УДК 621.001.5

Имитационное моделирование акустического излучения, возникающего при взаимодействии высокоскоростной струи жидкости с материалом*

А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, М.В. Хафизов

Получение обобщенных математических зависимостей, описывающих весьма разнородные по физической сути процессы и явления, представляет собой актуальную задачу моделирования. В статье исследуется возможность использования вероятностного математического моделирования для имитации и анализа таких специфических физических процессов, как явление генерации волн упругих деформаций — волн акустической эмиссии (АЭ), возникающих при ударно-динамическом взаимодействии сверхзвуковой струи жидкости с твердотельной мишенью. Этот процесс лежит в основе прогрессивной гидроструйной технологии обработки материалов. В данном исследовании показано, что путем вероятностного математического моделирования процесса излучения волн АЭ из зоны взаимодействия струи с преградой можно получить количественные соотношения между энергетическими параметрами струи и информативными признаками АЭ. Результаты исследования можно использвать для теоретического экспресс определения параметров гидроструйной обработки, влияющих на эффективность технологического процесса и связанных с интенсивностью энергетических превращений в зоне взаимодействия гидростуи и преграды.

Ключевые слова: гидроструйное резание, акустическая эмиссия, вероятностное математическое моделирование.

БАРЗОВ
Александр Александрович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BARZOV
Aleksandr Aleksandrovich
(Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University)

ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей Леонидович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

GALINOVSKIY
Andrey Leonidovich
(Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University)

ХАФИЗОВ
Максим Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KHAFIZOV
Maksim Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University)

Simulation of acoustic emission caused by the interaction of a high-speed jet of fluid with the material

A.A. Barzov, A.L. Galinovskiy, M.V. Khafizov

To derive generalized mathematical relationships describing highly heterogeneous physical processes and phenomena is an urgent task of modeling. The paper investigates the possibility of using a probabilistic mathematical modeling for simulation and analysis of specific physical processes such as wave generation by elastic deformations. In this case, acoustic waves are generated by the dynamic shock interaction of a supersonic jet of liquid with a solid target. This process forms the basis for advanced water-jet materials processing

* Исследования выполнены по гранту Президента РФ №16.120.11.5069-МД и грантов РФФИ №12-08-33022-мол_а_вед и 13-08-92608 КО_а.

technologies. It is shown that the probabilistic mathematical modeling of acoustic emission from the area where the water jet interacts with the material can result in quantitative relationships between energy parameters of a jet and informative characteristics of acoustic emission. The results of the study can be used for rapid theoretical evaluation of water-jet parameters influencing the efficiency of the process and related to the intensity of energy transformation in the interaction zone.

Keywords: water-jet cutting, acoustic emission, probabilistic mathematical modeling.

В настоящее время гидроструйные методы обработки материалов находят все более широкое применение в современных производственных технологиях [1, 2]. Под ультраструйной обработкой (УСО) понимают совокупность методов и средств создания и реализации таких параметров высокоэнергетической компактной струи жидкости, которые при ее взаимодействии с окружающей средой, например, при ударно-динамическом торможении о твердотельную мишень-заготовку, способны привести к фиксируемым целенаправленным изменениям в обрабатываемом материале и/или самой жидкости [3].

Отметим, что в работах, посвященных анализу эффективности технологии УСО [4, 5], решаются вопросы, которые условно можно разделить на несколько групп:

• исследование физико-технологических закономерностей процессов гидроэрозионного разрушения в зоне взаимодействия гидроструи с обрабатываемым материалом [6–8];

• традиционные технологические исследования функциональных возможностей УСО [9–11] как средства обеспечения заданной производительности и требуемого качества обработки [12–13];

• анализ возможностей инновационного расширения сферы рационального применения гидроструйных технологий за рамки классической обрабатывающей технологии [14–16].

Метод акустической эмиссии успешно применяется для диагностирования и оптимизации различных процессов обработки материалов [17–19], что позволяет предположить возможность его применения и к процессу гидроабразивного резания [20, 21].

Вероятностная математическая модель акустического излучения. Ярко выраженный нестационарный характер энергетических превращений при УСО [2, 3] — причина возникновения значительного числа источников волновых и колебательных процессов различной мощности и частотного спектра [2, 4]. Физическая природа, месторасположение источников, их энергетика и т.д. могут быть весьма различными и/или взаимосвязанными. Однако общим проявлением механизма действия данных источников является динамическое возмущение окружающей их упругой волноводной среды – материала мишени.

