

## ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА

**Разработка физико-математической модели функционирования гидроабразивной установки подводного резания**А. А. Илюхина,<sup>1, а</sup> В. И. Колпаков,<sup>1, б</sup> В. В. Вельтищев,<sup>1</sup> А. Л. Галиновский,<sup>1</sup> А. В. Хахалин<sup>2, в</sup><sup>1</sup> МГТУ имени Н.Э. Баумана. Россия, 105005, Москва.<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет. Россия, 119991, Москва.

Поступила в редакцию 28.08.2019, после доработки 12.11.2019, принята к публикации 30.01.2020.

Разработана однофазная физико-математическая модель процесса формирования высокоскоростной гидроабразивной струи, реализующей технологию подводной гидроабразивной резки, при прохождении абразивно-жидкостного потока, находящегося под давлением 60–80 МПа, через струеформирующий тракт мобильной гидроабразивной установки. Представлены результаты численного эксперимента. При этом показано влияние основных конструктивных параметров внутреннего профиля струеформирующего элемента (профиля фокусирующей полости, диаметра и длины выходного канала) на геометрические и кинематические параметры формируемой струи и расход гидроабразивной суспензии.

**Ключевые слова:** подводная гидроабразивная резка, высокоскоростная гидроабразивная струя, процесс струеформирования, математическое моделирование.

УДК: 621.924.93:519.63. PACS: 02.60.Cb.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время технологии ультраструйной обработки и очистки с применением высокоскоростной струи жидкости все активнее используются в машиностроении [1–3]. Одновременно эти технологии начинают применяться и в других областях, одной из которых является подводная техника. Например, обитаемые и необитаемые подводные аппараты в настоящее время успешно применяются при выполнении различных подводно-технических работ и для освоения ресурсов Мирового океана [3–7]. Во многих случаях выполнение поставленных задач невозможно без оснащения подводного технического средства специализированным инструментом, способным осуществлять под водой резку различных материалов. В настоящее время в подводной технике с этой целью применяются резакки различных типов, циркулярные и цепные пилы, перфораторы, сверлильные и фрезерные головки. Однако многолетняя практика использования традиционного подводного инструмента показала, что довольно часто существующие традиционные технологии резки материалов под водой не позволяют выполнить требуемые работы. Поэтому задача разработки новых методов резки, реализуемых в подводных условиях и обладающих универсальностью к виду обрабатываемого материала и геометрии реза, является чрезвычайно актуальной.

Одна из технологий, способных решать поставленные задачи, — технология гидроабразивной резки (ГАР), реализующая фрагментацию различных элементов конструкций из различных материалов, включая их размерную обработку, например под сварку, прошивку отверстий и т.п. Так как окружающая морская вода является неограниченным

расходным материалом для ГАР, то реализация такой технологии в подводных условиях представляется вполне логичной и перспективной. Однако развитие технологии ГАР в рассматриваемых условиях требует серьезной научной адаптации из-за специфики использования в затопленном состоянии, а ее практическое применение выдвигает специфические требования к параметрам струеформирующего тракта, а именно к системе подачи гидроабразивной суспензии, параметрам соплового блока и другим.

На сегодняшний день известны работы, посвященные применению ГАР в подводных условиях [8], а также обработке материалов затопленными струями [3, 9, 10]. Однако практически не изучен вопрос оптимизации подводной гидроабразивной обработки по расходу суспензии и скорости обработки. Поэтому цель настоящей работы — определение влияния конструктивных параметров соплового блока (в т.ч. геометрических, прочностных, технологических) на процесс формирования гидроабразивной струи под водой, а также разработка практических рекомендаций для повышения эффективности рассматриваемого технологического процесса. При этом для оценки параметров эффективности формируемого струйного течения использовалась полученная расчетным путем временная функциональная зависимость, характеризующая изменение глубины формируемой каверны в воде, и анализировалась взаимосвязь конструктивных параметров гидросистемы с характером процесса истечения гидроабразивной суспензии (диаметром и скоростью формируемого потока, степенью его диспергирования), а также с величиной расхода гидроабразивной суспензии.

