

В.С. Бабенко, к.т.н., директор ООО «Импульс»,
А.П. Кремена, нач. отдела ГП «КБ «Южное»

ДАЛЬНОБОЙНОСТЬ ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ СТРУИ

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Предложен базирующийся на феноменологической модели гидроимпульсной струи подход к определению её дальности и получено согласующееся с экспериментальными данными соотношение, устанавливающее связь между дальностью струи и параметрами истечения.

Ключевые слова: дальность, струя, диспергирование, эксперимент, модель.

Постановка проблемы. Гидроимпульсные струи (ГИС) пожаротушащих жидкостей (ПТЖ), генерируемые путём наложения импульсов давления на поток, истекающий из sprays ствола [1], являются новым перспективным средством предупреждения и тушения пожаров различных классов. Их экспериментально подтверждённая высокая пожаротушащая эффективность, обеспечивает возможность существенного, по сравнению с действующими нормативами [2], снижения расхода ПТЖ на тушение пожаров класса А (в ~ 35 раз) и класса В (в 5 – 7 раз) [3]. Это обусловлено повышением эффективно используемой длины струи, увеличенной площадью покрытия зоны пожара, простотой регулирования характеристик дисперсности факела ГИС и большой дальностью подачи капельных потоков ПТЖ, сопоставимой с дальностью сплошных струй [3, 4].

Изложенное, наряду с возможностью работы как в режиме генерирования дальноточных диспергированных потоков, так и сплошных (силовых) струй ПТЖ, позволяет сделать вывод, что применение гидроимпульсного диспергирования в различных образцах пожаротехнического вооружения (ПТВ) позволит существенно расширить их тактико-технические возможности.

Анализ последних достижений и публикации. Высокая пожаротушащая эффективность ГИС, как и любых струй ПТЖ, в значительной степени определяется высокой дальностью подачи диспергированной ПТЖ. Однако, публикации, посвящённые расчётным методам её определения в настоящее время отсутствуют. Это объясняется сложной структурой ГИС, представляющей собой повторяющуюся последовательность движущихся в воздушной среде идентичных порций ПТЖ, каждая из которых состоит из высокоскоростной струи, истекающей из sprays ствола во время действия импульса повышенного давления ($H_{и}$), и низкоскоростной – истекающей под действием питательного напора ($H_{п}$) в остальной промежуток времени. В про-

цессе взаимодействия указанных струй происходит трансформация указанной порции ПТЖ в каплю и остаточный участок низкоскоростной струи и их последующее «независимое» движение и дробление в потоке обтекающего воздуха [4].

Анализ публикаций, посвящённых определению дальнобойности как капельных потоков, так и сплошных струй жидкостей [5 - 7] показывает, что существующие методики её расчёта основываются либо на аналитических решениях уравнения движения материальной точки в пространстве, при этом точность результатов расчётов во многом определяется «удачным» подбором зависимости коэффициента сопротивления воздуха от скорости движения [6], либо на соответствующим образом обработанных экспериментальных данных [7].

Попытка комплексного подхода к исследованию кинематики движения струи, выходящего, по мнению авторов, за рамки «только эмпирических аппроксимаций» приведена в [8]. В основу подхода положено представление движущейся капельно-воздушной смеси в виде двухфазного пограничного слоя струи, что хотя и позволяет рассчитывать её траекторию численными методами, но лишь при наличии надёжных данных о длине начального участка сплошности. Другая неопределённость связана с определением сопротивления воздуха движению капель, с учётом его разгона впереди летящими каплями, движущимися вдоль оси струи и определяющими дальнобойность её раздробленного факела [7, 9].

В целом учёт сложного комплекса взаимосвязанных процессов, влияющих на дальнобойность гидравлических струй как сплошных, так и диспергированных, ввиду недостаточной изученности этих процессов в настоящее время не представляется возможным. Этим объясняется отсутствие надёжных аналитических методик расчёта их дальнобойности в зависимости от параметров истечения [5]. Указанный вывод в полной мере может быть отнесён к гидроимпульсным струям, что, наряду с ограниченным объёмом соответствующих экспериментальных данных, является фактором, в определённой мере сдерживающим разработку и внедрение перспективных образцов ПТВ и технологий предупреждения и тушения пожаров, основанных на использовании ГИС пожаротушающих жидкостей.