Под источником акустической эмиссии (АЭ) понимают реально существующий объем или поверхность, принадлежащие элементам рассматриваемой технологической системы, в которых имеет место локальная динамическая перестройка полей напряжений из-за действия факторов, присущих и неотделимых от данного вида физико-технологического воздействия на обрабатываемый материал. В результате динамической перестройки полей механических напряжений возникают волны упругой деформации, несущие информацию об их источниках и являющиеся основным объектом анализа при использовании метода АЭ.

Учитывая многообразие источников АЭ в зоне взаимодействия высокоэнергичной струи жидкости с мишенью и случайный характер их возникновения, следует рассматривать вероятностное уравнение, количественно связывающее вероятность их появления в данный момент времени с основным энергетическим параметром гидроструи — скоростью ее движения, расположенной в близкой к мишени зоне наиболее интенсивных энергетических превращений:

$$p(S) = 1 - \exp(-CS), \qquad (1)$$

где $p(S)$ — вероятность присутствия в анализируемый момент времени источника АЭ в данной области S; C — средняя концентрация (число) источников АЭ в анализируемой области S струи жидкости. Параметр C пропорционален объемному расходу жидкости (объему, отнесенному к единице времени) через область

S, или скорости струи жидкости в данной области ее взаимодействия с мишенью.

Уравнение (1) позволяет с общих вероятностных позиций количественно изучать волновую картину излучения АЭ в малой области S, характеризуемую некоторым постоянным расходом жидкости через ее границы. Кроме того, уравнение (1) позволяет в аналитическом виде оценить вероятность излучения некоторым элементарным источником волну АЭ в зависимости от струи скорости (давления).

Выполненный теоретический анализ вероятностного характера процесса генерации волн АЭ в зоне ударно-динамического торможения гидроструи жидкости о мишень позволяет более детально изучить его количественно-временные соотношения путем имитационного моделирования, в частности методом Монте-Карло [24, 25]. Для этого вполне обоснованно предположить, что все источники волн АЭ, в первую очередь, ударно-кавитационной природы, имеют примерно одинаковые энергетические параметры и не взаимодействуют между собой. Время появления отдельного кавитационного пузырька и/или динамического разрыва сплошности некоторого объема жидкости под действием волн АЭ является случайной величиной, не зависящей от предыстории. Тогда вероятность наличия элементарного (единичного) источника волны АЭ в некоторой анализируемой области малых размеров, с учетом (1)

$$p_i = 1 - \exp(-c_i \tau), \qquad (2)$$

где p_i — вероятность «срабатывания» элементарного источника АЭ, например схлопывания кавитационного пузырька, в момент времени τ; c_i — средняя «временная» концентрация этих срабатываний (схлопывания пузырьков) во времени.

Поскольку показатель экспоненты в уравнении (2), как и ранее, полностью определяется масштабным фактором — количеством жидкости, протекающей через анализируемую малую область (площадку единичной толщины) в зоне ее контакта, то формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$p_i = 1 - \exp(-c_к v_i \tau), \qquad (3)$$

где v_i — средняя скорость движения жидкости через анализируемую i-ю малую область, т. е. v_i представляет собой интегральный параметр энерго-массообмена в ней; $c_к$ — некоторый параметр жидкости, комплексно характеризующий ее излучательно-волновые, кавитационные и другие динамические свойства.

В первом приближении в достаточно узком диапазоне изменения технологических режимов гидроструйной обработки можно положить, что $c_к \sim \text{const}$.

Учитывая практически мгновенный характер распространения импульса волны упругой деформации от ее источника (кавитирующего пузырька), формально процедуру возникновения интегрального акустического поля от всех источников в зоне УСО можно представить в виде

$$S_{ij}^{и} = \sum_{j=1}^{n} p_j = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left[1 - \exp(-c_к v_{ij} \tau_{ij}) \right], \qquad (4)$$

где $S_{ij}^{и}$ — величина импульса суммарной волны АЭ; τ_{ij} — момент времени срабатывания j-го источника в i-й момент времени; n — число источников акустического излучения; m — число временных интервалов наблюдения за процессом генерации АЭ.

