

Научная статья
УДК 614.842.612
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2024.25.24.012

Научные основы поиска технических решений дальних водяных струй

Сергей Петрович Амельчугов

Алексей Николаевич Батуро

Николай Викторович Мартинович

Юлия Николаевна Коваль

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия,

Автор ответственный за переписку: Сергей Петрович Амельчугов, asp-911@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема подачи воды на пожарах компактными струями. Дальность подачи воды пожарным стволом является ключевым фактором при тушении крупных пожаров, а также пожаров с высокой интенсивностью теплового излучения и возможными взрывами. В таких условиях важно обеспечить максимальную эффективность и дальность подачи воды и тем самым безопасность работы пожарных. Предложен новый способ расчета технических характеристик насадка пожарного ствола, позволяющий улучшить параметры подачи воды. Приведены результаты экспериментов, которые подтверждают эффективность предложенного метода. Для повышения дальности полета струи из насадка пожарного ствола его необходимо проектировать с таким условием, чтобы число Рейнольдса по длине насадка изменялось равномерно. Экспериментально установлена оптимальная длина конической части насадка для обеспечения максимальной дальности струи. Установлено, что для стволов с большим расходом, необходимо многослойное внутреннее тело. Предложено решение в виде насадка представляющего из себя конфузور с внутренними конфузорами расчетного профиля по сечению.

Ключевые слова: осмотр места пожара, нормативная пожарно-техническая экспертиза, требование пожарной безопасности, анализ

Для цитирования: Амельчугов С.П., Батуро А.Н., Мартинович Н.В., Коваль Ю.Н. Научные основы поиска технических решений дальних водяных струй // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 3 (34). С. 142-148. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.25.24.012>.

Original article

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF THE SEARCH FOR TECHNICAL SOLUTIONS FOR LONG-RANGE WATER JETS

Sergey P. Amelchugov

Alexey N. Baturо

Nikolai V. Martinovich

Yulia N. Koval

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Sergey P. Amelchugov, asp-911@yandex.ru

Abstract. The article addresses the issue of water delivery during firefighting operations using compact jets. The range of water delivery from a fire hose is a key factor in extinguishing large fires, as well as in situations involving high thermal radiation intensity and potential explosions. Under such conditions, it is crucial to ensure maximum efficiency in water delivery, thereby enhancing the safety of firefighting personnel. A novel method for calculating the technical characteristics of fire hose nozzles is proposed, which allows for the improvement of water delivery parameters. Experimental results confirming the effectiveness of the proposed method are presented. To increase the range of the jet from the fire hose nozzle, it is necessary to design the nozzle such that the Reynolds number changes uniformly along its length. The optimal length of the conical section of the nozzle for achieving maximum jet range has been experimentally established. It has been determined that for nozzles with a high flow rate, a multi-layered internal body is required. A solution is proposed in the form of a nozzle that consists of a diffuser with internal diffusers designed with a calculated cross-sectional profile.

Keywords: fire scene inspection, regulatory fire-technical expertise, fire safety requirements, analysis

For citation: Amelchugov S.P., Baturo A.N., Martinovich N.V., Koval Yu.N. Scientific foundations of the search for technical solutions for long-range water jets // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2024. № 3 (34). С. 142-148. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.25.24.012>.

Дальность подачи воды пожарным стволом крайне существенна при тушении крупных пожаров, пожаров с высокой интенсивностью теплового излучения, а также тушения пожаров с возможными взрывами. Однако необходимость получения дальних струй важна не только в пожарном деле, компактные струи используют для гидродобычи полезных ископаемых, в сельском хозяйстве и даже для защиты судов от морских пиратов.

Полет водяной струи определяют сопротивление воздуха, угол струи относительно горизонта, скорость истечения из насадка пожарного ствола и направления внутренних струй [1-4].

При рассмотрении эти составляющих, следует обратить внимание, что дальность водяной струи зависит от компактности водяной струи, а наилучшая практическая дальность получается при угле наклона ствола примерно 30-34° [5]. Компактные струи, получаемые от комбинированных или универсальных пожарных стволов, выполненных по технологии «jet fog», очень зависимы от скорости ветра, а в ряде случаев, например, при тушении встречных лесных пожаров струя воды не долетает до кромки пожара [6], что крайне небезопасно для самих пожарных.

Поэтому в данной статье, рассмотрены скорость истечения воды из насадка пожарного ствола и направления внутренних течений сплошной водяной струи. В задачи публикации не входил обзор всего разнообразия элементов конструкций пожарных стволов обеспечивающие увеличение дальности полета сплошной водяной струи и для краткости повествования эта информация не приводится.

