

5. Чистюхин В.В., Кудинов В.П., Папушин А.Ю. Анализ аварий, связанных с обрушением пород в горных выработках // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр./НИИГД.-Донецк, 1994.- С.22-26.
6. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах. т.2, Київ. 2003, 416с.
7. Юценко А.Ю. Оптимальные сроки службы шахтных трубопроводов водоотлива и водоснабжения до их очистки // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. /НИИГД.- Донецк, 1999.-С. 46-50.
8. Сухоруков В.П., Кузнецов В.В. Расчет параметров установки дистанционной прокладки гибкого трубопровода.// Разраб. Месторождений полезных ископаемых: Респ. Межвед. Науч.-техн. Сб.-1991.- Вып.89. С.93-98.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М: Наука. 1978.- 736с.

УДК 614.84:628.174

В.П.Ольшанский, д. ф.-м. н, профессор (Академия пожарной безопасности Украины)

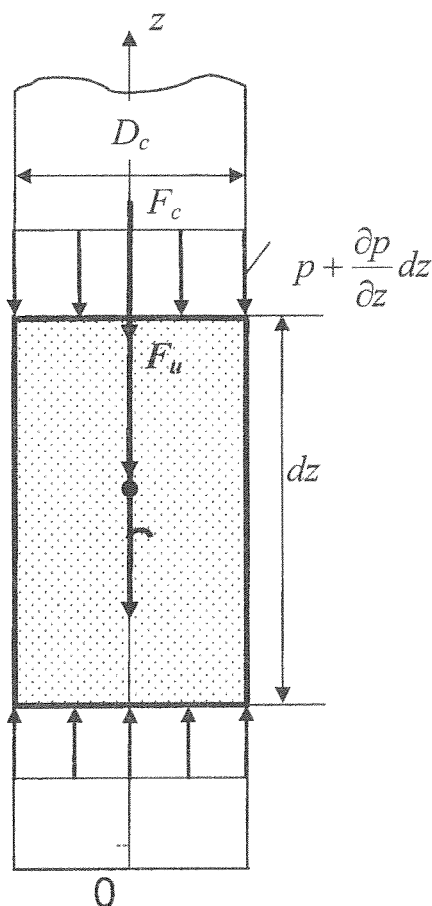
О ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПОЖАРНОЙ СТРУИ

С помощью решения упрощенного уравнения Бернулли, при квадратичной зависимости силы сопротивления от скорости движения, построены простые формулы для вычисления высоты раздробленной части вертикальной струи, а также радиусов действия наклонных струй. Показано, что результаты, к которым приводит построенная теория, находятся в хорошем соответствии с результатами других исследований.

Состояние проблемы. В основе технической теории гидравлических пожарных струй лежат эмпирические формулы Люгера и Фримана [1-4], позволяющие вычислять высоту раздробленной части вертикальной струи. В.Г.Лобачев дал общее теоретическое обоснование этим формулам, учитывая потери напора выражением Дарси-Вейсбаха, которое построено для учета потерь напора в трубах. Кроме того, он составил эмпирические зависимости для расчета высоты компактной части вертикальной и радиусов действия наклонной струй. Ввиду большой практической важности этих результатов в пожарном деле, они нашли отражение в публикациях [1-5] и других учебниках по гидравлике и противопожарному водоснабжению.

Постановка задачи и ее решение. Однако эмпирические зависимости Люгера и Фримана построены путем аппроксимации результатов конкретных экспериментов, т. е. на базе ограниченной выборки. Их экстраполирование за пределы выборки может дать большие погрешности. Поэтому не удивительно, что формулы Люгера и Фримана приводят к существенно различным количественным результатам (высотам вертикальной струи) при больших начальных напорах. В этой области асимптотики имеют разное не только количественное, но и качественное поведение. В связи с этим актуальна разработка более общей технической теории гидравлической струи на основе законов механики, учитывающих динамическое равновесие частиц жидкости. В пожарном деле желательно иметь простые аналитические зависимости, удобные для практических расчетов, что определило цель работы и средства ее достижения. Целью проводимого исследования является получение удобных расчетных формул, их апробация и установление границ практической применимости. Средством ее достижения выбрано интегрирование уравнения Бернулли, записанного для стационарного потока жидкости, в предположении квадратичной зависимости силы сопротивления от скорости движения частиц струи. Коэффициент сопротивления воздуха выбирается в ходе сравнения расчетных и проверенных практикой

