7. В частности, при тушении пожаров с применением воды из открытых источников можно использовать взамен изначально установленного на стволе СПРУ 50/0,7 гладкий насадок с диаметром выходного отверстия, достаточным для обеспечения нормативного расхода. Такой насадок не будет подвержен засорению. Кроме того, с учетом существующих правил тушения электроустановок под напряжением (допускается тушение при струе воды, подаваемой из пожарных стволов с диаметром выходного отверстия не более 13 мм)³ при использовании гладкого насадка определенного диаметра отсутствует вероятность поражения ствольщика электрическим током, а сам пожарный ствол с насадком может иметь конструктивный элемент для присоединения заземляющего устройства при тушении электроустановок под напряжением.



а – внешний вид

б – чертеж с местным разрезом

Рисунок 2. – Гладкие насадки с различным диаметром выходного отверстия для ручных пожарных стволов компании Elkhart Brass

Для сохранения энергии потока на выходе из насадка и предотвращения возникновения областей повышенной турбулентности в его проточном тракте необходимо провести расчет геометрических параметров проточной части. Это позволит обеспечить наибольшую дальность подачи компактной струи ОТВ, что, в свою очередь, даст возможность ствольщику дистанцироваться от очага пожара и снизить величину теплового воздействия на него.

С учетом установленных на территории Республики Беларусь требований к расходу ОТВ пожарных стволов принято решение выполнить подбор геометрии проточного тракта

³ Об утверждении инструкции по тушению пожаров в электроустановках организаций Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Мин-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь и Мин-ва энергетики Респ. Беларусь, 28 мая 2004 г., № 20/15 // // Онлайн-сервис готовых правовых решений iLex. – Режим доступа: <https://ilex-private.ilex.by>. – Дата доступа: 10.10.2023.

насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 для формирования компактной струи с расходом ОТВ и дальностью подачи не меньше, чем это требуется в соответствии с отечественным государственным стандартом СТБ 11.13.14⁴. Таким образом, необходимо разработать оптимальные модели двух гладких насадков для обеспечения нормативных значений вышеуказанных параметров при рабочем давлении перед ручным пожарным стволом, которые будут иметь возможность последовательного соединения и отсоединения во время тушения пожара.

Основная часть

Гладкий насадок на пожарный ствол является видом гидравлического насадка. Длина гидравлического насадка, при которой возможно заполнение всего сечения канала и достигается максимальная пропускная способность для внешних цилиндрических насадков, составляет, как правило, 3–4 диаметра выходного отверстия. Наибольшей пропускной способностью обладают конический сходящийся и коноидальный гидравлические насадки (рис. 3) [5–7]. Проточный тракт коноидального насадка выполняется по форме вытекающей из отверстия струи, что позволяет на несколько процентов увеличить его пропускную способность по сравнению с коническим [7].

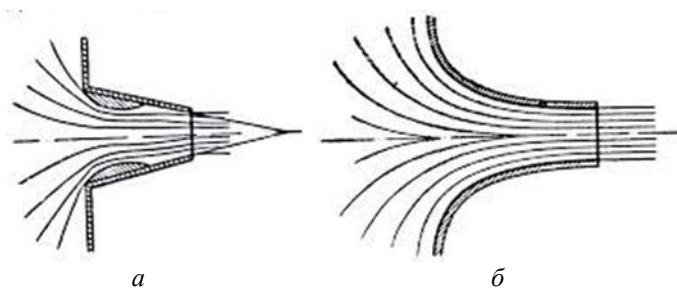


Рисунок 3. – Конический (а) и коноидальный (б) гидравлические насадки [6]

В связи с тем что расход и дальность компактной струи пожарного ствола зависят от геометрических параметров его проточной части, задача сводилась к расчету ее геометрических параметров с заданными технико-эксплуатационными характеристиками с последующей оптимизацией. При стандартном рабочем давлении перед стволом 0,45 МПа нормативный расход ОТВ не менее 2,7 и 7,4 л/с достигается применением насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм (насадок типа Б) и 19 мм (насадок типа А) соответственно. По этой причине предполагается разработка двух насадков с вышеуказанными диаметрами выходного отверстия, при этом насадок диаметром 13 мм будет иметь возможность накручивания на насадок диаметром 19 мм наподобие каскада насадков на рисунке 2. Диаметр отверстия в месте соединения пожарного ствола СПРУ-50/0,7 с насадком составляет 40 мм. Данные параметры геометрии являлись входными для создания виртуальной 3D-модели проточного тракта насадков. При выполнении оптимизации геометрических параметров основной целью являлось достижение максимальной скорости вылета струи при регламентированном давлении 0,45 МПа на входе в проточный тракт насадка. Задача решалась с помощью моделирования процесса течения жидкости через проточный тракт насадков для пожарного ствола. Решение строилось с помощью метода конечных элементов в программном обеспечении Ansys.

Геометрическая модель. Задача решалась в осесимметричной постановке. Геометрическая модель проточного тракта насадка показана на рисунке 4.

Для поиска оптимальной формы проточного тракта насадка его геометрические размеры изменялись по трем опорным точкам А, В и С (рис. 4). Для моделирования были

⁴ Стволы пожарные ручные. Общие технические условия: СТБ 11.13.14-2009 Государственный стандарт Республики Беларусь. – Введ. 21.08.09. – Минск: Госстандарт, 2009. – 9 с.

отобраны три варианта геометрии проточного тракта: 1) длины отрезков $A'B$ и BC (рис. 4а) равны; 2) длины отрезков $A'B$ и BC находятся в соотношении 1 к 9; 3) длина отрезка $A'B = 100$ мм, $BC = 0$ мм. Кроме того, для расчетов были подготовлены геометрические модели с вогнутой стороной AB для создания эффекта коноидального насадка. Для этого отрезку AB задавался наименьший возможный радиус кривизны таким образом, чтобы получившийся вогнутый отрезок AB не пересекался с отрезком $A'B$ (рис. 4б). Подобная операция была выполнена для всех трех вариантов насадков с прямой стороной AB .



Рисунок 4. – Геометрическая модель проточного тракта насадка

Результаты расчетов. Описание модели, граничные условия и уравнения турбулентных течений, которые применялись при моделировании, аналогичны тем, что подробно описаны в работе [4].

На рисунке 5 представлены графики изменения скорости потока жидкости по длине проточного тракта насадка для трех вариантов его исполнения. На рисунке 5а видно, что вне зависимости от формы сходящейся части насадка (конической либо коноидальной) в месте перехода в его цилиндрическую часть наблюдается скачок скорости потока (в среднем на 14,2 % относительно установившейся скорости в цилиндрической части), который свидетельствует о появлении области повышенной турбулентности, которая, в свою очередь, может приводить к заметным потерям полной удельной энергии потока. Подобную картину можно наблюдать и на рисунке 5б, однако в данном случае в вышеупомянутом месте проточного тракта скорость в среднем повышается на 3,5 %. Избежать образования области повышенной турбулентности потока удастся только в том случае, когда цилиндрическая часть в проточном тракте отсутствует, как это следует из рисунка 4в. При этом следует заметить, что максимальная установившаяся скорость потока на срезе выходного отверстия для всех вариантов исполнения насадков практически одинакова и равна приблизительно 28 м/с. Из вышесказанного можно сделать вывод, что оптимальным вариантом исполнения проточного тракта насадка является тот вариант, когда постепенное сужение проточного тракта происходит по всей его длине без участков цилиндрической формы, т.е. когда он конический либо коноидальный по всей длине.

