



ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей Леонидович

кандидат технических наук,
доктор педагогических наук,
доцент, профессор
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
GALINOVSKY
Andrey Leonidovich
Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc.
(Pedag.), Associate Professor,
Professor
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N. E. Bauman)



ПРОВАТОРОВ
Александр Сергеевич
студент

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
PROVATOROV
Alexander Sergeevich
student
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N. E. Bauman)



ХАФИЗОВ
Максим Васильевич
аспирант

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
HAFIZOV
Maxim Vasilyevich
Post-Graduate
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N. E. Bauman)

Экспресс-выбор рациональных режимов гидроабразивной обработки материалов с использованием акустической эмиссии*

А.Л. Галиновский, А.С. Проваторов, М.В. Хафизов

Рассмотрена возможность решения проблемы экспресс-выбора рациональных режимов гидроабразивного резания материалов, основываясь на данных акустической эмиссии. Проведено моделирование процесса гидроабразивного резания методом конечных элементов. Показано наличие оптимального по производительности режима гидроабразивного резания. Получены данные соответствующего эксперимента на гидроустановке и сопоставлены с результатами моделирования. Показано наличие корреляции между производительностью гидроабразивного резания и акустическим сигналом.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, акустическая эмиссия, технологические параметры, расход абразива, эффективность технологии.

Express Choice of Solutions for Abrasive Waterjet Cutting Technology with the Use of Acoustic Emission

A.L. Galinovsky, A.S. Provatorov, M.V. Hafizov

Article reflects the possibility to solve the problem of choosing waterjet cutting technology optimum solutions, based on the acoustic emission data. Waterjet cutting process simulation by finite-element method is carried out. The existence of efficient production processes optimum in the waterjet cutting performance is showed. Obtained experiment data is compared with the simulation results. Correlation between the waterjet cutting performance and the acoustic emission data is showed.

Keywords: waterjet cutting, optimization, acoustic emission, technology parameters, abrasive consumption, technology efficiency.

К числу универсальных и эффективных способов обработки материалов в современном машиностроении относится технология гидроабразивного резания (ГАР). Данная технология обладает широкими функционально-технологическими возможностями, что вызвало интенсивный рост парка технологического гидрорежущего оборудования в различных отраслях промышленности, расширение

* Данное исследование проводилось в рамках гранта президента РФ №16.120.11.5069-МД и гранта РФФИ №12-08-33022 мол_а_вед «Разработка теоретических основ гибридной диагностики материалов и технологических покрытий».

сферы его рационального применения. Наиболее эффективно использование ГАР при сложноконтурном раскрое листовых заготовок из различных материалов, характеризующихся широким разбросом физико-механических характеристик. При этом научно-методическая база и информационно-аналитическое обеспечение данной производственной технологии разработано недостаточно, хотя в последние годы активно исследовались технологические возможности метода, изучались особенности процесса взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом, оценивалась его производительность, как основной показатель эффективности ГАР [1–3].

Значительный вклад в разработку и развитие конструкторско-технологического обеспечения процесса ГАР внесли отечественные и зарубежные ученые: В.Ф. Бабанин, Г.В. Барсуков, В.С. Гуенко, Е.Н. Петухов, В.С. Степанов, Р.А. Тихомиров, И.И. Шапиро, D. Arova, A. Mombert, R. Kovacevic и другие. В большинстве работ этих исследователей решались вопросы оптимизации параметров ГАР по критерию максимальной производительности и проводились оценки стоимостных показателей процесса формообразования. Вместе с тем работ, позволяющих оперативно осуществлять поиск оптимальных технологических режимов ГАР, проведено не было, а также не были предприняты попытки использовать потенциальные возможности метода акустической эмиссии для информационно-аналитического обеспечения процесса ГАР и применяемого технологического оборудования.

В связи с этим, разработка инженерных алгоритмов для экспресс-выбора рациональных технологических режимов ГАР, позволяющих дать объективную оценку по критерию максимальной производительности, является актуальной научно-практической задачей, решение

которой имеет существенное значение для повышения конкурентоспособности этой технологии в различных отраслях машиностроения.