Согласно выражениям (2)—(4) и учитывая реальные, физические особенности аппаратурной регистрации параметров АЭ, процедуру имитационного моделирования методом Монте-Карло можно свести к следующему вычислительному алгоритму:

1) разыгрывается значение случайного числа p_i и по (3) определяется время срабатывания j-го источника τ_{ij}:

$$\tau_i \to f(p_i, c_к, \text{v}); \qquad (5)$$

2) для j-го источника строится случайная последовательность его срабатываний. В дальнейшем вполне обоснованно можно использовать принцип эргодичности процесса случайной генерации импульсов АЭ;

3) осуществляется суммирование импульсов АЭ, генерируемых отдельными источниками, т. е. определяются характеристики излучения интегрального гипотетического источника волнового возмущения гидросреды;

4) строится итоговая интегральная картина акустического излучения (возмущения) зоны УСО материалов и/или жидкостей;

5) статистически определяются информативные параметры АИ — средняя амплитуда упругих волн, интенсивность излучения, амплитудное распределение и т. д.;

6) изменяются физико-технологические параметры УСО, в частности, наиболее значимый — скорость движения гидроструи жидкости к преграде. Повторяется выполнение п.п. 1–5 при новом значении физико-технологических параметров обработки;

7) строятся зависимости статистических характеристик АИ от технологических режимов УСО, проводится их анализ и делаются соответствующие выводы.

Сопоставление результатов имитационного моделирования волновых процессов в зоне обработки со значениями акустического сигнала, полученными экспериментально. Для реализации рассмотренного выше алгоритма была написана программа, позволяющая варьировать количество источников, скорость и коэффициент, зависящий от свойств жидкости $c_к$. Реальный импульс волны упругой деформации, имеющий затухающий синусоидальный колебательный характер, для наглядности заменен прямоугольником. Эта формальная замена не существенно влияет на характер изменения и расчетные значения интегральных параметров АЭ.

Данные, полученные в результате выполнения процедуры имитационного моделирования, представлены на рис. 1. Для сравнения на рис. 2 приведена запись сигнала АЭ, снятая при помощи акустической системы «Малахит АС-15А/2» во время гидроструйной обработки детали.

Для оценки достоверности результатов имитационного моделирования проведены экспериментальные исследования, целью которых было измерение и анализ параметров АЭ для разных значений рабочего давления (скоростей) истечения струи.

Сопоставление данных эксперимента и параметров АЭ полученных в результате расчетов по методу Монте-Карло, представлено на рис. 3.

Степень достоверности и подобие результатов экспериментов теоретическим оценкам, сделанным по разработанной математической модели, осуществлялось путем определения

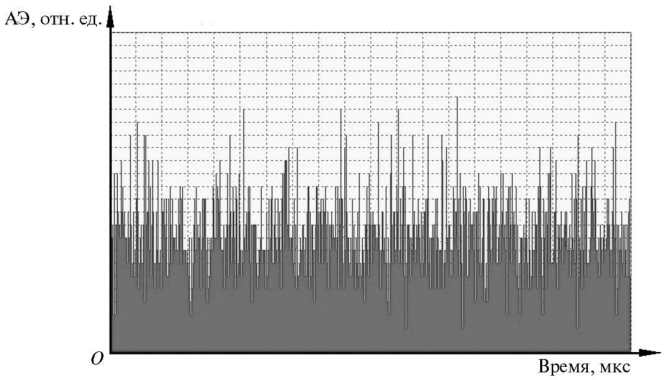

Рис. 1. Качественный результат выполнения процедуры имитационного моделирования методом Монте-Карло

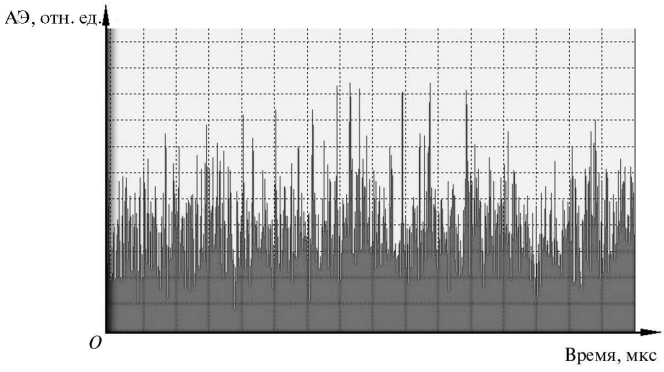

Рис. 2. Акустический сигнал, записанный с помощью системы «Малахит АС-15А/2» во время гидроструйной обработки детали

