

УДК 614.84

# ГИДРОИМПУЛЬСНАЯ СТРУЯ: ТЕОРИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ПОТОКА

**В. С. Бабенко**

Кандидат технических наук

Директор

ООО «Импульс»

ул. Комсомольская, 16/18, г. Днепропетровск,

Украина, 49000

E-mail: pozh.bezpeka@gmail.com

**А. П. Кремена**

Начальник отдела

ГП «КБ «Южное»

ул. Криворожская, 3,

г. Днепропетровск, Украина, 49008

E-mail: andr\_petr@ukr.net

*Представлено результати дослідження гідроімпульсного струменя. Розроблено математичну модель диспергування, отримано співвідношення, що зв'язують характеристики дисперсності, форму факела і далькобійність струменя з частотою і амплітудою пульсацій тиску, що генеруються в струмені. Проведені експерименти продемонстрували хороший збіг їх результатів з розрахунковими даними*

*Ключові слова: гідроімпульсний струмінь, модель диспергування, форма факела, далькобійність*

*Представлены результаты исследования гидроимпульсной струи. Разработана математическая модель диспергирования, получены соотношения, связывающие характеристики дисперсности, форму факела и дальнобойность струи с частотой и амплитудой, генерируемых в струе пульсаций давления. Проведенные эксперименты продемонстрировали хорошее совпадение их результатов с расчетными данными*

*Ключевые слова: гидроимпульсная струя, модель диспергирования, форма факела, дальнобойность*

## 1. Введение

Диспергированные струи жидкостей и технологии на их основе применяются в различных областях деятельности общества. Однако расширение сферы применения наиболее широко используемых способов их получения ограничивается узостью диапазона регулирования дисперсности при фиксированном расходе жидкости и низкой дальнобойностью получаемых капельных потоков.

В значительной степени указанные недостатки могут быть преодолены при использовании гидроимпульсного способа диспергирования, представляющего собой комбинацию гидравлического и пульсационного способов. В этом случае экономичность и дальнобойность гидравлического диспергирования дополняются не только характерными для пульсационного диспергирования высоким качеством и однородностью дробления, но и потенциальной возможностью управления дисперсностью и интенсивностью распада струи при фиксированном расходе жидкости [1].

## 2. Анализ исследований и публикаций

Анализ публикаций по распаду жидкостных струй, носящих обзорный характер [2 – 4], показал, что количество работ, посвященных изучению влияния на процесс диспергирования струй импульсов давления, крайне ограничено. При этом известные результаты экспериментальных исследований носят преимущественно качественный характер и не могут быть ис-

пользованы для построения обобщающих эмпирических зависимостей, устанавливающих объективные связи между характеристиками дисперсности, формой факела гидроимпульсной струи и параметрами ее истечения.

В свою очередь результаты теоретических исследований процесса распада струй жидкости, полученные в предположении малости деформаций их поверхности по сравнению с начальным диаметром струи [3], не могут быть однозначно распространены на случай периодического воздействия на струю значительных осевых импульсов давления, коренным образом изменяющих картину ее распада [2, 3].

В целом, отсутствие адекватной действительности теории диспергирования струи жидкости, подвергаемой воздействию интенсивных периодически повторяющихся импульсов давления, является фактором, сдерживающим разработку и внедрение ряда перспективных технологий.

## 3. Формирование целей и задач исследования

В соответствии с общей методологией исследований разработка теории распада гидроимпульсной струи (ГИС) обуславливает необходимость:

- выполнения базирующегося на объективных и информативных экспериментальных данных феноменологически содержательного описания процесса распада ГИС, с выделением составляющих его “элементарных” актов, процессов и связей между ними;

- разработки формализованной схемы процесса диспергирования ГИС и его математической модели с использованием минимального числа “элементарных” актов, процессов и физических параметров, преимущественным образом определяющих описываемый процесс;
- получения на основе математической модели соотношений, устанавливающих объективные связи между параметрами истечения ГИС, характеристиками дисперсности и факела струи.

