

# Технология и технологические машины

УДК 629.76;629.78

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-55-62

## Кинетический анализ механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю

А.А. Барзов<sup>1</sup>, В.В. Вельтищев<sup>2</sup>, А.Л. Галиновский<sup>2</sup>, Д.Р. Мугла<sup>2</sup><sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, Москва, Российская Федерация, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 2<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Kinetic Analysis of the Mechanism of Self-Induced Vibrations of the Mass Concentration of Dispersed-and-Solidphase Particles into a Hydro-Ultrajet

A.A. Barzov<sup>1</sup>, V.V. Veltishchev<sup>2</sup>, A.L. Galinovskiy<sup>2</sup>, D.R. Mugla<sup>2</sup><sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, 119234, Moscow, Russian Federation, Leninskie Gory, Bldg. 1, Block 2<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: a.a.barzov@gmail.com, sm42@sm.bmstu.ru, galcomputer@mail.ru, mdr@bmstu.ru



Рассмотрена проблема повышения качества и производительности обработки материалов с использованием технологии гидроабразивного резания. При проведении кинетического анализа механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструе исследована последовательность процесса смешивания с учетом автоматической подачи дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю за счет реализации эффекта их эжекции в начальный участок фокусирующего абразивно-жидкостного сопла. Описаны механизм возникновения автоколебаний в подаче дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю, иллюстрирующий фактор внутриоперационной физико-технологической наследственности при гидроабразивной обработке и гидроабразивном резании материалов и изделий. Разработанные на базе теоретических положений конструкторско-технологические решения после соответствующей экспертно-аналитической оценки при минимальных технико-экономических затратах на их реализацию позволят существенно повысить физико-технологические параметры качества и производительность гидроабразивной обработки и гидроабразивного резания материалов при получении деталей ответственного назначения.

**Ключевые слова:** абразив, фокусирующее абразивно-жидкостное сопло, гидроультраструя, эжекция, гидроабразивная обработка, гидроабразивное резание



The paper considers the problem of improving the quality and productivity of materials processing using hydroabrasive cutting technologies. When performing the kinetic analysis of the mechanism of self-induced vibrations of the mass concentration of dispersed-and-solidphase particles to a hydro-ultrajet, the sequencing of the mixing process is examined.

The analysis takes into account the automatic feed of the particles to the hydro-ultrajet due to their ejection into the initial section of the focusing abrasive-liquid nozzle. The mechanism of generation of self-induced vibrations in the feed of the dispersed-and-solidphase particles to the hydro-ultrajet is described. It illustrates the factor of intraoperative physico-technological heredity in hydroabrasive processing and hydroabrasive cutting of materials and products. The design and technological solutions developed on the basis of theoretical provisions, after a corresponding expert-analytical evaluation with minimal technical and economic costs for their implementation, will significantly improve the physical and technological parameters of quality and efficiency of hydroabrasive processing and hydroabrasive cutting of materials in the production of critical parts.

**Keywords:** abrasive, focusing abrasive-liquid nozzle, hydro-ultrajet, ejection, hydroabrasive processing, hydroabrasive cutting

При традиционной схеме подачи дисперсно-твердофазных частиц (ДТЧ) в виде абразивно-порошкообразного материала в гидроультраструю (ГУС) используется эффект эжекции [1–3], связанный с возникновением зоны разрушения при входе ГУС в фокусирующее абразивно-жидкостное сопло (ФАС) [4]. Именно в этой зоне предварительного смешивания ДТЧ и ГУС происходит их засасывание с определенной интенсивностью (массовым расходом).

Цель работы — проведение кинетического анализа механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю для повышения качества и производительности обработки материалов с использованием технологии гидроабразивного резания.

Очевидно, что массовый расход ДТЧ — абразива  $\dot{m}_a$  (кг/с) будет зависеть от степени разреженности воздуха  $\Delta p$ , на которую оказывают влияние скорость ГУС  $v_c$  (м/с) и зазор  $\Delta$  между ГУС и каналом ФАС:

$$\Delta = \frac{1}{2}(d_k - d_c),$$

где  $d_k$  и  $d_c$  — диаметры канала ФАС и ГУС.

