

УДК 519.6:532:539.5:621.9.04.011

Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла

А.М. Герасимова, А.Л. Галиновский, В.И. Колпаков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Analysis of the Interaction between the Abrasive Jet Stream and the Inner Surface of the Jet Forming Nozzle

A.M. Gerasimova, A.L. Galinovsky, V. I. KolpakovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: blakdragonn@rambler.ru, galcomputer@yandex.ru, kolpakov54@mail.ru



Рассмотрен анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего (струеформирующего) сопла. Разработана физико-математическая модель данного процесса. Определены зависимость набора скорости абразивной частицей от ее размера и влияние расстояния между частицами абразива на его движение внутри канала фокусирующего сопла. Проведено сравнение параметров движения частиц абразива внутри канала сопла в двух- и трехмерном представлении. Полученные результаты позволяют проанализировать причины и оценить характер износа внутреннего канала сопла. Данные теоретических исследований и математического моделирования могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего решения проблемы, связанной с увеличением срока службы фокусирующего насадка путем применения новых конструкторско-технологических решений, в частности путем изготовления фокусирующего сопла слоистой структуры и уменьшения времени приработки сопла в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, абразивные частицы, фокусирующее сопло, численное моделирование.



The article presents the analysis of the interaction between the abrasive jet stream and the inner surface of the jet stream forming nozzle. A physico-mathematical model of the process was developed. This study enabled the authors to determine the relationship between the particle acceleration and its size, and the influence of the distance between the abrasive particles on the movement of the abrasive material inside the jet stream forming nozzle. The parameters of motion of the abrasive particles inside the jet stream forming nozzle were compared in the 2D and 3D representation. The results obtained make it possible to evaluate the pattern of wear of the inner channel of the jet stream forming nozzle and analyze the reasons for its occurrence. The results of the theoretical research and mathematical simulation can be used as the basis for further studies of the life extension of the jet stream forming nozzle through the use of new design and technological decisions. Specifically, it can be achieved if the jet stream forming nozzle has a layered structure and the wear-in time is reduced during the operation.

Keywords: hydroabrasive processing, abrasive particles, jet forming nozzle, numerical simulation.

В настоящее время технологии гидроабразивной обработки широко применяют в машиностроении, в частности в ракетно-космической отрасли, так как они продемонстрировали высокую конкурентоспособность, а в некоторых случаях и преимущества по сравнению с традиционными методами обработки материалов [1–5].

Гидроабразивная обработка обладает рядом достоинств, среди которых возможность резания материалов с различными физико-механическими свойствами (металлы, стали и сплавы, керамика, резина, композиты); возможность осуществления сложноконтурной резки с использованием станков с ЧПУ; гибкость и универсальность применения; высокая производительность и широкий диапазон значений скоростей подачи; высокое качество получаемой после обработки поверхности (отсутствие микротрещин и зон термического или химического воздействия на материал в поверхностном слое детали); малые потери обрабатываемого материала; экологическая безопасность; совместимость с промышленными роботами и манипуляторами.

Как метод формообразования, гидроабразивная обработка не лишена недостатков. В частности, это сравнительно малый срок службы фокусирующих сопел, сложность обслуживания и малый межремонтный ресурс систем создания высокого давления (ремонт и текущее обслуживание проводят через каждые 300...500 ч работы), сложность управления резкой вследствие «заноса» абразивной струи, а также высокая стоимость абразивного материала и фокусирующего сопла.

Целью исследований является анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла. Моделирование этого взаимодействия осуществляется с помощью численных методов механики сплошной среды в трехмерной по-

становке с использованием программного комплекса ANSYS AUTODYN [6].

На *предварительном этапе* моделирования была сформулирована следующая система допущений [7–9]:

1. Процесс формирования высокоскоростной абразивно-жидкостной струи считался происходящим в абсолютном вакууме, что допустимо ввиду малых расстояний (2...3 мм) от среза сопла до поверхности детали и минимального сопротивления струи о воздушную среду в данном зазоре.