Определение оптимальной длины проточного тракта насадков является не менее актуальной задачей. Для этого были созданы еще четыре геометрические модели проточного тракта насадка коноидальной формы с диаметром входного и выходного сечений 40 и 13 мм соответственно, при этом длина геометрических моделей составляла 200, 300, 400 и 500 мм. На рисунке 6 представлена зависимость скорости потока жидкости от длины проточного тракта для указанных моделей.

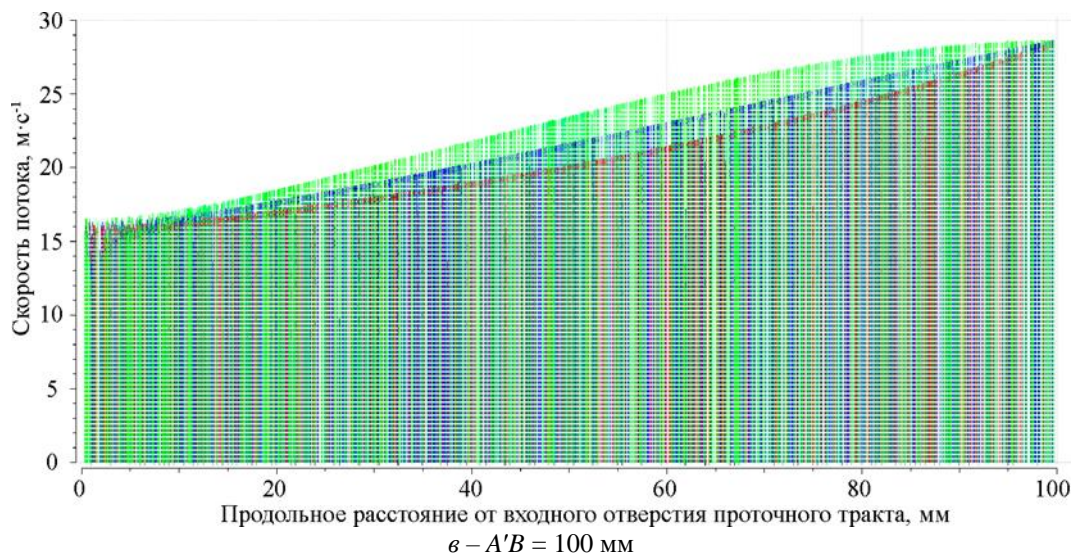
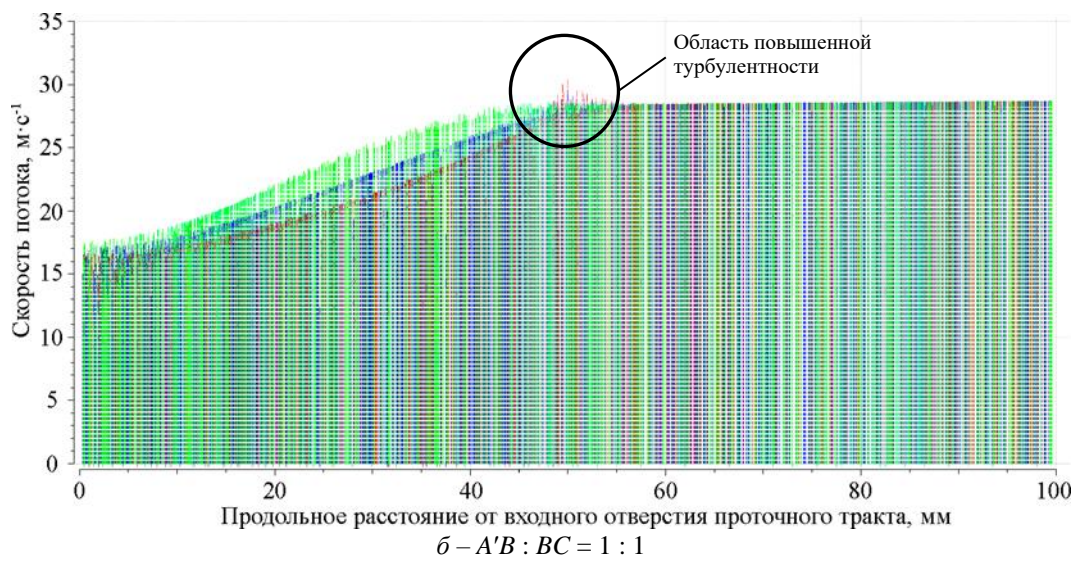
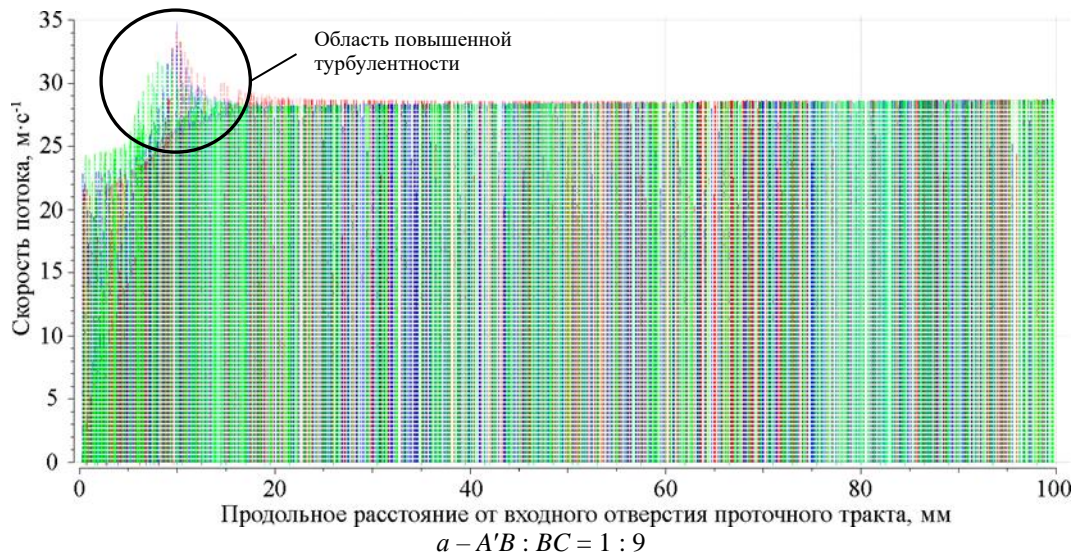