Обоснование наличия оптимального режима ГАР. Выбор приоритетной цели исследования, связанной с разработкой информационно-аналитического сопровождения ГАР на основе метода акустической эмиссии (АЭ), был обоснован результатами экспертного оценивания. Было установлено (таблица), что наибольшего внимания, по мнению экспертов, среди возможных методов технологической диагностики заслуживают эмиссионные методы вследствие их малой изученности и больших перспектив по реализации, поскольку эти методы позволяют непосредственно оценить высокочастотную динамику ГАР, как средства формообразования деталей.

В классическом представлении решение задачи оптимизации процесса ГАР по производительности обработки должно обеспечить такие режимы формообразования, при которых суммарные затраты времени T_{Σ} на осуществление обработки материала $T_{об.м}$ и ее обеспечение $T_{об.б}$, приведенные к единице массы (объема) удаленного с заготовки обрабатываемого материала Q были бы минимальны, т. е. должна обеспечиваться максимальная удельная производительность процесса формообразования.

С физико-технологических позиций наиболее наглядно просматривается оптимум зависимости производительности ГАР от концентрации (массовой или объемной) абразива, вводимого посредством эжекции в сопловой струеформирующий насадок — фокусирующее сопло (в практике гидроабразивной обработке под массовой концентрацией абразива понимают отношение $c = \dot{m}_a / \dot{m}_в$ массовых расходов абразива \dot{m}_a и воды $\dot{m}_в$).

Наличие физически оптимального режима ГАР обусловлено взаимонаправленным, проти-

Результаты экспертного оценивания

Критерий	Альтернатива							
	Анализ продуктов гидроэрозии	Анализ параметров гидроустановки	Анализ силовых параметров	Оценка тепловых параметров	Виброметрия	Акустическая эмиссия	Электромагнитное излучение	Экзоэлектронная эмиссия
Изученность	0,136	0,124	0,149	0,120	0,118	0,054	0,063	0,061
Перспектива	0,088	0,099	0,074	0,100	0,105	0,166	0,158	0,160

вофазным влиянием на значение Q скорости струи, зависящей от отношения c (%) и ее абразивно-режущими свойствами, определяемыми скоростью движения и количеством (концентрацией) частиц абразива.

Действительно, при малом значении концентрации абразива c в рабочей жидкости (воде) режущая способность струи будет невелика, несмотря на ее достаточно большую скорость. По мере увеличения значения c режущая способность струи и, следовательно, производительность обработки будут возрастать. При этом, согласно закону сохранения количества движения (импульса) скорость струи уменьшится, так как часть ее кинетической энергии будет расходоваться на разгон частиц абразива до некоторой результирующей скорости движения абразивно-жидкостного потока (струи). Дальнейшее увеличение концентрации абразива, т. е. рост присоединенной (дополнительной) массы абразивных частиц к массе исходной жидкости, в конечном счете, приведет к существенному торможению струи. В этом случае произойдет снижение скорости частиц, определяющих эффективное разрушение обрабатываемого материала.

В первом приближении, без учета потерь на взаимодействие потока абразивно-жидкостной суспензии со стенками фокусирующего сопла соотношение скоростей на входе и выходе из него по закону сохранения количества движения определяется как

$$\dot{m}_b V_{0b} = (\dot{m}_b + \dot{m}_a) V_{ab} \Rightarrow V_{ab} = \frac{V_{0b}}{(1+c)}, \quad (1)$$

где \dot{m}_b и \dot{m}_a — удельные в единицу времени массовые расходы воды (принимается известным и неизменным) и абразива соответственно; V_{0b} — скорость жидкостной струи на входе в фокусирующее сопло (может быть оценена по закону Бернулли исходя из давления, создаваемого установкой); V_{ab} — скорость движения абразивной суспензии (частиц абразива и потока воды) на выходе из струеформирующего сопла; c — массовая (весовая) концентрация абразива в воде, $c = \dot{m}_a / \dot{m}_b$.