2. Не учитывались процессы, протекающие в коллекторе (камере смешивания) во время формирования абразивно-жидкостной струи.

3. Форма частиц принята идеально сферической формы.

На рис. 1 представлена параметрическая схема движения абразивных частиц внутри канала фокусирующего сопла в трехмерном представлении. В данной схеме Z — продольная ось (ось симметрии), а X и Y — поперечные оси, перпендикулярные оси Z .

Скорость частиц задана с помощью разложения вектора скорости по соответствующим осям: $V_X = V_Y = 0,01$ км/с; $V_Z = 0,04$ км/с. За положительное направление скоростей принято направление, показанное на параметрической схеме (см. рис. 1). Скорость струи $V_{стр} = 0,9$ км/с, длина сопла $L = 70$ мм.

В расчетах принимались следующие значения переменных:

$$R_a = 0,25 \dots 0,40 \text{ мм}; R = 0,5 \text{ мм}; R_k = 1 \text{ мм}.$$

Выходными параметрами являются зависимости $V_Z(z)$, $V_X(z)$, $V_Y(z)$ проекций скоростей частиц абразива на координатные оси от пройденного частицей расстояния z и траектории $X(z)$, $Y(z)$ движения центров частиц абразива.

Координаты центров абразивных частиц для различных радиусов R_a представлены в таблице.

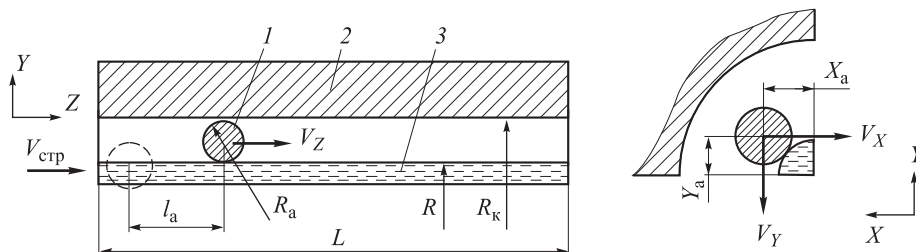


Рис. 1. Параметрическая схема движения абразивных частиц внутри канала фокусирующего сопла:

1 — частица абразива; 2 — фокусирующее сопло; 3 — струя воды; $V_{стр}$ — скорость струи воды; V_X , V_Y , V_Z — проекции скорости частицы абразива соответственно на ось X , Y , Z ; l_a — шаг между частицами абразива по оси Z ; R_a — радиус частицы абразива; R — радиус струи воды; R_k — радиус канала фокусирующего сопла; X_a , Y_a — положение центра абразивной частицы относительно осей X , Y соответственно

Координаты центров абразивных частиц

R_a , мм	$(X_a; Y_a)$, мм
0,25; 0,3	(0,3; 0,6), (0,4; 0,5), (0,5; 0,4), (0,6; 0,3)
0,35; 0,4	(0,4; 0,5), (0,5; 0,4)

В ходе математического моделирования решались следующие задачи, сформулированные в виде последовательных этапов:

- 1) определение зависимости набора скорости частицей от ее размера;
- 2) определение влияния расстояния между частицами абразива на его движение внутри канала фокусирующего сопла;
- 3) сравнение параметров движения частиц абразива внутри канала фокусирующего сопла в двух- и трехмерном представлении.

На *первом этапе* проводился анализ движения частиц абразива внутри канала фокусирующего сопла. Определялось, как скорость (набор скорости) частицы зависит от ее размера. Полученная зависимость позволяет найти оптимальный размер частицы абразива, который способствует набору большей скорости.