#### 4. Основные результаты исследования и их обсуждение

*Содержательное описание* процесса распада ГИС должно основываться на анализе материалов экспериментальных исследований. Однако недостаточная информативность и даже противоречивость известных результатов исследований ГИС [2, 3] предопределили необходимость проведения экспериментальных исследований, акцентированных на установление объективной физической картины их распада. Исследовались струи, истекающие при давлении питания  $P_n = 1,93$  МПа из насадков с диаметрами отверстий  $d_n = 16,6; 17,6; 18,8; 20,8 \times 10^{-3}$  м. Струи нагружались периодическими импульсами давления с амплитудой  $P_u = (0,45 - 1,10)P_n$  и частотой  $f = 100-500$  Гц. Эти колебания генерировались трубкой Вентури, находящейся в жидкостном контуре перед насадком и работающей в режиме периодически – срывной кавитации [5].

Регистрация изменений, происходящих в ГИС, в процессе ее движения осуществлялась скоростной киносъемкой при согласованном выборе параметров истечения струи, частоты и амплитуды генерируемых в ней пульсаций давления и скорости съемки (~ 1500 – 4000 кадр/с). Это обеспечило высокую детальность наглядной информации и, как следствие, возможность объективного ранжирования “элементарных” актов и процессов в ГИС и инициирующих их механизмов по значимости влияния на распад струи. В свою очередь, использование фиксируемых на кинограмме координатной сетки (с шагом 0,1 м) и временных отметок (0,001 с, 0,01 с и 0,1 с), позволило получать объективные количественные данные о геометрических и кинематических характеристиках, трансформирующейся в процессе движения ГИС.

Фрагмент типичной кинограммы ГИС представлен на рис. 1.

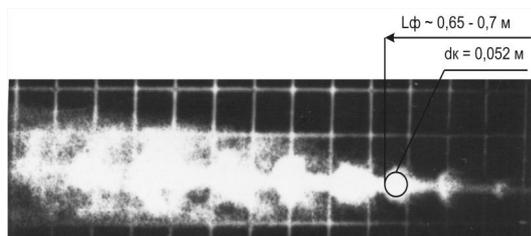


Рис. 1. Фрагмент кинограммы гидроимпульсной струи при диаметре отверстия насадка  $d_0 = 0,0208$  м

Анализ и сопоставление с визуальной картиной ГИС данных об изменении по ее длине диаметра транс-

формирующейся части истекающей в течение периода пульсаций порции жидкости, диаметра остаточной (не трансформирующейся) струи и скорости порции позволил выделить ряд характерных особенностей протекания процесса распада:

- истекающая из насадка струя формируется из последовательности идентичных порций жидкости, каждая из которых состоит из низкоскоростной струи, истекающей при давлении  $P_n$  в течение промежутка времени, соответствующего продолжительности паузы ( $t_n$ ), и высокоскоростной струи, истекающей при давлении  $P_u$  в течение промежутка времени, равного продолжительности действия импульса ( $t_u$ );
- в процессе взаимодействия указанных струй происходит проникание высокоскоростной струи в низкоскоростную, инициирующее трансформацию порции жидкости в структуру, состоящую из осесимметричного формообразования и остаточного участка низкоскоростной струи;
- после первоначального ускорения последующее движение порции жидкости происходит с близкой к постоянной скоростью; при этом диаметр осесимметричного образования возрастает, а диаметр остаточного участка остается практически неизменным;
- в начале процесса трансформации порции жидкости интенсивность диспергирования мала и лишь на удалении от насадка, когда осесимметричное образование принимает форму близкую к сферичной, она скачкообразно возрастает.

