

УДК 614.843(476)

Г. Н. Здор, А. В. Потеха

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ НАКЛОННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СТРУИ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Во введении указан предмет исследования – геометрические характеристики траектории гидравлической струи, формируемой лафетными стволами пожарных роботов, и обозначена проблема, заключающаяся в сложности определения траектории наклонной струи, поскольку очевидна необходимость принимать во внимание значительное число факторов, влияющих на движение струи в воздухе и обуславливающих ее разрушение. Целью исследования является уточнение зависимостей для расчета траектории наклонной струи путем оценки влияния действующей силы трения, возникающей на ее боковой поверхности при движении в воздухе. Исследования базируются на представленной методике, в основу которой положена теорема импульсов, учитывающая силу трения, возникающую в пограничном слое воздуха, образуемом у поверхности струи. В основной части работы по итогам проведенных исследований получены выражения для расчета коэффициента трения в зависимости от ламинарного или турбулентного состояния пограничного слоя, использование которых в формулах для нахождения траектории наклонной струи позволяет построить кривую, представляющую собой ось свободной струи, выпущенной под углом к горизонту. Практическая проверка итоговых выражений для расчета траектории струи была проведена для случая ее формирования лафетным стволом пожарного робота с расходом 40 л/с при рабочем давлении 0,6 МПа. Результаты сравнения полученных теоретических траекторий с экспериментальными позволяют говорить об их совпадении в пределах погрешности измерений для компактного участка наклонной струи. В заключении отмечена возможность применения полученных результатов для расчета траектории компактной части гидравлических струй, формируемых лафетными стволами пожарных роботов, используемых для противопожарной защиты высокопролетных объектов и сооружений различного назначения.

Ключевые слова: гидравлическая наклонная струя, траектория, координаты, сила трения, коэффициент трения, лафетный ствол, пожарный робот.

Введение. Водяные струи, используемые для целей пожаротушения, отличаются своей компактностью, большой дальностью полета и сильным динамическим воздействием. Для оценки эффективности пожарных струй при локализации или ликвидации возгораний на объекте, а также орошении конструкций либо оборудования рассчитываются их гидравлические параметры, на основании которых выбираются те или иные проектные решения. При расчете гидравлических струй основными определяемыми геометрическими характеристиками являются: высота и дальность полета, радиусы действия компактной и раздробленной частей струи [1]. Соответствующие методики достаточно распространены на практике и приведены в литературных источниках, например [2; 3].

С точки зрения пожаротушения наиболее полезной информацией о движении струи жидкости в воздухе будут данные о траектории ее полета. Однако расчет траектории представляется весьма затруднительным, и до сих пор не удалось аналитически получить уравнение траектории струи вследствие неизученности законов сопротивления,

Здор Геннадий Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. робототехнических систем БНТУ (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: rts@bntu.by

Потеха Алексей Валентинович, ассистент каф. технической механики и материаловедения ГГАУ (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Терешковой, 28, 230008, г. Гродно, Беларусь; e-mail: potekha_av@mail.ru

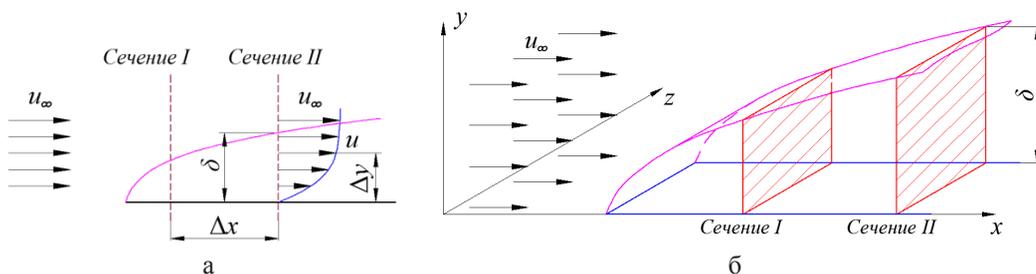
возникающих при ее движении в воздухе и обуславливающих ее разрушение. В настоящее время расчет траекторий струи основывается на эмпирических данных [4].