Кроме того,  $\Delta p$  зависит от конкретных конструкторско-технологических решений (КТР), обеспечивающих результативность подачи ДТЧ в ГУС [5, 6].

В соответствии с логикой рассматриваемой задачи исследуем последовательность процесса смешивания с учетом «автоматической» подачи ДТЧ в ГУС за счет реализации эффекта их эжекции в начальный участок ФАС [7, 8].

Допустим, что в начальный момент времени из-за случайных причин произошло снижение интенсивности поступления  $\dot{m}_a$  (–) в ГУС. Это

обстоятельство, согласно закону сохранения энергии, характеризуется повышением скорости ГУС на величину  $\Delta v_c$  (+), что приведет к возрастанию степени разреженности воздуха в камере предварительного смешивания ФАС  $\Delta p$  (+): естественной реакцией системы автоподачи ДТЧ будет пропорциональное увеличение подачи частиц в зону предварительного смешивания ФАС на величину  $\Delta \dot{m}_a$  (+). Рост  $\Delta \dot{m}_a$  (+) сопровождается падением  $\Delta v_c$  (–) и, как следствие, снижением  $\Delta p$  (–) и пропорциональным уменьшением  $\Delta \dot{m}_a$  (–). Далее описанный автоколебательный механизм пульсации подачи ДТЧ в ГУС циклически повторится, так как причины его возникновения связаны с гидроаэрофизическим наследованием параметров, характеризующих текущее состояние процесса формирования гидроабразивной ультраструи (ГАУС) от значений в предшествующий момент времени функционирования системы смешивания.

С этих позиций данная система представляет классическую схему возникновения автоколебаний, обусловленных запаздыванием возмущающей силы от текущей реакции объекта воздействия на ее величину. Схематично вышеизложенное можно представить в виде следующей символической записи:

$$\Delta \dot{m}_a (-) \downarrow \rightarrow \Delta v_c (+) \uparrow \rightarrow \Delta p (+) \uparrow \rightarrow \Delta \dot{m}_a (+) \uparrow; \quad (1)$$

$$\Delta \dot{m}_a (+) \uparrow \rightarrow \Delta v_c (-) \downarrow \rightarrow \Delta p (-) \downarrow \rightarrow \Delta \dot{m}_a (-) \downarrow. \quad (2)$$

Знаки « $\downarrow$ » и « $\uparrow$ » означают соответственно увеличение и снижение значения анализируемого параметра.

Заметим, что соотношение (1) описывает полупериод автоколебаний, связанный, как правило, с ростом интенсивности гидроабразивной эрозии обрабатываемого материала

вследствие увеличения массовой концентрации ДТЧ в ГУС ( $\Delta \dot{m}_a (+) \uparrow$ ), а выражение (2) — процесс снижения производительности обработки [9, 10]. Учитывая, что ДТЧ получают «импульс разлета» при выходе из ФАС, соотношению (1) должно соответствовать появление более глубоких характерных рисок на обрабатываемой поверхности — поверхности реза. В свою очередь выражение (2) описывает появление «гребней» между данными рисками, обусловленных обеднением ГАУС ДТЧ.

Необходимо подчеркнуть, что на практике именно такой рельеф обработанной поверхности характеризует технологические операции по гидроабразивной обработке (ГАО) и гидроабразивному резанию (ГАР) [11, 12]. Причем именно радиальным разлетом ДТЧ на выходе из ФАС объясняется существенное расширение поверхности реза в месте воздействия ГАУС.

Качественное описание кинетики формирования автоколебаний подачи ДТЧ в ГУС, представленное соотношениями (1) и (2), можно детализировать исходя из следующих соображений. Запишем уравнения количества движения для ГУС и отдельной ДТЧ. При этом учтем, что сила  $F_p$ , разгоняющая ДТЧ, равна силе  $F_c$  сопротивления (торможения) ГУС, и они являются взаимонаправленными.