*Формализованная схема и математическая модель распада гидроимпульсной струи.* Выявленная при анализе кинограмм содержательная информация позволяет сформулировать базовые предпосылки и допущения для разработки формализованной схемы и математической модели распада гидроимпульсной струи:

- диспергирование ГИС представляет собой повторяющуюся последовательность процессов трансформации и распада идентичных порций жидкости, истекающих из сопла в течение промежутка времени, равного периоду повторения импульсов;
- процесс взаимодействия высокоскоростной и низкоскоростной струй, составляющих порцию жидкости, учитывая кратковременность импульса, четко выраженное начало его действия и текучесть жидкости, может рассматриваться как прямой неупругий удар, инициирующий деформационные процессы в жидкости и определяющий интенсивность их протекания;
- силы аэродинамического происхождения, как не относящиеся в рассматриваемом случае к разряду ударных [6], не оказывают существенного влияния на обусловленные соударением струй деформационные процессы в рассматриваемой порции жидкости;
- в результате соударения струй, образующих порцию жидкости, последняя превращается в структуру, состоящую из осесимметричного формообразования, трансформирующегося в

процессе движения в каплю, и остаточного участка струи, истекающей в течение паузы, движущихся с одинаковой скоростью;

- указанные субструктуры (капля и струя) дробятся в потоке обтекающего их газа независимо друг от друга, образуя распределения капель, суперпозиция которых формирует факел ГИС.

С учетом изложенного рассмотрим прямое центральное соударение двух струй, одна из которых, движущаяся со скоростью  $V_n$ , сформирована во время паузы, а другая, движущаяся со скоростью  $V_u$  – во время импульса, в системе координат, относительно которой первая струя неподвижна.

При неупругом соударении двух струй энергия, расходуемая на работу деформации струй, определяется выражением [7]:

$$\Delta E_0 = \frac{m_n \cdot m_u}{2(m_n + m_u)} \cdot \Delta V^2, \quad (1)$$

где  $m_u$  – масса струи, сформированной во время импульса;  $m_n$  – масса струи, сформированной во время паузы;  $\Delta V = V_u - V_n$  – скорость соударения струй.

Соотношения, определяющие указанные величины, имеют вид [8, 9]:

$$m_n = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \rho \cdot \phi \cdot \frac{\gamma}{f} \cdot \sqrt{2gH_n}, \quad (2)$$

$$m_u = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \rho \cdot \phi \cdot \frac{1-\gamma}{f} \cdot \sqrt{2gH_n}, \quad (3)$$

$$V_n = \phi \cdot \sqrt{2gH_n}, \quad (4)$$

$$V_u = \phi \cdot \sqrt{2gH_n}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\phi$  – коэффициент расхода, учитывающий уменьшение действительной скорости истечения по сравнению с теоретической;  $d_0$  – диаметр отверстия насадка;  $H_n, H_u$  – питательный напор и напор в импульсе, соответственно;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\gamma = t_n / T$  – коэффициент заполнения;  $T$  – период повторения импульсов;  $f$  – частота следования импульсов.

В связи с тем, что, как показано в [9], форма импульса и его частотный диапазон «не изменяют параметров технологического процесса энергетической гидроимпульсной системы», далее будем полагать, что импульсы, генерируемые в ГИС, имеют идеальную прямоугольную форму и не содержат высокочастотных составляющих.

Из (1-5) следует, что энергия, идущая на деформацию порции жидкости, составляет:

$$\Delta E_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{2\sqrt{2}} \cdot \rho \cdot \phi^3 \cdot g^{1,5} \cdot \frac{1-\gamma}{f} \cdot \frac{H_n^{0,5} H_n^{0,5} (H_n^{0,5} - H_n^{0,5})^2}{H_n + \frac{1-\gamma}{\gamma} H_n^{0,5}}, \quad (6)$$

а установившаяся после соударения струй скорость порции жидкости определяется выражением:

$$V_y = \sqrt{2g} \cdot \phi \cdot \left[ H_n^{0,5} + \frac{H_n^{0,5} (H_n^{0,5} - H_n^{0,5})}{H_n^{0,5} + (1-\gamma)/\lambda \cdot H_n^{0,5}} \right]. \quad (7)$$

В результате соударения деформации подвергается вся высокоскоростная (ударяющая) струя и часть сплошного участка низкоскоростной (ударяемой) струи. Протяженность этой части определяется глубиной проникания ударного воздействия, равной длине ударяющей струи [10].