Для обеспечения пожарной безопасности высокопролетных объектов различного назначения с помощью стационарных роботизированных систем существует необходимость обоснованной расстановки минимально необходимого числа роботизированных устройств пожаротушения (пожарных роботов – ПР) с целью получения наиболее экономичных проектных решений [5]. В связи с этим размещение ПР на объекте является одним из важнейших этапов проектирования роботизированных систем пожаротушения (РСП), на котором выполняется построение карт орошения и производится оценка досягаемости каждой точки контролируемого пространства. Для высокопролетных сооружений эта задача усложняется их техническими характеристиками (высота, объем, площадь, вместимость, протяженность и др.) и функциональным назначением, что привело к необходимости разработки методики объемного размещения стационарных пожарных роботов на основе определения траектории гидравлической струи [6]. Проверка согласованности полученных результатов с экспериментальными данными может быть осуществлена с учетом ранее проведенных исследований [7].

Целью настоящей работы является получение уравнений траектории гидравлической струи с учетом действующей на ее боковой поверхности силы трения воздуха, которая является одной из основных составляющих в суммарном сопротивлении, испытываемом свободной струей, а итоговые результаты могут быть использованы при моделировании противопожарной защиты высокопролетных зданий и сооружений с применением роботизированных систем.

Методика исследований. Тело, движущееся в среде, встречает со стороны последней сопротивление (полное), обусловленное изменением направления обтекания (сопротивление давления) и возникающей на боковых поверхностях тела тангенциальной силой трения (сопротивление трения) [2]. Поскольку по мере удаления струи от места выпуска ее характеристики (геометрические и динамические) изменяются, то очевиден переменный характер коэффициента полного сопротивления.

Для нахождения аналитического выражения по определению коэффициента трения в воздухе k гидравлической струи, выпускаемой под углом к горизонту из насадка лафетного ствола пожарного робота, была разработана соответствующая методика, в которой рассматривается примыкающий к струе слой воздуха. В основу методики положена теорема об изменении количества движения (теорема импульсов), в соответствии с которой разность количеств движения вязкой среды, перемещающейся за единицу времени через два параллельных сечения потока, расположенных на определенном расстоянии Δx друг от друга, должна равняться сумме импульсов всех сил, действующих на участок, ограниченный этими сечениями (рисунок 1) [8].



Пояснения: u_∞ – скорость набегающего потока; u – скорость движения потока; в произвольной точке пограничного слоя; δ – толщина пограничного слоя.

Рисунок 1 – Пояснение к теореме об изменении количества движения

В расчетах учитывается сила трения, возникающая в пограничном слое воздуха толщиной δ , который образуется у поверхности струи. Искомая разность количеств движения воздуха, протекающего за единицу времени через первое и второе сечения потока, выразится интегралом, учитывающим площадь пограничного слоя по одну сторону поверхности:

$$\iint_S \rho u (u_\infty - u) dy dz,$$

где u – скорость движения воздуха в произвольной точке пограничного слоя толщиной δ , удаленной от поверхности струи на расстояние Δy , м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $dy dz$ – элементарная площадка сечения Π потока; S – область интегрирования, представляющая собой площадь пограничного слоя, образуемую при его сечении плоскостью, перпендикулярной оси x , и определяемая координатами y и z .

Трение струи о воздух той части поверхности, которая заключена между сечениями I и II , определяется выражением

$$F_{mp} = \iint_G \tau_0 dx dz, \quad (1)$$

где τ_0 – напряжение трения на произвольном элементе поверхности, Па; G – область интегрирования, представляющая собой площадь обтекаемой поверхности, заключенную между сечениями I и II .

В соответствии с теоремой импульсов имеет место равенство

$$\iint_S \rho u (u_\infty - u) dy dz = \iint_G \tau_0 dx dz. \quad (2)$$

Согласно закону вязкого трения Ньютона, касательное напряжение на поверхности

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} = \mu \frac{u_\infty}{\delta}, \quad (3)$$

где μ – абсолютная (динамическая) вязкость среды, Па·с; $\frac{du}{dy}$ – градиент скорости, характеризующий интенсивность изменения скорости поперек направления движения, с⁻¹.

При определении коэффициента трения в воздухе k используется формула для расчета величины трения

$$F_{mp} = k \omega \rho \frac{u_\infty^2}{2}, \quad (4)$$

где k – коэффициент трения; ω – площадь обтекаемой поверхности, м².

Из (4) следует, что

$$k = \frac{F_{mp}}{\omega \rho \frac{u_\infty^2}{2}}.$$

С учетом (1) и (2) видно, что коэффициент k является функцией от координаты x :

$$k(x) = \frac{F_{mp}(x)}{\omega \rho \frac{u_\infty^2}{2}}. \quad (5)$$

Исходя из практической целесообразности, для нахождения площади обтекаемой поверхности осесимметричной струи вводится допущение, а именно: струя представляется в виде изогнутого усеченного конуса с радиусами R большего основания и r – меньшего (рисунок 2а), а площадь его боковой поверхности определяется как площадь боковой поверхности усеченного конуса, полученного при выпрямле-

нии его оси, которая в рассматриваемой модели представляет собой ось струи жидкости (рисунок 2б).