График зеленого цвета – конoidalный проточный тракт, красного – конический сходящийся
Рисунок 5. – Изменение скорости потока жидкости (м/с, вертикальная ось) по длине проточного тракта насадка (мм, горизонтальная ось) для трех вариантов его исполнения ($A'B$ и BC см. на рис. 4)

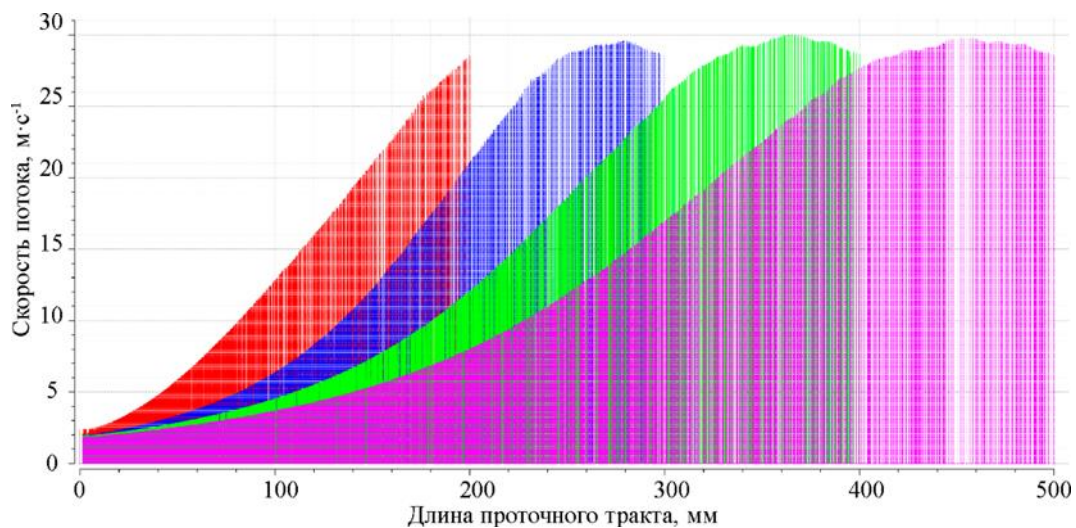


График красного цвета – 200 мм, синего – 300 мм, зеленого – 400 мм, фиолетового – 500 мм
Рисунок 6. – Зависимость скорости потока жидкости от длины проточного тракта каскада насадка

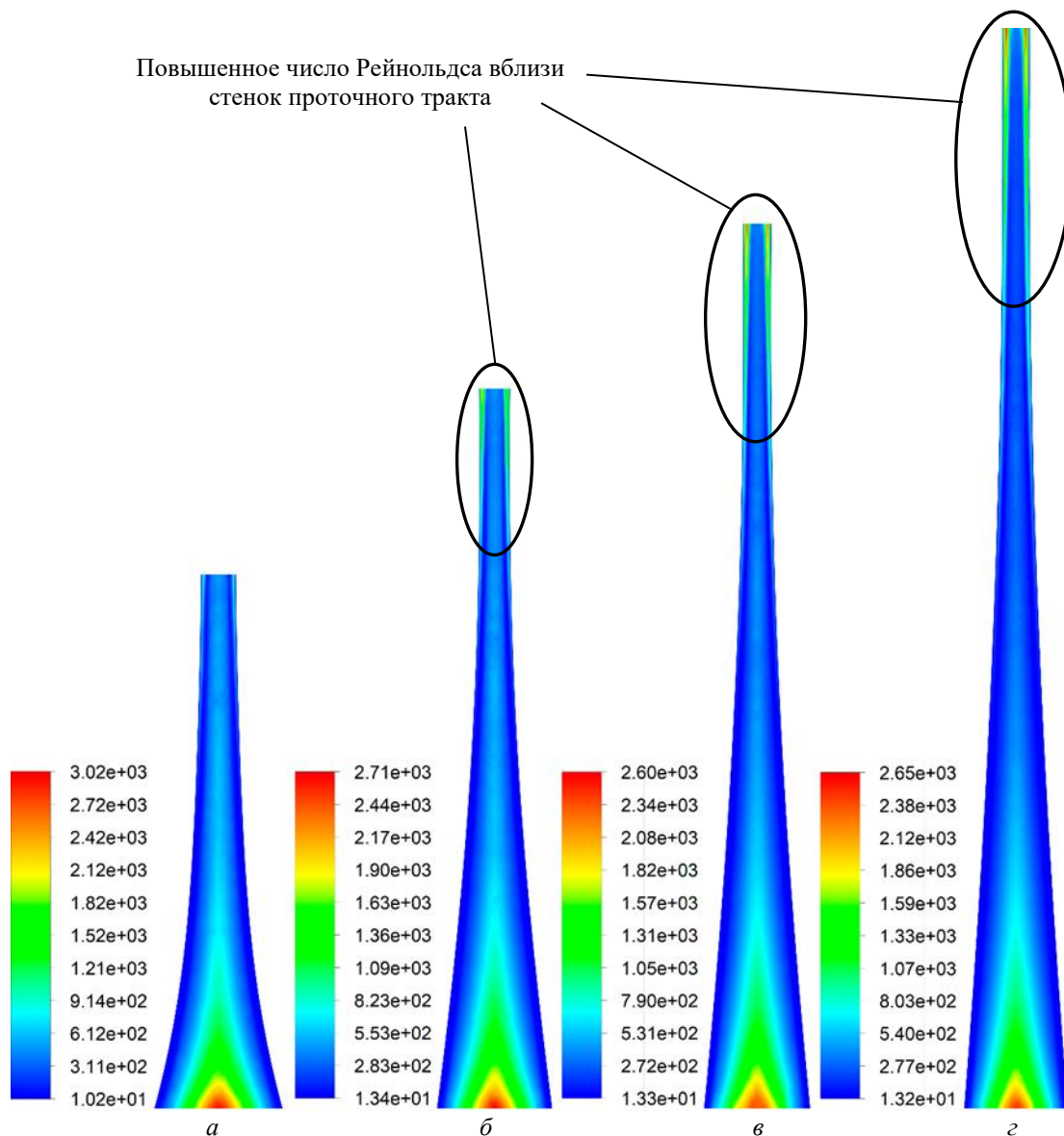


Рисунок 7. – Результаты расчета изменения числа Рейнольдса в среде Ansys (a, б, в, г – длина проточного тракта 200, 300, 400 и 500 мм соответственно)

Как видно из рисунка 6, уже при длине проточного тракта 200 мм скорости струи на выходе достигает 28 м/с. Максимальная скорость в насадках большей длины несущественно выше и составляет от 29 до 30 м/с. При этом следует отметить, что насадок длиной 200 мм позволяет сформировать наиболее ровный профиль изменения турбулентности потока жидкости (рис. 7а). В насадках длиной от 300 до 500 мм в последней четверти вблизи стенок возникают области, в которых число Рейнольдса повышается в несколько раз по сравнению с основной центральной частью потока (рис. 7 б, в, г). Это может привести к заметным потерям энергии потока и, как следствие, к падению напора на выходе из насадка и снижению дальности полета компактной струи.

