

УДК 621.924.93:519.63

doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39

# Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки

А.А. Илюхина, В.И. Колпаков, В.В. Вельтищев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Engineered Estimate of the Design Parameters of a Built-up Jet-Forming Nozzle for Mobile Underwater Waterjet Cutting Systems

A.A. Ilyukhina, V.I. Kolpakov, V.V. Veltishchev

Bauman Moscow State Technical University

Адаптация технологии гидроабразивной резки к подводным условиям работы позволит решить различные задачи при выполнении подводно-технических работ, в том числе по обслуживанию техногенных объектов. Реализовать такую технологию под водой можно с помощью мобильных установок, которые обладают малой мощностью, что накладывает определенные ограничения на их применение. Предложен способ повышения эффективности работы мобильных установок, реализующих подводную гидроабразивную резку. Способ основан на использовании составного струеформирующего тракта, содержащего алмазное сопло, дополнительную переходную втулку и стандартную фокусирующую трубку. Приведена конструкция алмазного сопла. Описана физико-математическая модель процесса формирования высокоскоростной струи, реализующей технологию подводной гидроабразивной резки, при прохождении потока суспензии, находящейся под давлением, через струеформирующий тракт предложенной конструкции. На основании расчетов по разработанной модели и натурных экспериментов выявлено влияние параметров конструктивных элементов составного струеформирующего тракта на выходные характеристики струйного течения. Оценена возможность и показана целесообразность использования такой конструкции для управления выходными характеристиками формируемой высокоскоростной струи.

**Ключевые слова:** мобильная установка, гидроабразивная суспензия, подводная гидроабразивная резка, высокоскоростная струя, струеформирующий тракт, процесс формирования струи

The adaptation of waterjet cutting technology to underwater working conditions will allow solving various tasks when performing underwater technological operations, including maintenance of man-made hazardous objects. The implementation of such technology under water is possible with the application of mobile installations having low power, which imposes certain restrictions on its use. A method for improving the efficiency of mobile installations implementing underwater waterjet cutting is proposed. The method is based on the use of a built-up jet-forming path consisting of a diamond nozzle, an additional transition tube and a standard focusing tube. The structural externality of the diamond nozzle is given. A physical and mathematical model of the process of forming a high-speed jet which implements the technology of underwater hydro- or waterjet cutting, when the flow of

a suspension under pressure passes through the jet-forming path of the proposed design, is described. Using calculations based on the developed model and results of field experiments, the effect of the structural element parameters of the built-up jet-forming path on the output characteristics of the formed jet flow is determined. The possibilities of applying such a design for controlling the output characteristics of the formed high-speed jet are assessed and the practicability of its use is indicated.

**Keywords:** mobile installation, waterjet suspension, underwater waterjet cutting, high-speed jet, jet-forming path, jet-forming process

Развитие технологий с применением высокоскоростной струи жидкости [1] предусматривает разработку технологии, позволяющей проводить под водой резку различных материалов и техногенных объектов [2–4].

Использование при выполнении подобных операций существующих технологий резки (например, лазерной, плазменной, газовой и электрической) [5, 6], приводит к выделению большого количества тепла, что может повлечь за собой негативные последствия [7, 8].

Применение гидроабразивной резки (ГАР) позволяет практически исключить нагрев обрабатываемого материала [9]. Поэтому адаптация ГАР к подводным условиям работы позволит реализовать не только фрагментацию затопленных конструкций [10, 11], но и решить задачи, связанные с обслуживанием техногенных объектов [12].

Для работы под водой используют мобильные установки ГАР, необходимая мощность которых  $N$  не превышает 2 кВт. Ограничения мощности влияют на технические параметры мобильной установки следующим образом:

$$N = \frac{Qp_{in}}{60\eta} \leq 2 \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход жидкости, л/мин;  $p_{in}$  — давление в гидросистеме, МПа;  $\eta$  — коэффициент

полезного действия (КПД) мобильной установки [13].

Вследствие имеющихся ограничений производительность мобильных установок ГАР существенно ниже стационарных.

Цель работы — изыскание возможностей повышения эффективности мобильных установок ГАР обоснованным выбором рациональных конструктивных характеристик соплового блока.