Как показывают исследования, при истечении жидкости из цилиндрической части насадка – sprays, максимальная скорость находится на оси sprays. У стенок sprays скорость равна нулю, т.к. частицы жидкости покрывают внутреннюю поверхность sprays тонким неподвижным слоем. От стенок sprays к ее оси скорости нарастают плавно [3]. График распределения скоростей по поперечному сечению потока представляет собой параболоид вращения, а сечение параболоида осевой плоскостью - квадратичную параболу (Рис.1).

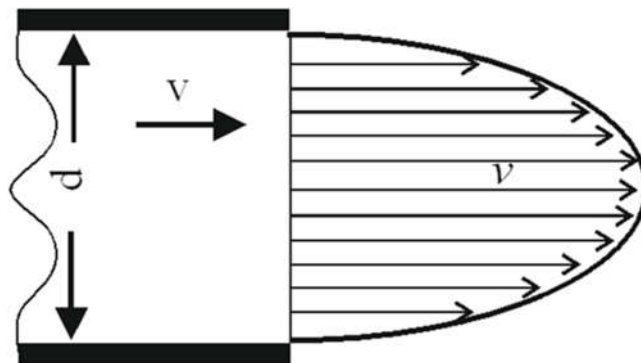


Рис.1. Схема для рассмотрения истечения потока из насадка, где d – внутренний диаметр sprыска, V – средняя скорость истечения, V – мгновенная скорость частиц воды.

Из анализа следует, что разность скоростей частиц воды при внезапном расширении приводит к разрушению компактной части струи, т.е. на выходе из sprыска насадка частицы воды, находящиеся в центре sprыска и обладающие большей скоростью, чем частицы, находящиеся на периферии, помимо осевого движения, в силу законов гидродинамики, приобретают вектор поперечного движения. Это приводит к преждевременному разрушению целостности летящей струи и кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование. При этом наблюдается следующая зависимость, чем больше скорость, тем больше хаотичных внутренних течений на выходе из насадка, приводящей к разрушению компактной части струи.

Следовательно, для обеспечения максимальной дальности необходимо решить двуединую задачу: усреднить внутренние потоки и увеличить скорость потока воды.

Использовались следующие результаты научных исследований: известно, что критическое значение Рейнольдса для воды для цилиндрической трубы равно 2200, при кинематической вязкости пресной воды при $t=20^{\circ}\text{C}$, которая составляет около $106 \text{ м}^2/\text{с}$. Однако, исследователи [7;8], изучая вопросы гидродинамики подводного крыла и аэродинамики крыла, движущегося над границей раздела установили, что около передней поверхности крыла Рейнольдс составляет 10000, а для судов и их моделей характерны более высокие числа Рейнольдса ($Re - 1010$ — суда; $Re - 107$ — модели).

Таким образом, если рассматривать физическую природу Re , то она напрямую связана кинематической вязкостью воды. Предположено, что в насадке, вследствие сжатия струи происходит снижение вязкости воды. Т.е. часть кинетической энергии движения воды, задаваемой насосом, идет на преодоление внутреннего трения, а, следовательно, тангенциальной вязкости – оказывающей сопротивление сдвигающему усилию. Таким образом, физический смысл уравнения Рейнольдса сводится к характеристикам молекулярного взаимодействия жидкости. При формировании струи в насадке пожарного ствола происходит её сжатие и увеличение скоростного давления, которое приводит к изменению вязкости и критического значения Рейнольдса.

Поэтому, следует ожидать, что при определенных условиях возможно обеспечить квазиламинарное движение воды по всей длине насадка пожарного ствола. Этими условиями является устройство насадка, при котором его геометрия изменяется таким образом, что критерий Re изменяется равномерно. Предложен насадок пожарного ствола равноускоренного значения критерия Рейнольдса, при этом принимается, что ламинарное течение воды характеризуется критическим значением.

Однако изменение числа Рейнольдса при изменении кинетического давления мало исследовано, по крайней мере, в открытых источниках. Поэтому рассмотрено изменение потока воды при сжатии в насадке пожарного ствола.

Принимается, что критерий Рейнольдса характеризуется уравнением 1,

$$Re = V/dv \quad (1)$$

где:

V – характерная скорость, м/с

d – внутренний диаметр трубы, м

v – кинематическая вязкость м²/с

Критическое значение Рейнольдса для воды для цилиндрической трубы равно 2200, а кинематическая вязкость пресной воды при $t=20^{\circ}\text{C}$ составляет примерно 106 м²/с. Предполагается, что в насадке пожарного ствола с равномерным изменением числа Рейнольдса, оно меняется с 2200 на входе до 10000 на выходе.