Таким образом, исходя из проведенных расчетов наиболее оптимальной геометрией проточного тракта насадка с точки зрения обеспечения наибольшей скорости и сохранения энергии струи воды при заданных давлении (0,45 МПа) и диаметрах входного (40 мм) и выходного (13 мм) отверстий является тот вариант, при котором проточный тракт постепенно сужается по всей длине без участков цилиндрической формы от входного до выходного отверстия, при этом длина тракта не должна превышать 200 мм. Тем не менее результаты моделирования в среде Ansys подлежат экспериментальной верификации.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований дальности компактной струи и расхода ОТВ были изготовлены шесть комплектов экспериментальных образцов насадков (далее – насадки) с различными геометрическими параметрами проточного тракта. В комплект входит насадок типа А с диаметром выходного отверстия 19 мм и насадок типа Б с диаметром выходного отверстия 13 мм. Ствол пожарный ручной СПРУ-50/0,7 с присоединенным комплектом насадков изображен на рисунке 8.

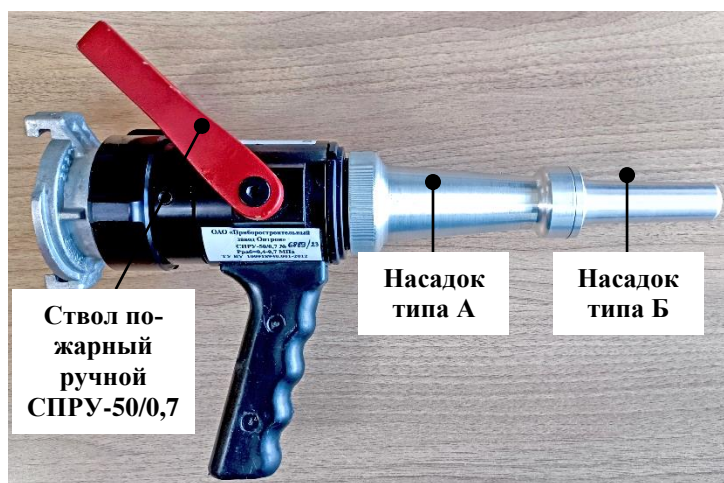


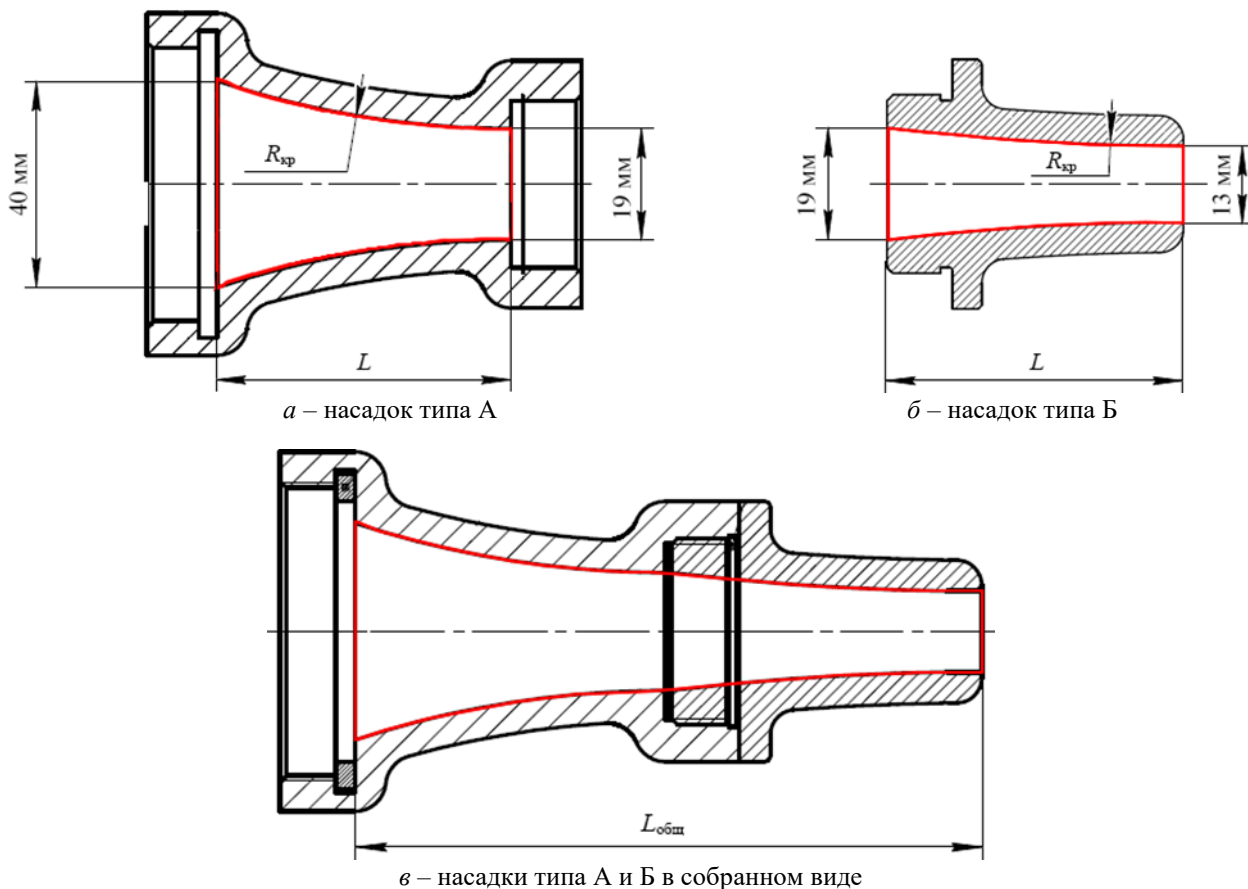
Рисунок 8. – Ствол пожарный ручной СПРУ-50/0,7 с комплектом насадков типа А и Б

При проведении экспериментов с диаметром выходного отверстия 13 мм к стволу СПРУ 50/0,7 присоединяли комплект насадков типа А и типа Б в сборе. При проведении экспериментов с диаметром sprыска 19 мм к стволу присоединяли только насадок типа А. На рисунке 9 представлен вид насадков типа А и Б в разрезе, а также обозначения их геометрических размеров. Геометрические размеры всех вариантов исполнения насадков, которые использовались в экспериментах, указаны в таблице 1. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a (основной параметр шероховатости) проточного тракта всех изготовленных насадков составляет не более 3,2 мкм.