**Физико-математическая модель процесса истечения гидроабразивной суспензии.** Для выявления особенностей процесса формирования струйного течения в подводных условиях разработана обобщенная параметрическая схема, приведенная на рис. 1.

Струеформирующее сопло считалось абсолютно жестким твердым телом, а рассматриваемый процесс описывался двумерной гидродинамической моделью, включающей в себя уравнения сохранения (массы, импульса, энергии) и уравнения состояния взаимодействующих между собой сред (гидроабразивной суспензии и воды) [14, 15].

При этом струеформирующее сопло принято абсолютно жестким. Для описания жидких субстанций применялась полиномиальная зависимость

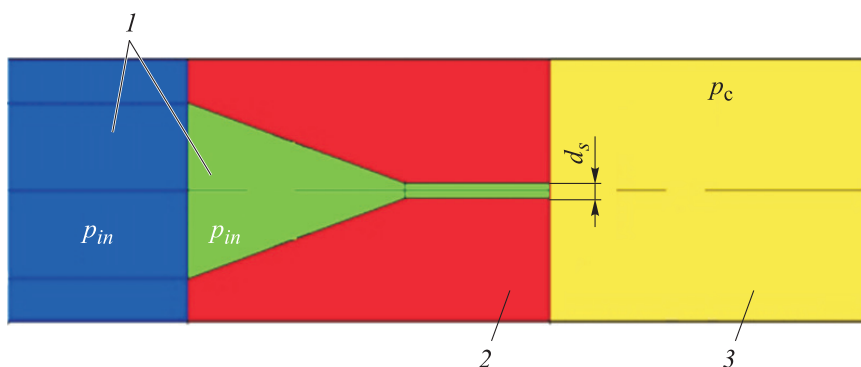


Рис. 1. Обобщенная параметрическая схема струеформирующего тракта: 1 — гидроабразивная суспензия под давлением  $p_{in}$ ; 2 — струеформирующее сопло; 3 — окружающая среда под давлением  $p_c$

$$p = \begin{cases} A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e & \text{при } \mu = (\rho/\rho_0 - 1) \geq 0; \\ T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e & \text{при } \mu \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$  — эмпирические коэффициенты,  $A_1 = 2,2$  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;  $\mu$  — сжимаемость воды;  $\rho_0$  и  $\rho$  — начальная и текущая плотность воды;  $e$  — удельная внутренняя энергия [15].

Предполагалось, что гидроабразивная суспензия является однородной жидкостью. В этом случае воду окружающей среды 3 (см. рис. 1) и гидроабразивную суспензию 1 можно описать одним и тем же соотношением (2). Различие заключалось в начальной плотности жидкости: для воды она составляла