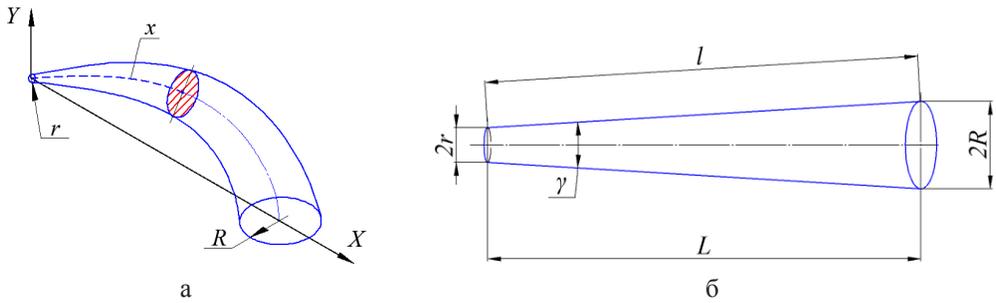


Рисунок 2 – Наклонная струя (а) и размеры конуса, полученного при ее выпрямлении (б)

Предложенная методика позволяет получить выражение для расчета коэффициента k для случаев ламинарного и турбулентного состояний пограничного слоя, а также при необходимости позволяет учитывать уменьшение скорости набегающего потока после прохождения начального участка струи, связанное с возрастанием сил сопротивления воздуха.

Основная часть. Величина силы трения обуславливается характером движением воздуха в пограничном слое [9]. Необходимо определить площадь наружной поверхности струи для нахождения величины сопротивления трения. Для этого представляем ее в виде плоской развертки боковой поверхности конуса длиной L и углом сектора φ (рисунок 3).

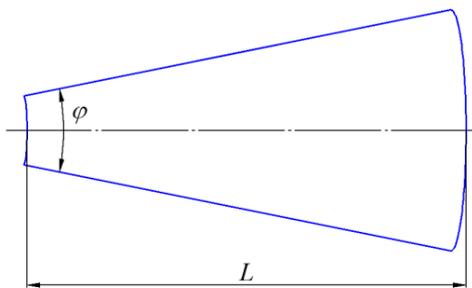


Рисунок 3 – Развертка боковой поверхности струи

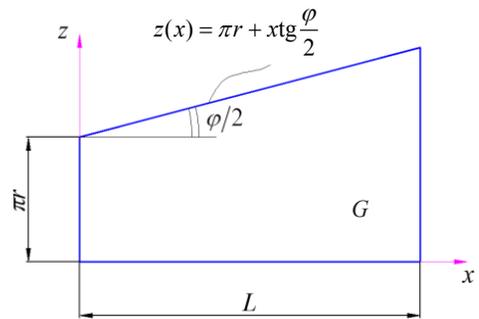


Рисунок 4 – Форма и размеры симметричной половины развертки боковой поверхности струи

Учитывая малость длины дуг окружностей, ограничивающих боковую поверхность струи со стороны ее торцов, по сравнению с ее длиной L , заменяем их прямыми отрезками, что с практической точки зрения упрощает определение искомой площади. В итоге форма и размеры симметричной половины развертки боковой поверхности струи будут представлять собой прямоугольную трапецию G (рисунок 4).

Для аналитического определения ширины поверхности (координаты z) в произвольной точке по длине L (координата x) используется уравнение $z(x) = \pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$.

Тогда площадь ω рассматриваемой поверхности G (рисунок 4) может быть найдена из выражения

$$\omega = \int_0^L \left(\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) dx = x \left(\pi r + \frac{x}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right). \quad (6)$$

Пограничный слой воздуха толщиной δ распространяется у поверхности струи, на которой выделяем два сечения потока: сечение $I-I$ – в начале поверхности, там, где скорость равна скорости набегающего потока u_∞ , и сечение $II-II$ – на расстоянии $\Delta x'$ от края поверхности (рисунок 5).