Исследование ствола пожарного ручного СПРУ-50/0,7 с присоединенными насадками проводилось в соответствии с методом испытаний, описанным в п. 6 СТБ 11.13.14⁵. Условия проведения экспериментов были следующими: температура окружающего воздуха

⁵ См. сноску 4.

от +22 до +25 °С; атмосферное давление от 980 до 995 гПа; относительная влажность от 50 до 75 %; скорость ветра от 0 до 1,5 м/с (с порывами до 3 м/с); осадки отсутствовали. В качестве ОТВ использовали водопроводную воду температурой (15 ± 5) °С.



а – насадок типа А

б – насадок типа Б

в – насадки типа А и Б в собранном виде

L – длина проточного тракта насадка, $R_{кр}$ – радиус кривизны проточного тракта насадка (только для насадков с коноидальной формой проточного тракта), $L_{общ}$ – длина проточного тракта комплекта насадков

Рисунок 9. – Насадки типа А и Б в разрезе

Таблица 1. – Геометрические размеры насадков для ствола пожарного ручного СПРУ-50/0,7

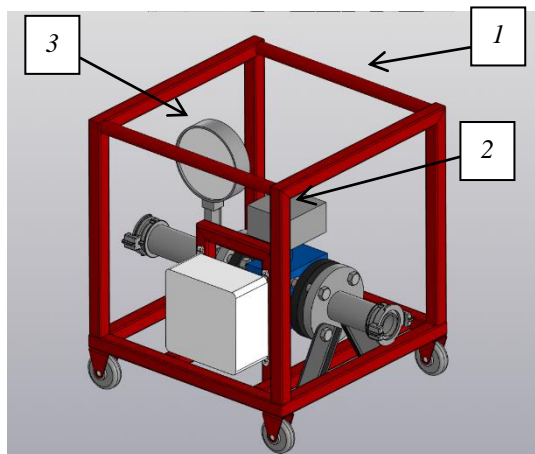
Наименование насадка либо комплекта насадков	Длина проточного тракта насадка L либо комплекта насадков $L_{общ}$, мм	Форма проточного тракта	Радиус кривизны проточного тракта насадка $R_{кр}$, мм
НСДК-01.001 тип Б	50	Конический	–
НСДК-01.002 тип А	50	Конический	–
НСДК-02.001 тип Б	50	Конический	–
НСДК-02.002 тип А	50	Конический	–
НСДК-02.001 тип Б	50	Конический	416
НСДК-02.002 тип А	50	Конический	160
НСДК-03.001 тип Б	100	Конический	–
НСДК-03.002 тип А	100	Конический	–
НСДК-04.001 тип Б	100	Конический	–
НСДК-04.002 тип А	100	Конический	–
НСДК-04.001 тип Б	100	Конический	1592
НСДК-04.002 тип А	100	Конический	646
НСДК-05.001 тип Б	200	Конический	–
НСДК-05.002 тип А	200	Конический	–
НСДК-06.002 тип Б	200	Конический	10915
НСДК-06.002 тип А	200	Конический	2504

Средства измерений и оборудование, которые применялись при проведении экспериментов, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Средства измерений и оборудование для проведения экспериментов

Наименование, измеряемая величина, техническая характеристика	Диапазон измерений	Класс точности, погрешность
Анемометр Testo 410-2: скорость воздуха V , м/с температура воздуха, °С относительная влажность воздуха, % ОВ	(0,4–20,0) -10 – +50 0–100	$\pm (0,2 + 0,02 \cdot V)$ $\pm 0,5$ $\pm 2,5$
Расходомер РСУ-05.03: расход, м ³ /ч	0,63–78,75	2
Манометр МП-160МЧ: давление, МПа	0–1,6	0,6
Лазерный дальномер Leica DISTO D510: расстояние D , м угол наклона α , градус	0,05–200 0–360	$\pm 2 \cdot (1,0 + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot D)$ $\pm (0,3 + 0,01 \cdot \alpha)$
Линейка (по ГОСТ 427-75): расстояние, мм	0–1000 (ц. д. – 1 мм)	2
Пожарная автоцистерна: расход воды не менее 10 л/с при давлении 0,6 МПа	–	–
Рукав напорный: длина 20 м, диаметры Ø51 и 77 мм	–	–
Фотоаппарат Olympus Tough TG-5	–	–
Штатив	–	–
Ствол пожарный ручной СПРУ-50/0,7: рабочее давление 0,4–0,7 МПа	–	–

Для определения основных параметров насадков для формирования компактной струи в составе ствола пожарного ручного СПРУ-50/0,7 разработан и изготовлен испытательный стенд (рис. 10).

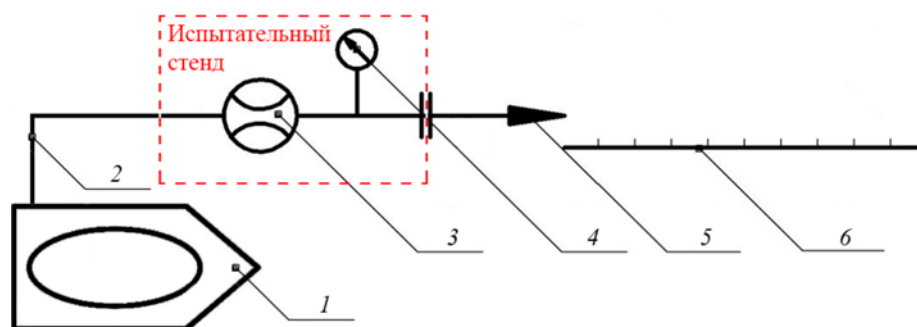


1 – металлическая рама; 2 – ультразвуковой расходомер РСУ-05.03; 3 – виброустойчивый манометр МП-160МЧ

Рисунок 10. – Общий вид испытательного стенда

Испытательный стенд обеспечивает измерение расхода воды и давления при подаче воды от пожарной автоцистерны по напорной рукавной линии к стволу пожарному ручному. Стенд изготовлен на прямоугольной металлической раме 1. Для его перемещения предусмотрены колеса по четырем углам металлической рамы. В состав стенда входит ультразвуковой расходомер 2 с диаметром условного прохода 50 мм и виброустойчивый манометр 4, имеющий в составе демпферное устройство для уменьшения пульсаций измеряемой среды. Манометр и расходомер зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений Республики Беларусь и прошли поверку. Детали стенда размещены таким образом, что снятие показаний измерительных приборов может производиться визуально из одной точки. Манометр установлен после расходомера по направлению течения воды. Для подключения рукавов пожарных стенд оснащен головками муфтовыми типа ГМ-50.

Общая схема экспериментальной установки, которая использовалась для определения измеряемых параметров, представлена на рисунке 11.