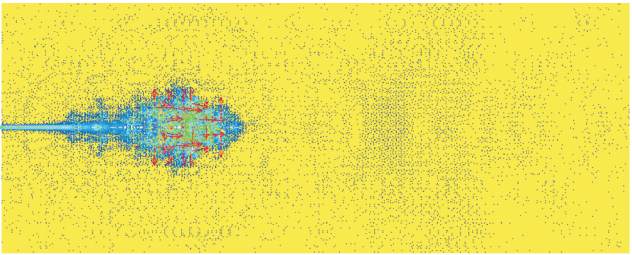

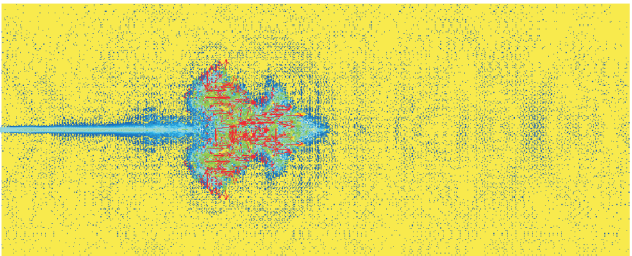

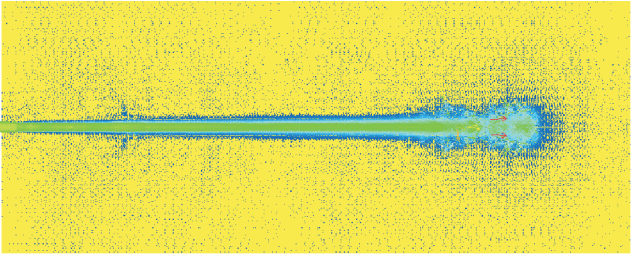
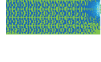
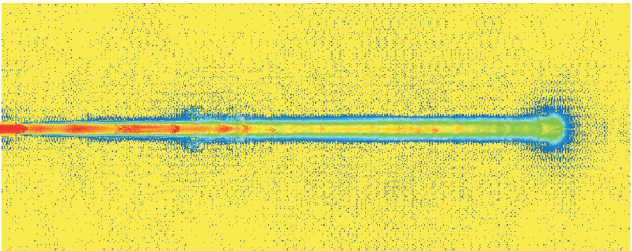
$1,0 \text{ г/см}^3$ , для гидроабразивной суспензии — определялась по объемной или массовой концентрации и изменялась в диапазоне  $1,15 \dots 1,40 \text{ г/см}^3$ .

Результаты математического моделирования поставленной двумерной осесимметричной задачи в программном комплексе ANSYS-AUTODYN позволили выявить зависимость между выходным диаметром струеформирующего сопла  $d_s$  и глубиной проникновения сформированной режущей струи в окружающее водное пространство (табл. 1).

Для оценки минимального значения выходного диаметра струеформирующего сопла  $d_s$  использованы кинематические параметры истекающего из сопла струйного течения, а также глубина внедрения струи в окружающую вод-

Таблица 1

Влияние выходного диаметра сопла на характер формирования струи при давлении  $p_{in} = 80$  МПа

Выходной диаметр $d_s$ , мм	Момент времени, мс	Картина формирования струи	
0,2	0,25		
0,3	0,25		
0,4	0,25		
0,5	0,20		

ную среду. Анализ картин формирования струи, приведенных в табл. 1, показывает, что при давлении  $p_{in} = 80$  МПа и диаметре выходного отверстия  $d_s \leq 0,2$  мм происходит резкое торможение струи при истечении в воду, что вызывает заметное снижение эффективности воздействия сформированной струи на преграду в непосредственной близости от среза сопла.

С увеличением выходного диаметра до 0,3 мм при том же давлении глубина внедрения струи в окружающее пространство растет незначительно (см. табл. 1). Дальнейший рост выходного диаметра  $d_s$  приводит к постепенной стабилизации истекающей в воду гидроабразивной струи.

Для определения расхода гидроабразивной суспензии путем обработки результатов численных расчетов предложена зависимость

$$Q_{г.с} = \alpha \cdot 60 \pi (d_s/2)^2 v_{г.с}, \text{ л/мин}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий объемную концентрацию абразива в суспензии и неравномерность распределения осевой составляющей скорости по радиусу формируемого струйного течения;  $v_{г.с}$  — скорость истечения гидроабразивной суспензии из струеформирующего сопла, км/с.

Коэффициент, учитывающий объемную концентрацию абразива в суспензии и неравномерность распределения осевой составляющей скорости по радиусу формируемого струйного течения,

$$\alpha = (1 - K_{V\alpha}) \frac{v_R + \pi(v_{г.с} - v_R)/4}{v_{г.с}}$$

Здесь  $K_{V\alpha}$  — объемная концентрация абразива в суспензии;  $v_R$  — продольная составляющая скорости формируемого струйного течения на периферии, км/с;  $v_{г.с} = \sqrt{2(p_{in} - p_c) / \rho_{г.с}}$  — продольная составляющая скорости формируемого струйного течения на оси симметрии, км/с;  $\rho_{г.с}$  — плотность гидроабразивной суспензии, г/см<sup>3</sup>.

При  $K_{V\alpha} = 0$  и  $v_R = v_{г.с}$  имеем  $\alpha = 1$ , при  $K_{V\alpha} = 0,11$  и  $v_R = v_{г.с}$  —  $\alpha = 0,890$ , при  $K_{V\alpha} = 0,11$  и  $v_R = v_{г.с}/2$  —  $\alpha = 0,795$ , а при  $K_{V\alpha} = 0,11$  и  $v_R = 0$  —  $\alpha = 0,700$ . Следует отметить, что с помощью разработанного подхода можно оперативно рассчитать параметры формируемого струйного течения для суспензии с любой объемной концентрацией абразива.