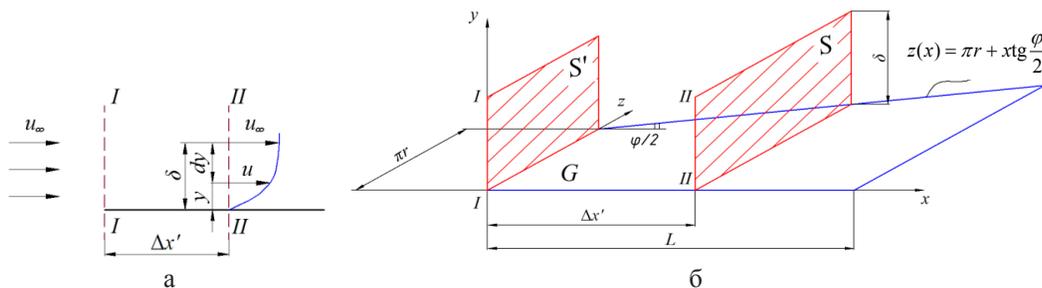


Рисунок 5 – Расположение сечений пограничного слоя воздуха у наружной поверхности струи

Искомая разность количеств движения воздуха, протекающего за единицу времени через первое ($I-I$) и второе ($II-II$) сечения потока, выразится интегралом

$$2 \iint_S \rho u (u_\infty - u) dy dz, \quad (7)$$

учитывающим площадь пограничного слоя у внешней поверхности струи.

В формуле (7) множитель 2 учитывает полную боковую поверхность рассматриваемой развертки конуса струи, симметричная половина которой показана на рисунке 4.

В данном случае область интегрирования S – площадь пограничного слоя в его поперечном сечении с размерами δ (по координате y) и $\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$ (по координате z).

При этом устанавливаются следующие ограничения: $0 \leq y \leq \delta$; $0 \leq z \leq \pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$, с учетом которых выражение (7) можно представить в виде

$$2 \iint_S \rho u (u_\infty - u) dy dz = 2\rho \left(\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \int_0^\delta u (u_\infty - u) dy.$$

Сопротивление, вызванное трением той части поверхности, которая заключена между сечениями $I-I$ и $II-II$, определяется выражением (1), для которого в соответствии с рисунком 5 соблюдаются условия: $0 \leq x \leq L$; $0 \leq z \leq \pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$.

В соответствии с теоремой импульсов и выражением (2) получаем

$$\rho \left(\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \int_0^\delta u (u_\infty - u) dy = \int_0^x \tau_0 \left(\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) dx. \quad (8)$$

После преобразований из (8) получаем выражение для напряжения силы трения τ_0 :

$$\frac{\rho \left(\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \frac{d}{dx} \int_0^\delta u (u_\infty - u) dy + \rho \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \int_0^\delta u (u_\infty - u) dy}{\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \tau_0. \quad (9)$$

Учет состояния пограничного слоя в расчетах коэффициента трения ведется в соответствии со значением числа Рейнольдса, которое является определяющим параметром не только для количественных характеристик пограничного слоя, но и для самого характера течения. В зависимости от ламинарного и турбулентного состояний пограничного слоя в дальнейших расчетах по рекомендациям [10] приближенно принимаются линейный и степенной законы распределения скоростей.

На основании выражений (3) и (9) после необходимых преобразований получаем формулу для расчета толщины пограничного слоя δ .

При ламинарном состоянии пограничного слоя значение δ определяется выражением

$$\delta = \frac{2}{\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{\nu x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)}{u_\infty}}, \quad (10)$$

где ν – кинематическая вязкость среды (воздуха), $\text{м}^2/\text{с}$.

В случае турбулентного состояния пограничного слоя значение δ определяется выражением

$$\delta = \frac{2,62}{\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{\nu x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)}{u_\infty}}. \quad (11)$$

При этом скорость потока, обтекающего поверхность, принимается равной скорости на оси струи, которая для случая $x \leq 145d_0$ считается равной начальной скорости движения струи ($u_\infty = v_0$), а для значений $x > 145d_0$ является величиной переменной ($u_\infty = u_x$) и может быть определена по рекомендациям [3]:

$$u_x = \frac{145v_0 d_0}{\Delta x_0},$$

где v_0 – скорость движения струи в выходном сечении насадка, $\text{м}/\text{с}$; d_0 – диаметр в начальном сечении струи, равный диаметру выходного сечения насадка, м ; Δx_0 – расстояние от насадка лафетного ствола до рассматриваемого сечения струи, измеренное по длине ее оси, м .