1 – пожарная автоцистерна с пожарным насосом; 2 – напорная рукавная линия для размещения средств измерений и оборудования (Ø50 мм); 3 – расходомер; 4 – манометр; 5 – ствол; 6 – разметка для определения дальности струи в метрах

Рисунок 11. – Общая схема экспериментальной установки

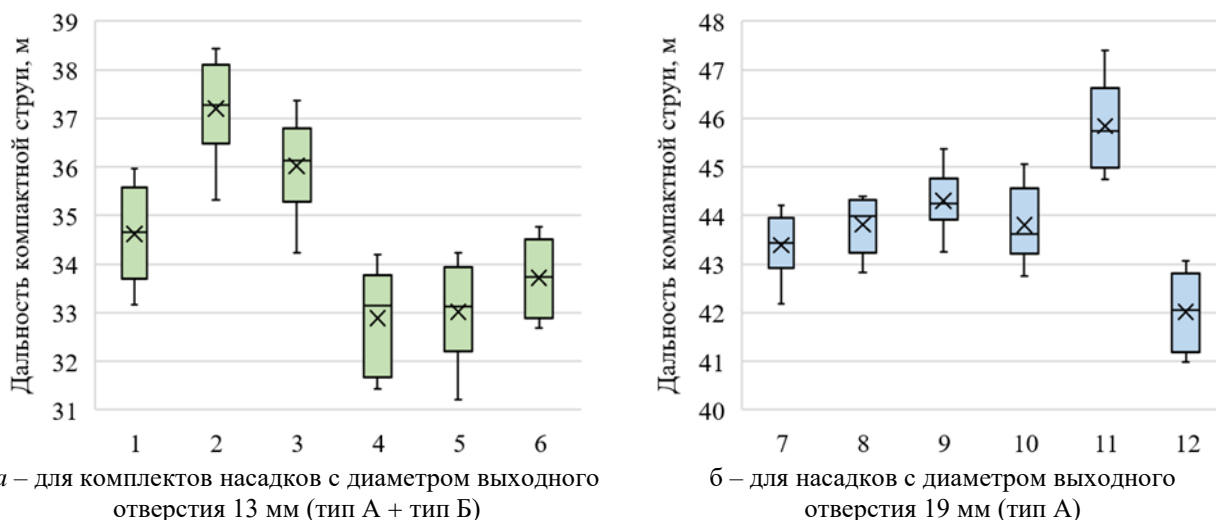
При заданном давлении ($0,45 \pm 0,05$) МПа (по манометру 4, рис. 11) проводились четыре измерения для каждого параметра (дальность компактной струи и расход воды). Результаты экспериментов приведены в таблице 3, а также на рисунке 12.

Таблица 3. – Результаты экспериментального определения основных параметров насадков типа А и Б к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7

№ п/п	Наименование насадки либо комплекта насадков	Длина проточного тракта насадка L либо комплекта насадков $L_{\text{общ}}$, мм	Диаметр выходного отверстия, мм	Форма проточного тракта	Средняя дальность компактной струи, м	Расход воды, л/с
1	НСДК-01.000 тип Б (тип А + тип Б)	100 (50 + 50)	13	Конический	34,5	3,54
2	НСДК-02.000 тип Б (тип А + тип Б)	100 (50 + 50)	13	Коноидальный	37,2	3,69
3	НСДК-03.000 тип Б (тип А + тип Б)	200 (100 + 100)	13	Конический	36,0	3,69
4	НСДК-04.000 тип Б (тип А + тип Б)	200 (100 + 100)	13	Коноидальный	32,9	3,56
5	НСДК-05.000 тип Б (тип А + тип Б)	400 (200 + 200)	13	Конический	33,0	3,61
6	НСДК-06.000 тип Б (тип А + тип Б)	400 (200 + 200)	13	Коноидальный	33,7	3,39
7	НСДК-01.002 тип А	50	19	Конический	43,4	7,64
8	НСДК-02.002 тип А	50	19	Коноидальный	43,8	7,81
9	НСДК-03.002 тип А	100	19	Конический	44,3	7,72
10	НСДК-04.002 тип А	100	19	Коноидальный	43,8	8,00
11	НСДК-05.002 тип А	200	19	Конический	45,8	8,17
12	НСДК-06.002 тип А	200	19	Коноидальный	42,0	7,53

Согласно рисунку 12 наибольшая дальность компактной струи комплектов насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм получена при использовании НСДК-02.000 типа Б (тип А + тип Б), состоящего из насадков типа А и Б с коноидальным проточным трактом длиной 50 мм каждый, а для насадков с диаметром выходного отверстия 19 мм – НСДК-05.002 типа А с коническим проточным трактом длиной 200 мм. Кроме того, из таблицы 3 и рисунка 12 видно, что все экспериментальные образцы насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 обеспечивают нормативную дальность компактной струи и расход воды (дальность компактной струи ствола с насадком типа Б должна быть не менее 30 м, расход – не менее 2,7 л/с, дальность компактной струи ствола с насадком типа А должна быть не менее 32 м, расход – не менее 7,4 л/с)⁶.

⁶ См. сноску 4.

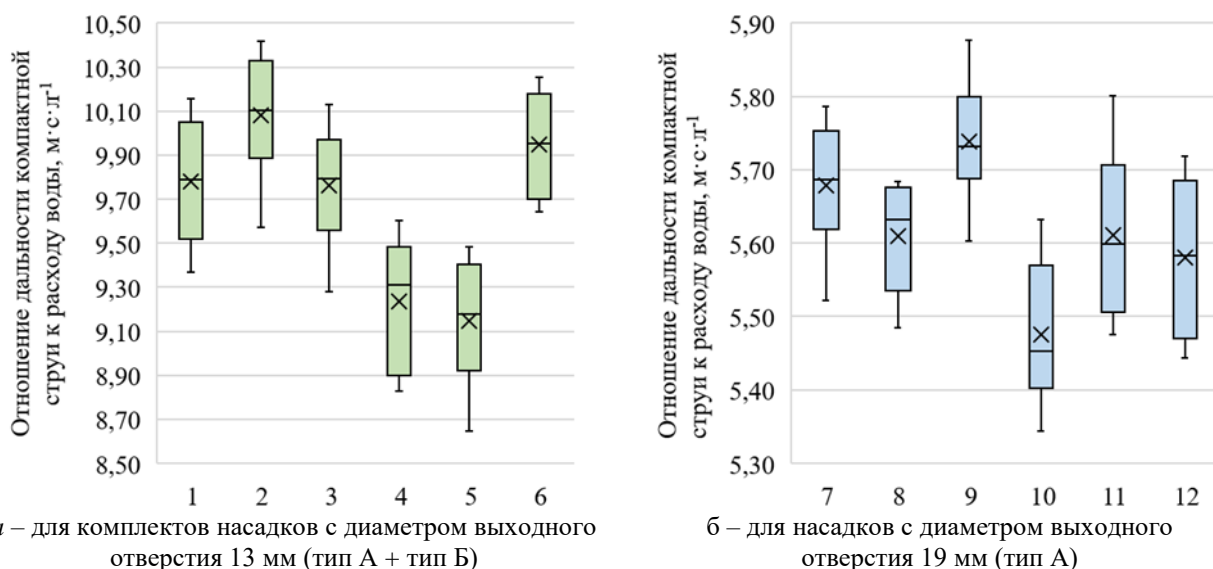


а – для комплектов насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм (тип А + тип Б)