**1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА**

Конструктивные схемы струеформирующих элементов, в рамках которых проводилось исследование влияния их геометрических параметров на процесс

<sup>а</sup> E-mail: [opti156@yandex.ru](mailto:opti156@yandex.ru)<sup>б</sup> E-mail: [kolpakov54@mail.ru](mailto:kolpakov54@mail.ru)<sup>в</sup> E-mail: [avkhakhalin@mail.ru](mailto:avkhakhalin@mail.ru)

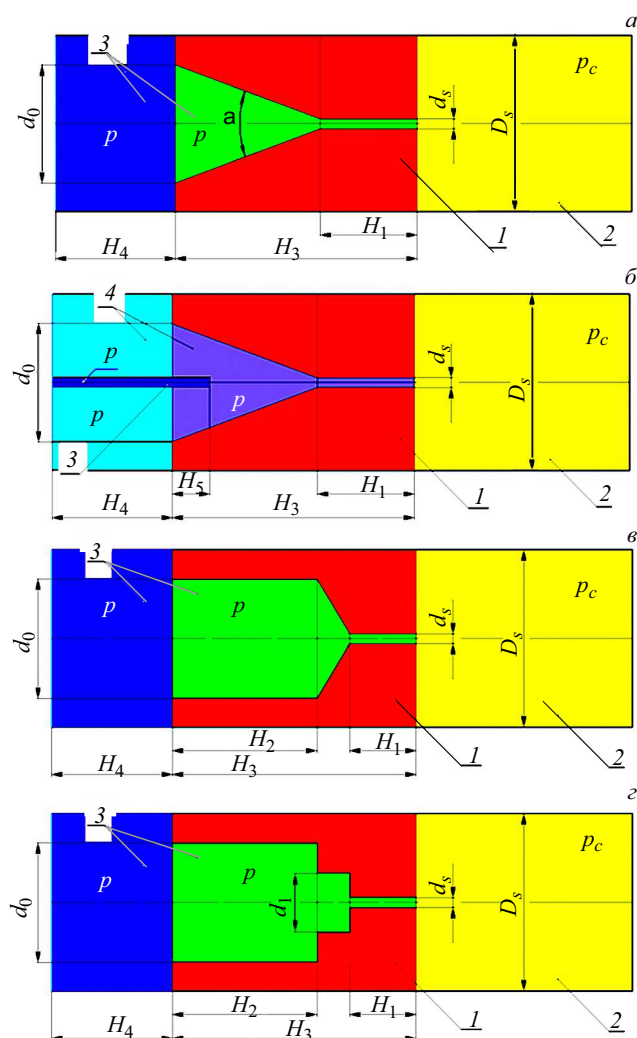


Рис. 1. Конструктивные схемы струеформирующего элемента (сопла или фокусирующей трубки): 1 – сопловый блок; 2 – окружающая среда (вода под давлением  $p_c$ ); 3 – вода с абразивом под давлением  $p$ ; 4 – вода без абразива под давлением  $p$

формирования высокоскоростной гидроабразивной струи, представлены на рис. 1. При этом использовались следующие числовые значения конструктивных параметров:  $D_s = 7.2$  мм – наружный диаметр соплового блока;  $d_0 = 4.8$  мм,  $d_1 = 0.5 \cdot d_0$ ,  $d_s = 0.2\text{--}0.8$  мм – входные (два первых) и выходной диаметры сопла;  $H_3 = 10\text{--}76$  мм – высота соплового блока;  $H_1 \geq 1.5$  мм,  $H_2 = 6.3\text{--}8.5$  мм – высота цилиндрической части соплового блока, прилегающая к входному отверстию;  $\alpha = 13\text{--}180^\circ$  – угол раствора конической части соплового блока. Другие параметры струеформирующего тракта согласно принятой расчетной схеме (рис. 1) принимались равными  $H_4 = 20$  мм;  $H_5 \approx H_3 - H_1$ . В качестве модели гидроабразивной суспензии принята модель однородной субстанции, находящейся под давлением  $p = 60\text{--}80$  МПа (рис. 1, поз. 3). Начальная плотность суспензии рассчитывалась из условия 11% ( $K_{V_a} = 0.11$ ) объемного содержания в воде мелкодисперсных частиц гранатового песка ( $\rho_a = 2.38$  г/см<sup>3</sup>) и составила  $\rho_c = 1.15$  г/см<sup>3</sup>. В качестве жидкой среды, расположенной перед задним срезом струеформирующего

блока (рис. 1, а–г, поз. 2), и перед входом в струеформирующий элемент (рис. 1, б, поз. 4) использовалась обычная вода, начальная плотность которой определялась по ударной адиабате из условия соответствия приложенному к ней внешнему давлению. Очевидно, что при нулевом внешнем давлении ( $p_c = 0$ ) начальная плотность воды равна  $\rho_0 = 1.0$  г/см<sup>3</sup>. Наконец, в качестве материала струеформирующего элемента использовалась модель абсолютно жесткого тела.