Тогда в исходном приближении

$$\dot{M}_c (v_c - \Delta v_c) - \dot{m}_a (v_a + \Delta v_a) = F_c; \quad (3)$$

$$\dot{m}_a (v_a + \Delta v_a) = F_p - F_{тр}, \quad (4)$$

где  $\dot{M}_c$  — масса жидкостной составляющей ГАУС;  $\Delta v_c$  и  $\Delta v_a$  — приращения скоростей ГУС и ДТЧ;  $v_a$  — скорость ДТЧ;  $F_{тр}$  — сила трения, действующая на ДТЧ,

$$F_{тр} = k_{тр} N,$$

где  $k_{тр}$  — коэффициент пропорциональности между направленной по оси ФАС силой сопротивления поверхности канала и движения ДТЧ разгоняемой частицы — коэффициент «трения» ДТЧ о ФАС;  $N$  — радиально-направленная сила реакции стенки канала ФАС, равная по значению силе «прижима» ДТЧ к рабочей поверхности канала.

Заметим, что в момент вылета ДТЧ из ФАС именно сила «прижима» создает импульс разлета частиц, сообщая им некоторую вполне значимую с физико-технологических позиций радиально направленную составляющую их результирующей скорости:

$$v_r \ll v_r,$$

где  $v_r$  — радиальная скорость разлета ДТЧ;  $v_r$  — скорость ГАУС.

Полученная при общих допущениях система уравнений изменения качества движения ГУС (3) и ДТЧ (4) позволяет количественно детализировать кинетику механизма возникновения автоколебательных пульсаций подачи абразивного материала в ГУС.

Для этого сделаем следующие обоснованные предположения.

1. Подачу абразива в ГУС можно представить в виде

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c + \dot{m}_v(t), \quad (5)$$

где  $\dot{m}_c$  — постоянная составляющая,  $\dot{m}_c = \text{const}$ ;  $\dot{m}_v(t)$  — переменная составляющая, обусловленная неоднородностью подачи абразива в струеформирующий тракт,  $\dot{m}_v(t) = \text{var}(t)$  — анализируемый промежуток времени формирования ГАУС).

2. Внутрисистемные силы  $F_c$  и  $F_p$  по аналогии с выражением (5) можно охарактеризовать как

$$F_c = F_c(\text{const}) + F_c(\text{var});$$

$$F_p = F_p(\text{const}) + F_p(\text{var}).$$

3. С учетом логически обоснованной периодичности изменения  $F_c(\text{var})$  и  $F_p(\text{var})$  их можно вполне адекватно представить в виде разложений в ряд Фурье. Однако отсутствие энергетически значимых источников полигармонического возмущения процессу формирования ГАУС позволяет допустить:

- наличие одной доминантной гармоникой периодического изменения  $F_c(\text{var})$  и  $F_p(\text{var})$ ;
- запаздывание  $F_p(\text{var})$  от  $F_c(\text{var})$  на  $\pi/2$ , обусловленное инерционностью процесса эжекционного наполнения ГУС множественным массивом ДТЧ — абразивными частицами.

Тогда определяем вариативную составляющую  $\dot{m}_a^v$  подачи ДТЧ в процессе автоколебаний в виде

$$\dot{m}_a^v = \int_0^t \sin \omega t = \frac{1}{\omega} \cos \omega t,$$

где  $\omega$  — круговая частота автоколебаний процесса изменения «оснащенности» ГАУС абразивным материалом — массивом ДТЧ.

Далее, вполне обоснованно допуская примерное равенство скоростей ГУС и ДТЧ на вы-

ходе из ФАС, т. е. незначительную величину градиента радиальных скоростей по сечению ГАУС при физически оптимальной длине  $L$  канала ФАС, имеем

$$v_c(L) \sim v_a(L) \sim \text{const.}$$

Кроме того, учитывая сдвиг по фазе колебаний вариативных слагаемых  $F_c$  и  $F_p$  в выражениях (3) и (4) и пренебрегая потерями на трение ДТЧ о стенку канала ФАС, инерционность вариаций процесса формирования ГАУС вполне можно охарактеризовать отношением массового расхода рабочей жидкости (воды)  $\dot{M}_c$  к циклическому изменению подачи ДТЧ в ГУС:

$$\dot{M}_c / \Delta \dot{m}_a^v \sim \omega, \quad (6)$$

где  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — число автоколебаний в единицу времени, Гц).