Вследствие указанного обстоятельства, в результате соударения струй, образующих порцию жидкости, в последней формируются две характерных субструктуры:

- деформирующийся под действием силы, обусловленной потерянной при ударе кинетической энергии, участок ГИС длиной:

$$l_d = 2l_n = 2V_n t_n = 2\phi \sqrt{2gH_n} \cdot \frac{\gamma}{f}; \quad (8)$$

- недеформирующаяся от действия указанной силы часть сплошного участка  $l_{nd}$ , истекающей во время паузы струи, длина которой составляет:

$$l_{nd} = l_n - l_d = \sqrt{2g} \frac{\phi}{f} [(1-\gamma)H_n^{0,5} - \gamma \cdot H_n^{0,5}], \quad (9)$$

где  $l_n$  и  $l_u$  – длины струй, истекающих во время паузы и импульса, соответственно.

Важнейшей составной частью математической модели распада ГИС является поле скоростей в деформирующемся, вследствие соударения струй, участке порции жидкости, которое в цилиндрической системе координат, где ось  $x$  совпадает с осью ГИС, а ось  $r$  перпендикулярна ей, определяется зависимостями:

$$V_r = V_r(r, x) \text{ и } V_x = V_x(r, x). \quad (10)$$

Для отыскания этих зависимостей воспользуемся приведенным в [11] решением задачи о пластическом деформировании центральным ударом цилиндрической заготовки, в соответствии с которым радиальная скорость пластической деформации участка струи длиной  $2l_u$  в цилиндрической системе координат, где направление оси  $x$  противоположно направлению движения струи, а начало отсчета совпадает с границей проникания ударного воздействия, описывается зависимостью:

$$V_r = \frac{3\Delta V r x (x - 2l_n)}{8l_n^3}. \quad (11)$$

Осевая составляющая полной скорости деформации определится из условия неразрывности  $\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{V_r}{r} = 0$ , которое с учетом (11) запишется в виде:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{3\Delta V \cdot x \cdot (x - 2l_n)}{4l_n^3}. \quad (12)$$

Интегрируя (12), с учетом того, что при  $x = 0$   $V_x = 0$ , получим, что

$$V_x = \frac{3\Delta V x^2 \left(1_n - \frac{x}{3}\right)}{4l_n^3}. \quad (13)$$

Выражения, определяющие геометрические характеристики деформирующейся части порции жидкости в процессе ее движения, получаются интегрированием (11, 13) при условии, что в момент соударения ( $t=0$ )

$r = r_0 = \frac{d_0}{2}$ , а  $x = 2l_n$  и имеют вид:

$$d = d_0 \cdot e^{\left(\frac{3\Delta V \cdot x(x - 2l_n)}{8l_n^3} \cdot t\right)}, \quad (14)$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{3l_n} \cdot \ln \left| \frac{l_n - \frac{x}{3}}{x} \right| + \frac{1}{10l_n} = \frac{3\Delta V}{4 l_n^2} \cdot t. \quad (15)$$