Поставленная задача решалась численно в двумерной осесимметричной постановке в неподвижной системе координат с использованием гидродинамической модели взаимодействующих между собой материалов в среде программного комплекса ANSYS/Autodyn. При этом процесс формирования высокоскоростной гидроабразивной струи описывался системой следующих дифференциальных уравнений [11, 12]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{V_y}{y} \right) &= 0, \\ \rho \frac{dV_x}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho \frac{dV_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y}, \\ \rho \frac{de}{dt} &= \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt}, \quad p = p(\rho, e), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $e$  – удельная внутренняя энергия;  $t$  – текущее время;  $x, y$  – осевая и радиальная координаты соответственно;  $V_x, V_y$  – осевая и радиальная компоненты вектора скорости. В приведенной системе уравнений (1) в порядке следования приведены дифференциальные уравнения сохранения массы, импульса, энергии и уравнения состояния взаимодействующих сред в общем виде. При этом в качестве уравнений состояния воды использовались следующие соотношения:

$$\begin{aligned} p &= A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0e, \\ \mu &= (\rho/\rho_0 - 1) \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{и } p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0e, \quad \mu \leq 0,$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  и  $\mu$  – начальное и текущее значения плотности, а также сжимаемость воды соответственно;  $A_1 = 2.2$  ГПа,  $A_2 = 9.54$  ГПа,  $A_3 = 14.57$  ГПа,  $B_0 = B_1 = 0.28$ ,  $T_1 = 2.2$  ГПа,  $T_2 = 0$  ГПа – эмпирические коэффициенты [11]. Для учета кавитации жидкости в процессе истечения из сопла и последующего движения гидроабразивной струи в воде в области отрицательных давлений принудительно принималось  $p = 0$ . В этом случае жидкость не способна воспринимать растягивающие усилия и ведет себя как сыпучая субстанция или, другими словами, является разрушенной. Полагалось также, что в начальный момент времени рассматриваемые жидкости неподвижны, однако подвержены воздействию внешнего давления. Для взаимодействующих выше описанных жидких компонент начальные условия выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} t &= 0, \quad V_x = V_y = 0, \\ p &= 60\text{--}80 \text{ МПа}, \quad p_c = 0\text{--}10 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $p$  – давление в струеформирующей системе;  $p_c$  – давление в окружающей среде (рис. 1, поз. 2).

Табл. 1. Влияние выходного диаметра и длины фокусирующей трубки и давления в гидросистеме на осевую составляющую скорости истечения гидроабразивной суспензии ( $K_{V_a} = 0.11$ ;  $\rho_c = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $V_R = 0$ )

№	$p/p_c$ , МПа	$d_{\text{вых}}$ , мм	Форма струеформирующего тракта			$V_c/V_{c2}$ , км/с	$W_T$ , л/мин ( $\eta = 0.89$ )	$W_p$ , л/мин ( $\eta = 0.7$ )
			Схемы рис. 1	$H_3$ , мм	$H_1$ , мм			
1	80 / -	0.2	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / 0.35	0.63–0.59	0.49–0.46
2	80 / -	0.3	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / 0.36	1.41–1.36	1.10–1.07
3	50 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.295 / -	1.98	1.55
4	60 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.323 / 0.31	2.17–2.08	1.70–1.63
5	80 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / 0.365	2.81–2.75	1.96–1.92
6	100 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.417 / -	2.80	2.20
7	150 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.511 / -	3.43	2.69
8	200 / -	0.4	<i>a</i>	10	1.5	0.590 / -	3.96	3.11
9	80 / -	0.4	<i>a</i>	76	67.5	0.373 / 0.3	2.50–2.01	1.96–1.58
10	80 / -	0.3	<i>a</i>	10	4	0.373 / 0.36	1.41–1.36	1.10–1.07
11	80 / -	0.4	<i>a</i>	10	4	0.373 / 0.365	2.50–2.45	1.96–1.92
12	80 / -	0.5	<i>a</i>	10	4	0.373 / 0.365	3.91–3.83	3.07–3.00
13	80 / -	0.3	<i>a</i>	20	11.5	0.373 / 0.35	1.41–1.32	1.10–1.04
14	80 / -	0.4	<i>z</i>	10	1.5	0.373 / 0.3	2.50–2.01	1.96–1.58
15	85 / 5	0.4	<i>z</i>	10	1.5	0.373 / 0.32	2.50–2.15	1.96–1.68
16	90 / 10	0.4	<i>z</i>	10	1.5	0.373 / 0.335	2.50–2.25	1.96–1.76
17	100 / 20	0.4	<i>z</i>	10	1.5	0.373 / 0.34	2.50–2.28	1.96–1.79
18	120 / 40	0.4	<i>z</i>	10	1.5	0.373 / 0.34	2.50–2.28	1.96–1.79
19	80 / -	0.6	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / -	5.63	4.42
20	80 / -	0.7	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / -	7.66	6.01
21	80 / -	0.8	<i>a</i>	10	1.5	0.373 / -	10.01	7.86

Плотности гидроабразивной суспензии и воды в начальный момент времени определялись по соотношению (2) с учетом условия (3).