Проведем некоторые количественные оценки. Обычно

$$(0,1...0,2) \dot{M}_c \sim \Delta \dot{m}_a.$$

По аналогии предположим, что

$$\dot{m}_a^v \sim (0,1...0,2) \dot{m}_a.$$

Тогда из выражения (6) получим следующую приближительную частоту автоколебаний функционально-технологических параметров ГАУС на операциях ГАО–ГАР:

$$f \sim 10...20 \text{ Гц.}$$

Причем вполне очевидно, что с увеличением  $\dot{M}_c$  уменьшается амплитуда автоколебаний. Это обусловлено энергетическими особенностями эжекции ДТЧ в ГУС при формировании ГАУС.

Для определенности положим, что скорость движения пятна контакта ГАУС по поверхности заготовки — скорость раскрытия материала

$$S = 10...100 \text{ мм/мин}$$

в зависимости от его толщины и вида.

Тогда периодичность (длина волны  $l$ ) образования характерных рисок на обработанной поверхности определяется из простого соотношения

$$l \sim Sf^{-1} \sim 0,15...1,5 \text{ мм.} \quad (7)$$

Заметим, что теоретическая весьма приближительная оценка выражения (7) совпадает с результатами экспериментального анализа циклического диапазона расположения характерных рисок на обработанной поверхности.

На основании этого можно сделать вывод, что физико-технологический механизм образования периодического рельефа обработанной поверхности на операциях ГАО–ГАР связан с возникновением устойчивых автоколебаний функциональных параметров ГАУС, обусловленных циклическими вариациями ее оснащения ДТЧ вследствие специфики эжекционного способа их введения в исходную ГУС. Поэтому возникает проблема повышения качества обработанной поверхности путем физико-технического и конструкторско-технологического нивелирования негативных последствий автоколебаний такого вида. Причем в их энергетическую структуру могут входить и другие макро- и микродинамические процессы формирования ГАУС, зависящие от ее волнового возмущения при ударном торможении о мишень и «отдачи» ДТЧ при их вылете из ФАС, а также волноводные свойства слагаемых струеформирующего тракта и всех элементов системы ультразвуковой обработки [13].

Таким образом, феноменологическая модель анализа автоколебательного механизма «оснащения» ГУС необходимым количеством ДТЧ позволяет сформулировать некоторые предложения по совершенствованию процесса формирования результативной ГАУС на операциях ГАО–ГАР материалов и изделий.

Исходя из физико-технологического содержания возможных вариантов КТР по устранению автоколебаний вариаций подачи ДТЧ в ГУС, КТР можно подразделить на две основные группы:

1) условно пассивные:

– снижение значения пульсаций давления эжекционного разряжения  $\Delta p$ , создаваемого ГУС при входе в ФАС, путем применения в камере предварительного смешивания ДТЧ с ГУС различных демпфирующих элементов,

– уменьшение значения пульсаций  $\Delta p$  благодаря наличию в камере предварительного смешивания дренажных отверстий, соединяющих ее с атмосферным воздухом;

2) активные, основанные на целенаправленном внешнем подавлении пульсаций  $\Delta p$ :

– отказ от эжекционного метода подачи ДТЧ в камеру их предварительного смешивания с ГУС, например с помощью дозированно-непрерывной виброотдачи или избыточного давления воздуха, в том числе в тракте подачи и камере предварительного смешивания,

– наложение осциллирующе-скрайбирующих колебаний на ФАС в плоскости реза,  
– динамическое снижение амплитуды автоколебаний  $\Delta p$  путем использования внешнего наддува камеры предварительного смешивания в противофазном режиме.

