

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ПОД ВОДОЙ**И.С. Бондарев**

is-bondarev@mail.ru

SPIN-код: 9701-6171

А.А. Петров

aapetrov23@gmail.com

SPIN-код: 9375-6341

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Работа посвящена исследованию функционирования гидроабразивного тракта в условиях работы под водой. Разработана физико-математическая модель процесса формирования и последующего движения гидроабразивной струи в окружающее водное пространство под действием давления с учетом кавитации жидкости. Представлены результаты параметрического исследования особенностей формирования высокоскоростной струи в зависимости от конструктивных параметров струеформирующего тракта, полученные с использованием программного комплекса ANSYS/AUTODYN. Установлено, что путем изменения геометрической формы насадка можно существенно снизить расход рабочего тела и увеличить эффективную длину движущейся в воде струи. Показано, что противодействие окружающей среды подавляет процесс кавитации в струе, что делает струю более стабильной.

Ключевые слова

Нейронная сеть, перцептрон, искусственный интеллект, биометрия, компьютерное зрение, обработка изображений, верификация, рукописная подпись

Поступила в редакцию 28.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В настоящее время повышение эффективности подводного резания является актуальной задачей. Подводное резание применяют при выполнении судоремонтных, судоподъемных и аварийно-спасательных работ. Термическими методами также осуществляют подводное резание, однако их применение связано с появлением определенных трудностей. Альтернативой термическим способам резания является гидроабразивное резание (ГАР). Широкое распространение ГАР во многих отраслях промышленности обусловлено наличием ряда преимуществ: низким тепловыделением, универсальностью обработки, экологичностью.

При гидроабразивном резании формирование струи осуществляется насадком и зависит от профиля его внутренней части. Анализ выполненных работ [1–5] показал, что ранее в основном рассматривалась ГАР в воздушной среде. В частности, в работе [1] показано, что увеличение угла раствора насадка значительно уменьшает скорость режущей струи; в работе [2] проанализированы закономерности скорости истечения от приложенного давления в рабочей жидкости

в насадках с различным продольным профилем в среде программного комплекса ANSYS/AUTODYN. В результате анализа литературных источников принято решение о проведении более широкого исследования возможностей использования гидроабразивных установок в условиях работы под водой для повышения их производительности. Очевидно, что она зависит от скорости истекающей струи (рабочего тела), его эффективной длины и других параметров.

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование параметров струеформирующего тракта, повышающего скорость гидроабразивной струи при одновременном уменьшении расхода рабочего тела. При этом в качестве метода исследования использовалось численное моделирование процесса в рамках механики сплошной среды в среде программного комплекса ANSYS/AUTODYN.

Для достижения поставленной цели разрабатывалось математическое описание процесса, проводилось параметрическое исследование струеформирующего тракта, анализировалось влияние противодавления на эффективность резания.

Математическая модель. Расчет осуществлялся в программе ANSYS/AUTODYN. Параметрическая модель процесса струеформирования, в которой в качестве варьируемых параметров рассматривались геометрические характеристики внутреннего профиля насадка — H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , d_1 , d_3 , α , представлена на рис. 1.