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные расчеты поставленной задачи выявили ряд особенностей, присущих исследуемому процессу, в частности было показано, что внутренний профиль и выходной диаметр фокусирующей трубки не оказывают существенного влияния на осевую составляющую скорости истекающей струи. При этом из условия постоянства давления в струеформирующей системе (см. рис. 1, поз. 3, 4) числовые значения скорости истекающей струи ( $V_c$ ) с высокой степенью точности можно рассчитать по формуле Бернулли:

$$V_c = \sqrt{2(p - p_c)/\rho_c}, \quad (4)$$

где  $\rho_c$  – плотность гидроабразивной струи. Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 1, где  $V_{c2}$  – числовые значения скорости струи, полученные путем численного интегрирования системы уравнений (1) при условии реализации постоянства давления в гидросистеме.

Помимо кинематических параметров формируемого гидроабразивного потока, в табл. 1 представлены числовые значения расхода используемой гидроабразивной суспензии ( $W$ ) в зависимости от диаметра выходного отверстия струеформирующей трубки ( $d_s$ ), рассчитанные через 0.25 мс после включения установки. Здесь  $W_T$  – теоретический расход суспензии, определенный в предположении равномерного распределения скоростей по сечению (рис. 2, а), а  $W_p$  –

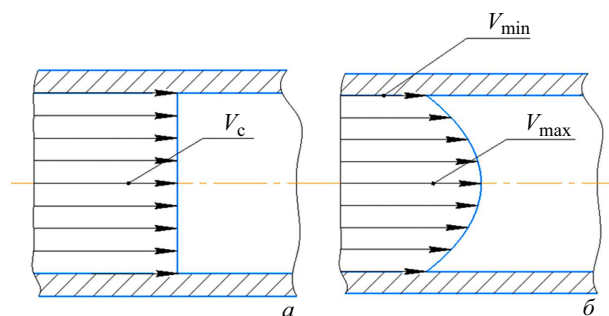


Рис. 2. Распределение вектора скорости по сечению струеформирующего канала теоретическое (а) и фактическое (б)

его расчетное значение. Причем  $W_p$  несколько меньше, чем  $W_T$ . Это объясняется тем, что, как показало расчетное исследование, частицы, расположенные ближе к стенкам, обладают меньшей скоростью, чем в центре струи (рис. 3). При этом распределение скоростей по сечению цилиндрического канала имеет вид параболы (рис. 2, б), максимальное значение осевой составляющей скорости находится на оси симметрии, а минимальное – у стенок канала.

В связи с изложенным можно предложить следующую зависимость, определяющую расход гидроабразивной суспензии (л/мин):

$$W = W_p = \eta \cdot 60\pi(d_s/2)^2 V_c, \quad (5)$$

где  $d_s$  (мм) – диаметр выходного отверстия;  $V_c$  (км/с) – скорость истечения гидроабразивной суспензии из струеформирующей трубки соответственно;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий объемную концентрацию абразива в суспензии и неравномерность распределения осевой составляющей скорости

Табл. 2. Влияние параметров гидросистемы на осевую составляющую скорости истечения и расход гидроабразивной суспензии ( $K_{V_a} = 0.29$ ;  $\rho_c = 1.4 \text{ г/см}^3$ ,  $V_R = 0$ )