Теоретический анализ полученных результатов осуществим в предположении, что интенсивность изнашивания любого материала пропорциональна потоку энергии абразив-

ных частиц в направлении эродирующей поверхности:

$$J = K(\dot{m}_a V_{ab}^2) = K\dot{m}_a \left(\frac{V_{0b}}{1+c} \right)^2 = K(\dot{m}_b V_{0b}^2) \frac{c}{(1+c)^2}, \quad (2)$$

где $(\dot{m}_a V_{ab}^2)$ — плотность потока энергии абразива в струе; K — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от прочности и плотности эродирующего материала. Для определения коэффициента K удобно использовать методику анализа параметров гидроабразивного резания путем прорезания пазов в материале.

Из формулы (2) следует, что при $c \rightarrow \infty J \rightarrow 0$, т. е. струя полностью утрачивает режущую способность. Это еще раз подтверждает справедливость логики проведенных выше рассуждений.

Следовательно, существует такое значение концентрации абразива c_{opt} , при котором имеет место максимальная производительность процесса гидроабразивного разрушения материала заготовки. Схематично изменение производительности Q как функции концентрации абразива c представлено на рис. 1.

Моделирование процесса ГАР методом конечных элементов и сопоставление его результатов с экспериментальными данными. С целью анализа влияния (массовой или объемной) концентрации абразива в воде и подтверждения предложенных феноменологических представлений о наличии физически оптимального ре-

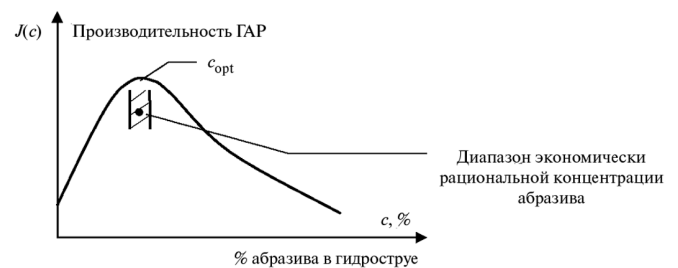


Рис. 1. Предполагаемая теоретическая кривая зависимости производительности резания от концентрации абразива в струе:

$p = \text{const}$ (номинальное рабочее давление жидкости в системе высокого давления)

жима ГАР проведем численное моделирование методом конечных элементов. Для этого рассмотрим задачу взаимодействия гидроабразивной струи с преградой для ряда случаев, отличающихся наличием в гидроструе различного количества абразивных зерен, т. е. разного значения c .

Схема постановки задачи показана на рис. 2. В задаче использовалась мультиматериальная Эйлера модель (Euler 2-D multimaterial), решалась осесимметричная задача описания движения деформируемой сплошной среды. Материал мишени — алюминий. Материал абразива — SiC. Были смоделированы варианты с концентрацией абразива = 0, 8, 14, 25, 40%. Начальная скорость движения водяной струи $V_{0в} = 860$ м/с (что соответствует давлению 370 МПа, используемому в эксперименте). Скорость мишени v , равная скорости гидроабразивной струи $V_{аб}$, рассчитывалась по формуле (1) для каждой концентрации.

Исходя из полученных результатов моделирования, можно сделать вывод, что увеличение концентрации абразива приводит не только к снижению скорости гидроабразивного потока, но и к нежелательному взаимодействию частиц абразива, тормозящему динамический процесс ГАР.

Кроме того, по результатам моделирования при одних и тех же начальных условиях (технологических параметрах) гидрорезания, можно отметить различный характер разрушения для водяной и гидроабразивной струи. В качестве модельного материала был выбран алюминиевый сплав. Для первого случая отмечено наличие давлений в пятне контакта струи и мате-