результатов, что приводит к полуэмпирической теории, альтернативной по отношению к чисто эмпирическим теориям.



Составим уравнение вертикального движения элемента гидравлической струи. Обратимся к рисунку и рассмотрим динамическое равновесие элемента длиной dz в направлении вертикальной оси oz . Оно выражается уравнением

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) \omega + F_c + F_u + G - p\omega = 0, \quad (1)$$

в котором $G = \rho g \omega dz$;

$$\begin{aligned} F_c &= K_c \pi D_c v^2 dz; \\ F_u &= \rho \omega \left(\frac{\partial v}{\partial z} v + \frac{\partial v}{\partial t} \right) dz; \end{aligned} \quad (2)$$

D_c и ω - диаметр и площадь поперечного сечения струи; p - давление; v - вертикальная скорость движения центра выделенного элемента; ρ - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения; G - сила веса; F_u - сила инерции; F_c - сила сопротивления воздушной среды; K_c - коэффициент трения струи о воздух.

Рис. Выделенный элемент струи

Поскольку далее идет речь о стационарном движении, то $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$, а частные производные по z переходят в обыкновенные.

Подставив выражения (2) в (1), приходим к уравнению Бернулли в дифференциальной форме

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{4K_c}{D} v^2 + \rho g + \rho v \frac{\partial v}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Чтобы упростить его, давление в струе считаем постоянным, в силу чего $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$.

После упрощения (3), имеем

$$dz = - \frac{v \cdot dv}{c v^2 + g}. \quad (4)$$

Здесь $c = 4K_c (\rho D_c)^{-1}$; $v = v(z)$.

Начальным условием к уравнению (4) берем

$$v(0) = v_0, \quad (5)$$

где v_0 - скорость истечения струи из насадка.

Заметим, что при дальнейшем упрощении выражений (4), (5), они приводят к упомянутым выше эмпирическим формулам. Действительно, приняв в знаменателе правой части уравнения (4) $v(z) = v_0 = const$ интегрированием получаем

$$S_b = \int_0^{S_b} dz = -\frac{1}{cv_0^2 + gv_0} \int v dv,$$

или

$$S_b = \frac{v_0^2}{2(cv_0^2 + g)}. \quad (6)$$

Здесь через S_b обозначена высота раздробленной части вертикальной струи.

Если выразить квадрат начальной скорости через начальный напор H соотношением $v_0^2 = 2gH$ и ввести обозначение $2c = \varphi$, то вместо (6), получим

$$S_b = \frac{H}{1 + \varphi H}.$$

Это эмпирическая формула Люгера [3]. Введенное выше упрощение не дает больших погрешностей когда $cv^2 \ll g$, т.е. при малом начальном напоре H . Поэтому Люгер рекомендовал свою формулу для фонтанных струй, получаемых при небольших напорах.

При больших H , но таких, что $cv^2 < g$, возможно следующее упрощение. Разложим в биномиальный ряд двучлен

$$(cv^2 + g)^{-1} = \frac{1}{g} \left(1 - \frac{cv^2}{g} \right) + O \left(\left(\frac{cv^2}{g} \right)^2 \right).$$

Отбросив остаток, интегрированием (4), получаем

$$\int_0^{S_b} dz = -\frac{1}{g} \int_{v_0}^0 \left(v - \frac{cv^3}{g} \right) dv$$

или $S_b = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{c}{4g^2} v_0^4$. После замены начальной скорости ее выражением через напор, находим

$$S_b = H - cH^2.$$

Это эмпирическая формула Фримана, которую он рекомендовал для расчета пожарных струй [3].