№	$p/p_c$ , МПа	$d_{\text{вых}}$ , мм	Форма струеформирующего тракта			$V_c$ , км/с	$W_t$ , л/мин ( $\eta = 0.71$ )	$W_p$ , л/мин ( $\eta = 0.558$ )
			Схемы рис. 1	$H_3$ , мм	$H_1$ , мм			
1	80 / -	0.2	a	10	1.5	0.338	0.452	0.355
2	80 / -	0.3	a	10	1.5	0.338	1.017	0.799
3	50 / -	0.4	a	10	1.5	0.267	1.430	1.123
4	60 / -	0.4	a	10	1.5	0.293	1.566	1.230
5	80 / -	0.4	a	10	1.5	0.338	1.809	1.420
6	100 / -	0.4	a	10	1.5	0.378	2.022	1.588
7	150 / -	0.4	a	10	1.5	0.463	2.477	1.944
8	200 / -	0.4	a	10	1.5	0.535	2.860	2.245
9	80 / -	0.4	a	76	67.5	0.338	1.809	1.420
10	80 / -	0.3	a	10	4	0.338	1.017	0.799
11	80 / -	0.4	a	10	4	0.338	1.809	1.420
12	80 / -	0.5	a	10	4	0.338	2.826	2.219
13	80 / -	0.3	a	20	11.5	0.338	1.017	0.799
14	80 / -	0.4	z	10	1.5	0.338	1.809	1.420
15	85 / 5	0.4	z	10	1.5	0.338	1.809	1.420
16	90 / 10	0.4	z	10	1.5	0.338	1.809	1.420
17	100 / 20	0.4	z	10	1.5	0.338	1.809	1.420
18	120 / 40	0.4	z	10	1.5	0.338	1.809	1.420
19	80 / -	0.6	a	10	1.5	0.338	4.070	3.195
20	80 / -	0.7	a	10	1.5	0.338	5.540	4.349
21	80 / -	0.8	a	10	1.5	0.338	7.235	5.680

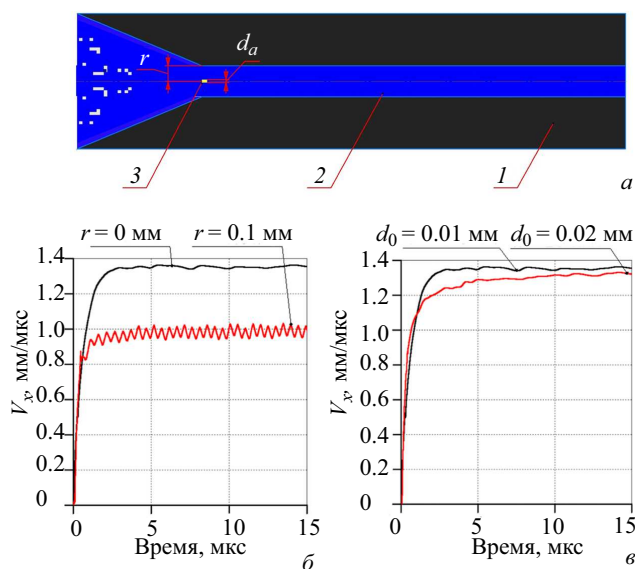


Рис. 3. Расчетная модель (а) и характер набора скорости частицами абразива (1) в канале (2) фокусирующей трубки (3) в зависимости от их расположения (б) и размера (в), где  $d_a$  — диаметр абразивной частицы,  $r$  — удаление частицы от оси симметрии,  $V_x$  — осевая составляющая скорости абразивных частиц

по радиусу формируемого струйного течения. В общем случае этот коэффициент можно рассчитать по следующей формуле:

$$\eta = (1 - K_{V_a}) \frac{V_R R + \pi R (V_c - V_R) / 4}{V_c R} = (1 - K_{V_a}) \frac{V_R + \pi (V_c - V_R) / 4}{V_c}, \quad (6)$$

где  $K_{V_a}$  — объемная концентрация абразива,  $R = d_c/2 \approx d_s/2$  — радиус струи ( $d_c$  — диаметр струи),  $V_c$  и  $V_R$  — продольные составляющие скорости формируемого струйного течения на оси симметрии и на периферии соответственно. При  $K_{V_a} = 0$  и  $V_R = V_c$  имеем  $\eta = 1$ , при  $K_{V_a} = 0.11$  и  $V_R = V_c$  —  $\eta = 0.89$ , при  $K_{V_a} = 0.11$  и  $V_R = V_c/2$  —  $\eta = 0.7945$  и при  $K_{V_a} = 0.11$  и  $V_R = 0$  —  $\eta = 0.7$ . Необходимо отметить, что данные, представленные в табл. 1 и обозначенные  $W_t$ , соответствуют  $\eta = 0.89$ , а  $W_p$  —  $\eta = 0.7$ . Используя разработанный подход (соотношения (4)–(6)), можно оперативно рассчитать параметры формируемого струйного течения для суспензии с любой объемной концентрацией абразива (см., например, табл. 2).

С одной стороны, уменьшение диаметра сопла позволяет снизить расход суспензии (табл. 1 и табл. 2), а с другой стороны, существует нижний предел такого уменьшения. Поэтому в настоящей работе выполнена оценка минимальной величины выходного диаметра. При этом в качестве критериальных параметров подобной оценки послужили кинематические параметры истекающего из сопла струйного течения, а также непрерывность струйного потока и глубина его внедрения в окружающую водную среду.