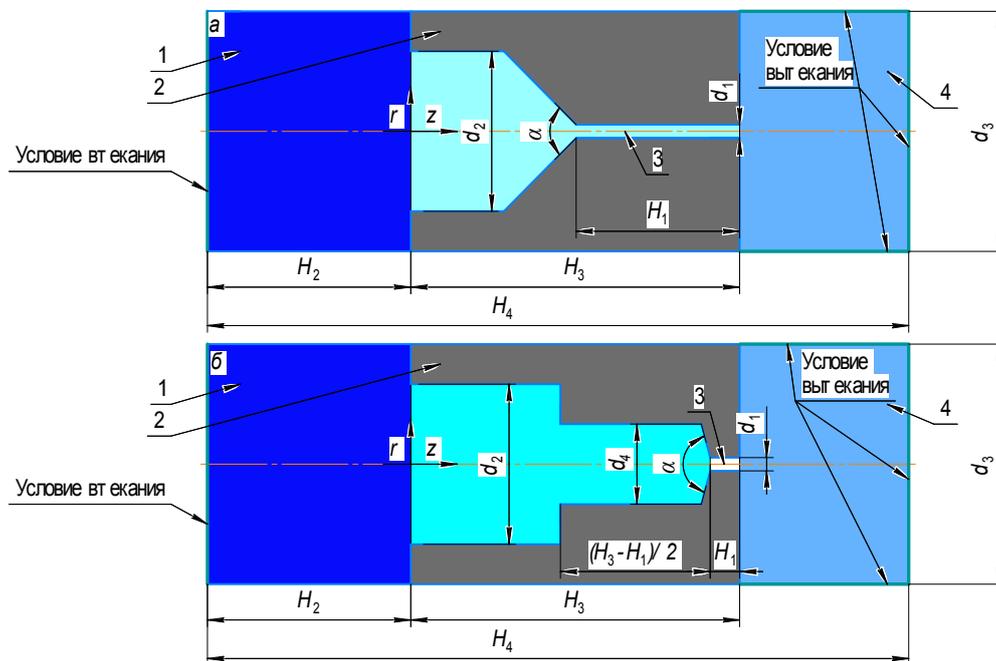


Рис. 1. Параметрические модели насадков:

а — одноступенчатый; *б* — двухступенчатый; 1 — рабочее тело (гидроабразивная жидкость);
2 — струеформирующий насадок; 3 — струя; 4 — рабочая среда

При создании математической модели были приняты следующие допущения: струеформирующий насадок — абсолютно жесткое тело; абразив равномерно распределен по всему объему воды, при этом его концентрация учитывается заданием плотности водной суспензии [5].

Процессы истечения гидроабразивной жидкости из струеформирующего насадка с образованием высокоскоростной струи можно описать следующей системой уравнений [6–8]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v_i = 0;$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\nabla_i p;$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt};$$

$$p = p(\rho, e).$$

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса, энергии и уравнение состояния взаимодействующих сред, при этом использовались следующие обозначения: t — время; ρ — плотность; p — давление; e — удельная внутренняя энергия; $i = r, z$ — осевая и радиальная координаты; v_i — компоненты вектора скорости.

В качестве уравнений состояния взаимодействующих сред (суспензии и окружающей водной среды) использовалось полиномиальное соотношение вида

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \text{ при } \mu \geq 0;$$

$$p = 0 \text{ при } \rho \leq \rho_0 \text{ — условие кавитации,}$$

где $A_1 = 2,2$ ГПа, $A_2 = 9,54$ ГПа, $A_3 = 14,57$ ГПа, $B_0 = B_1 = 0,28$ — экспериментальные коэффициенты; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$. В качестве граничных условий использовались условие втекания на левой границе и условие вытекания на правой границе (рис. 1).

Результаты математического моделирования. Наиболее сильное влияние на параметры формируемой струи оказывают выходной диаметр насадка d_1 , угол раствора конической части α и длина цилиндрической части H_1 .

Анализ влияния выходного диаметра насадка. На рис. 2, 3 представлены процессы формирования струи в зависимости от выходного диаметра одноступенчатого и двухступенчатого насадков. На рис. 4 показана зависимость скорости струи от осевой координаты, кроме того в табл. 1 представлены зависимости расхода рабочего тела от выходного диаметра одноступенчатого и двухступенчатого насадков.



Рис. 2. Влияние выходного диаметра одноступенчатого насадка на процесс формирования струи:

a — $d_1 = 0,2$ мм; *б* — $d_1 = 0,4$ мм; *в* — $d_1 = 0,5$ мм; *г* — $d_1 = 0,6$ мм

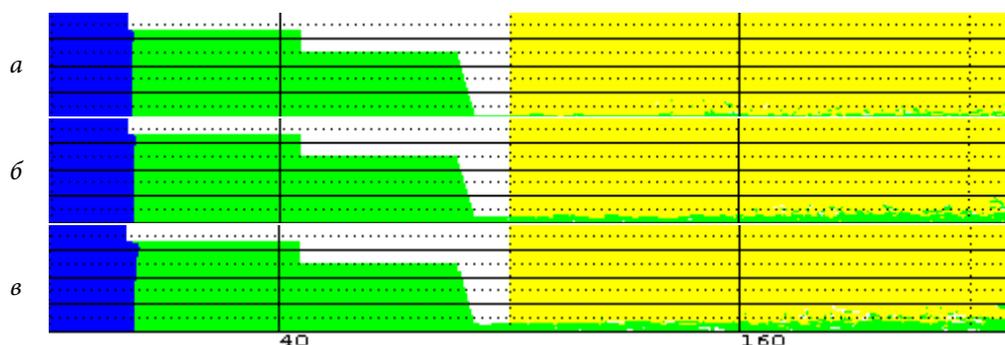


Рис. 3. Влияние выходного диаметра двухступенчатого насадка на процесс формирования струи:

a — $d_1 = 0,3$ мм; *б* — $d_1 = 0,4$ мм; *в* — $d_1 = 0,5$ мм

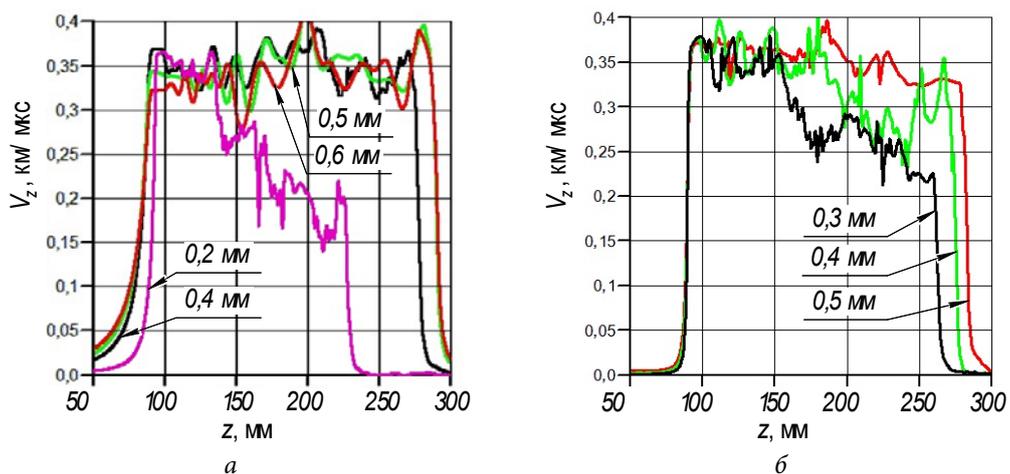


Рис. 4. Зависимость скорости струи от осевой координаты:

a — одноступенчатый насадок; *б* — двухступенчатый насадок

Зависимость расхода рабочего тела от выходного диаметра насадка

Параметр	Одноступенчатый насадок				Двухступенчатый насадок		
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5
d_1 , мм	0,2	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5
Расход, л/мин	0,473	2,211	3,484	4,924	1,099	1,730	2,646

Анализ влияния угла раствора конической части. На рис. 5, 6 представлены процессы формирования струи в зависимости от угла раствора конической части одноступенчатого и двухступенчатого насадков. На рис. 7 показана зависимость скорости струи от осевой координаты, кроме того, в табл. 2 представлены зависимости расхода рабочей жидкости от угла раствора конической части одноступенчатого и двухступенчатого насадков.

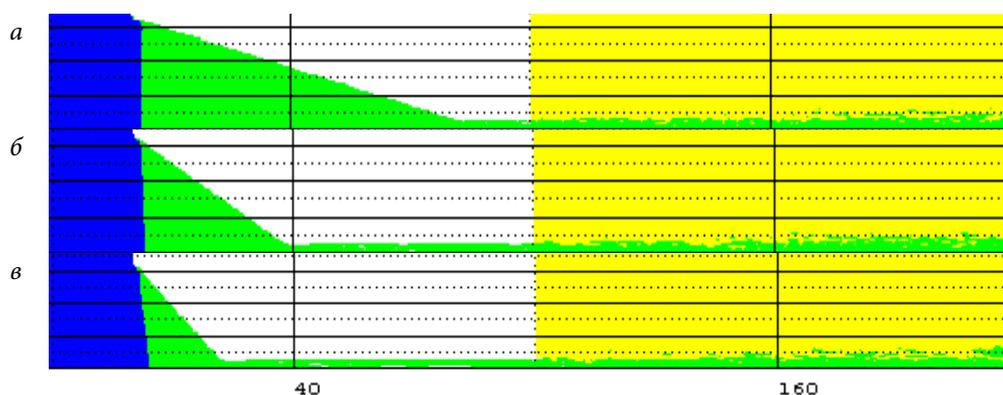


Рис. 5. Влияние угла раствора конической части одноступенчатого насадка на процесс формирования струи:

$a - \alpha = 30^\circ$; $b - \alpha = 60^\circ$; $v - \alpha = 90^\circ$

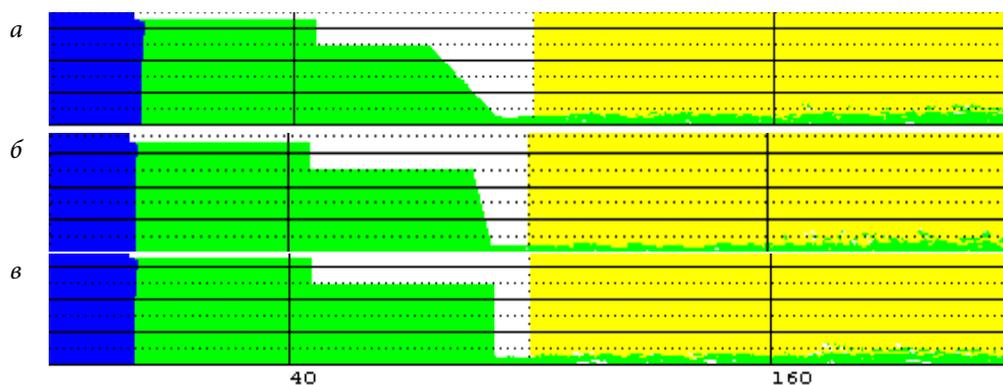


Рис. 6. Влияние угла раствора конической части двухступенчатого насадка на процесс формирования струи:

$a - \alpha = 90^\circ$; $b - \alpha = 150^\circ$; $v - \alpha = 180^\circ$

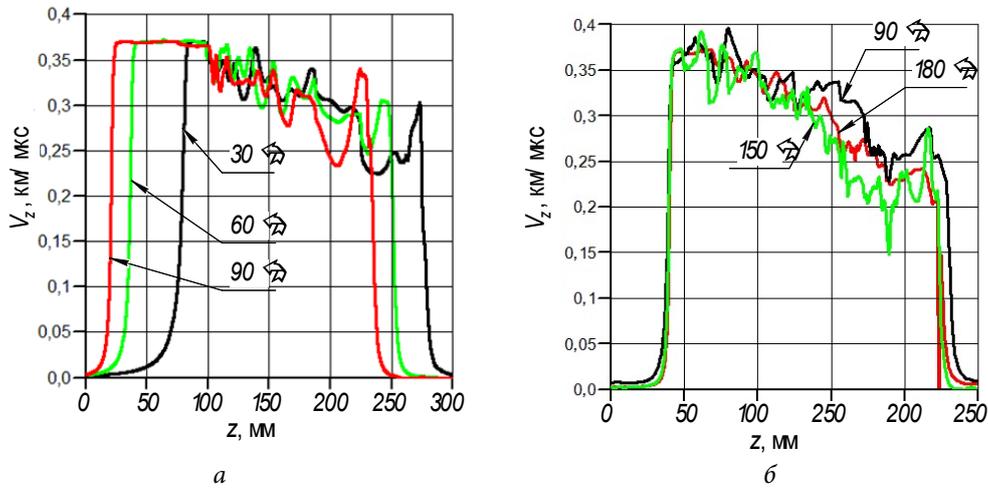


Рис. 7. Зависимость скорости струи от осевой координаты:

a — одноступенчатый насадок; *б* — двухступенчатый насадок

Таблица 2

Зависимость расхода рабочего тела от угла раствора конической части насадка

Параметр	Одноступенчатый насадок			Двухступенчатый насадок			
	α , град	30	60	90	90	150	180
Расход, л/мин		2,046	1,861	1,633	2,198	1,730	1,667

Анализ влияния длины цилиндрического участка. На рис. 8, 9 представлены процессы формирования струи в зависимости от длины цилиндрической части H_1 одноступенчатого и двухступенчатого насадков. На рис. 10, 11 показана зависимость осевой и радиальной составляющей скорости струи от осевой координаты, кроме того в таблице 3 представлены зависимости расхода рабочего тела от длины цилиндрической части H_1 одноступенчатого и двухступенчатого насадков.