б – для насадков с диаметром выходного отверстия 19 мм (тип А)

Рисунок 12. – Диаграммы размаха результатов экспериментального определения дальности компактной струи при использовании экспериментальных образцов насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 (порядковый номер насадка либо комплекта насадков см. в таблице 3)

Здесь важно заметить, что подача воды к стволу во время экспериментов осуществлялась от центробежного насоса, установленного на пожарной автоцистерне. Ввиду особенности работы таких насосов, в напорной линии зачастую наблюдаются пульсации давления ОТВ даже при условии применения виброустойчивых манометров. Это затрудняет для оператора установку с необходимой точностью давления для проведения экспериментов. Более того, сами экспериментальные образцы имеют некоторые отклонения в размерах от чертежей по причине погрешности фрезеровочного оборудования. Таким образом, учитывая вышеуказанные погрешности эксперимента, а также имея в виду известный факт, что коноидальные насадки, как правило, обеспечивают несколько больший расход жидкости по сравнению с коническими сходящимися насадками, расход воды при использовании разработанных экспериментальных образцов насадков отличался, что можно увидеть в последнем столбце таблицы 3. По этой причине целесообразно при сравнении насадков определять отношение дальности компактной струи к расходу воды, т.е. определять, сколько метров дальности полета струи приходится на единицу расхода воды. Результаты данных расчетов приведены на рисунке 13.



а – для комплектов насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм (тип А + тип Б)

б – для насадков с диаметром выходного отверстия 19 мм (тип А)

Рисунок 13. – Диаграммы размаха отношения дальности компактной струи к расходу воды при использовании экспериментальных образцов насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 (порядковый номер насадка либо комплекта насадков см. в таблице 3)

Из диаграммы на рисунке 13а видно, что для комплектов насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм на каждую единицу расхода воды наибольшая дальность компактной струи соответствует НСДК-02.000, тип Б (тип А + тип Б), результат по сравнению с абсолютным значением дальности компактной струи из диаграммы на рисунке 12 не изменился. Однако несколько иная картина для насадков с диаметром выходного отверстия 19 мм (рис. 13б). Здесь наибольшее соотношение дальности компактной струи и расхода воды получено при использовании насадка НСДК-03.002 типа А с коническим проточным трактом длиной 100 мм.

Следует отметить, что изготовление проточного тракта насадка коноидальной формы отличается особой сложностью и требует обязательного применения дорогостоящих станков с числовым программным управлением. В свою очередь, для производства конического сходящегося насадка можно использовать более простое оборудование, при этом соблюдать все требуемые параметры геометрии и шероховатости детали. Учитывая сказанное, на практике целесообразнее предусматривать именно коническую форму проточного тракта насадка ввиду простоты изготовления и более низкой вероятности отклониться от заданных в конструкторской документации размеров при производстве.

Исключив результаты для насадков с коноидальной формой проточного тракта на диаграмме размаха на рисунке 13а (порядковые номера 2, 4 и 6), можно увидеть, что на первую позицию выходит комплект насадков НСДК-01.000 типа Б (тип А + тип Б) с коническим проточным трактом длиной 50 мм каждый. Разница между коническим и коноидальными насадками (поз. 1 и 2 в табл. 3) по соотношению дальности компактной струи и расхода воды составляет около 3 %. В конечном счете данная разница незначительна и ею можно пренебречь в угоду более простому, точному и дешевому варианту исполнения насадка.

Заключение

В рамках настоящей работы выполнено численное моделирование проточного тракта насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 для формирования компактной струи ОТВ с помощью метода конечных элементов в среде Ansys. На основании результатов моделирования установлено, что наиболее оптимальной геометрией проточного тракта насадка с точки зрения обеспечения наибольшей скорости и сохранения энергии струи воды при заданных давлении (0,45 МПа) и диаметрах входного (40 мм) и выходного (13 мм) отверстий является тот вариант его исполнения, при котором проточный тракт постепенно сужается по всей длине (без участков цилиндрической формы) от входного до выходного отверстия, при этом длина тракта должна быть не более 200 мм.

Для проверки теоретических расчетов разработаны шесть комплектов экспериментальных образцов насадков. В соответствии с методом испытаний, описанным в СТБ 11.13.14, экспериментально определены дальность компактной струи и расход воды для всех экспериментальных образцов насадков. Согласно полученным результатам эксперимента для комплектов насадков с диаметром выходного отверстия 13 мм на каждую единицу расхода воды наибольшая дальность компактной струи соответствует НСДК-02.000 типа Б (тип А + тип Б), состоящего из насадков типа А и Б с коноидальным проточным трактом длиной 50 мм каждый. Для насадков с диаметром выходного отверстия 19 мм наибольшее соотношение «дальность компактной струи / расход воды» получено при использовании насадка НСДК-03.002, тип А, с коническим проточным трактом длиной 100 мм. Учитывая сложность изготовления насадков с коноидальной формой проточного тракта, предложено вместо комплекта коноидальных насадков длиной по 50 мм применять на практике конические аналоги той же длины ввиду незначительной разницы между соотношениями «дальность компактной струи / расход воды» (около 3 %). Также следует отметить, что все экспериментальные образцы насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 обеспечивают нормативную дальность компактной струи и расход воды в соответствии с СТБ 11.13.14.

В результате анализа результатов проведенных исследований можно предположить, что наилучшие показатели дальности и расхода компактной струи могут быть достигнуты при соединении тех составных компонентов комплектов экспериментальных образцов насадков, для которых были получены наибольшие экспериментальные значения соотношения «дальность компактной струи / расход воды», а именно насадок НСДК-03.002 типа А с коническим проточным трактом длиной 100 мм и диаметром выходного отверстия 19 мм и насадок типа Б из комплекта НСДК-02.000 типа Б (тип А + тип Б) с коническим проточным трактом длиной 50 мм и диаметром выходного отверстия 13 мм. Общая длина проточного тракта в итоге составит 150 мм. Экспериментальные исследования такого комплекта насадков являются целью дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с расходом до 5 л/с и возможностью формирования воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон, А.А. Морозов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – Т. 1, № 40. – С. 76–85. – EDN: ZEUEPZ.
2. Морозов, А.А. Методы использования современных ручных пожарных стволов при тушении пожаров / А.А. Морозов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 378–390. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.378. – EDN: ROWESN.
3. Marozau, A. Pump-hose systems with universal fire barrels for extinguishing buildings / A. Marozau, H. Tran Duc, A. Kamluk, V. Parmon, M. Striganova // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 3 (103). – Article 10305. – 9 p. – DOI: 10.34910/MCE.103.5. – EDN: ALXOEJ.
4. Камлюк, А.Н. Расчет и оптимизация геометрии проточного канала пожарного ствола с расходом до 5 л/с / А.Н. Камлюк [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 51–59. – EDN: VKXNTD.
5. Френкель, Н.З. Гидравлика: учебник для вузов / Н.З. Френкель. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
6. Лепешкин, А.В. Гидравлические и пневматические системы: учебник для сред. проф. образования / А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин; под ред. Ю.А. Беленкова. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 336 с.
7. Kotousov, L.S. Measurement of the water jet velocity at the outlet of nozzles with different profiles / L.S. Kotousov // Technical Physics. – 2005. – Vol. 50, No. 9. – P. 1112–1118. – DOI: 10.1134/1.2051447.