На иллюстрациях в табл. 3 показаны результаты расчетов изменения характера струйного течения при использовании струеформирующих сопел с разным диаметром выходного отверстия. Они показывают, что при давлении в струеформирующей системе  $p = 80$  МПа и диаметре выходного отверстия  $d_s \leq 0.2$  мм происходит резкое торможение струи при истечении в окружающую водную среду, что приводит к заметному снижению эффективности воздействия сформированной струи на преграду уже



Табл. 3. Влияние диаметра сопла на характер процесса струеформирования при  $p = 80$  МПа

№	$d_s$ , мм	Момент времени, мс	Визуализация
1	0.2	0.25	
2	0.3	0.25	
3	0.4	0.25	
4	0.5	0.20	

в непосредственной близости от среза сопла. С увеличением выходного диаметра до 0.3 мм при тех же давлениях ( $p$ ) глубина внедрения струи в окружающее пространство увеличивается незначительно (п. 2 табл. 3). Дальнейшее увеличение выходного диаметра приводит к постепенной стабилизации истекающей в воду струи (п. 3, 4 табл. 3). Однако при этом более чем в 1.5 раза увеличивается расход рабочей жидкости (п. 2 и 5 табл. 2). Поэтому нижней допустимой границей выходного диаметра сопла  $d_s$  следует принять числовое значение, равное 0.4 мм.

Здесь же необходимо отметить, что с увеличением глубины погружения гидроабразивной установки давление в окружающем ее водном пространстве увеличивается. Это способствует увеличению стабильности формируемой струи и глубины ее проникновения в окружающее водное пространство за счет снижения вероятности развития процесса кавитации в формируемом струйном течении.

Исследование влияния длины сопла на характер режущей струи показало, что удлинение сопла не способствует повышению осевой составляющей скорости истекающей суспензии, а напротив, приводит к ее снижению (рис. 4). Кроме того, увеличение длины канала не способствует дополнительной стабилизации радиальной составляющей скорости суспензии (рис. 5). Поэтому смысл в удлинении сопла отсутствует, особенно при работе на больших глубинах, где стабилизация струи в радиальном направлении обеспечивается давлением окружающей среды.

Выполненное исследование струеформирующего тракта, показанного на рис. 1, б, являющегося аналогом конструктивной схемы, предложенной в патенте № 2500518 [13] и применяемой с целью увеличения срока службы фокусирующей трубки, показало, что эта схема может быть эффективной только в случае подвода струи гидроабразивной суспензии (рис. 1, б, поз. 3) непосредственно к вершине выходного сопла, т.е. при  $H_5 \approx H_3 - H_1$ . В противном случае (при  $H_5 < H_3 - H_1$ ) гидроабразивная суспензия не

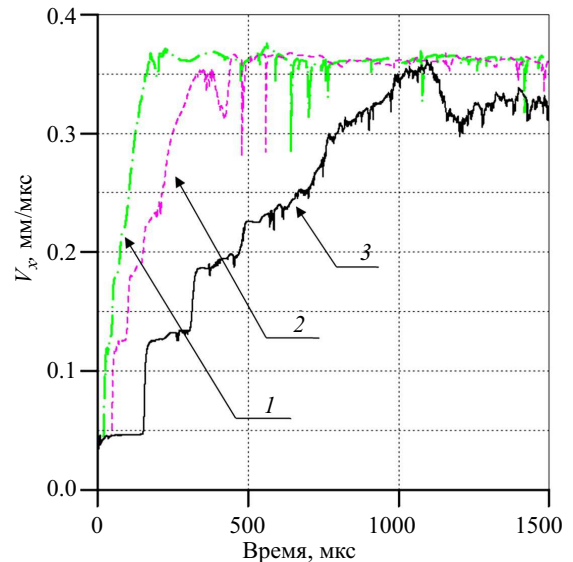
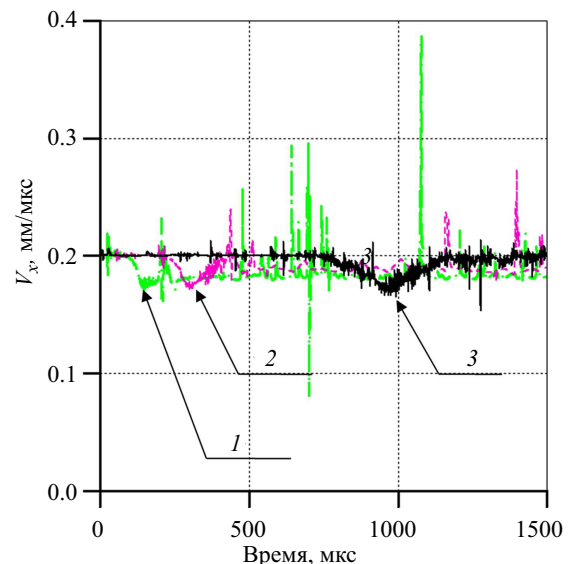
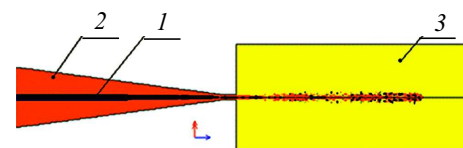