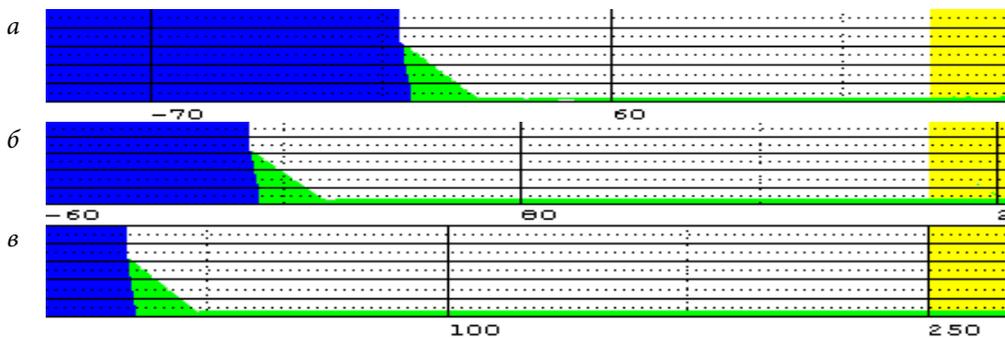


Рис. 8. Влияние длины цилиндрической части одноступенчатого насадка H_1 на процесс формирования струи:

a — $H_1 = 128$ мм; *б* — $H_1 = 178$ мм; *в* — $H_1 = 228$ мм

Особенности гидроабразивной резки под водой

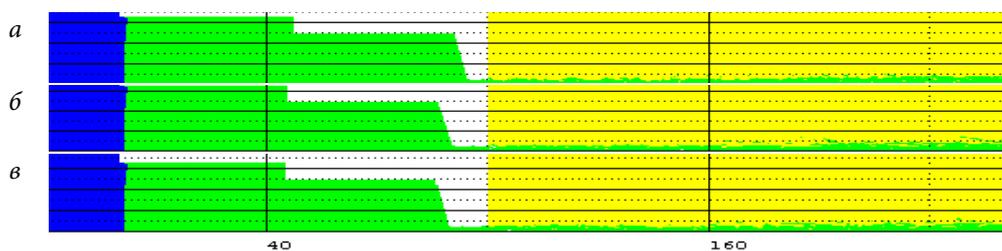


Рис. 9. Влияние длины цилиндрической части двухступенчатого насадка H_1 на процесс формирования струи:

$a - H_1 = 5 \text{ мм}$; $b - H_1 = 9 \text{ мм}$; $c - H_1 = 10 \text{ мм}$

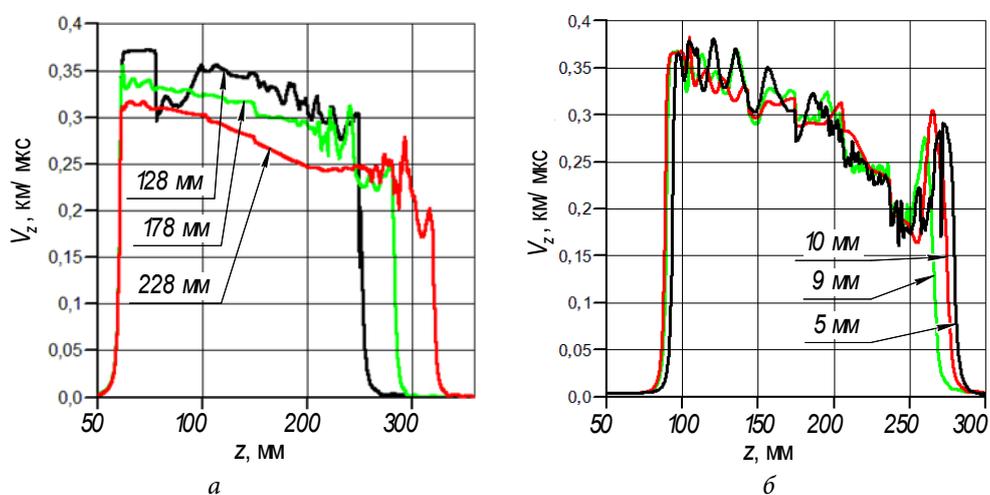


Рис. 10. Зависимость осевой скорости струи от осевой координаты:

$a -$ одноступенчатый насадок; $b -$ двухступенчатый насадок

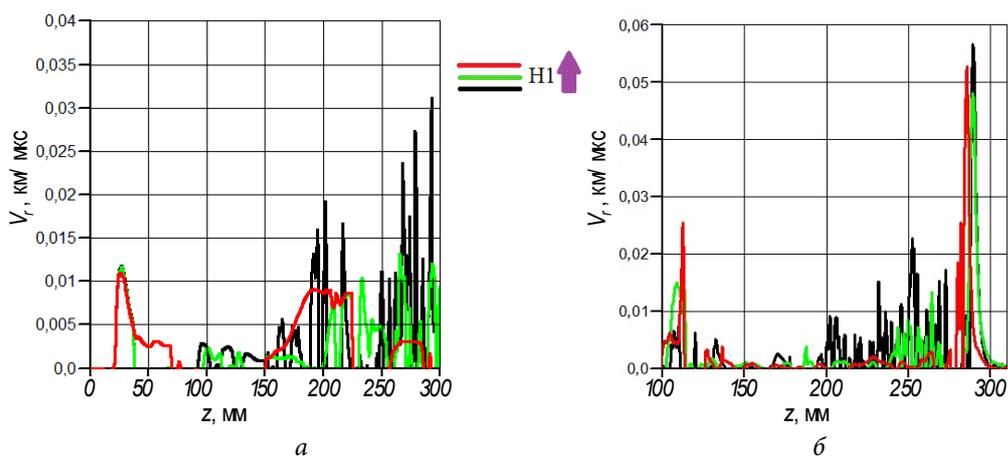


Рис. 11. Зависимость радиальной скорости струи от осевой координаты:

$a -$ одноступенчатый насадок; $b -$ двухступенчатый насадок

Зависимость расхода рабочего тела от длины цилиндрической части H_1

Параметр	Одноступенчатый насадок			Двухступенчатый насадок		
	H_1 , мм	128	178	228	5	9
Расход, л/мин	1,384	1,282	1,187	1,641	1,633	1,572

Анализ влияния противодействия. На рис. 12 представлен процесс формирования струи в зависимости от глубины реализации ГАР. Увеличение глубины погружения гидроабразивной установки привело к стабилизации формируемой струи за счет подавления процесса кавитации внешним давлением.



Рис. 12. Формирование струи:

a — у поверхности воды; b — на глубине 1000 м

Выводы. В результате выполнения работы можно сделать следующие выводы.

Разработана физико-математическая модель процесса формирования и последующего движения гидроабразивной струи в окружающее водное пространство под действием давления струеформирующего тракта с учетом кавитации гидроабразивной суспензии и окружающей жидкости.

При диаметре выходного отверстия струеформирующего насадка менее 0,3 мм нарушается целостность струи и уменьшается эффективная длина рабочего участка струи.

В исследуемом диапазоне изменения размеров выходных отверстий струеформирующего насадка при условии постоянства давления в струеформирующем тракте, можно считать, что скорость струи не меняется.

Увеличение угла раствора конической части насадка способствует снижению расхода рабочей суспензии и уменьшению рабочего участка формируемой струи.

Увеличение длины цилиндрической части насадка способствует уменьшению радиальной составляющей скорости струи, что делает ее более стабильной.

Увеличение глубины погружения гидроабразивной установки способствует стабилизации формируемой струи.

Литература

- [1] Mithilesh K.G., Sanjay S. Computational optimization of water jet machining: effect of nozzle convergence angle. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 454–462.