Параметры этого наддува определяются соответствующей системой диагностики характеристик автоколебаний: сенсорами  $\Delta p$  и/или косвенным способом, например методом акустической эмиссии (АЭ) по специфическим пульсациям сигнала, генерируемого в ФАС при изменении уровня  $m_a$  — вариаций содержания ДТЧ в ГУС. Причем система диагностики процессов ГАО–ГАР методом АЭ позволяет одновременно решать и другие практически важные задачи, напрямую не связанные с контролем процесса подачи ДТЧ. В частности, весьма результативна диагностика:

- текущего состояния, в первую очередь эрозийного износа, элементов струеформирующего тракта;
- соосности гидросопла, формирующего ГУС и ФАС.

Кроме того, метод АЭ весьма эффективен для широкомасштабного информационно-диагностического обеспечения этапа технологической подготовки производства и разработки соответствующих рекомендаций для повышения качества и технико-экономической результативности практически всех видов операций по ультразвуковой обработке материалов и жидкостей [14]. Характерным примером может служить выбор по параметрам АЭ оптимального эксцентриситета (смещения) осей ГУС и ФАС для локализации траектории движения ДТЧ в ГАУС и, как следствие, для повышения точности обработанной поверхно-

сти и производительности процессов ГАР. Причем по мере развития гидроабразивной эрозии определенного участка ФАС происходит его соответствующий поворот в осевом направлении, а активный контроль за этой процедурой осуществляется методом АЭ.

## Выводы

1. Рассмотренный механизм возникновения автоколебаний и/или пульсаций в подаче ДТЧ в ГУС является характерным примером, иллюстрирующим фактор внутриоперационной физико-технологической наследственности при ГАО–ГАР материалов и изделий. Этот факт обусловлен влиянием предшествующего состояния системы струеобразования, в частности особенностями формирования ГАУС в канале ФАС на параметры ее последующего функционирования — величину «оснащенности» ГУС массивом ДТЧ, которая фактически определяет производительность и качество обработки. Причем полномасштабное моделирование данного проявления внутриоперационного фактора физико-технологической наследственности лежит в плоскости анализа автоколебаний систем с запаздыванием, в том числе при случайном характере возникновения импульсных возмущений.

2. Разработанные на базе теоретических положений КТР после соответствующей экспертно-аналитической оценки при минимальных технико-экономических затратах на их реализацию позволят существенно повысить физико-технологические параметры качества и производительности операций ГАР–ГАО при получении деталей ответственного назначения.

## Литература

- [1] Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н. Эжекция при высокоскоростном пробивании тонких алюминиевых экранов и модельные эксперименты с водой. *XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сб. докл.*, Казань, 20–24 августа 2015, Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. 4270 с.
- [2] Александров А.А., Барсуков Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012, № 3–2(293), с. 89–93.
- [3] Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Короткий О.А. Разработка программного обеспечения для технологии гидроабразивной резки материалов абразивной смесью. *Вопросы радиоэлектроники*, 2016, № 2, с. 48–52.