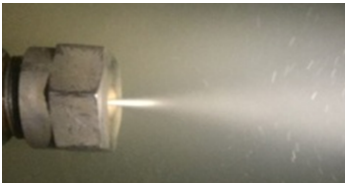



Рис. 4. Осевая составляющая скорости ( $V_x$ ), достигаемая суспензией на выходе из сопла  $d_s = 0.4$  мм с течением времени (1 — для сопла длиной 10 мм, 2 — для сопла длиной 12 мм, 3 — для сопла длиной 20 мм)Рис. 5. Радиальная составляющая скорости ( $V_y$ ), достигаемая суспензией на выходе из сопла  $d_s = 0.4$  мм с течением времени (1 — для сопла длиной 10 мм, 2 — для сопла длиной 12 мм, 3 — для сопла длиной 20 мм)

Рис. 6. Специфика процесса формирования и структура гидроабразивной струи при центральной подаче абразивной суспензии в фокусирующую трубку (1 — абразивная суспензия под давлением, 2 — вода без абразива под давлением, 3 — окружающая среда)

заполняет всю площадь выходного отверстия. Более того, большая часть струи, выходящей из сопла, состоит из обычной воды (поз. 2 на рис. 6), которая заполняет большую часть ее внутреннего объема.

Табл. 4. Результаты экспериментов

№	$H_3$ , мм	$d_s$ , мм	На воздухе	В воде
1	10	0.4		
2	20	0.4		
3	20	0.2		
4	76	0.51		

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Результаты экспериментальной регистрации формируемого струйного потока в воздухе и воде фокусирующими трубками разной длины ( $H_3$ ) с разными выходными диаметрами ( $d_s$ ) представлены на рисунках в табл. 4. Была отмечена более высокая стабильность струй, образованных соплами больших диаметров, что в полной мере соответствует результатам выполненного численного анализа, описанным выше. При этом, как и ожидалось, показано, что на характер поведения струи, вытекающей из короткого сопла (поз. 1, 2), существенное влияние оказывает окружающая среда. Так, более плотная среда (в нашем случае вода) нивелирует радиальные составляющие скорости струи, препятствуя распылению последней. Сравнивая же результаты, полученные при использовании фокусирующих трубок разной длины и разных диаметров (см. поз. 1, 2 и 4), можно заметить, что длина фокусирующей трубки не существенно сказывается на длине сформированной струи в воде.

### ВЫВОДЫ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана однофазная физико-математическая модель гидроабразивной суспензии, учитывающая плотность и объемную концентрацию абразива, сжимаемость и кавитацию воды, и на ее основе — методика численного анализа процесса формирования высокоскоростной гидроабразивной струи, реализующей технологию подводной гидроабразивной прошивки отверстий в деталях из различных конструкционных материалов. Разработанная методика

базируется на численном решении системы дифференциальных уравнений, описывающей поведение сжимаемой гидродинамической сплошной среды в двумерной постановке в эйлеровых координатах с учетом начальных и граничных условий, определяемых конструктивными особенностями струеформирующего тракта гидроабразивной установки.

2. В рамках рассмотренных конструктивных схем струеформирующего тракта, реализующих прохождение абразивно-жидкостного потока под действием давления, генерируемого насосом гидроабразивной установки, установлено влияние геометрических параметров фокусирующей трубки (формы внутреннего профиля, длины и диаметра выходного цилиндрического канала) на характер движения гидроабразивной суспензии внутри цилиндрического канала и на расход гидроабразивной суспензии в процессе функционирования установки. Кроме того, выявлены особенности формирования гидроабразивной струи, ее целостность и кинематические параметры при движении в воздухе и в воде. При этом определено минимально допустимое числовое значение диаметра выходного цилиндрического канала, составляющее 0.4 мм. Показано, что применение ГАР в водной среде позволяет использовать более короткую фокусирующую трубку, по сравнению с применяемой в обычных условиях, что объясняется спецификой формирования гидроабразивной суспензии и характером ее движения в окружающей среде.