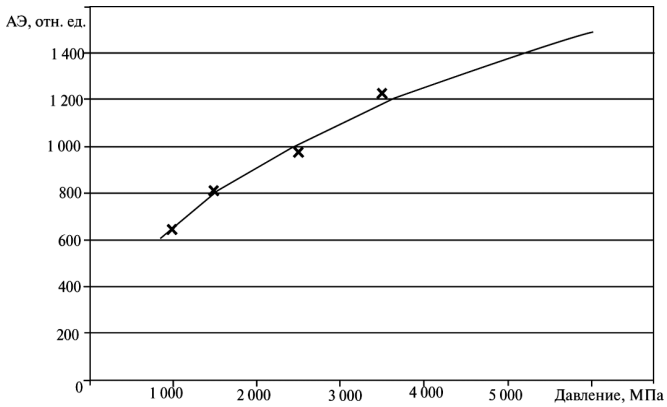

Рис. 3. Сравнение параметров АЭ, полученных в результате расчетов по методу Монте-Карло и данных эксперимента:

× — экспериментальные данные;
—— — теоретическая кривая

коэффициента корреляции r между ними по стандартной программе.

Анализ полученных результатов показывает, что, в целом, теоретическая зависимость достаточно полно отражает экспоненциальный характер нарастания волнового возмущения зоны обработки — области интенсивного торможения о мишень высокоскоростной струи жидкости при увеличении ее скорости. Об этом свидетельствует большое значение коэффициента корреляции между теоретическими и экспериментальными данными ($r = 0{,}975$), а также качественное совпадение характера поведения полученных зависимостей:

$$A = f(V).$$

Выводы

Энергетические параметры АЭ существенно зависят от скорости движения струи обрабатываемой жидкости к мишени — своеобразной скорости обработки, аналогу скорости резания в операционных технологиях механической обработки материалов.

Дальнейший анализ результатов имитационного моделирования предполагает исследование спектральных характеристик волн АЭ с целью выявления тенденций изменения диапазонов регистрации информативных частот, а также изучение амплитудного распределения импульсов для интегродифференциальной оценки их энергоемкости. Из рассмотрения совокупности реализаций имитационной модели процесса генерации волн АЭ следует, что информативный диапазон сигнала смещается в область более высоких частот, а анализ амплитудного распределения показывает увеличение относительной доли сигнала большой энергоемкости. Данное обстоятельство объясняется ростом вероятности одновременной генерации и, как следствие, сложением импульсов АЭ от различных источников. Реально при этом весьма вероятно появление вторичных кавитационных источников излучения, обусловленных нарушением сплошности жидкости в местах волнового импульсного возрастания до критического значения растягивающих механических напряжений из-за явления интерференции волн АЭ, своеобразных «волновых» флуктуаций.

Литература

1. *Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М.* Нетрадиционные методы обработки материалов. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 212 с.
2. *Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Алюшин Е.Г.* Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. № 6. С. 15–20.
3. *Барзов А.А., Галиновский А.Л.* Технологии ультраструйной обработки и диагностики материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 246 с.
4. *Барсуков Г.В.* Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Орел, 2006. 32 с.
5. *Потапов В.А.* Струйная обработка: состояние и перспективы развития в Европе и мире // Вестник машиностроения. 1996. № 1. С. 26–30.
6. *Chen F.L., Wang J., Lemma E., Siores E.* Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. Journal of Materials Processing Technology // J. Mater Process Technol. 2003. Vol. 141. P. 213–218.
7. *Алексеев В.К.* Некоторые особенности разрушения и износа материалов при взаимодействии с твердыми и жидкими частицами // Трение и износ. 1981. № 2. С. 239–243.
8. *El-Domiaty A., Abdel-Rahman A.* Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials // J. Adv Manuf Technol. 1997. Vol. 13. P. 171–181.
9. *Степанов Ю.С., Барсуков Г.В.* Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. Библиотека технолога. М: Машиностроение, 2004. 239 с.
10. *Погодин С.П., Саможенков В.М., Сотников А.А., Манвелова Н.Е., Бреннер В.А., Пушкарев А.Е., Пушкарева Е.В.* Практика использования гидроструйной технологии для резки картона и бумаги // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2003. № 1–2. С. 27–28.
11. *Бернадский В.Н.* Гидроабразивная разделительная резка // Сварщик. 2000. № 3. С. 23–26.
12. *Тихомиров Р.А., Кравченко Д.В., Кузьмин Р.А.* Экономическая эффективность процесса обработки сепаратных сит абразивно-жидкостными струями сверхвысокого давления / Производственные технологии: Материалы 3-й международной научно-технической конференции. Владимир: ВлГУ, 2000. С. 198.
13. *Abdel-Rahman A., El-Domiaty A.* Maximum depth of cut for ceramics using abrasive waterjet technique // Wear. 1998. Vol. 218. P. 216–222.
14. *Aydin G., Karakurt I., Aydiner K.* An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet // Bull Mater Sci. 2011. Vol. 34. P. 985–992.
15. *Полянский С.Н., Нестеров А.С.* Технология и оборудование гидроабразивной резки // Вестник машиностроения. 2004. № 5. С. 43–46.
16. *Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С.* Инверсия технологических понятий: «инструмент» – «заготовка» при ультраструйной обработке материалов и жидкостей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 2. С. 72–83.
17. *Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С.* Ультраструйные технологии жидкостей и суспензий. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 250 с.