Таким образом, формулы Люгера и Фримана являются следствием упрощения уравнения (4).

Дадим далее его решение без введения упрощений. Выполнив интегрирование

$$\int_0^{S_b} dz = - \int_{v_0}^0 \frac{v \cdot dv}{c v^2 + g},$$

находим $S_b = \frac{1}{2c} \ln \left(1 + \frac{c v^2}{g} \right) = \frac{1}{2c} \ln(1 + 2cH).$

Эту логарифмическую зависимость положим в основу полуэмпирической теории. Для этого перепишем ее в более общем виде

$$S_b = a(D) \ln \left(1 + \frac{H}{b(D)} \right), \quad (7)$$

определяя $a(D)$ и $b(D)$, как функции диаметра насадка ствола D , в ходе сравнения значений S_b с проверенными на практике результатами [1, 4].

В случае небольших диаметров насадков ($0,013 \leq D \leq 0,025$ м), характерных для ручных пожарных стволов, предлагаем использовать соотношения:

$$\begin{aligned} a(D) &= D [1609 + 391,203\xi - 91,804 \sin \xi + 53,750 \times \\ &\times \sin(2\xi) - 38,304 \sin(3\xi)]; \\ b(D) &= D [1455 + 428,445\xi - 75,311 \sin \xi + 59,500 \times \\ &\times \sin(2\xi) - 46,311 \sin(3\xi)]; \quad \xi = \frac{D - 0,013}{0,012} \pi, \end{aligned} \quad (8)$$

в которые D следует подставлять в метрах.

С целью упрощения вычислений S_b по формулам (7), (8) в таблице 1, указаны значения $a_1 = a(D) \cdot D^{-1}$ и $b_1 = b(D) \cdot D^{-1}$ при различных диаметрах насадка ствола.

Таблица 1

Значения a_1 и b_1 при различных D в м

D , м	a_1	b_1	D , м	a_1	b_1
0,013	1609	1455	0,020	2237	2170
0,014	1687	1545	0,021	2302	2236
0,015	1776	1647	0,022	2385	2319
0,016	1878	1765	0,023	2502	2441
0,017	1986	1890	0,024	2658	2607
0,018	2086	2006	0,025	2838	2801
0,019	2170	2099	-	-	-

Для вычисления радиусов действия компактной R_K и раздробленной R_b частей струи можно применять формулы [6]

$$R_K = f \cdot S_b; \quad R_b = \beta \cdot S_b, \quad (9)$$

где $f = 0,840 - 0,01[9,549\eta - 2,369 \sin \eta - 0,823 \times \sin(2\eta) - 0,385 \sin(3\eta)]$;

$$\eta = \frac{S_b - 10}{45} \pi;$$

$$\beta = 1,396 - 0,0044\gamma - 0,0759 \sin \frac{\pi\gamma}{90} + 0,0033 \sin \frac{\pi\gamma}{30}, \quad (10)$$

γ - угол (в градусах) наклона радиуса R_b к горизонту.

Проведем сравнение результатов, к которым приводят формулы (7), (8), (9), с известными данными в литературе. В таблице 2 выписаны R_K , вычисленные по формулам (7), (8), (9), для пяти диаметров насадка D и различных напоров H .

В правой (последней) колонке указаны значения $R_{KП}$, которые приняты в теории противопожарного водоснабжения для тех же параметров D и H [2, табл. 38 или 4, табл. 15]. Сравнительный анализ подтверждает хорошую точность предложенных зависимостей для расчета S_b и R_K .