На рис. 2 показан характер изменения проекций скорости частицы на ось Z в зависимости

от пройденного частицей расстояния z : $V_z(z)$. Были рассмотрены четыре варианта: частицы абразива радиусами 0,25; 0,3; 0,35 и 0,4 мм. При $R_a = 0,4$ мм построить график $V_z(z)$ не удалось, так как частица разрушилась при взаимодействии с поверхностью сопла в процессе эксплуатации.

На рис. 3 представлен процесс прохождения абразивными частицами канала фокусирующего сопла.

На данном этапе исследования можно сделать вывод, что наиболее удачным вариантом является выбор абразивной частицы с $R_a = 0,3$ мм. При этом происходит постоянный захват частицы струей воды. Тем самым обеспечивается наиболее быстрый набор скорости. Выбирать частицы с $R_a < 0,25$ мм нецелесообразно, так как частица, оттолкнувшись от струи, больше не взаимодействует с ней и движется вдоль канала соплового насадка без набора скорости. Также нецелесообразно выбирать частицы с $R_a > 0,35$ мм, поскольку они занимают слишком много места в канале соплового насадка и разрушаются под воздействием напора воды на стенке канала сопла.

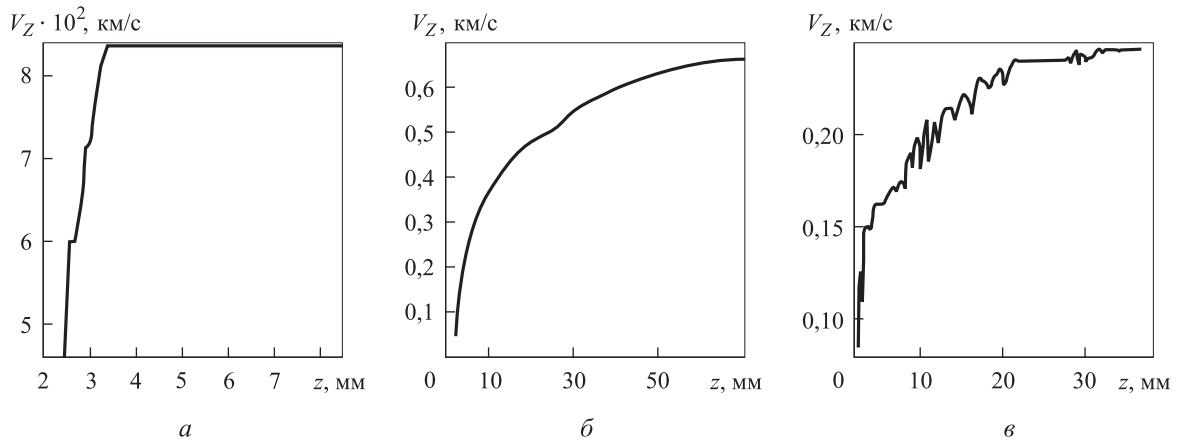


Рис. 2. Зависимости проекций на ось Z скорости абразивной частицы от пройденного ею расстояния при $R_a = 0,25$ (а), $0,3$ (б) и $0,35$ мм (в)

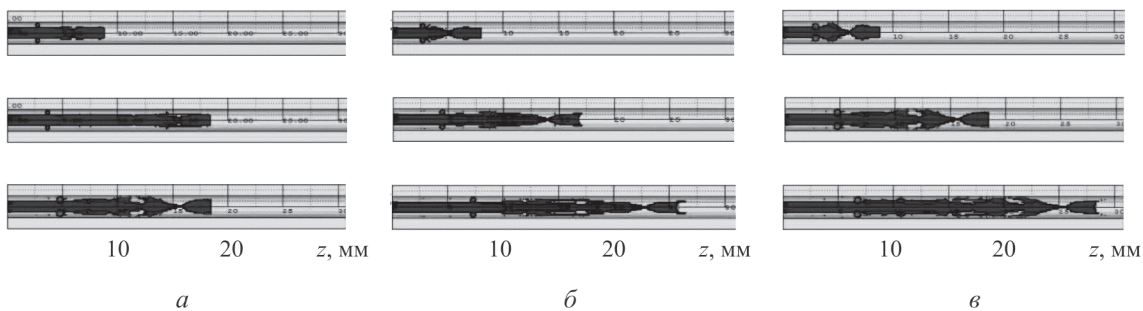


Рис. 3. Процесс прохождения частицами абразива канала фокусирующего сопла при $R_a = 0,25$ (а), $0,3$ (б) и $0,35$ мм (в)