Используя (14, 15) можно оценить продолжительность промежутка времени  $t_{\phi}$ , в течение которого в порции жидкости, истекающей из отверстия насадка за время между двумя импульсами, формируется структура, состоящая, в общем случае, из капли сферической (или близкой к ней) формы диаметром:

$$d_k \leq \sqrt{3d_0^2 \cdot l_n} \quad (16)$$

и остаточного участка цилиндрической струи диаметром  $d_0$  и длиной:

$$l_{нд} = l_n - l_n. \quad (17)$$

Так, например, как показывают расчеты, выполненные по (14-17), в гидроимпульсной струе с параметрами  $d_0 = 0,0208$  м,  $f=360$  Гц,  $\gamma=0,375$ ,  $H_n = 193$  м и  $H_u = 540$  м в течение времени  $t_{\phi} = 0,00865 - 0,00918$  с, т.е. на расстоянии  $\approx 0,65 - 0,69$  м от насадка, формируется сферическая капля диаметром  $d_k = 0,052$  м, движущаяся со скоростью  $V_y = 77$  м/с. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис. 1. Близкое к полученным по (14, 15) значениям времени формирования капли дает формула:

$$t_{\phi} = \frac{2l_n - d_k}{\Delta V}, \quad (18)$$

полученная из условия, что скорость процесса формообразования определяется скоростью проникания ударяющей струи в ударяемую, равной половине скорости соударения  $-\frac{\Delta V}{2}$  [10].

Количественное значение критерия разрушения капли, движущейся в потоке обтекающего ее газа, в качестве которого традиционно используется число Вебера ( $We$ ), изменяется в диапазоне  $3 < We < 25$  [6, 12].

При «статической» деформации капли в обтекающем ее газовом потоке, когда время нарастания аэродинамических сил велико по сравнению с периодом собственных колебаний капли,  $We_{кр} = 17$ . Для случая внезапного приложения аэродинамической нагрузки и жидкости малой вязкости  $We_{кр} = 8,5$  [12].

По значению  $We_{кр}$  определяется наибольший диаметр капель, образовавшихся в результате распада исходной капли ( $d_k$ ):

$$d_{max} = \frac{2We_{кр} \sigma}{\rho V_y^2}, \quad (19)$$

где  $\sigma$  и  $\rho$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости и плотность газа, соответственно.

Для определения размера капель, образующихся при распаде остаточной струи, целесообразно использовать полученную обработкой экспериментальных данных зависимость [3]:

$$d_{43} = \frac{47 \cdot 10^3 \cdot \nu}{V_y}, \quad (20)$$

где  $d_{43}$  – средневзвешенный по объему всех капель диаметр;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Таким образом, в результате распада порции жидкости образуется диспергированный поток, медианный диаметр капель которого, для случая наиболее широко используемого в практике распределения Розин-Раммлера [13], определяется соотношением:

$$d_{M\%} = \frac{0,362 d_{max} \cdot 2m_n + 0,94 d_{43} \cdot (m_n - m_n)}{m_n + m_n}, \quad (21)$$

или с учетом (2, 3, 7, 19, 20)

$$d_{M\%} = \frac{7,38 \cdot 10^{-2} We_{кр} \cdot \sigma \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) H_n^{0,5} H_n^{0,5} + \gamma \cdot H_n}{\phi^2 \rho_r \left[ (1-\gamma) H_n - \gamma H_n \right]^2} + \frac{10^4 \nu_{ж} (1-\gamma) H_n^{0,5} - \gamma H_n^{0,5}}{\phi (1-\gamma) H_n + \gamma H_n}. \quad (22)$$

Полученное значение  $d_{M\%}$  может быть использовано для определения различных видов среднего диаметра капель в факеле ГИС, представляющих реальный полидисперсный поток фиктивным монодисперсным, отражающим преимущественно те или иные свойства совокупности капель.

К характеристикам формы факела, определяющим его размеры и конфигурацию относятся, прежде всего, начальный диаметр факела  $d_{\phi}$ , угол его раскрытия  $\beta$  и дальность  $l_{GIS}$ .