3. Апробированы аналитические соотношения, описывающие кинематические параметры формируемой гидроабразивной струи и расход гидроабразивной суспензии от давления в гидроабразивной установке, давления в окружающей водной среде, объемной концентрации абразива в суспензии

и физико-механических свойств абразива и жидкостной составляющей гидроабразивной суспензии.

Исследования выполнялись в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ № 18-29-18081

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лядник А. М., Лядник А. М., Сазанов И. И. // Строительные и дорожные машины. 2012. № 7. С. 50.
2. Грищенко Т. А., Грищенко Т. А., Мелюхов Н. И., Любушкин В. О. // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2017. № 2(31). С. 49.
3. Цыгановский А. Б. // Вібрації в техніці та технологіях. 2010. № 2(58). С. 205.
4. Mullick S. // Optics and Lasers in Engineering. 2016. **83**. P. 32.
5. Miller P. L. Underwater abrasive entrainment waterjet cutting method / Patent No.: US 9,446,500 B2 / Sep. 20, 2016. 24 p.
6. Kivisto B. / Deepwater Subsea Waterjet Impact on HSE / In Offshore Technology Conference-Asia. Kuala Lumpur, Malaysia 25–28 March 2014.
7. Thiyahuddin M., Izzat M., Tan N. W. et al. // Abrasive Waterjet Cutting Simulation Using Coupled SPH-FEA Method / SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment — Society of Petroleum Engineers, 2018.
8. Kivisto B. Water Jet Technology and Applications—Deepwater Subsea // International Conference & Exhibition: Oil Spill India 2011. 29th September-1th October, Holiday Inn Resort, Goa, India. 2011. **30**.
9. Doornbos R. Underwater effectivity characterization of waterjet performance in cleaning applications // WJTA-IMCA Conference and Expo, New Orleans, Louisiana, USA. 2015 November 2–4.
10. Haghbin N., Spelt J. K., Papini M. // International journal of Machine Tools & Manufacture. 2015. **88**. P. 108.
11. Илюхина А. А., Колпаков В. И., Галиновский А. Л., Хахалин А. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 4. С. 101. (Илюхина А. А., Колпаков В. И., Галиновский А. Л., Хахалин А. В. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. **73**, N 4. P. 441.)
12. Бабкин А. В., Колпаков В. И., Охитин В. Н., Селиванов В. В. Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов. Учебник для вузов. В 3 т. Т. 3. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
13. Лившич А. (AU), Лившич Д. (AU), Лившич Д. А. (AU). Режущий инструмент и режущее сопло для гидроабразивного режущего устройства // Патент № 2500518 /21.08.2008. Оpubл. 10.12.2013.

#### The Development of a Physico-Mathematical Model for the Functioning of an Underwater Waterjet Cutting Machine

A. A. Ilyukhina<sup>1,a</sup>, V. I. Kolpakov<sup>1,b</sup>, V. V. Veltoshev<sup>1</sup>, A. L. Galinovsky<sup>1</sup>, A. V. Khakhalin<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia.

<sup>2</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>opti156@yandex.ru, <sup>b</sup>kolpakov54@mail.ru, <sup>c</sup>avkhakhalin@mail.ru.

A single-phase physico-mathematical model of a high-speed waterjet forming process that uses the underwater abrasive waterjet cutting technology while an abrasive-liquid flow under a pressure ranging from 60 to 80 MPa passes through the jet-forming path of a mobile abrasive waterjet machine has been developed. The results of a numerical experiment are presented. It has been shown that the main structural parameters of the internal profile of the jet-forming element (the profile of the focusing cavity, diameter and length of the output-channel) influence the geometric and kinematic parameters of the formed jet and the consumption of the hydro-abrasive suspension.

*Keywords:* underwater abrasive waterjet cutting, high-speed waterjet, jet-formation process, mathematical modeling.

PACS: 02.60.Cb.

Received 28 August 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 2. Pp. 167–174.

#### Сведения об авторах

1. Илюхина Анна Андреевна — аспирант; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: opti156@yandex.ru.
2. Колпаков Владимир Иванович — доктор техн. наук, профессор; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: kolpakov54@mail.ru.
3. Вельтищев Вадим Викторович — доктор техн. наук, зав. кафедрой, зав. отделом «Подводные системы» НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана; тел. (499) 263-61-15, e-mail: vvv@bmstu.ru.
4. Галиновский Андрей Леонидович — доктор техн. наук, профессор; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: galcomputer@mail.ru.
5. Хахалин Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-34, e-mail: avkhakhalin@mail.ru.