Таблица 2

Значения R_K в м для различных D и H в м

$D = 0,013$		$D = 0,016$		$D = 0,019$		$D = 0,022$		$D = 0,025$		R_K из [2]
H	R_K	H	R_K	H	R_K	H	R_K	H	R_K	
9,6	7,2	9,2	7,2	9,0	7,1	8,9	7,1	8,7	7,0	7
13,0	9,2	12,4	9,2	12,0	9,1	11,7	9,1	11,5	9,0	9
16,9	11,1	15,8	11,1	15,2	11,1	14,7	11,0	14,4	11,0	11
21,4	13,0	19,7	13,0	18,7	13,0	18,0	13,0	17,5	13,0	13
26,7	14,9	24,0	14,9	22,6	15,0	21,6	15,0	20,9	15,0	15
33,2	16,8	29,2	16,9	27,1	16,9	25,7	17,0	24,7	17,0	17
41,7	18,8	35,6	18,9	32,5	18,9	30,5	18,9	29,1	19,0	19
53,3	20,9	43,7	20,9	39,1	21,0	36,3	21,0	34,3	21,0	21
70,3	23,0	54,6	23,0	47,6	23,0	43,4	23,1	40,6	23,0	23
98,2	25,4	70,2	25,2	58,9	25,2	52,7	25,1	48,6	25,1	25
-	-	94,2	27,5	75,1	27,4	65,3	27,2	59,1	27,3	27
-	-	-	-	-	-	83,7	29,2	73,8	29,2	29

Проиллюстрируем применение изложенной теории к решению конкретных задач.

Задача 1. Вычислить каким должен быть напор H , чтобы при диаметре насадка $D = 19$ мм и угле наклона радиуса действия раздробленной части струи $\gamma = 60^\circ$ его длина R_b равнялась 25 м. Найти соответствующее ему значение R_K .

Из формулы (7) следует

$$H = b(D) \left[\exp\left(\frac{R_b}{\beta a(D)}\right) - 1 \right] = b_1 D \left[\exp\left(\frac{R_b}{\beta a_1 D}\right) - 1 \right].$$

По таблице 1 и формуле (10) для заданных исходных данных находим: $\beta = 1,07$; $a_1 = 2170$; $b_1 = 2099$. Следовательно,

$$H = 2099 \cdot 0,019 \left[\exp \left(\frac{25}{1,07 \cdot 2170 \cdot 0,019} \right) - 1 \right] \approx 30,4 \text{ м.}$$

В книге [2] при решении этой задачи на основе эмпирической теории получено $H \approx 30,3$ м.

Высота вертикальной струи $S_b = R_b \cdot \beta^{-1} \approx 23,36$ м. Для нее вычисления по формуле (9) дают: $f \approx 0,78$; $R_K \approx 0,78 \cdot 23,36 \approx 18,2$ м.

Задача 2. Вычислить какими должны быть напор H и диаметр sprыска ствола D , чтобы при расходе $Q = 5$ л/с радиус действия компактной части струи R_K был близок к 20 м.

Учитывая, что $H = 8Q^2 (\pi^2 g D^4)^{-1}$, перепишем формулу (7) в виде

$$S_b = a(D) \ln \left(1 + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4 b(D)} \right). \quad (11)$$

Согласно данным задачи $8Q^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3/\text{с)}^2$. Перебирая D и значения a_1 и b_1 в таблице 1, по формулам (11) и (9) находим R_K , наиболее близкое к 20 м. Таким является $R_K \approx 19,8$ м и получается оно при $D = 0,015$ м, $H \approx 40,8$ м. В книге [2] приближенный ответ к этой задаче составляет: $D = 0,016$ м, $H \approx 39,4$ м; $Q \approx 5,6$ л/с, $R_K = 20$ м. Так, что отклонения приближенных решений незначительны, несмотря на то, что они построены с помощью различных теорий.

Задача 3. Определить высоту вертикальной струи S_b при напоре $H = 30$ м водяного столба и диаметре насадка $D = 19$ мм.