Скорость потока воды в насадке пожарного ствола определяется из формулы 2,

$$V = 0,25 \cdot 10^{-6} Q / d^2 \quad (2)$$

где:

Q – расход, м³/с;

d – внутренний диаметр насадка, м.

Таким образом, для пожарного ствола изменение числа Рейнольдса следует из зависимости 3,

$$Re = 7,85 \cdot 10^{-5} d^3 \cdot Q \quad (3)$$

Следует обратить внимание, что физическая характеристика сплошности потока определяется кубичной зависимостью от диаметра. Известно, что в практике производства пожарных стволов применяются конические насадки с одномерным изменением формы насадка или эвольвентным с двумерным изменением формы насадка. Однако из формулы 3 следует, что необходимо трехмерное изменение формы насадка.

Поэтому разработан насадок пожарного ствола с внутренним обтекателем. В целях минимизации затрат на производство, насадок пожарного ствола имеет коническую часть 12° и обтекатель в соответствии формулы 4 в зависимости от расчетного расхода.

$$Q = Re / 7,85 \cdot 10^{-5} d^3 \quad (4)$$

Проведены экспериментальные исследования насадков стволов с производительностью до 45 м³/ч (12,5 л/с). Схема насадка представлена на Рис.2. Длина конической части L составляла 120 мм, длина sprыска $L_c = 20$ мм, длина цилиндрической части на входе (трубы) $L_t = 20$ мм, диаметр струи на входе $D_t = 65$ мм, диаметр струи на выходе $D_c = 22$ мм.

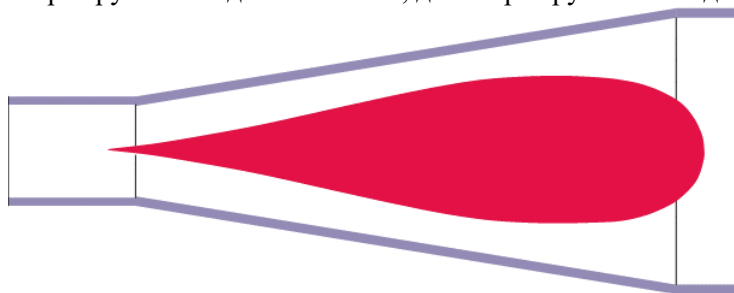


Рис.2. Схема насадка с равноускоренным числом Рейнольдса.

Наилучшую дальность показал насадок с внутренним телом близким к профилю NASA-2212, дальность полета струи (по крайним каплям) составила 62 м, при давлении 6 атм и расходе 43 м³/ч (12 л/с).

На основании экспериментов получено оптимальное изменение средней скорости движения потока в насадке (см. Рис.3).

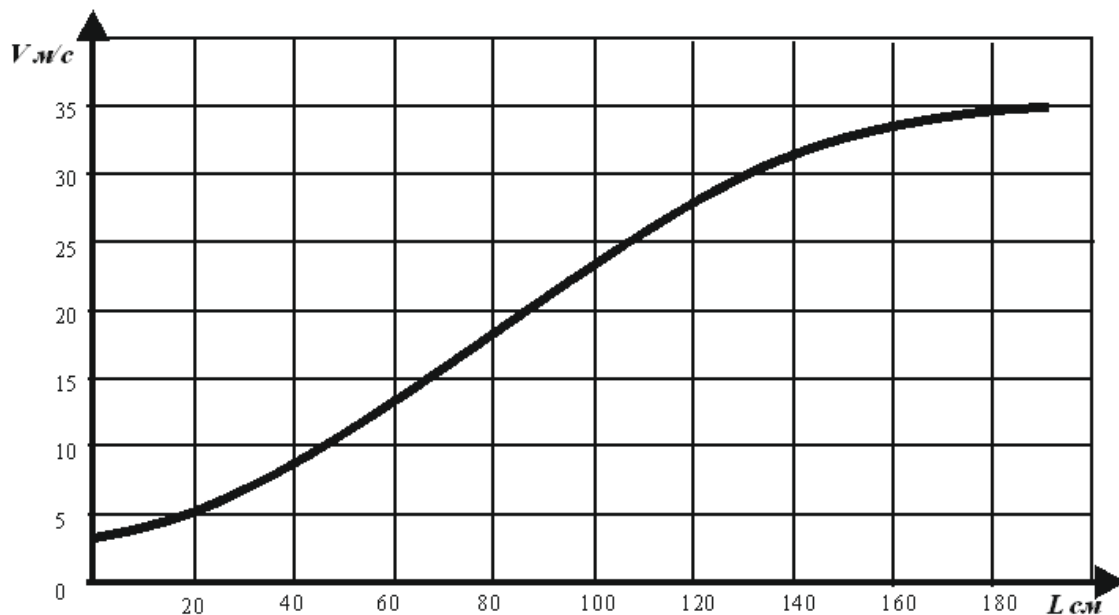


Рис.3. График изменения скорости потока по длине насадка с равноускоренным числом Рейнольдса

Таким образом, на основе экспериментов установлена оптимальная длина конической части. Так, для насадка с входящим диаметром 66 мм и выходным отверстием диаметром 22 мм оптимальная длина конической части составляет 120 мм.