В соответствии с полученными результатами математического моделирования с использова-

Таблица 2

**Результаты исследования влияния физико-геометрических параметров гидросистемы на потребляемую мощность установки при КПД  $\eta = 0,95$  и начальной плотности  $\rho_0 = 1,15$  и  $1,40$  г/см<sup>3</sup>**

$d_s$ , мм	$p_{in}$ , МПа	Q, л/мин	N, кВт
0,3	50	0,87/0,63	0,76/0,55
	60	0,96/0,69	1,01/0,73
	70	1,03/0,75	1,26/0,92
	80	1,10/0,80	1,54/1,12
	90	1,17/0,85	1,85/1,34
	100	1,24/0,89	<b>2,18/1,56</b>
0,4	50	1,55/1,12	1,36/0,98
	60	1,70/1,23	1,79/1,29
	70	1,84/1,33	<b>2,26/1,63</b>
	80	-/1,42	-/1,99
	90	-/1,51	<b>-/2,38</b>
0,5	50	2,43/1,75	<b>2,13/1,54</b>
	60	2,66/1,92	<b>2,80/1,85</b>
	70	-/2,08	<b>-/2,55</b>

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для  $\rho_0 = 1,15$  г/см<sup>3</sup>, в знаменателе — для  $\rho_0 = 1,40$  г/см<sup>3</sup>.

нием формул (1) и (3) определена зависимость потребляемой мощности мобильной установки ГАР от физико-геометрических параметров гидросистемы. Результаты исследования влияния физико-геометрических параметров гидросистемы на потребляемую мощность установки при КПД  $\eta = 0,95$  и двух значениях начальной плотности гидроабразивной суспензии ( $\rho_0 = 1,15$  и  $1,40$  г/см<sup>3</sup>) приведены в табл. 2, где жирным шрифтом выделены значения мощности, превышающие допустимый уровень.

**Результаты математического моделирования.**

Анализ данных табл. 2 показывает, что снижение выходного диаметра струеформирующего сопла позволяет повысить давление в гидросистеме без превышения ограничений на ее предельную мощность. С учетом того, что лучшие характеристики (целостность и глубина проникновения в толщу воды) формируемой струи реализуются при увеличении выходного диаметра струеформирующего тракта, а снижение расхода гидроабразивной суспензии и, соответственно, мощности установки достигается

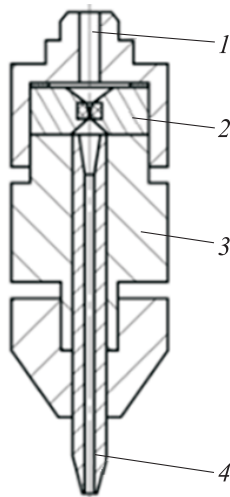


Рис. 2. Конструктивная схема составного сопла:  
1 — канал подвода воды; 2 — алмазное сопло;  
3 — оправка; 4 — фокусирующая трубка

уменьшением выходного диаметра сопла, разработана конструктивная схема составного соплового блока (далее составное сопло), приведенная на рис. 2.

Особенностью предлагаемого струеформирующего тракта является наличие двух составных частей: короткого алмазного сопла 2 с малым выходным диаметром, обеспечивающего ограничение расхода гидроабразивной суспензии, и стандартной фокусирующей трубки 4, больший внутренний диаметр которой позволяет добиться лучшего проникновения сформированной режущей струи в толщу воды.

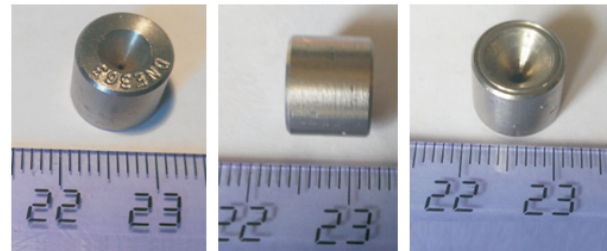
**Экспериментальное исследование.** В целях апробации высказанной идеи проведена серия натурных экспериментов. Для этого изготовлено алмазное сопло (рис. 3, а), геометрические характеристики которого приведены на рис. 3, б.

Первую серию натурных экспериментов проводили при истечении гидроструи в резервуар с водой при давлении  $p_{in} = 50$  МПа. В процессе эксперимента сравнивали выходные геометрические параметры струй, полученных при истечении воды из составного сопла и стандартной фокусирующей трубки.