На *втором этапе* исследования определялось влияние расстояния между частицами абразива на характер движения частиц внутри канала фокусирующего сопла. При этом для частиц размером $R_a = 0,3$ мм было рассмотрено два варианта: $l_a = 1,25$ мм и $l_a = 2,5$ мм.

На рис. 4 видно, что частицы абразива совершают сложное колебательное движение. В начальный момент времени частица абразива отталкивается от высокоскоростного потока жидкости (воды) и взаимодействует со стенкой, отталкивается от нее и взаимодействует со стенкой струеформирующего канала соплового насадка, создавая напряженно-де-

формационное состояние в зоне контакта. Проникновение абразивных частиц в водяную струю вызывает ее существенную турбулизацию, которую можно погасить, выбрав соответствующую длину проточного канала соплового насадка.

В первом варианте ($l_a = 1,25$ мм) происходит скопление частиц внутри канала фокусирующего сопла, что плохо влияет на его живучесть — износ идет быстрее. Во втором варианте ($l_a = 2,5$ мм) скопления частиц не наблюдалось. Отсюда можно сделать вывод, что явление скопления частиц в процессе прохождения ими канала фокусирующего сопла зависит от расстоя-

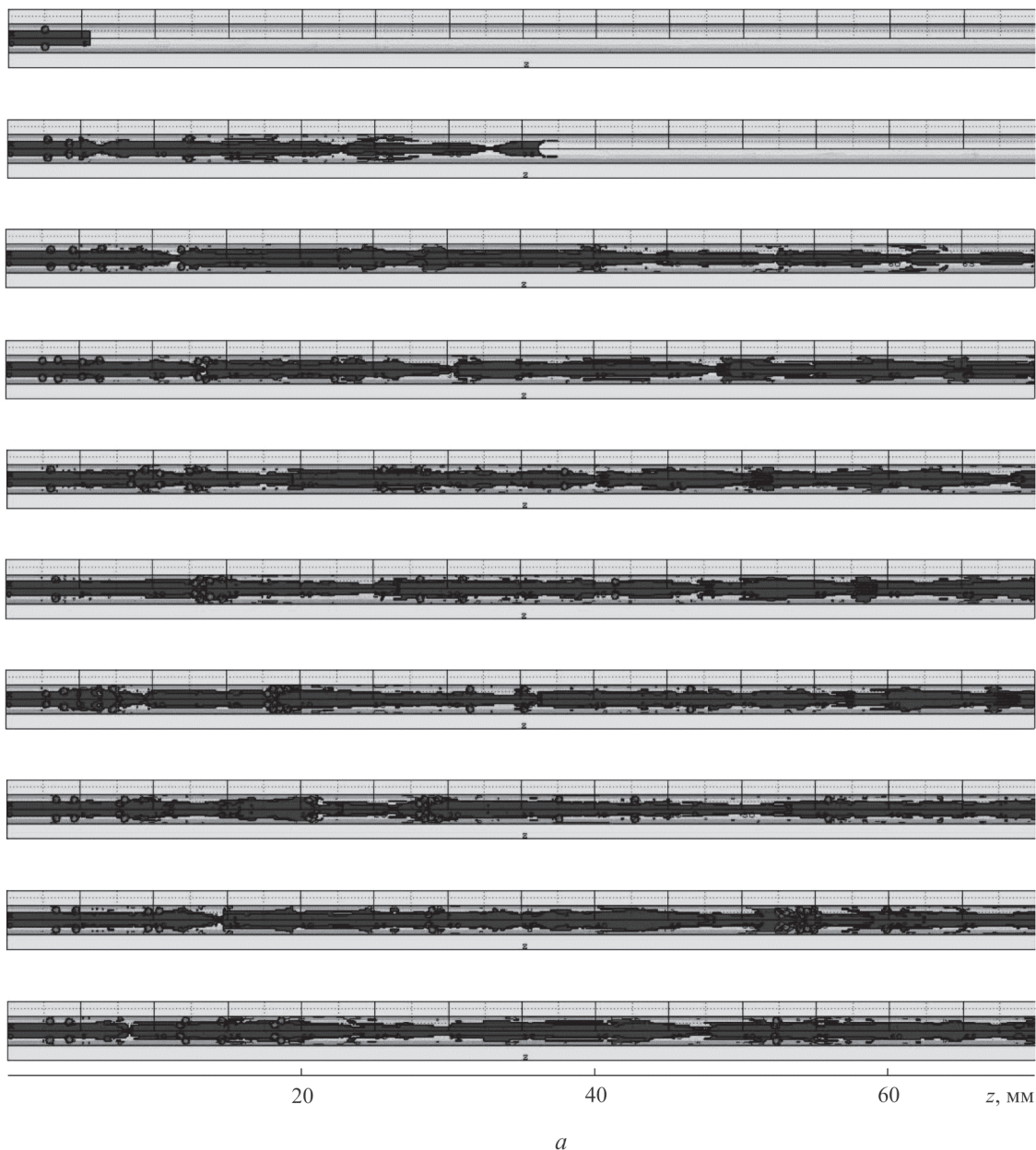


Рис. 4 (начало). Процесс прохождения частицами абразива канала фокусирующего сопла при расстоянии между частицами 1,25 (а) и 2,5 мм (б)