18. *Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Сарычев Г.А., Щавелин В.М.* Акустическая эмиссия при трении. М.: Энергоатомиздат, 1998. 256 с.

19. *Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А.* Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 1988. 56 с.

20. *Гуревский А.В.* Экспресс-определение рациональных динамических условий и режимов ультразвуковой абразивной обработки методом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2005. 16 с.

21. *Tönshoff H.K, Jung M., Männel S., Rietz W.* Using acoustic emission signals for monitoring of production process // Ultrasonics. 2000. Vol. 37. Issue 10. P. 681–686.

22. *Marinescu I., Axinte D.A.* A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations // Int J. Mach Tool Manuf. 2008. Vol. 48. P. 1148–1160.

23. *Барзов А.А.* Эмиссионная технологическая диагностика. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.

24. Ультраструйная технология получения микросуспензий. О.Е. Балашев, А.А. Барзов, А.Л. Галиновский и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 352 с.

25. *Гмурман В.Е.* Теория вероятности и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.

26. *Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С., Трощий О.А.* Вероятностное моделирование в инновационных технологиях. М.: Изд-во «НТ», 2006. 100 с.

References

1. Kovshov A.N., Nazarov Iu.F., Iaroslavtsev V.M. *Netraditsionnye metody obrabotki materialov: Elektronnoe mul'timediinoe uchebnoe posobie* [Non-traditional methods of data processing: Digital multimedia tutorial]. Moscow, MGOU publ., 2007. 212 p.

2. Stepanov Iu.S., Barsukov G.V., Aliushin E.G. Sovremennye tekhnologii gidro- i gidroabrazivnoi obrabotki zagotovok [Modern technologies of hydro- and hydroabrasive machining]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [High Tech in Mechanical Engineering]. 2012, no. 6, pp. 15–20.

3. Barzov A.A., Galinovskii A.L. *Tekhnologii ul'trastruinoi obrabotki i diagnostiki materialov* [Ultra-Jet processing technology and diagnostic materials]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2009. 246 p.

4. Barsukov G.V. *Povyshenie effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniia na osnove diskretnogo regulirovaniia sostoianii tekhnologicheskoi sistemy.* Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk. [Improving the efficiency of waterjet cutting on the basis of the discrete states of the process control system. Dr. Tech. Sci. Diss.]. Orel, 2006. 32 p.

5. Potapov V.A. *Struinaia obrabotka: sostoianie i perspektivy razvitiia v Evrope i mire* [Blasting: state and prospects of development in Europe and worldwide]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1996, no. 1, pp. 26–30.

6. Chen F.L., Wang J., Lemma E., Siores E. Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. *Journal of Materials Processing Technology.* 2003, vol. 141, issue 2, pp. 213–218.

7. Alekseev V.K. Nekotorye osobennosti razrusheniia i iznosa materialov pri vzaimodeistvii s tverdymi i zhidkimi chastitsami [Some features of the destruction and wear of materials in contact with the solid and liquid particles]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 1981, no. 2, pp. 239–243.

8. El-Domiaty A., Abdel-Rahman A. Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials. *Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 1997, vol. 13, pp. 171–181.

9. Stepanov Iu.S., Barsukov G.V. *Sovremennye tekhnologicheskie protsessy mekhanicheskogo i gidrostruinogo raskroia tekhnicheskikh tkanei* [Modern technological processes of mechanical cutting and jetting technical fabrics]. Biblioteka tekhnologa. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 239 p.