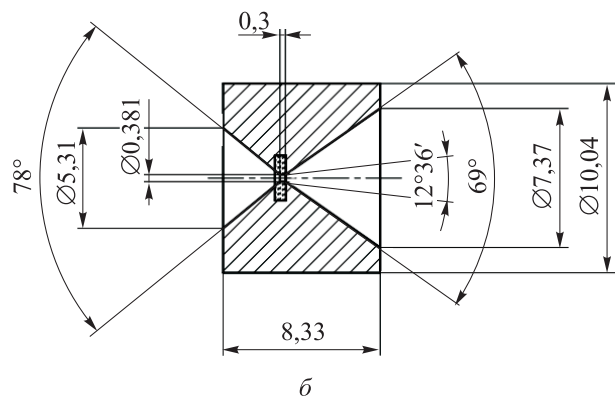
Оцениваемые геометрические параметры струйного течения показаны на рис. 4. К ним относятся:  $\alpha$  — угол при вершине конической части (угол раствора) формируемого струйного течения;  $d_{стр}/D$  — отношение диаметра струи  $d_{стр}$  к диаметру оправки  $D$  на расстоянии диаметра оправки от выходного среза сопла;  $L$  — длина видимой в воде части струи.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3, где ФТ — фокусирующая трубка; АС — алмазное сопло.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что применение алмазного сопла снижает угол раствора струи  $\alpha$ . Это позволяет получить более сфокусированное струйное



а



б

Рис. 3. Внешний вид алмазного сопла в разных проекциях (а) и его геометрические характеристики (б)

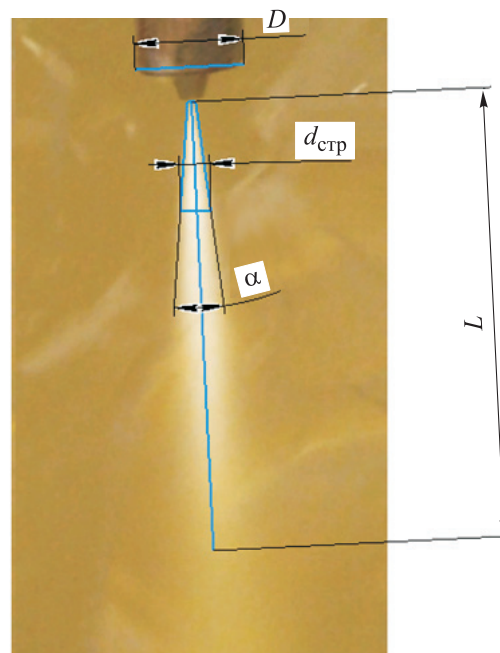

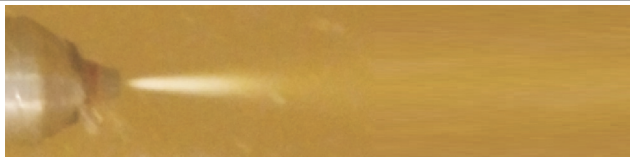




Рис. 4. Оцениваемые геометрические параметры струи

Таблица 3

Результаты исследования влияния алмазного сопла на процесс формирования струи

Тип сопла (диаметр ФТ, мм)	$\alpha$ , град	$L/D$	$d_{стр}/D$	$L$ , мм	Картина формирования струи
ФТ (0,40)	11	1,18	-	12	
АС + ФТ (0,40)	8	1,10	-	11	
ФТ (0,51)	11	4,13	0,28	41	
АС + ФТ (0,51)	8	2,17	0,21	22	

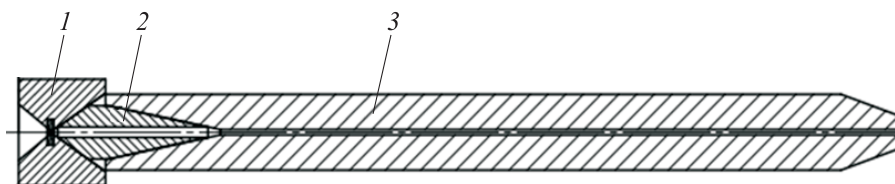


Рис. 5. Конструктивная схема составного сопла:  
1 — алмазное сопло; 2 — промежуточная втулка; 3 — фокусирующая трубка

течение. Применение в составной конструкции фокусирующей трубки большего диаметра способствует увеличению длины формируемой струи при сохранении расхода гидроабразивной суспензии за счет меньшего диаметра алмазного сопла.