Оптимизация геометрии проточного тракта насадков к стволу пожарному ручному СПРУ-50/0,7 для формирования компактной струи огнетушащего вещества

Optimization of the geometry of the flow path of nozzles for the manual firefighting barrel SPRU-50/0.7 to form a compact jet of fire extinguishing agent

Рябцев Виталий Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: v.reabtsev@ucp.by

SPIN-код: 9218-7854

Vitaly N. Ryabtsev

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alexlikh20@gmail.com

SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: oleg.navrotsky@gmail.com

SPIN-код: 4031-1141

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: oleg.navrotsky@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4137-2519

Морозов Артем Александрович

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра ликвидации
чрезвычайных ситуаций, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: morozow974@gmail.com

SPIN-код: 7482-7284

Artem A. Morozov

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Elimination,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: morozow974@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8079-2578

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», заместитель
начальника университета по научной
и инновационной деятельности

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Deputy Chief of the University
on Scientific and Innovative Activity

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

Ильюшонок Александр Васильевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, заведующий кафедрой

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: ilyushonak@ucp.by

SPIN-код: 7209-8335

Alexandr V. Il'yushonok

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: ilyushonak@ucp.by

ORCID: 0000-0001-7523-4483

Гончаренко Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Ihar02@list.ru

SPIN-код: 7194-0240

Igor A. Goncharenko

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences,
Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Ihar02@list.ru

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Шкиндер Олег Вячеславович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
руководящих кадров, магистрант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: asb@ucp.by

Oleg V. Shkinder

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Administration Training Faculty,
graduate student

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: asb@ucp.by

ORCID: 0009-0003-2022-3615

OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF THE FLOW PATH OF NOZZLES FOR THE MANUAL FIREFIGHTING BARREL SPRU-50/0.7 TO FORM A COMPACT JET OF FIRE EXTINGUISHING AGENT

**Ryabtsev V.N., Likhomanov A.O., Navrotskiy O.D., Morozov A.A.,
Kamlyuk A.N., Il'yushonok A.V., Goncharenko I.A., Shkinder O.V.**

Purpose. To develop experimental samples of removable series-connected nozzles with an outlet diameter of 19 (type A) and 13 mm (type B) for the SPRU-50/0.7 manual firefighting barrel and optimize the geometry of its flow path in terms of the range of the compact jet of fire extinguishing agent at a given flow rate. To evaluate the compliance of experimental samples with the requirements of safety standards STB 11.13.14.

Methods. The general methodology of the work included the use of theoretical research methods (analysis, synthesis, comparison). The calculation of the geometric parameters of the flow path of the nozzles was carried out by numerical modeling in Ansys software using the finite element method. The range and flow rate of a compact jet of fire extinguishing agent were determined experimentally using the test method described in STB 11.13.14.

Findings. When numerically modeling the flow path of nozzles to the SPRU-50/0.7 manual firefighting barrel, it was established that to ensure the highest speed and conserve the energy of the water jet at a given pressure (0.45 MPa), inlet (40 mm) and outlet (13 mm) diameters, the flow path should gradually narrow along its entire length without cylindrical sections, and the length of the path should not exceed 200 mm.

The range of the compact jet and water flow rate were experimentally determined for six developed sets of experimental samples of nozzles of various geometries. All samples provide the standard compact jet range and water flow in accordance with STB 11.13.14. It has also been established that for each unit of water flow, the greatest range of a compact jet is achieved when using: a set consisting of series-connected nozzles of type A and B with a conoidal flow path 50 mm long each – to ensure a flow rate of at least 2.7 l/s with an outlet diameter 13 mm; nozzle type A with a conical flow path 100 mm long – to ensure a flow rate of at least 7.4 l/s with an outlet diameter of 19 mm. At the same time, it is shown that instead of a set of conoidal nozzles 50 mm long, in practice it is advisable to use conical analogues of the same length due to the insignificant difference between the indicator “compact jet range/water flow rate” (about 3 %).

Application field of research. Development and optimization of nozzles for firefighting barrels to supply a compact jet.

Keywords: firefighting barrel, nozzle, flow path, compact jet, modeling of fluid movement, flow rate, jet range.

(The date of submitting: October 12, 2023)

REFERENCES

1. Kamlyuk A., Parmon V., Morozov A. Stvol pozharney ruchnoy universal'nyy kombinirovanny s raskhodom do 5 l/s i vozmozh-nost'yu formirovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny [Universal firefighter manual fire barrel combined with a flow rate of up to 5 l/s and the possibility of forming an air-mechanical foam]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2019. No. 1 (40). Pp. 76–85. (rus). EDN: ZEUEPZ.
2. Morozov A.A., Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Striganova M.Yu. Metody ispol'zovaniya sovremennykh ruchnykh pozharnykh stvolov pri tushenii pozharov [Methods of using modern hand-held fire barrels for fire extinguishing]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 4. Pp. 378–390. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.378. EDN: ROWESN.
3. Marozau A., Tran Duc H., Kamlyuk A., Parmon V., Striganova M. Pump-hose systems with universal fire barrels for extinguishing buildings. *Magazine of Civil Engineering*, 2021. No. 3 (103). Article 10305. 9 p. DOI: 10.34910/MCE.103.5. EDN: ALXOEJ.
4. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Striganova M.Yu., Shirko A.V., Morozov A.A. Raschet i optimizatsiya geometrii protochnogo kanala pozharного stvola s raskhodom do 5 l/s [Calculation and optimization of the geometry of the flow channel at a rate of fire of the barrel to 5 l/s]. *Vestnik Komandno-inzhener'nogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 51–59. (rus). EDN: VKXNTD.

5. Frenkel' N.Z. *Gidravlika* [Hydraulic]: textbook. 2nd ed. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 456 p. (rus)
6. Lepeshkin A.V., Mikhaylin A.A. *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy* [Hydraulic and pneumatic systems]: textbook. Ed. by Belenkov Yu.A. Moscow: Publishing Center «Akademiya», 2004. 336 p. (rus)
7. Kotousov L.S. Measurement of the water jet velocity at the outlet of nozzles with different profiles. *Technical Physics*, 2005. Vol. 50, No. 9. Pp. 1112–1118. DOI: 10.1134/1.2051447.