Постановка задачи и её решение. В настоящей работе представлен подход к определению дальнобойности ГИС, основанный на ряде положений, следующих из экспериментально обоснованной феноменологической модели формирования движения и диспергирования ГИС [4] и приведённых в работах [6 - 9] результатов исследований кинематики гидравлических струй.

Эти основные положения состоят в следующем:

- длина начального участка ГИС в десятки раз меньше её дальнобойности, в связи с чем, может быть исключена из рассмотрения при решении рассматриваемой задачи;

- дальнобойность ГИС, как и других гидравлических струй, является функцией начальных параметров истечения и сопротивления воздуха её движению;

- формирующаяся в порции ГИС осесимметричная структура распадается практически мгновенно, образуя облако капель ПТЖ, движущееся вдоль оси ГИС;

- остаточная струя порции ГИС продолжает движение, постепенно распавшись, но оставаясь достаточно компактной, и индуцирует при этом спутный поток воздуха, снижающий сопротивление движению капельного облака;

- распад остаточной струи происходит, начиная с её периферии, в связи с чем максимальную дальность полёта будут иметь капли, формирующиеся из центральной части остаточной струи.

Анализ указанных положений позволяет сделать вывод, что дальность полёта порции ГИС определяющая дальнобойность гидроимпульсной струи в целом, в соответствии с [7, 8] зависит от трёх переменных параметров: напора, при котором происходит истечение, т.е. скорости истечения, характерным геометрическим размером струи, или расхода в ней и начального угла наклона её траектории к горизонту. При этом дальнобойность практически не зависит от размера капель, на которые распадается струя. Это подтверждается приведёнными в [8] данными, показывающими, что увеличение степени диспергирования струи в десятки и сотни раз приводит к вариации её дальности не превышающей 5%.

Таким образом, учитывая, что основным фактором, определяющим, наряду с гравитационными силами, дальность полёта струи, является её инерция, зависящая от начальной массы остаточной струи и начальной скорости её движения, можно сделать вывод, что снижение дальнобойности ГИС ($l_{\text{ГИС}}$), по сравнению с дальнобойностью сплошной струи ($l_{\text{СПЛ}}$) с аналогичными питательным напором и характерным геометрическим размером отверстия sprays (диаметром), будет пропорционально уменьшению массы остаточной сплошной струи, обусловленному процессом трансформации порции жидкости, истекающей из sprays ствола в течение промежутка времени, равного периоду повторения гидравлических импульсов. При этом соотношение для определения относительной дальнобойности ГИС будет иметь вид:

$$\bar{l}_{\text{ГИС}} = \frac{l_{\text{ГИС}}}{l_{\text{СПЛ}}} = \frac{l_{\text{п}} - l_{\text{и}}}{l_{\text{СПЛ}}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{п}}$, $l_{\text{и}}$ – длины струй ПТЖ, истекающих из sprays ствола в течение промежутка времени между импульсами давления (пауза) и в течение импульса, соответственно; $l_{\text{СПЛ}}$ – длина сплошной струи, истекающей из sprays в течение промежутка времени, равного периоду генерирования импульсов (T).

В соответствии с приведённой в [4] структурой ГИС

$$l_{\text{п}} = \varphi \cdot \frac{1-\gamma}{f} \sqrt{2gH_{\text{п}}}; \quad (2)$$

$$l_{\text{и}} = \varphi \cdot \frac{\gamma}{f} \sqrt{2gH_{\text{и}}}; \quad (3)$$

$$l_{\text{спп}} = \frac{\Phi}{f} \sqrt{2gH_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где $H_{\text{п}}$, $H_{\text{и}}$ – напор на входе в спрыск во время паузы и импульса, соответственно; φ – коэффициент расхода спрыска; $f = \frac{1}{T}$ – частота следования импульсов; γ – коэффициент заполнения [10]

$$\gamma = \frac{2l_{\text{пт}}}{a} \cdot \bar{\tau}_{\text{и}}^a, \quad (5)$$

где $l_{\text{пт}}$ – длина питательной трубы устройства генерирования гидравлических импульсов; a – скорость распространения ударной волны в питательном трубопроводе; $\bar{\tau}_{\text{и}}^a$ – активная длительность импульса (относительная).