В то же время наличие алмазного сопла снижает длину видимой части высокоскоростной струи, что в перспективе может накладывать ограничения на технологический процесс резки изделий, находящихся в затопленном состоянии. Причиной снижения длины видимой части струи, по-видимому, является наличие полости между алмазным соплом и фокусирующей трубкой. Эта полость не препятствует быстрому распылению жидкости при ее прохождении через алмазное сопло.

Для уменьшения отмеченного недостатка предложено в указанной полости разместить промежуточную втулку 2 (рис. 5). Внешний вид

промежуточной втулки с внутренним диаметром 1 мм показан на рис. 6.

Результаты второй серии экспериментов по выявлению влияния промежуточной втулки на длину формируемой струи приведены в табл. 4.


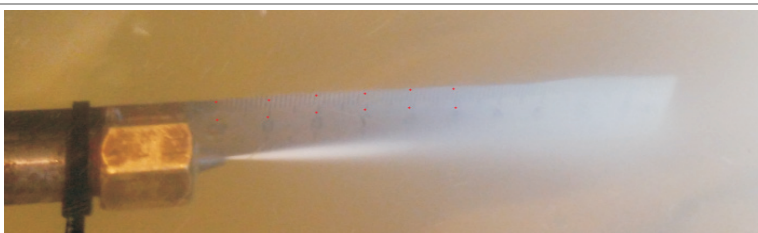

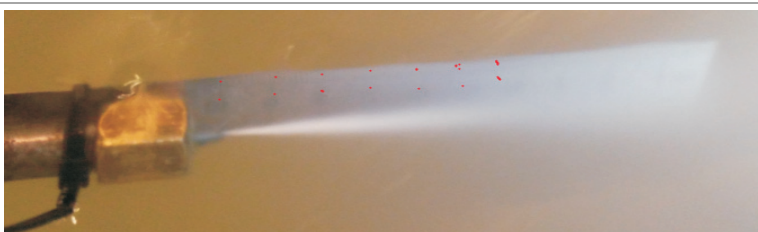
Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что наличие промежуточной втулки спо-



Рис. 6. Внешний вид промежуточной втулки с внутренним диаметром 1 мм

Таблица 4

## Результаты исследования влияния промежуточной втулки на длину формируемой струи

Конструкция составного сопла	$L$ , мм	$p_{in}$ , МПа	Результаты экспериментов
Без втулки	30	50	
Со втулкой	40	50	
Без втулки	45	70	
Со втулкой	60	70	

способствует увеличению длины идентифицируемой струи, формируемой составным соплом, на 30 %. Кроме того, сравнение данных, приведенных в табл. 3 и 4, указывает на соответствие длин идентифицируемых струй, полученных с применением только фокусирующей трубки и составного сопла. При этом составное сопло позволяет в 1,5 раза снизить расход гидроабразивной суспензии за счет меньшего диаметра алмазного сопла, что позволяет повысить эффективность мобильной установки подводной ГАР в целом.

## Выводы

1. Установлено, что применение в мобильных установках подводной ГАР составного струеформирующего тракта, включающего в себя алмазное сопло, переходную втулку и фокусирующую трубку, позволяет снизить расход

гидроабразивной суспензии в 1,5 раза по сравнению с таковым в конструкции, содержащей только фокусирующую трубку, при неизменной длине идентифицируемой струи. Это подтверждает целесообразность использования предложенной конструкции для управления выходными характеристиками формируемой высокоскоростной струи.

2. Показана возможность двукратного увеличения длины идентифицируемой формируемой струи при сохранении значений расхода и давления в гидросистеме путем увеличения диаметра фокусирующей трубки, входящей в состав конструкции струеформирующего элемента.

3. Выявлено влияние отдельных элементов разработанной составной конструкции на характер формирования струи в процессе функционирования мобильной установки ГАР.