Выявление области уменьшения скорости центральных частиц потока воды определялось изменением шероховатости и/или введением продольных полос и уменьшением кольцевого пространства.

Экспериментально установлено, что увеличение шероховатости и продольные полосы на внутреннем теле при малых скоростях потока приводят к увеличению дальности струй, однако по достижению критических скоростей в потоке возникают турбулентные течения, и струя распадается.

Установлено, что небольшое вихреобразование и отрыв потока от стенки с одновременным сжатием потока возникает лишь на выходе из конфузора [9] в месте соединения конической трубы с цилиндрической. Для создания лучших условий для формирования сплошной струи внутреннюю часть поверхности входа конуса в цилиндр следует профилировать [10-12].

Для выравнивания струйных потоков на выходе из насадка необходим спрыск – цилиндр длиной не менее 2-3 d. Однако, истечение воды из насадка зависит от характера изменения скорости в пограничном слое. Поэтому дополнительным техническим решением является формирование двухфазного потока (вода-воздух) в пограничном слое. Для этого внутренний диаметр спрыска должен быть на 1,5-2,4 мм больше выходного отверстия насадка, как представлено на рис. 5. Наружная часть насадка заканчивается реданом, с углом 60 градусов. Таким образом, струя выходящая из насадка доформируется внутри спрыска, при этом за счет эжекции воздуха на внутренней поверхности спрыска образуется 2-х фазный поток, благоприятно сказывающийся на трении потока воды о стенки спрыска

Также спрыск обеспечивает защиту внутреннего тела от механических воздействий (Рис.4).

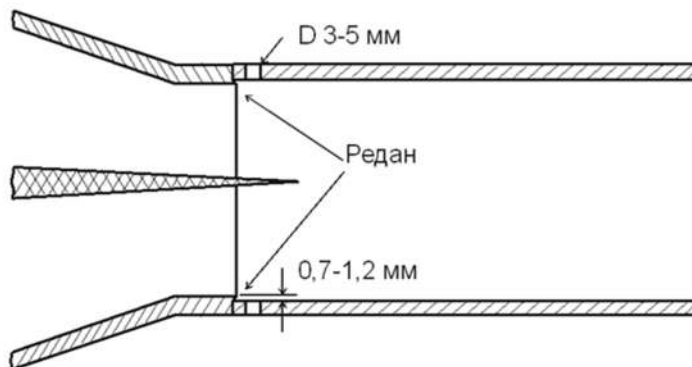


Рис.4. Схема срезки.

Результатом исследования стало получение насадка пожарного ствола, компактная струя которого усреднена (см. Рис.5) по сплошности квазиламинарного потока, при этом скорость этого потока на выходе из насадка увеличилась. Характерным свойством данного потока явилась прозрачность получаемой струи.

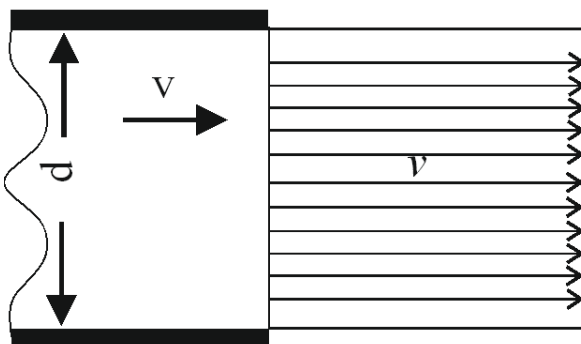


Рис.5. Схема для рассмотрения истечения потока из насадка с равноускоренным числом Рейнольдса, где d – внутренний диаметр срезки, v – средняя скорость истечения, V – мгновенная скорость частиц воды.

Таким образом, задача получения компактной струи, сохраняющей сплошность в полете на расстояние более чем в 1,5 раза превышающее показатели лучших представителей пожарных стволов решена.

Вывод

Для повышения дальности полета струи из насадка пожарного ствола его необходимо проектировать с таким условием, чтобы число Рейнольдса по длине насадка изменялось равномерно.