Применяя формулу (7) и таблицу 1, для указанных в задаче исходных данных, находим

$$S_b = 2710 \cdot 0,019 \cdot \ln \left(1 + \frac{30}{2099 \cdot 0,019} \right) \approx 23,1.$$

Именно такой ответ, но с помощью формулы Люгера, был получен для этой задачи в учебнике [2].

Проведенный сравнительный анализ подтверждает пригодность разработанной выше полуэмпирической теории для расчета параметров гидравлических пожарных струй.

Выводы

1. В результате аналитического решения уравнения Бернулли установлена логарифмическая зависимость высоты вертикальной струи от начального напора.

2. Предложены аналитические выражения для вычисления радиусов действия наклонной струи.

3. Показано, что разработанная полуэмпирическая теория дает численные результаты близкие к тем, что приводятся в литературе по противопожарному водоснабжению.

4. Использование предложенных формул позволяет без применения справочных таблиц провести расчет основных параметров гидравлической струи, а также решать задачи синтеза, т.е. подбора диаметра sprыска и напора, при которых струя имеет заданные параметры.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобачев В.Г. Противопожарное водоснабжение. - М.-Л.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1950. - 330 с.
2. Тарасов-Агалаков Н.А. Практическая гидравлика в пожарном деле. - М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1959. - 262 с.
3. Ходаков В.Ф. Гидравлика в пожарном деле. - М.: Высшая школа МООП РСФСР, 1965. - 204 с.
4. Качалов А.А., Воротынцев Ю.П., Власов А.В. Противопожарное водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1985. - 286 с.
5. Иванов Е.Н. Противопожарное водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1986. - 316 с.
6. Ольшанский В.П. Об одной полуэмпирической теории гидравлической пожарной струи // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. АПБУ. Вып. 13. - Харьков: Фолио, 2003. - С. 109-114.

УДК 658.5

О.В.Сидорчук, д.т.н., професор, В.О. Тимочко, к.т. н., доцент, (Львівський державний аграрний університет), О.І.Баши́нський, (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)

НАУКОВІ ПРИНЦИПИ РОЗБУДОВИ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ПОЖЕЖНИХ АВТОМОБІЛІВ ЗА СТАНОМ

Зниження ресурсовитрат у виробничій системі технічного обслуговування і ремонту пожежних автомобілів досягається завдяки її структурному вдосконаленню. Для визначення оптимальних параметрів та режимів функціонування цієї системи обґрунтовано сім головних наукових принципів, які мають бути враховані в її моделі. Метою статті є розроблення цих наукових принципів. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше системно розглядаються зазначені принципи.

Деградація технічного потенціалу підприємств багатьох галузей народного господарства, в тому числі системи протипожежного захисту, вимагає не лише його поповнення, але й підтримання в працездатному стані та поновлення ресурсу окремих машин. Для цього здебільшого використовується обслуговуючо-ремонтна база, створена для централізовано-планової економіки [1]. Аналіз функціонування цієї бази переконує, що вона також деградувала через відсутність достатньої кількості замовлень. Таким чином, спостерігаємо деградацію як системи використання техніки, так і системи її технічного обслуговування та ремонту (ТОР).

Розроблені рекомендації щодо розвитку виробничої системи ТОР в окремих галузях народного господарства (наприклад, в сільському господарстві) лише в загальних рисах окреслюють можливий напрям її вдосконалення [2]. Достатньо аргументованого обґрунтування напряму розвитку виробничої системи ТОР на жаль, ще не існує. Зумовлене це, в першу чергу, відсутністю глибоких наукових засад створення відповідних обслуговуючих виробничих систем.

Чинні науково-методичні засади проектування ремонтних підприємств уможливають достатньо повне обґрунтування технологічних питань проекту [3]. Організаційні ж підстави, що базуються на методиці професора І.С.Левицького [4], на наш погляд, використати в сучасних умовах не можливо через те, що вони ґрунтуються на традиційних наукових засадах, які не дають змоги виявити системну ефективність проектних розв'язків.