С учётом работы деформации стенок трубы для ПТЖ на основе воды [10]

$$a = \frac{1450}{\sqrt{1 + 0.01 \cdot \frac{d_{\text{пт}}}{\delta_{\text{ст}}}}}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где $d_{\text{пт}}$ – внутренний диаметр питательной трубы; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенок питательной трубы.

Принимая во внимание, что в реальных гидравлических импульсах давления, генерируемых с помощью механического гидроударного клапана [11], их форма близка к треугольной, в связи с чем относительная активная длительность импульса составляет [10]

$$\bar{\tau}_{\text{и}}^a = 0.5, \quad (7)$$

из (1) – (7) можно получить, что относительная дальнобойность ГИС будет определяться выражением

$$\bar{l}_{\text{гис}} = 1 - \frac{l_{\text{пт}} \sqrt{1 + 0,01 \frac{d_{\text{пт}}}{\delta_{\text{ст}}}}}{1450} \cdot f \left(1 + \sqrt{\frac{H_{\text{и}}}{H_{\text{п}}}} \right). \quad (8)$$

Экспериментальная проверка достоверности определения относительной дальнобойности ГИС в зависимости от параметров истечения ПТЖ из spryska ствола и конструктивных параметров питательной трубы по выражению (8) осуществлялась на установке, схема и внешний вид которой приведены на рисунке 1.

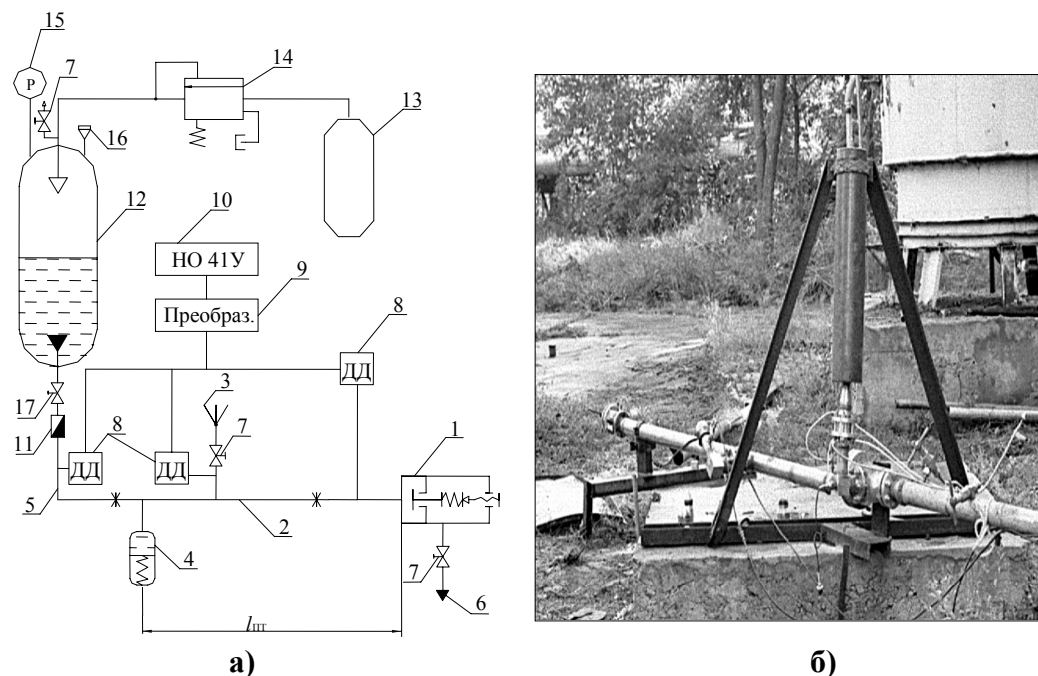


Рис. 1 – Экспериментальная установка: а) схема; б) внешний вид; 1 – гидроударный клапан; 2 – питательный трубопровод; 3 – форсунка; 4 – пневмогидроаккумулятор; 5 – запитывающая магистраль; 6 – сливной трубопровод; 7 – вентиль; 8 – датчики давления; 9 – преобразователь; 10 – осциллограф; 11 – расходомер; 12 – емкость для воды; 13 – баллонная батарея; 14 – редуктор давления; 15 – манометр; 16 – заправочная горловина; 17 – запорный вентиль