## Литература

- [1] Thiyahuddin I., Tan N.W., Dindi M., Ikhranizam M., Ros M. Abrasive Waterjet Cutting Simulation Using Coupled SPH-FEA Method. *SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment. Society of Petroleum Engineers. Conference Paper*, 2018, January, doi: 10.2118/193949-MS
- [2] Кононенко В.Я. Использование способа сухой сварки при ремонте подводных переходов газо- и нефтепроводов в России. *Автоматическая сварка*, 2010, № 5, с. 54–59.
- [3] Debruyne S., Massenhove K.V., Brackx K. Real-time underwater abrasive water jet cutting process control. *Proceedings of EuroNoise*, 2015, vol. 10, pp. 1375–1379.
- [4] Kivisto B. Water jet Technology and Applications-Deep-water Subsea. *Oil Spill India. Conference*, Goa, India, 2011, vol. 30. URL: [http://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/White-Paper-Subsea-Waterjetting\\_0.pdf](http://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/White-Paper-Subsea-Waterjetting_0.pdf) (accessed 06 October 2020).
- [5] Брыных А., Шустек Л., Елинскис А. Опорожнение, химическая очистка и консервация нефтепровода Ду 700 Полоцк–Вентспилс на участке длиной 250 км. *Трубопроводный транспорт: теория и практика*, 2011, № 3, с. 7–11.
- [6] Лекарева А.В., Кобзев А.А., Махфуз А.А. Особенности построения мобильного РТК гидроабразивной резки труб нефтепроводов. *Экстремальная робототехника*, 2018, т. 1, № 1, с. 367–376.
- [7] Созинова Т.В., Рябцева А.Э., Яковцев П.А. Применение гидроабразивной резки в производстве авиационной техники для увеличения безопасности. *Успехи современного естествознания*, 2010, № 10, с. 48–49.
- [8] Матризаев М.Ю., Халлыев Н.Х., Гумеров А.К. Методология повышения эффективности производства ремонтно-строительных работ подводных промысловых трубопроводов, бывших в эксплуатации. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2016, № 2, с. 74–83.
- [9] Пизинцале Л.В., Александровская Н.И., Варбанец Р.А. Выбор технологического процесса утилизации корпуса судна методом экспертных оценок. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология*, 2015, № 1, с. 14–20.
- [10] ElaineMaslin. Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-highpressure *Offshore Engineer*. URL: <https://www.oedigital.com/subsea/item/4249-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure> (accessed 05 October 2020).
- [11] Kivisto B. Deepwater Subsea Waterjet Impact on HSE. *Offshore Technology Conference Asia*, 25–28 March, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, 6 p., doi: <https://doi.org/10.4043/24783-MS>
- [12] Архипов А.Н., Кобзев А.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А., Петухов Е.Н. Анализ роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6, с. 73–73. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15697> (дата обращения 06 октября 2020).
- [13] Савин И.Ф., Сафонов П.В. *Основы гидравлики и гидропривод*. Москва, Высшая школа, 1978. 222 с.
- [14] Колпаков В.И., Илюхина А.А. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 9, с. 1–8, doi: 10.18698/2308-6033-2019-9-1913
- [15] Plyukhina A.A., Kolpakov V.I., Galinovskii A.L., Khakhalin A.V. The Features of Hydroabrasive Cutting of Honeycomb Panels of Space Vehicles. *Moscow University Physics Bulletin*, 2018, vol. 73 (4), pp. 441–446, doi: 10.3103/S0027134918040069

## References

- [1] Thiyahuddin I., Tan N.W., Dindi M., Ikhranizam M., Ros M. Abrasive Waterjet Cutting Simulation Using Coupled SPH-FEA Method. *SPE Symposium: Decommissioning and*