На основании полученных выражений (3), (10) и (11) полное трение на рассматриваемой поверхности для ламинарного состояния пограничного слоя:

$$F_{mp} = \frac{2}{3} \sqrt{u_\infty^3 \mu \rho x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)},$$

для турбулентного состояния пограничного слоя:

$$F_{mp} = 0,5 \sqrt{u_\infty^3 \mu \rho x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)}.$$

В итоге с учетом (5) и (6) получаем формулы для расчета коэффициента трения k . Для ламинарного состояния пограничного слоя коэффициент k рассчитывается следующим образом:

$$k = \frac{8}{3x \left(2\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)} \sqrt{\frac{\nu x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)}{u_\infty}},$$

а для турбулентного состояния пограничного слоя:

$$k = \frac{2}{x \left(2\pi r + x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)} \sqrt{\frac{\nu x \left(3\pi^2 r^2 + 3\pi r x \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)}{u_\infty}}. \quad (12)$$

Применим полученные результаты для расчета коэффициента трения в случае, когда наклонная струя, формируемая лафетным стволом ПР с расходом 40 л/с при рабочем давлении 0,6 МПа, выпускается из насадка с диаметром $d_0 = 94$ мм.

Основываясь на исходных данных при сравнении числа Рейнольдса для рассматриваемого случая с его критическим значением ($Re > Re_{кр} \approx 10^5 \dots 10^6$) на основании рекомендаций [11] режим пограничного слоя считается турбулентным, в связи с чем расчет k ведем по формуле (12), для которой задаем следующие параметры: ν – кинематическая вязкость воздуха, при температуре 20 °C $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; r – радиус насадка лафетного ствола ПР:

$$r = \frac{d_0}{2} = \frac{0,094}{2} = 0,047 \text{ (м)};$$

φ – угол сектора развертки боковой поверхности струи (рисунок 3), определяемый из ее геометрических характеристик:

$$\varphi = 360^\circ \frac{R}{l} = \frac{360^\circ}{x} \left(r \cos \frac{\gamma}{2} + x \sin \frac{\gamma}{2} \right),$$

где γ – угол раскрытия струи; l – длина образующей конуса струи (рисунок 2б).

В связи с отсутствием рекомендаций и сложностью аналитического определения угла раскрытия свободной гидравлической струи, зависящего в том числе и от конструкции насадка, значение угла γ для данного расчета определено экспериментально ($\gamma = 6^\circ$).

Результаты расчетов коэффициента k для случая постоянной скорости ($u_\infty = v_0$) и с учетом ее уменьшения после начального участка ($u_\infty = u_x$) представлены в виде графиков, иллюстрирующих зависимость изменения коэффициента трения по длине струи (рисунки 6 и 7 соответственно).

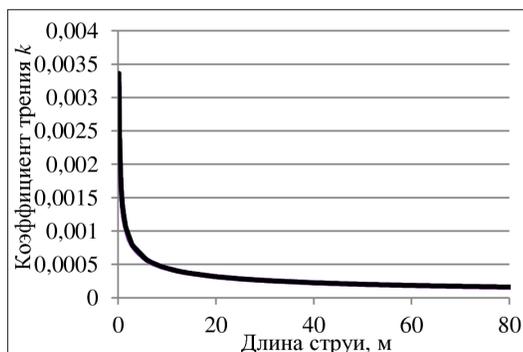


Рисунок 6 – Изменение коэффициента трения по длине струи при постоянной скорости потока

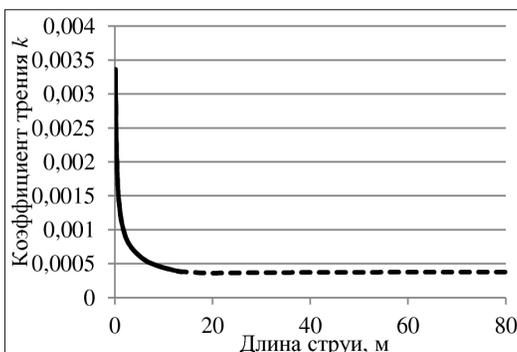


Рисунок 7 – Изменение коэффициента трения по длине струи при уменьшающейся скорости потока

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что на участке, где происходит постепенное снижение скорости, значения коэффициента трения k выравниваются, достигая практически постоянной величины, о чем свидетельствует штриховой участок кривой на рисунке 7.

Закон движения частиц свободной струи в координатном виде согласно [2]:

$$x = \frac{v_0 t \cos \theta}{1 + k \frac{v_0^2}{d2g}}, \quad y = \frac{v_0 t \sin \theta - \frac{gt^2}{2}}{1 + k \frac{v_0^2}{d2g}}, \quad (13)$$

где x, y – горизонтальная и вертикальная координаты частицы струи в любой момент времени, м; θ – угол наклона оси насадка лафетного ствола к горизонту, градусы; t – время, с; d – диаметр струи, м.