Начальный диаметр факела определяется диаметром капли, формирующейся в порции жидкости, и может быть оценен по соотношению (рис. 1):

$$d_{i_0} = 4,2 \sqrt[3]{\phi d_0^2 H_n^{0,5} \cdot \frac{\gamma}{f}}. \quad (23)$$

Выражение, определяющее относительный угол раскрытия факела, полученное обработкой экспериментальных данных, имеет вид:

$$\bar{\beta} = \frac{\beta}{\beta_c} = 1,13 - 0,13 e^{-\left(\frac{f}{40}\right)}, \quad (24)$$

где  $\beta_c$  – угол раскрытия цилиндрической струи [2, 13].

Учёт сложного комплекса взаимосвязанных процессов, влияющих на дальность гидравлических струй как сплошных, так и диспергированных, ввиду недостаточной их изученности в настоящее время не представляется возможным. Этим объясняется отсутствие надёжных аналитических методик расчёта дальности гидравлических струй в зависимости от параметров истечения. Указанный вывод в полной мере может быть отнесён к ГИС.

В настоящей работе представлен подход к определению дальности ГИС, основанный на ряде положений, следующих из экспериментально обоснованной феноменологической модели формирования движения и диспергирования ГИС и результатов исследований кинематики гидравлических струй [2, 14 – 16].

Эти основные положения состоят в следующем:

- длина начального участка ГИС в десятки раз меньше её дальности, в связи с чем, может быть исключена из рассмотрения при решении рассматриваемой задачи;
- дальность 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 жидкости, движущееся вдоль оси ГИС;
- остаточная струя порции ГИС продолжает движение, постепенно распадаясь, но оставаясь достаточно компактной, и индуцирует при этом спутный поток воздуха, снижающий сопротивление движению капельного облака;
- распад остаточной струи начинается с её периферии, в связи с чем максимальную дальность полёта будут иметь капли, образующиеся из центральной части остаточной струи.

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 дальности ГИС ( $l_{ГИС}$ ), по сравнению с дальностью сплошной струи ( $l_{спл}$ ) с аналогичными питательным напором и диаметром насадка ( $d_n$ ), будет пропорционально уменьшению массы сплошной струи (остаточной), обусловленному процессом трансформации порции жидкости в течение промежутка времени, равного периоду повторения гидравлических импульсов. При этом соотноше-

ние для определения относительной дальности ГИС будет иметь вид:

$$\bar{l}_{ГИС} = \frac{l_{ГИС}}{l_{спл}} = \frac{l_n - l_n}{l_{спл}}, \quad (25)$$

а с учетом (8) и (9):

$$\bar{l}_{ГИС} = 1 - \gamma \left( 1 + \sqrt{\frac{H_n}{H_n}} \right). \quad (26)$$

Для случая использования в качестве генератора гидравлических импульсов гидроударного клапана [1, 9]:

$$\gamma = \frac{2l_{пт}}{a} \cdot \bar{\tau}_n^a \cdot f, \quad (27)$$

где  $l_{пт}$  – длина питательной трубы устройства генерирования гидравлических импульсов;  $a$  – скорость распространения ударной волны в питательном трубопроводе;  $\bar{\tau}_n^a$  – относительная активная длительность импульса [9].

С учетом (27) соотношение для определения дальности ГИС будет иметь вид:

$$\bar{l}_{ГИС} = 1 - \frac{2l_{пт}}{a} \cdot \bar{\tau}_n^a \cdot f \left( 1 + \sqrt{\frac{H_n}{H_n}} \right). \quad (28)$$

Экспериментальная проверка достоверности определения относительной дальности ГИС в зависимости от параметров истечения жидкости из насадка и конструктивных параметров питательной трубы по (28) осуществлялась на установке, схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.