- Abandonment. Society of Petroleum Engineers. Conference Paper*, 2018, January, doi: 10.2118/193949-MS
- [2] Kononenko V.Ya. Application of method of dry welding in repair of underwater passages of gas and oil pipelines in Russia. *Avtomaticheskaya svarka*, 2010, no. 5, pp. 54–59 (in Russ.).
- [3] Debruyne S., Massenhove K.V., Brackx K. Real-time underwater abrasive water jet cutting process control. *Proceedings of EuroNoise*, 2015, vol. 10, pp. 1375–1379.
- [4] Kivisto B. Water jet Technology and Applications-Deepwater Subsea. *Oil Spill India. Conference*, Goa, India, 2011, vol. 30. Available at: [http://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/White-Paper-Subsea-Waterjetting\\_0.pdf](http://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/White-Paper-Subsea-Waterjetting_0.pdf) (accessed 06 October 2020).
- [5] Brynykh A., Shustek L., Elinskis A. Emptying, chemical cleaning and conservation of the DN 700 Polotsk–Ventspils oil pipeline on a 250 km long section. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2011, no. 3, pp. 7–11 (in Russ.).
- [6] Lekareva A.V., Kobzev A.A., Makhfuz A.A. Features of constructing a mobile robotic complex of waterjet cutting of oil pipelines. *Ekstremal'naya robototekhnika*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 367–376 (in Russ.).
- [7] Sozinova T.V., Ryabtseva A.E., Yakovtsev P.A. Application of waterjet cutting in the production of aviation equipment to increase safety. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2010, no. 10, pp. 48–49 (in Russ.).
- [8] Matrizayev M.Yu., Khallyyev N.Kh., Gumerov A.K. Methodology of improving efficiency of construction and repair works on underwater field pipelines that were in operation. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, 2016, no. 2, pp. 74–83 (in Russ.).
- [9] Pizintsale L.V., Aleksandrovskaia N.I., Varbanets R.A. Choice of the technological process of the ship hull utilization using the method of expert assessments. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 1, pp. 14–20 (in Russ.).
- [10] ElaineMaslin. *Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-highpressure Offshore Engineer*. Available at: <https://www.oedigital.com/subsea/item/4249-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure> (accessed 05 October 2020).
- [11] Kivisto B. Deepwater Subsea Waterjet Impact on HSE. *Offshore Technology Conference Asia*, 25–28 March, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, 6 p., doi: <https://doi.org/10.4043/24783-MS>
- [12] Arkhipov A.N., Kobzev A.A., Lekareva A.V., Makhfuz A.A., Petukhov E.N. Analysis of robotization of oil pipeline hydraulic cutting process. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6 (in Russ.). Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15697> (accessed 06 October 2020).
- [13] Savin I.F., Safonov P.V. *Osnovy gidravliki i gidroprivod* [Basics of hydraulics and hydraulic drive]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1978. 222 p.
- [14] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. Features of mathematical modeling the destruction of structures of different materials under the high-speed waterjet. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2019, is. 9, pp. 1–8 (in Russ.), doi: 10.18698/2308-6033-2019-9-1913
- [15] Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Galinovskii A.L., Khakhalin, A.V. The Features of Hydroabrasive Cutting of Honeycomb Panels of Space Vehicles. *Moscow University Physics Bulletin*, 2018, vol. 73 (4), pp. 441–446 (in Russ.), doi: 10.3103/S0027134918040069

Статья поступила в редакцию 05.10.2020

## Информация об авторах

**ИЛЮХИНА Анна Андреевна** — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [ilanna\\_a@mail.ru](mailto:ilanna_a@mail.ru)).

**КОЛПАКОВ Владимир Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [kolpakov54@mail.ru](mailto:kolpakov54@mail.ru)).

**ВЕЛЬТИЩЕВ Вадим Викторович** — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [vvv@bmstu.ru](mailto:vvv@bmstu.ru)).

## Information about the authors

**ILYUKHINA Anna Andreevna** — Postgraduate student, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [ilanna\\_a@mail.ru](mailto:ilanna_a@mail.ru)).

**KOLPAKOV Vladimir Ivanovich** — Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [kolpakov54@mail.ru](mailto:kolpakov54@mail.ru)).

**VELTISHCHEV Vadim Viktorovich** — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Submersible Robots and Mechanisms. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [vvv@bmstu.ru](mailto:vvv@bmstu.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Илюхина А.А., Колпаков В.И., Вельтищев В.В. Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 4, с. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39

### Please cite this article in English as:

Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Veltishchev V.V. Engineered Estimate of the Design Parameters of a Built-up Jet-Forming Nozzle for Mobile Underwater Waterjet Cutting Systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 4, pp. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

### III международная научно-практическая конференция

В сборнике размещены материалы Третьей Международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, прошедшей в МГТУ им. Н. Э. Баумана в Москве 19–20 ноября 2019 г. Материалы распределены по секциям «Криогенная техника и технологии», «Холодильная техника и технологии», «Системы кондиционирования и жизнеобеспечения».

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru); [www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)