При подстановке в (13) рассчитанных значений коэффициента трения в воздухе получаем закон движения частиц струи в горизонтальном и вертикальном направлениях. На основании этих уравнений построены кривые, представляющие собой траектории

наклонной гидравлической струи при изменяющемся угле наклона оси насадка лафетного ствола ПР к горизонту в диапазоне от 10 до 80 градусов (рисунок 8).

Для оценки соответствия результатов теоретического расчета траектории струи с данными, полученными экспериментальным путем, представим их вместе на одном изображении (рисунок 9). При этом экспериментальные траектории гидравлической осесимметричной струи определялись для положения ее оси.

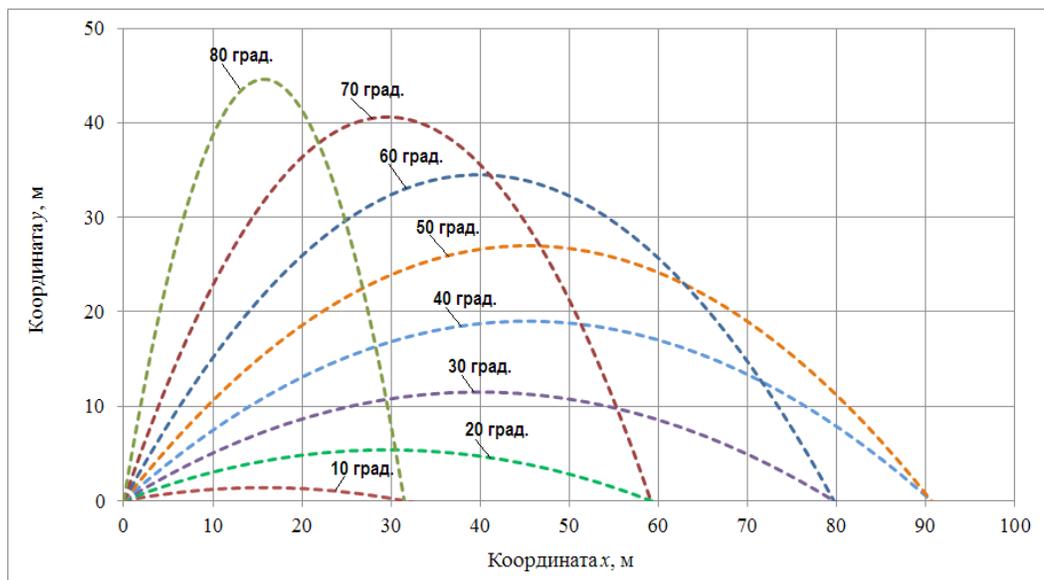


Рисунок 8 – Теоретические траектории наклонной гидравлической струи, рассчитанные с учетом коэффициента трения

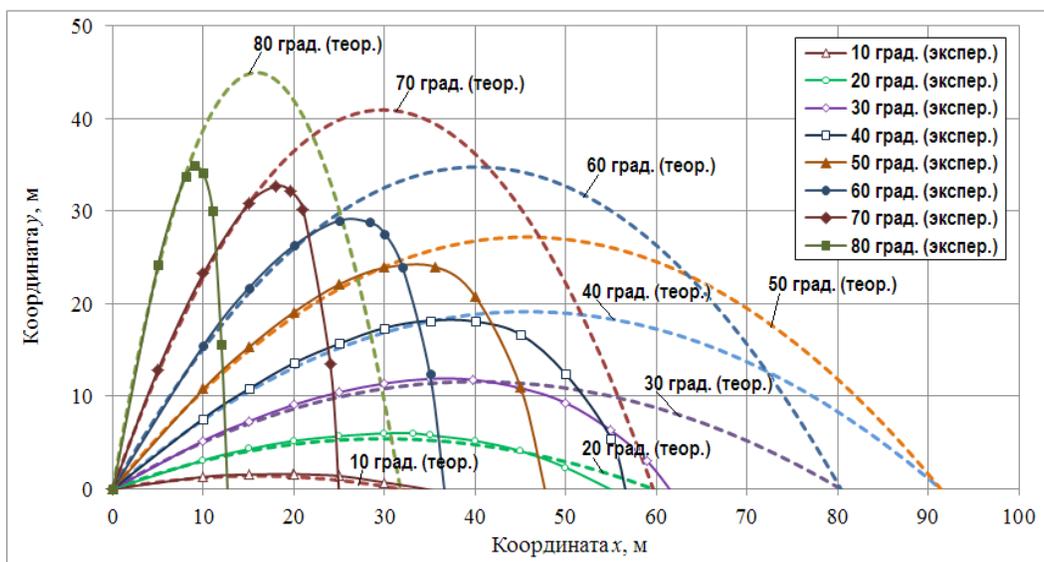


Рисунок 9 – Теоретические и экспериментальные траектории наклонной гидравлической струи