- [4] Петухов И.М. Графоаналитический метод оценки результатов трибоадгезионной классификации абразивных материалов. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. ст. междунар. науч.-техн. конф.*, Волжский, Волжский институт строительства и технологий, 2006. 240 с.
- [5] Кравченко Д.В., Петухов Е.Н., Тихомиров Р.А. *Способ получения отверстий абразивно-жидкостной струей*. Пат. 2172237 РФ, бюл. № 32, 2001.
- [6] Иванов В.В., Васин А.Н., Изнаиров Б.М. Гидроабразивная резка. Вопросы моделирования двухфазной турбулентной струи. *Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях*, 2016, т. 1, № 3, с. 108–112.
- [7] Веселов М.В., Коротков А.Н. Моделирование процесса гидроабразивной обработки как неотъемлемый этап разработки оборудования. *Современные научно-практические достижения. Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф.*, Кемерово, 5–6 мая 2015 г., Кемерово, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, ООО «ЗапСибНЦ», 2015, с. 162–165.
- [8] Яковлева Ю.В. Раскрой материалов струей воды высокого давления. *Каучук и резина*, 2007, № 3, с. 31–32.
- [9] Габутдинов Р.Р., Маликов Р.Р., Асташенко В.И. Гидроабразивный метод обработки материалов. *Прогрессивные технологии и процессы. Сб. науч. статей междунар. молодежной науч.-практ. конф.*, в 2 т. Т. 1, 2014, с. 122–124.
- [10] Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 107–116.
- [11] Hisakado T., Tanaka T., Suda H. Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from plowing volume in abrasive wear. *Wear*, 1999, vol. 236, no. 1–2, pp. 24–33.
- [12] Precision Hydraulic Cutting. *Mechanical Engineering*, 1994, vol. 116, no. 11, 58 p.
- [13] Абашин М.И., Хафизов М.В. Механизмы гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, no. 10, 67 p. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/223166.html> (дата обращения 15 сентября 2017).
- [14] Галиновский А.Л., Зосимов М.В., Моисеев В.А., Хафизов М.В. Повышение эффективности гидрорезания средствами акустической эмиссии. *Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова*, 2014, № 6, с. 59–62.

## References

- [1] Shumikhin T.A., Miagkov N.N., Bezrukov L.N. Ezheksia pri vysokoskorostnom probivani tonkikh aluminievyykh ekranov i model'nye eksperimenty s vodoi [The ejection under high-velocity penetration of thin aluminum screens and model experiments with water]. *11 Vserossiiskii s'ezd po fundamental'nyim problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki. Sb. dokl.* [11 All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics. A collection of papers]. Kazan, 20–24 August 2015, Kazan, Kazanskii (Privolzhskii) federal'nyi universitet publ., 2015. 4270 p.
- [2] Aleksandrov A.A., Barsukov G.V. Opredelenie komponentnogo sostava mass abrazivnoi smesi dlia rezaniia materialov sverkhzvukovoi gidroabrazivnoi struei [Determination of the component composition of the masses a mixture of abrasive material for cutting supersonic waterjet stream]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Technics and technology]. 2012, no. 3–2(293), pp. 89–93.
- [3] Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Korotkii O.A. Razrabotka programmnoho obespecheniia dlia tekhnologii gidroabrazivnoi rezki materialov abrazivnoi smes'iu [Development of software for waterjet cutting technology materials abrasive mixture]. *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics]. 2016, no. 2, pp. 48–52.
- [4] Petukhov I.M. Grafoanaliticheskii metod otsenki rezul'tatov triboadgезionnoi klassifikatsii abrazivnykh materialov [Graphic-analytical method of assessing results tribodesign classification of abrasive materials]. *Protsessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i ma-*