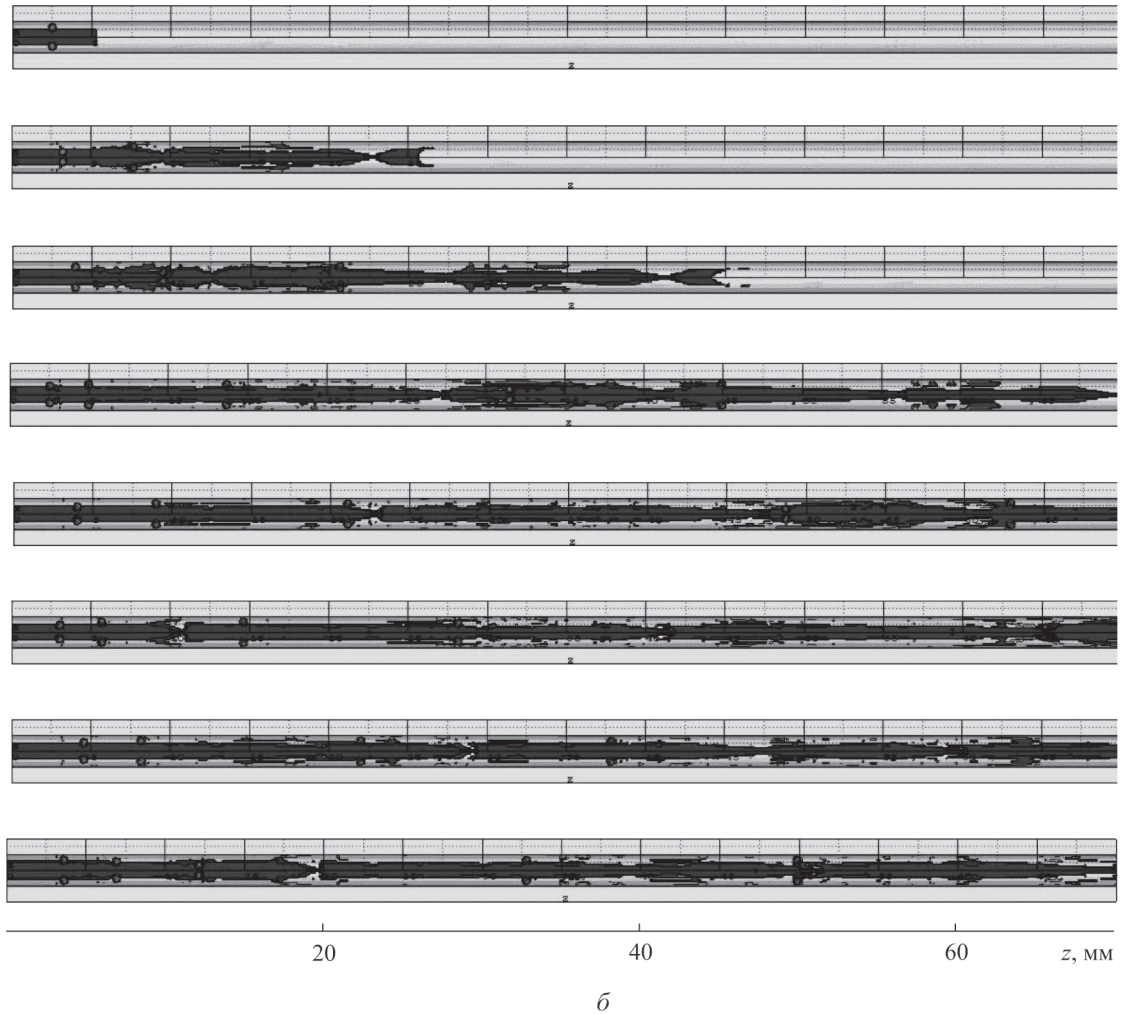


Рис. 4 (окончание). Процесс прохождения частицами абразива канала фокусирующего сопла при расстоянии между частицами 1,25 (а) и 2,5 мм (б)

ния между абразивными частицами при взаимодействии со струей или, другими словами, от начальной концентрации частиц абразива в жидкостной струе.

На рис. 5 видно, что вследствие неравномерного колебания частиц происходит соответствующий износ фокусирующего канала с характерной волнообразной картиной эрозии.

При взаимодействии со струей воды частицы абразива, совершающие колебательное дви-

жение, представленное на рис. 4, разгоняются. На рис. 6 показан характер изменения проекций скоростей частиц абразива на координатные оси, а на рис. 7 — траектории движения центров частиц абразива $X(z)$, $Y(z)$ для двух случаев, когда расстояние l_a между частицами абразива равно 1,25 и 2,5 мм.