Проведя анализ полученных кривых, можно сделать вывод о достаточно хорошем совпадении траекторий на том участке струи, где имеет место ее компактная часть. Это свидетельствует в пользу предположения о том, что сила трения, возникающая у поверхности струи, определяет полное сопротивление до момента перехода струи из компактной в раздробленную. Дальнейшее увеличение полного

сопротивления происходит из-за разрушения струи огнетушащего вещества под влиянием действующих на нее силы тяжести, сопротивления воздуха и внутренних сил, вызываемых турбулентностью потока и колебательно-волновым характером движения жидкости в струе, а также сил поверхностного натяжения, способствующих распылению струи на капли [3].

Заключение. Разработана методика определения коэффициента трения в воздухе k наклонной гидравлической струи, формируемой насадком лафетного ствола пожарного робота. Методика базируется на теореме о количестве движения при рассмотрении возникающего на поверхности струи пограничного слоя и учитывает динамику изменения характеристик гидравлической струи.

На основе предложенной методики получены формулы для расчета значений коэффициента трения k для случаев ламинарного и турбулентного состояний пограничного слоя воздуха на боковой поверхности осесимметричной струи жидкости. На примере расчета значений коэффициента k для случая формирования струи с помощью лафетного ствола ПР с расходом 40 л/с и при рабочем давлении 0,6 МПа показана практическая применимость найденных выражений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент k изменяется по гиперболическому закону, что соответствует современным представлениям о характере изменения коэффициента сопротивления, встречающимся в литературных источниках [8; 12].

Полученные значения коэффициента k используются для расчета и уточнения геометрии оси свободной наклонной струи, при рассмотрении компактной части которой наблюдается совпадение в пределах погрешности ее теоретических и экспериментальных траекторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Е. Н. Противопожарное водоснабжение / Е. Н. Иванов. – М. : Стройиздат, 1986. – 316 с.
2. Качалов, А. А. Противопожарное водоснабжение : учеб. пособие для пожарно-техн. училищ / А. А. Качалов, А. Е. Кузнецова, Н. В. Богданова. – М. : Стройиздат, 1975. – 272 с.
3. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, Ф. И. Пикалов ; под общ. ред. И. И. Агроскина. – Изд. 4-е. – М. : Энергия, 1964. – 352 с.
4. Гидравлика и противопожарное водоснабжение : учебник / Ю. Г. Абросимов [и др.] ; под ред. Ю. Г. Абросимова. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. – 392 с.
5. Потеха, В. Л. Роботизированные системы пожаротушения в Республике Беларусь / В. Л. Потеха, А. В. Потеха, Г. Н. Здор // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць / АПБ ім. Героїв Чорнобиля ; гол. ред. М. А. Кришталь [та ін.]. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2013. – № 13. – С. 106–115.
6. Потеха, А. В. Методика расстановки пожарных стационарных роботов на объектах / А. В. Потеха // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы Международ. науч.-практ. конф., Гомель, 19–20 мая 2016 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомельский инженер. ин-т ; редкол. : А. Э. Набатова (науч. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 246–248.
7. Здор, Г. Н. Уточнение зависимостей для построения огибающих кривых компактной и раздробленной гидравлических струй лафетных стволов пожарных роботов / Г. Н. Здор, А. В. Потеха // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2015. – № 2 (204). – С. 68–77.
8. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) : учеб. пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселёв. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
9. Аронин, Г. С. Практическая аэродинамика : учебник для летного состава / Г. С. Аронин. – М. : Воениздат, 1962. – 384 с.
10. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика : учеб. руководство для вузов : в 2 ч. / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – Ч. 1. – 600 с.
11. Романенко, П. Н. Гидродинамика и теплообмен в пограничном слое : справочник / П. Н. Романенко. – М. : Энергия, 1974. – 464 с.
12. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. – М. : Наука, 1974. – 712 с.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”
Vol. 6, No. 2, 2016, pp. 88–97
© Yanka Kupala State University of Grodno, 2016

Path determination of inclined hydraulic jet considering friction force on its surface

G. N. Zdor¹, A. V. Potekha²

¹ The Belarusian National Technical University (Belarus)
Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: rts@bntu.by

² Grodno State Agrarian University (Belarus)
Tereshkovoi St., 28, 230008, Grodno, Belarus; e-mail: potekha_av@mail.ru