- [2] Гусев В.Г., Петухов Е.Н., Вуколов А.М. Анализ течения рабочей жидкости через сопло гидрорезной установки в программе ANSYS. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2012, № 1, с. 260–266.
- [3] Stijn D., Korneel V.M., Kirsten B. Real-time underwater abrasive water jet cutting process control. *EuroNoise*, 2015. URL: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/499858/1/000339.pdf> (дата обращения 24.03.2018).
- [4] Иванов В.В., Решетников М.К. Компьютерное имитационное моделирование процесса гидроабразивного резания. *Вестник СГТУ*, 2015, т. 2, № 1(79), с. 46–49.
- [5] Анисимов П.Д., Колпаков В.И. Особенности математического моделирования гидро- и гидроабразивной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. *Молодёжный научно-технический вестник*, 2016, № 9. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848937.html>.
- [6] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [7] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [8] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 2. URL: <http://www.technomag.bmstu.ru/doc/334177.html>.
- [9] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Проваторов А.С., Хафизов М.В. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [10] Герасимова А.М., Ефимова С.А., Прохорова А.М., Колпаков В.И. Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых задач гидроабразивной резки различных материалов. *Инженерный вестник*, 2014, № 1. URL: <http://engsi.ru/doc/671120.html>.
- [11] ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения 06.05.2018).
- [12] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Факторная модель ультраструйной гидроэрозии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 10, с. 63–68.
- [13] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>.

Бондарев Иван Сергеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Петров Андрей Александрович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Колпаков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SPECIAL TECHNIQUES OF HYDROABRASIVE UNDERWATER CUTTING

I.S. Bondarev

is-bondarev@mail.ru

SPIN-code: 9701-6171

A.A. Petrov

aapetrov23@gmail.com

SPIN-code: 9375-6341

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This work is devoted to investigating the hydroabrasive tract operation when working under the water. We have developed a physico-mathematical model of generation process and subsequent hydroabrasive jet motion into the surrounding water space under pressure with allowance for fluid cavitation. The authors present the results of the parametric study of the high velocity jet formation nature depending on the jet-forming tract design parameters obtained through the use of software package ANSYS/AUTODYN. It has been established that by means of changing the geometrical shape of the jet nozzle it is possible to reduce the consumption of working substance significantly and increase the effective length of the jet moving in the water. It is shown that the back pressure of the surrounding medium suppresses the cavitation process in the jet, which makes the jet more stable.

Keywords

Jet-forming nozzle, hydroabrasive jet, cavitation, cutting speed, mathematical simulation

Received 28.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Mithilesh K.G., Sanjay S. Computational optimization of water jet machining: effect of nozzle convergence angle. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 454–462.
- [2] Gusev V.G., Petukhov E.N., Vukolov A.M. The analysis of the current of the hydraulic medium through the nozzle of hydrocarved installation in program ANSYS. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2012, no. 1, pp. 260–266.
- [3] Stijn D., Korneel V.M., Kirsten B. Real-time underwater abrasive water jet cutting process control. *EuroNoise*, 2015. Available at: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/499858/1/000339.pdf> (accessed 24 March 2018).
- [4] Ivanov V.V., Reshetnikov M.K. Computer simulation of the cutting waterjet. *Vestnik SGTU* [Vestnik Saratov State Technical University], 2015, vol. 2, no. 1(79), pp. 46–49.
- [5] Anisimov P.D., Kolpakov V.I. Special aspects of mathematical modelling hydro- and hydroabrasive treatment of tough material parts. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2016, no. 9. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848937.html>.
- [6] Orlenko L.P., red. Fizika vzryva. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit publ., 2004, 656 p.
- [7] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov [Numerical methods in problems of high-speed processes physics]. Moscow, Bauman Press, 2006, 520 p.

- [8] Kolpakov V.I. Mathematical simulation of the explosive devices' performance. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2012, no. 2. Available at: <http://www.technomag.bmstu.ru/doc/334177.html>.
- [9] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Provatorov A.S., Khafizov M.V. Modeling of ultra-jet influence for coating quality control. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89.
- [10] Gerasimova A.M., Efimova S.A., Prokhorova A.M., Kolpakov V.I. Special aspects of physical-mathematical statement and numerical solution of routine problems of different materials hydroabrasive cutting. *Inzhenernyy vestnik*, 2014, no. 1. Available at: <http://engsi.ru/doc/671120.html>.
- [11] ANSYS. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 06 May 2018).
- [12] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. Factor model of ultra-jet hydroerosion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 10, pp. 63–68.
- [13] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>.

Bondarev I.S. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Petrov A.A. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.I. Kolpakov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.