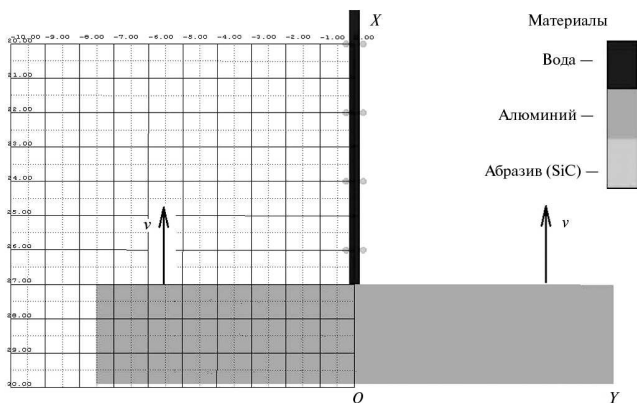


Рис. 2. Схема постановки задачи в системе ANSYS(AUTODYN)

риала, составляющее порядка 400 МПа, а для второго — около 1 ГПа, при этом эрозия материала при гидрорезании зависит от статического давления жидкости, кавитационных и волновых процессов в струе и материале. Для варианта гидроабразивного резания процесс гидроэрозии в большей степени зависит от факта взаимодействия с ним абразивных частиц, вызывающих заметные разрушения, значения напряжений в зоне контакта существенно превышают предел прочности материала (рис. 3).

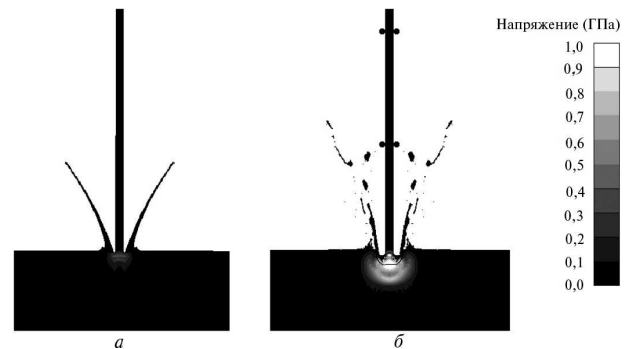


Рис. 3. Значения напряжений в месте взаимодействия водяной (а) и гидроабразивной (б) струи с алюминиевым материалом

Проведены соответствующие эксперименты на гидроустановке КМТ Waterjet Systems. Были установлены те же значения давления и концентраций абразива, которые использовались при моделировании. В качестве мишени использовалась сталь 20 и алюминий. Результаты сопоставительного анализа теоретических зависимостей и экспериментальных данных подтверждают выдвинутые предположения о наличии оптимального значения концентрации абразива (рис. 4–6).

С практической точки зрения доказательство физического оптимального режима ГАР имеет важное научное значение, не позволяет использовать этот факт для повышения эффективности обработки. Для решения этой задачи было предложено использовать потенциал возможностей хорошо зарекомендовавшего и широко используемого в машиностроении метода АЭ. Учитывая имеющийся опыт разработки информационно-диагностических комплексов для физико-механических методов обработки [4, 5] открываются широкие перспективы реализации указанного подхода для решения задачи экспресс-выбора оптимального режима ГАР.

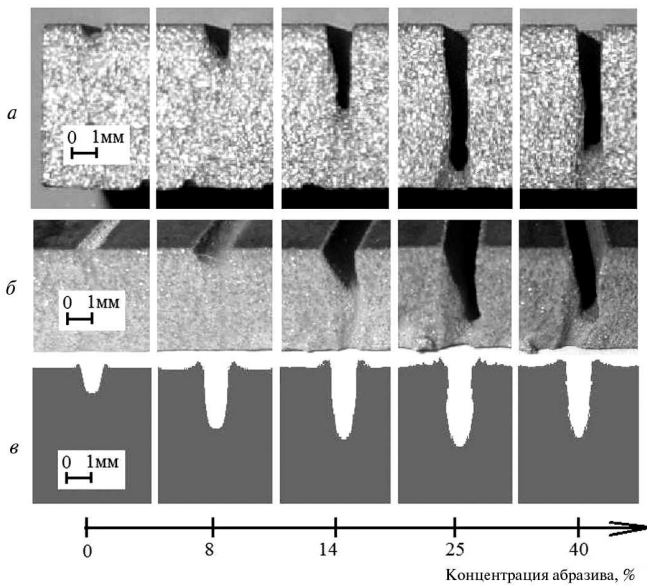


Рис. 4. Сопоставление данных численного моделирования с результатами экспериментальных исследований:

a — алюминий; *b* — сталь; *v* — AUTODYN по нахождению оптимального режима ГАР

Для оценки возможности экспресс-диагностики процесса гидроабразивного резания на основе показаний АЭ был проведен эксперимент. Перед обработкой стальной и алюминиевой пластины (о чем говорилось выше) на поверхность мишени был установлен акустический датчик и во время резания для каждой из концентраций абразива при помощи акустической системы «Малахит АС-15А/2» был записан сигнал. Затем сигнал был обработан разложением в ряд Фурье, была выделена амплитуда при основной гармонике. Кривые сопоставления полученных значений сигнала с данными по производительности обработки и результатами моделирования представлены на рис. 5, 6.

Корреляция между значениями АЭ и производительностью резания составила 0,795 для стали и 0,72 для алюминия. Также видно весьма точное совпадение значения концентрации, при которой наблюдаются максимумы производительности и акустического сигнала.

Выводы

1. Характер теоретической зависимости (см. рис. 1) практически полностью идентичен полученным экспериментальным данным и ре-

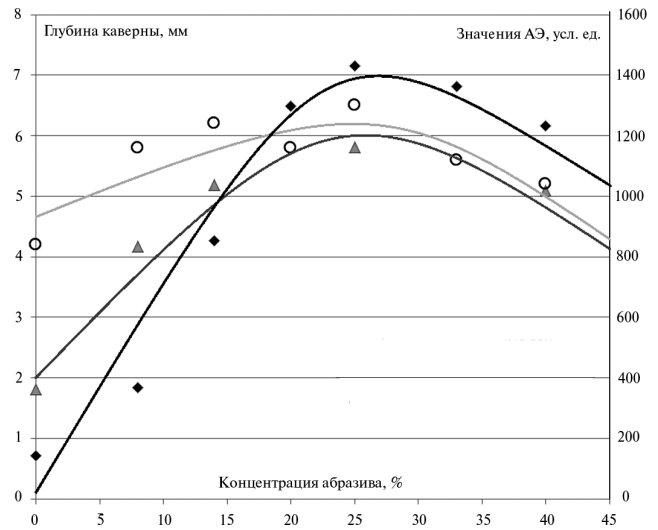


Рис. 5. Кривые сопоставления результатов моделирования производительности гидроабразивного резания с данными эксперимента и полученными значениями сигнала АЭ для алюминия:

◆ — экспериментальные данные; Δ — расчеты в AUTODYN; ○ — значения АЭ

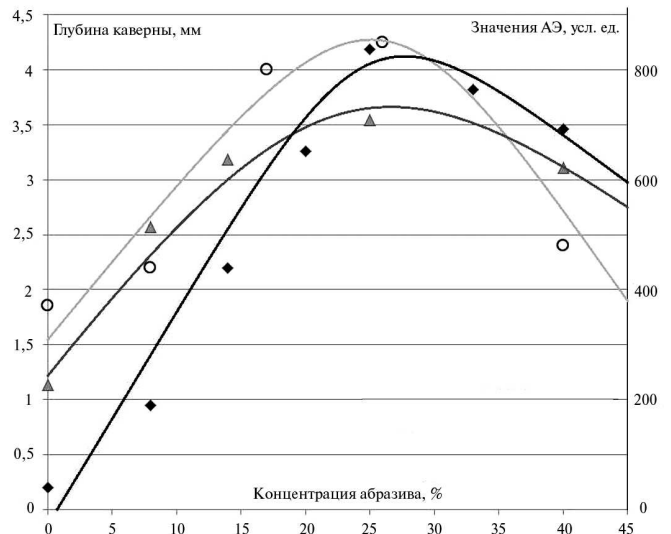


Рис. 6. Кривые сопоставления результатов моделирования производительности гидроабразивного резания с данными эксперимента и полученными значениями сигнала АЭ для стали:

◆ — экспериментальные данные; Δ — расчеты в AUTODYN; ○ — значения АЭ

зультатам моделирования методом конечных элементов (см. рис. 5, 6), а также аналогичным данным, полученным ранее, например в работе [6]. Причем предложенное в диссертационном исследовании В.М. Елфимова [6] физическое объяснение наличия максимума таких зависи-

мостей при ГАР вполне адекватно реальному поведению функции $J = f(c)$. Оно связано с противофазным влиянием скоростного и ударно-абразивного факторов ГАР на интенсивность процесса гидроабразивной эрозии, подробно проанализированным ранее. Основным отличительным признаком нашей зависимости является ее инвариантный характер, что придает ей определенную общность, необходимую для последующего практического применения в количественных расчетах по ранее построенным моделям.

2. Получена обобщающая зависимость между интенсивностями эрозионного изнашивания обрабатываемого материала и концентрацией абразива, согласующая известные результаты исследований в области ГАР и положения теории свободных струй. Показано наличие корреляции между значениями и производительности обработки и уровнем акустического сигнала и, следовательно, возможность экспресс-выбора рациональных режимов гидроабразивной обработки материалов, основываясь на показаниях сигнала АЭ.

Литература

1. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскраивания технических тканей. М.: Машиностроение, 2004. 239 с.
2. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 318 с.
3. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1995. 350 с.
4. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.

5. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М., Сальников С.К. Анализ влияния кинематического фактора ультразвука на эффективность гидрообработки материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. М.: Изд-во СПбГПУ, 2010. С. 115–124.

6. Елфимов В.М. Разработка методики выбора технологических режимов гидроабразивной резки листовых материалов и конструкций по технико-экономическому критерию: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 79–94.

References

1. Stepanov Yu.S., Barsukov G.V. *Sovremennye tekhnologicheskie protsessy mekhanicheskogo i gidrostruynogo raskroia tekhnicheskikh tkanei* [Modern technological processes of mechanical and jetting cutting fabrics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 239 p.
2. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. *Progressivnyye tekhnologii gidrostruynogo rezaniia materialov* [Advanced technologies jetting cutting materials]. Tula, TulGU publ., 2009. 318 p.
3. Shmanev V.A., Shulepov A.P., Meshcheriakov A.V. *Struinaia gidroabrazivnaia obrabotka detalei GTD* [Jet water jet machining parts of GTE]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1995. 350 p.
4. Barzov A.A. *Emissionnaia tekhnologicheskai diagnostika* [Emission process diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 384 p.
5. Barzov A.A., Galinovskii A.L., Elfimov V.M., Sal'nikov S.K. *Analiz vliianiia kinemacheskogo faktora ul'trastryi na effektivnost' gidroobrabotki materialov* [Analysis of the effect of the kinematic factor for the efficiency of hydrotreating ultrastrui materials]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2010. Moscow, SPbGPU publ., pp. 115–124.
6. Elfimov V.M. *Razrabotka metodiki vybora tekhnologicheskikh rezhimov gidroabrazivnoi rezki listovykh materialov i konstruktii po tekhniko-ekonomicheskomu kriteriiu*. Diss. na soiskanie uchenoi stepeni [Development of the method of choice of technological modes of waterjet cutting of sheet materials and structures of the feasibility criteria. Diss. for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow. MSTU named after N.E. Bauman. 2013. Pp. 79–94.

Статья поступила в редакцию 22.01.2013

Информация об авторах

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).

ПРОВАТОРОВ Александр Сергеевич (Москва) — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1, e-mail: sanru41@rambler.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

GALINOVSKY Andrey Leonidovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedag.), Associate Professor, Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: galcomputer@mail.ru).

PROVATOROV Alexander Sergeevich (Moscow) — student of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: sanru41@rambler.ru).

HAFIZOV Maxim Vasilyevich (Moscow) — Post-Graduate of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: m-khafizov@mail.ru).