Установка включала ёмкость для воды 12, питательный трубопровод 2 с пристыкованным к нему гидроударным клапаном (ГУК) 1 и нагнетательным трубопроводом с форсункой 3 и запорным вентилем 7. На входе в питательный трубопровод установлен пневмогидроаккумулятор 4 в виде ёмкости объёмом 15 л, выполняющий функции демпфера гидроудара.

Наддув ёмкости 12 для обеспечения требуемого по условиям эксперимента давления на входе в питательный трубопровод осуществлялся от баллонной батареи 13 через редуктор давления 14, а подача воды в питательный трубопровод через запорный вентиль.

Измерение давления в нагнетательном, питательном трубопроводах, перед форсункой и ГУК производилось датчиками ДДИ-20.

При запуске установки включалась подача воды в питательный трубопровод и регулировочным винтом производилось плавное нагружение пружины клапана вплоть до выхода ГУК на устойчивый режим работы. При этом осуществлялось измерение установившегося Дальнобойность гидроимпульсной струи

в питательном трубопроводе расхода, давления на входе в него и давлений перед ударным клапаном и форсункой и дальность ГИС $l_{\text{ГИС}}^{\ominus}$.

Затем закрывался вентиль 7 на сливном трубопроводе ГУК и при остановленном ГУК осуществлялось измерение расхода давлений в указанных выше местах и дальности сплошной струи ($l_{\text{спл}}^{\ominus}$) в режиме отсутствия пульсаций давления в питательном трубопроводе.

Результаты экспериментов по определению относительной дальнотойности ГИС $\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\ominus}$ в зависимости от параметров истечения из spryska форсунки, полученные для питательных трубопроводов с различными конструктивными характеристиками:

- сборка № 1: $l_{\text{пт}} = 2.2 \text{ м}$, $d_{\text{пт}} = 0.055 \text{ м}$, $\delta_{\text{ст}} = 0.004 \text{ м}$ и $d_{\text{ф}} = 0,013 \text{ м}$;

- сборка №2: $l_{\text{пт}} = 3.0 \text{ м}$, $d_{\text{пт}} = 0.068 \text{ м}$, $\delta_{\text{ст}} = 0.004 \text{ м}$ и $d_{\text{ф}} = 0,019 \text{ м}$;

приведены в табл. 1. Здесь же приведены расчетные значения $\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\text{расч.}}$, полученные по выражению (8).

Таблица 1 – Результаты экспериментов по определению относительной дальнотойности гидроимпульсных струй

№ сборки	Параметр	Значение параметра						
Сборка № 1	$H_{\text{п}}$, МПа	0,4	0,6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,04
	$H_{\text{и}}$, МПа	1,6	2,56	3,31	2,85	2,13	3,32	3,75
	f , Гц	50	18	27,5	24	24,5	31	16
	$l_{\text{ГИС}}^{\ominus}$, м	11,1	17,5	18,5	20,2	23,2	22,8	23,6
	$l_{\text{спл}}^{\ominus}$, м	14	20	22	23,5	25,5	25,6	26
	$\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\ominus}$	0,79	0,88	0,84	0,86	0,91	0,886	0,924
	$\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\text{расч.}}$	0,76	0,91	0,85	0,89	0,91	0,886	0,924
Сборка № 2	$H_{\text{п}}$, МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0
	$H_{\text{и}}$, МПа	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	3,1
	f , Гц	30	32	35	38	40	42	20
	$l_{\text{ГИС}}^{\ominus}$, м	19,4	20,5	21,5	22	23	25,4	28,5
	$l_{\text{спл}}^{\ominus}$, м	23,5	25	26,5	27,5	28,5	31	31,2
	$\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\ominus}$	0,826	0,82	0,81	0,8	0,81	0,82	0,92
	$\bar{l}_{\text{ГИС}}^{\text{расч.}}$	0,82	0,815	0,803	0,79	0,77	0,774	0,89