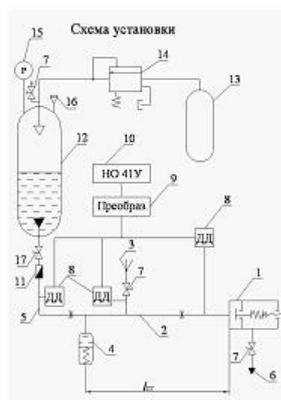


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 - гидроударный клапан; 2 - питательный трубопровод; 3 - насадка; 4 - пневмогидроаккумулятор; 5 - запитывающая магистраль; 6 - сливной трубопровод; 7 - вентиль; 8 - датчики давления; 9 - преобразователь; 10 - осциллограф; 11 - расходомер; 12 - емкость для воды; 13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

Результаты экспериментов по определению относительной дальности ГИС  $\bar{I}_{ГИС}^{\ominus}$  в зависимости от параметров истечения из насадка, полученные для питательных трубопроводов с различными конструктивными характеристиками:

- сборка № 1:  $l_{пт} = 2,2$  м,  $d_{пт} = 0,055$  м, и  $d_n = 0,013$  м;
- сборка № 2:  $l_{пт} = 3,0$  м,  $d_{пт} = 0,068$  м, и  $d_n = 0,019$  м;
- приведены в табл. 1. Здесь же приведены расчётные значения  $\bar{I}_{ГИС}^{расч.}$ , полученные по (28).

Сопоставительный анализ полученных расчётом и экспериментальных результатов определения относительной дальности ГИС в широком диапазоне изменения параметров истечения ( $H_n$ ,  $H_n$ ,  $f$ ) и при различных значениях конструктивных параметров устройства ( $l_{пт}$ ,  $d_{пт}$ ,  $d_n$ ) показал их удовлетворительное совпадение. Отмечено, что увеличение частоты гидравлических импульсов  $f$ , как и увеличение  $H_n$  при неизменном питательном напоре приводит к уменьшению относительной дальности ГИС, что полностью согласуется с предложенной феноменологической моделью гидроимпульсной струи.

Таблица 1

Результаты экспериментов по определению относительной дальности гидроимпульсных струй

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

В целом, хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных показывает, что принятое допущение о зависимости между потерей дальности ГИС и длиной остаточной (сплошной) струи в порции жидкости, истекающей из насадки в течение периода повторения, генерируемых в питательном трубопро-

воде гидравлических импульсов достаточно близко к действительности.

## 5. Выводы

Разработаны формализованная схема и математическая модель распада гидроимпульсной струи, учитывающая основные особенности физической картины исследуемого процесса и представления о центральном неупругом соударении двух струй идеальной несжимаемой жидкости. Установлены зависимости характеристик дисперсности и формы факела от параметров истечения струи.

Предложен методический подход и с использованием разработанной модели диспергирования гидроимпульсной струи получено выражение для расчётного определения её относительной дальности в зависимости от начальных параметров истечения жидкости, согласующееся с экспериментальными данными.

## Литература

1. Способ и устройство для получения струи жидкости с управляемой дисперсностью капель [Текст] : пат. 2140333 Российская Федерация: МПК 7B05B1/58 / 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. – 3 с.
2. Пажи, Д. Г. Распылители жидкости [Текст] / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
3. Исаев, А. П. Гидравлика дождевальных машин [Текст] / А. П. Исаев. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
4. Иванов, В. А. О дроблении жидкой струи [Текст] / В. А. Иванов // ПМТФ. – № 4. – 1966. – С. 30-37.
5. Пилипенко, В. В. Кавитационные автоколебания [Текст] / В. В. Пилипенко. – Киев: Наук. думка, 1989. – 316 с.
6. Вольтский, М. С. Деформация и дробление капель в потоке газа [Текст] / М. С. Вольтский, А. С. Липатов // ИФЖ. – Т.XVIII. – № 5. – 1970. – С. 838-843.
7. Воронков, И. М. Курс теоретической механики [Текст] / И. М. Воронков. – М.: Гостехиздат, 1953. – 552 с.
8. Угинчус, А. А. Гидравлика и гидравлические машины [Текст] / А. А. Угинчус. – Харьков: Изд-во Харьковск. ун-та, 1970. – 395 с.
9. Могендович, Е. М. Гидравлические импульсные системы [Текст] / Е. М. Могендович. – Л.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
10. Лаврентьев, М. А. Проблемы гидродинамики и их математические модели [Текст] / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
11. Соич, Л. О. Исследование поля скоростей перемещения частиц металла при штамповке биметаллического поршня [Текст] / Л. О. Соич // Самолетостроение. Техника воздушного флота. – Вып.45. – Харьков: Вища школа, 1979. – С. 93-94.