Abstract. In the introduction it is pointed a subject of investigation – the geometric characteristics of a hydraulic jet trajectory formed by fire monitors of fire robots, and the indicated problem is the difficulty of determination of the inclined jet trajectory as there is a clear need to consider a significant number of factors that affect the jet motion in the air causing its destruction. The purpose of research is to adjust equations for calculating a jet trajectory by assessing the impact of the existing frictional forces generated at the side surface while moving in the air. The research is founded on the proposed method, which is based on the impulse theorem, considering the friction forces arising in the air boundary-layer that forms at the surface of the jet. In the main part it is obtained expressions on the results of the research for calculating the friction coefficient depending on the state of laminar or turbulent boundary layer, which can be used in the calculation formulas for trajectory of the inclined jet and allow to construct a curve, which is an axis of a free jet that is fired at an angle to the horizon. The practical verification of the final expressions for a hydraulic jet trajectory was carried out in the case of its forming by fire monitor of fire robot with a flow rate of 40 CV at a working pressure of 0.6 MPa. The comparison results of the theoretical and experimental trajectories show their match within error measurement for a solid inclined jet. In the conclusion the possibility of applying the results to calculate the trajectory for solid hydraulic jets which are generated by fire monitors of fire robots used for fire protection of high constructions is mentioned.

Keywords: hydraulic inclined jet, path, coordinates, friction force, friction coefficient, fire monitor, fire robot.

References

1. Ivanov E. N. Fire-fighting water supply [*Protivopozharnoe vodosnabzhenie*]. Moscow, 1986, 316 p.
2. Kachalov A. A., Kuznetsova A. E., Bogdanova N. V. Fire-fighting water supply [*Protivopozharnoe vodosnabzhenie : ucheb. posobie dlia pozharo-tekhn. uchilishch*]. Moscow, 1975, 272 p.
3. Agroskin I. I., Dmitriev G. T., Pikalov F. I. Hydraulics [*Gidravlika*]; Ed. I. I. Agroskin. 4th ed. Moscow, 1964, 352 p.
4. Abrosimov Yu. G. [et al.]. Hydraulics and fire-fighting water supply [*Gidravlika i protivopozharnoe vodosnabzhenie : uchebnik*]; Ed. Yu. G. Abrosimov. Moscow, 2003, 392 p.
5. Potekha V. L., Potekha A. V., Zdor G. N. The robotic fire-fighting systems in Belarus [*Robotizirovannye sistemy pozharotusheniia v Respublike Belarus*']. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka : zb. nauk. prats*; Eds. M. A. Krishtal (ch. Ed.) [et al.]. Cherkasy, 2013, No. 13, pp. 106-115.
6. Potekha A. V. Methods for arrangement of stationary fire robots at facilities [*Metodika rasstanovki pozharnykh statsionarnykh robotov na ob"ektakh*]. *Chrezvychainye situatsii: teoriia, praktika, innovatsii : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Gomel, 19-20 maia 2016 g.; ed. board: A. E. Nabatova [et al.]. Gomel, 2016, pp. 246-248.
7. Zdor G. N., Potekha A. V. Correspondences clarification for envelope curves tracing of solid and fragmented hydraulic jets of fire-fighting robots fire monitors [*Utochnenie zavisimosti dlia postroeniia ogibaiushchikh krivyykh kompaktnoi i razdroblennoi gidravlicheskich strui lafetnykh stolov pozharnykh robotov*]. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhavnaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 6. Tekhnika*, 2015, No. 2 (204), pp. 68-77.
8. Altshul A. D., Kiselev P. G. Hydraulics and aerodynamics (Fundamentals of fluid mechanics) [*Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti) : ucheb. posobie dlia vuzov*]. 2nd ed. Moscow, 1975, 323 p.
9. Aronin G. S. Practical aerodynamics [*Prakticheskaia aerodinamika : uchebnik dlia letnogo sostava*]. Moscow, 1962, 384 p.
10. Abramovich G. N. Applied gas dynamics [*Prikladnaia gazovaia dinamika : ucheb. rukovodstvo dlia vuzov : v 2 ch.*]. 5th ed. Moscow, 1991, part 1, 600 p.
11. Romanenko P. N. Hydrodynamics and heat-mass exchange in the boundary-layer flow [*Gidrodinamika i teplomassoobmen v pogranychnom sloe : spravochnik*]. Moscow, 1974, 464 p.
12. Shlikhting G. Boundary layer theory [*Teoriia pogranychnogo sloia*]; transl. from germ. Moscow, 1974, 712 p.