Сопоставительный анализ полученных расчётом по выражению (8) и экспериментальных результатов определения относительной дальнотойности ГИС в широком диапазоне изменения параметров истечения ($H_{\text{п}}$, $H_{\text{и}}$, f) и при различных значениях конструктивных пара-

метров устройства ($l_{пт}, d_{пт}, d_{ф}$) показал их удовлетворительное совпадение. При этом отмечено, что увеличение частоты гидравлических импульсов f , как и увеличение $H_{и}$ при неизменном питательном напоре приводит к уменьшению относительной дальнобойности ГИС, согласующемуся с феноменологической моделью гидроимпульсной струи [4].

В целом, хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных показывает, что принятое допущение о зависимости между потерей дальности гидроимпульсной струи и длиной остаточной (сплошной) струи в порции ПТЖ, истекающей из sprays ствола в течение периода повторения генерируемых в питательном трубопроводе гидравлических импульсов достаточно близко к действительности.

Выводы. Предложен методический подход, и с использованием разработанной ранее модели диспергирования гидроимпульсной струи получено выражение для расчётного определения её относительной дальнобойности в зависимости от начальных параметров истечения ПТЖ из sprays ствола, которое может быть использовано при проектировании новых образцов ПТВ.

ЛИТЕРАТУРА

1 Пат. 2140333 Российская Федерация, МПК 7B05B1/58, Способ и устройство для получения струи жидкости с управляемой дисперсностью капель / Алексеев Ю.С., Межуев Н.Н., Нода А.А., Свириденко Н.Ф., Скобелев Н.К.; заявители и патентообладатели Нода А.А., Свириденко Н.Ф. – № 97116461/12; заявл. 24.09.97; опубл. 27.10.99. – Бюл. № 30. – 3с. ил.

2 Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожаров / В.П. Иванников, П.П. Ключ – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.

3 Бабенко В.С. Результати випробувань ручного диспергувального пожежного ствола, розробленого на основі використання гідроімпульсних систем / В.С. Бабенко, В.Ф. Кравчуновський, В.В. Присяжнюк, А.П. Кремена // Пожежна безпека. – 2003. - № 3. – С. 91 – 95.

4 Бабенко В.С. Диспергирование гидроимпульсной струи / В.С. Бабенко, И.К. Манько, А.П. Кремена // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 16. – С. 21 – 34.

5 Абрамов Ю.А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, Е.А. Шаповалова. – Харьков: Фолио, 2001. – 195 с.

6 Ольшанский В.П. О траектории гидравлической пожарной струи // Проблемы пожарной безопасности. – 2003. – Вып. 14 – С. 144 – 151.

7 Исаев А.П. Гидравлика дождевальных машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.

8 Мурзабаев М.Т. Динамика дождевальных струй / Дальнобойность гидроимпульсной струи

М.Т. Мурзабаев, А.Л. Ярин // Механика жидкости и газа. – 1985. – № 5. – С. 60 – 67.

9 Анаников С.В. О движении капли в свободной струе / С.В. Анаников, Е.В. Поляков // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 1977. – № 1. – С. 11 – 16.

10 Могендович Е.М. Гидравлические импульсные системы / Е.М. Могендович. – Л.: Машиностроение, 1977. – 216 с.

11 Кремена А.П. Синтез конструктивно-компоновочной схемы устройства генерирования гидравлических импульсов / А.П. Кремена // Вісник Національного гірничого університету. 2005.- № 10.- С. 50 – 53.

В.С. Бабенко, А.П. Кремена

Далекобійність гідроімпульсної струменя

Запропоновано підхід, що базується на феноменологічній моделі гідроімпульсного струменя до визначення її далекобійності і отримано узгоджене з експериментальними даними співвідношення, що встановлює зв'язок між далекобійністю струменя і параметрами закінчення.

Ключові слова: далекобійність, струмінь, диспергування, експеримент, модель.

V.S. Babenko, A. P. Kremena

Range of hydropulsing jet

Proposed based on a phenomenological model of the hydropulsing jet approach to the definition of its range and received consistent with experimental data correlation, establishes a connection between the long range jets and parameters of expiry.

Key words: long-range, jet, dispersion, experiment, model.