Для стволов с большим расходом, необходимо многослойное внутреннее тело. Ожидается, что насадок большой дальности водяной струи будет представлять конфузор с внутренними конфузорами расчетного профиля по сечению.

Список источников

1. Степанов В.И., Варганов В.А. Анализ условий подвода огнетушащего вещества к насадку лафетного ствола // Пожарная техника, средства и способы пожаротушения. - М.: ВНИИПО, 1992. - с. 31-35.
2. Иванов Е.Н. Противопожарное водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1986. - 316 с.
3. Тарасов-Агалаков Н.А. Практическая гидравлика в пожарном деле. - М.: Издательство МКХ РСФСР, 1959 г.
4. Ходаков В.Ф. Гидравлика в пожарном деле. - М.: ВШ МООН РСФСР, 1965. - 204 с.

5. Stenstrom B., Salen & Wikander A.V. Пат. 151140, Норвегия, Расположение трансверсака в режиме vaesketstrale // Пожарный ствол с повышенной дальностью и компактностью выбрасываемой водяной струи. 1976.
6. Дзикас Н.М., Щебеко Н.Д., Кисель А.С., Введенский Н.Д., Астахов Г.И. Пожарная техника. - М.: ЦНИИТЭ Строймаш, 1974, - 660 с.
7. Ван Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. М., Мир, 1967, 310 с.
8. Басин М.А., Шадрин В.П. Гидроаэродинамика крыла вблизи границы раздела сред. Издательство: Л.: Судостроение, 1980, - 304 с.
9. Патент SU 1797922 A1 - СССР, опубликован 1993.02.28, Хосанов Х.Х., Петухов С.В., СССР, Устройство для подачи огнегасительного вещества.
10. Патент SU629936A1, опубликован 1978.10.30, Заявитель: Ермаков Ю.М., СССР, Насадок для подачи жидкости.
11. Ермаков Ю.М., Насадок закручивающий воду винтом делает гидранты и брандспойты значительно эффективней. Изобретатель и рационализатор. №11, 1982, с. 24-25 с.
12. Патент RU 96107542 А, опубликован 1998.04.27, Заявитель: Ермаков Ю.М., СССР Насадок к устройству для подачи подвижном среды Изобретатель.

References

1. Stepanov V.I., Varganov V.A. Analysis of conditions for delivering fire extinguishing agents to the nozzle of a monitor // Fire Equipment, Means and Methods of Firefighting. – Moscow: VNIPO, 1992. pp. 31-35.
2. Ivanov E.N. Firefighting Water Supply. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 316 p.
3. Tarasov-Agalakov N.A. Practical Hydraulics in Firefighting. – Moscow: Publishing House of the Ministry of Housing and Communal Services of the RSFSR, 1959.
4. Khodakov V.F. Hydraulics in Firefighting. – Moscow: Higher School of the Ministry of Internal Affairs of the RSFSR, 1965. – 204 p.
5. Stenstrom V., Salen & Wikander A.V. Pat. 151140, Norway, Arordmng fon transversak sammenholding av vaesketstrale // Fire Nozzle with Increased Range and Compactness of the Water Jet, 1976.
6. Dzikas N.M., Shebeko N.D., Kisel A.S., Vvedensky N. D., Astakhov G.I. Fire Equipment. – Moscow: TsNIITE Stroy mash, 1974. – 660 p.
7. Van Dyke M. Perturbation Methods in Fluid Mechanics. – Moscow: Mir, 1967. – 310 p.
8. Basin M.A., Shadrin V.P. Hydroaerodynamics of the Wing near the Interface Boundary. – Leningrad: Shipbuilding, 1980. – 304 p.
9. Patent SU 1797922 A1 – USSR, published 1993.02.28, Khosanov Kh.Kh., Petukhov S.V., USSR, Device for Supplying Fire Extinguishing Agent.
10. Patent SU 629936 A1, published 1978.10.30, Applicant: Ermakov Yu.M., USSR, Nozzle for Supplying Liquid.
11. Ermakov Yu.M. Screw-Type Nozzle for Water Twisting Makes Hydrants and Nozzles Significantly More Effective // Inventor and Innovator, No. 11, 1982, pp. 24-25.
12. Patent RU 96107542 A, published 1998.04.27, Applicant: Ermakov Yu.M., USSR, Nozzle for Supplying a Moving Medium.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.07.2024, одобрена после рецензирования 20.08.2024, принята к публикации 30.08.2024.

The article was submitted 27.07.2024, approved after reviewing 20.08.2024, accepted for publication 30.08.2024.