- terialy. Sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. [Processes abrasive machining, abrasive tools and materials. Proceedings of the International scientific and technical conference]. Volzhskii, Volzhskii institut stroitel'stva i tekhnologii publ., 2006. 240 p.
- [5] Kravchenko D.V., Petukhov E.N., Tikhomirov R.A. *Sposob polucheniia otverstii abrazivno-zhidkostnoi struei* [A method of producing holes of the abrasive-liquid jet]. Patent RUS no. 2172237, 2001.
- [6] Ivanov V.V., Vasin A.N., Iznairov B.M. *Gidroabrazivnaia rezka. Voprosy modelirovaniia dvukhfaznoi turbulentnoi strui* [Water jet cutting services. Modeling two-phase turbulent jet]. *Problemy i innovatsii v oblasti mekhanizatsii i tekhnologii v stroitel'nykh i dorozhnykh otrasliakh* [Issues and innovations in the field of mechanization and technology in the construction and road industries]. 2016, vol. 1, no. 3, pp. 108–112.
- [7] Veselov M.V., Korotkov A.N. *Modelirovanie protsessa gidroabrazivnoi obrabotki kak neot'emlemyi etap razrabotki oborudovaniia* [Modeling of the process of water jet cutting as an integral stage of development]. *Sovremennye nauchno-prakticheskie dostizheniia Sb. mater. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf.* [Modern scientific and practical achievements. The collection of materials of International scientific-practical conference]. Kemerovo, Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva publ., 2015, pp. 162–165.
- [8] Iakovleva Iu.V. *Raskroi materialov struei vody vysokogo davleniia* [Cutting material with a jet of high pressure water]. *Kauchuk i rezina* [Kauchuk I Rezina]. 2007, no. 3, pp. 31–32.
- [9] Gabutdinov R.R., Malikov R.R., Astashchenko V.I. *Gidroabrazivnyi metod obrabotki materialov* [The waterjet machining method of materials]. *Progressivnye tekhnologii i protsessy. Sb. nauch. statei mezhdunar. molodezhnoi nauch.-praktich. konf.* [Advanced technologies and processes. Collection of scientific articles of the International youth scientific and practical conference]. 2014, pp. 122–124.
- [10] Tarasov V.A., Polukhin A.N. *Otsenka geometricheskikh parametrov formiruemoi poverkhnosti pri gidroabrazivnoi obrabotke* [Estimation of Geometric Parameters of Formed Surface during Hydro-Abrasive Treatment]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2012, no. 1, pp. 107–116.
- [11] Hisakado T., Tanaka T., Suda H. *Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from plowing volume in abrasive wear*. *Wear*, 1999, vol. 236, no. 1–2, pp. 24–33.
- [12] Precision Hydraulic Cutting. *Mechanical Engineering*, 1994, vol. 116, no. 11, 58 p.
- [13] Abashin M.I., Khafizov M.V. *Mekhanizmy gidroerozionnogo razrusheniia tverdotel'noi pregrady* [Mechanisms hydroerosion destruction of solid obstacles]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and education. Bauman MSTU]. 2011, no. 10, 67 p. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/223166.html> (accessed 15 September 2017).
- [14] Galinovskii A.L., Zosimov M.V., Moiseev V.A., Khafizov M.V. *Povyshenie effektivnosti gidrorezaniia sredstvami akusticheskoi emissii* [Improving the efficiency of waterjet cutting tools acoustic emission method]. *Vestnik KGU im. N.A. Nekrasova* [Vestnik of Kostroma State University]. 2014, no. 6, pp. 59–62.

Статья поступила в редакцию 19.10.2017

## Информация об авторах

**БАРЗОВ Александр Александрович** (Москва) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Физического факультета. МГУ им. М.В. Ломоносова (119234, Москва, Российская Федерация, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, e-mail: a.a.barzov@gmail.com).

**ВЕЛЬТИЩЕВ Вадим Викторович** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sm42@sm.bmstu.ru).

**ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

**МУГЛА Дарья Романовна** (Москва) — 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: mdr@bmstu.ru).

## Information about the authors

**BARZOV Aleksandr Aleksandrovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Lead Researcher, Faculty of Physics. Lomonosov Moscow State University (119234, Moscow, Russian Federation, Leninskie Gory, Bldg. 1, Block 2, e-mail: a.a.barzov@gmail.com).

**VELTISHCHEV Vadim Viktorovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Underwater Vehicles and Robots Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm42@sm.bmstu.ru).

**GALINOVSKIY Andrey Leonidovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Technology of Rocket-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

**MUGLA Daria Romanovna** (Moscow) — Postgraduate, Technology of Rocket-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mdr@bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание монографии  
под редакцией **А.С. Бугаева, С.И. Ивашова**

### «Биорадиолокация»

Освещены вопросы радиолокации биологических объектов (биорадиолокации) — метода, который может быть использован для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционного определения параметров их дыхания и сердцебиения. Биорадиолокация может найти применение в различных областях: спасательных операциях, антитеррористической борьбе, медицине и др. Описаны физические основы процесса биорадиолокации, особенности биорадиолокаторов с непрерывным и импульсным зондирующими сигналами, а также методы расчета и моделирования процессов в биорадиолокации.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

**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; www.baumanpress.ru