12. Лопарев, В. П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости в условиях постепенного нарастания внешних сил [Текст] / В. П. Лопарев // МЖГ. – № 3. – 1975. – С. 174-178.
13. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей [Текст] / В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитянин, Л. А. Клячко, В. И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.
14. Ольшанский, В. П. О траектории гидравлической пожарной струи [Текст] / В. П. Ольшанский // Проблемы пожарной безопасности. – 2003. – Вып. 14 – С. 144-151.
15. Мурзабаев, М. Т. Динамика дождевальных струй [Текст] / М. Т. Мурзабаев, А. Л. Ярин // Механика жидкости и газа. – 1985. – № 5. – С. 60-67.
16. Анаников, С. В. О движении капли в свободной струе [Текст] / С. В. Анаников, Е. В. Поляков // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 1977. – № 1. – С. 11-16.

*У статті викладена методика інженерного розрахунку параметрів удару високошвидкісного пневмоагрегата з вбудованим резервуаром, що ґрунтується на раціональному способі нормування нелінійної математичної моделі з виділенням мінімальної кількості критеріїв динамічної подоби. Завдяки виділенню невеликого числа критеріїв динамічної подоби за допомогою 4-х графіків вдалося охопити всю область існування ударних пневмоагрегатів з вбудованим резервуаром. Дається приклад розрахунку*

*Ключові слова: методика інженерного розрахунку, кінематичні параметри, ударний пневмоагрегат з вбудованим резервуаром*

*В статье изложена методика инженерного расчёта параметров удара высокоскоростного пневмоагрегата со встроенным резервуаром, в основе которой лежит рациональный способ нормирования нелинейной математической модели с выделением минимального количества критериев динамического подобия. Благодаря выделению небольшого числа критериев динамического подобия с помощью 4-х графиков удалось охватить всю область существования ударных пневмоагрегатов со встроенным резервуаром. Дается пример расчёта*

*Ключевые слова: методика инженерного расчёта, кинематические параметры, ударный пневмоагрегат со встроенным резервуаром*

УДК 621.05

## ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО ПНЕВМОАГРЕГАТА СО ВСТРОЕННЫМ РЕЗЕРВУАРОМ

Ю. Л. Атаманов

Директор

ООО «Харьковгазоборудование»

ул. Кооперативная, 6/8,

г. Харьков, Украина, 61003

E-mail: hgo\_rochta@ukr.net

Г. А. Крутиков

Доктор технических наук, профессор

Кафедра «Гидропневмоавтоматика и

гидропривод»\*

E-mail: gkrutikov@gmail.com

М. Г. Стрижак

Кандидат технических наук, старший

преподаватель

Кафедра «Подъёмно-транспортные

машины и оборудование»\*

E-mail: mp9753@mail.ru

\*Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

### 1. Введение

В работе [1] предложена и обоснована рациональная схема управления ударным пневмоагрегатом (ПА) со встроенным резервуаром и даётся его развёрнутая математическая модель, описывающая все фазы движения рабочего органа. Модификация этой схемы представлена на рис. 1. При этом показано,

что в период работы ПА от момента разгерметизации поршня-клапана и седла до момента соприкосновения ударника с заготовкой (вторая фаза работы ПА) ПА можно представить в виде обычного двустороннего пневмопривода с большими начальными объёмами справа и слева. В этом случае, приняв ряд вполне обоснованных допущений, можно найти аналитические выражения для координаты достижения макси-