10. Pogodin S.P., Samozhenkov V.M., Sotnikov A.A., Manvelova N.E., Brenner V.A., Pushkarev A.E., Pushkareva E.V. Praktika ispol'zovaniia gidrostruinoi tekhnologii dlia rezki kartona i bumagi [The practice of using water-jet technology for cutting cardboard and paper]. *Tselliuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board]. 2003, no. 1–2, pp. 27–28.

11. Bernadskii V.N. Gidroabrazivnaia razdelitel'naia rezka [Waterjet cutting dividing]. *Svarshchik* [Welder]. 2000, no. 3, pp. 23–26.

12. Tikhomirov R.A., Kravchenko D.V., Kuz'min R.A. *Ekonomicheskaia effektivnost' protsessa obrabotki separatnykh sit abrazivno-zhidkostnymi struiami sverkhvysokogo davleniia* [Economic efficiency of the processing of separate screens abrasive ultra-high pressure liquid jets]. *Proizvodstvennye tekhnologii: Materialy 3 mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Manufacturing Technology: Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. Vladimir, Vladimir State University publ., 2000. 198 p.

13. Abdel-Rahman A., El-Domiaty A. Maximum depth of cut for ceramics using abrasive waterjet technique. *Wear.* 1998, vol. 218, pp. 216–222.

14. Aydin G., Karakurt I., Aydiner K. An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet. *Bull Mater Sci.* 2011, vol. 34, pp. 985–992.

15. Polianskii S.N., Nesterov A.S. Tekhnologiia i oborudovanie gidroabrazivnoi rezki [Technology and equipment for water-jet cutting]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2004, no. 5, pp. 43–46.

16. Barzov A.A., Galinovskii A.L., Puzakov V.S. Inversiia tekhnologicheskikh poniatii: «instrument» – «zagotovka» pri ul'trastruinoi obrabotke materialov i zhidkostei [Inversion of Tool–Workpiece Notions in Ultra-Jet Processing of Materials and Liquids]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2009, no. 2, pp. 72–83.

17. Barzov A.A., Galinovskii A.L., Puzakov V.S. *Ul'trastruinye tekhnologii zhidkostei i suspenzii* [Ultra-Jet technology liquids and slurries]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2009. 250 p.

18. Baranov V.M., Kudriavtsev E.M., Sarychev G.A., Shchavelin V.M. *Akusticheskaia emissiia pri trenii* [Acoustic emission during friction]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1998. 256 p.

19. Poduraev V.N., Barzov A.A., Gorelov V.A. *Tekhnologicheskaia diagnostika rezaniia metodom akusticheskoi emissii* [Process diagnostics cutting acoustic emission method]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 56 p.

20. Gurevskii A.V. *Ekspress-opredelenie ratsional'nykh dinamicheskikh uslovii i rezhimov ul'trazvukovoi abrazivnoi obrabotki metodom akusticheskoi emissii.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Express definition of rational dynamic conditions and modes of ultrasonic abrasion acoustic emission method. Abstract of cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 2005. 16 p.

21. Tönkshoff H.K., Jung M., Männel S., Rietz W. Using acoustic emission signals for monitoring of production process. *Ultrasonics*, 2000, vol. 37, issue 10, pp. 681–686.

22. Marinescu I., Axinte D.A. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, issue 10, pp. 1148–1160.

23. Barzov A.A. *Emissionnaia tekhnologicheskaia diagnostika* [The emission process diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 384 p.

24. Balashev O.E., Barzov A.A., Galinovskii A.L. *Ul'trastruinaia tekhnologiia polucheniia mikrosuspenzii* [Ultra-jet technology for microsuspensions]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2011. 352 p.

25. Gmurman V.E. *Teoriia veroiatnosti i matematicheskaia statistika* [The theory of probability and mathematical statistics]. Tenth Edition, Moscow, Vysshaia shkola publ., 2004. 479 p.

26. Barzov A.A., Galinovskii A.L., Puzakov V.S., Troshchii O.A. *Veroiatnostnoe modelirovanie v innovatsionnykh tekhnologiiakh* [Probabilistic modeling for innovative technologies]. Moscow, «NT» publ., 2006. 100 p.

Статья поступила в редакцию 13.05.2013

Информация об авторах

БАРЗОВ Александр Александрович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1).

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

ХАФИЗОВ Максим Васильевич (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: m-khafizov@mail.ru).

Information about the authors

BARZOV Aleksandr Aleksandrovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

GALINOVSKIY Andrey Leonidovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedag.), Associate Professor, Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: galcomputer@mail.ru).

KHAFIZOV Maksim Vasil'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: m-khafizov@mail.ru).