Как уже было отмечено, при движении внутри фокусирующего канала частицы совершают сложное колебательное движение, при этом каждая частица колеблется по своему закону со своей частотой. Это хорошо видно на рис. 7.

Различие максимально набираемых скоростей в проекции на ось Z можно объяснить тем, что в обоих случаях энергия струи расходуется на разное количество частиц. В варианте с меньшим содержанием частиц абразива в струе, т. е. при $l_a = 2,5$ мм, максимальная скорость $V_Z^{\max}(z) = 0,74$ км/с, что больше, чем в варианте с большим содержанием частиц абразива в струе ($l_a = 1,25$ мм) — $V_Z^{\max}(z) = 0,72$ км/с.

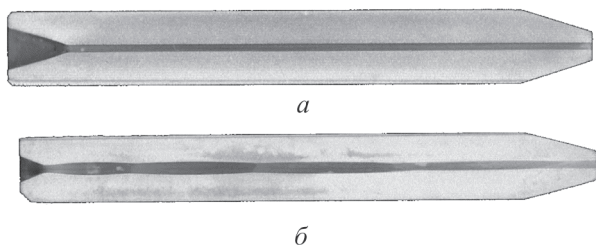


Рис. 5. Сопловые насадки:
а — новый; б — отработавший 50 ч

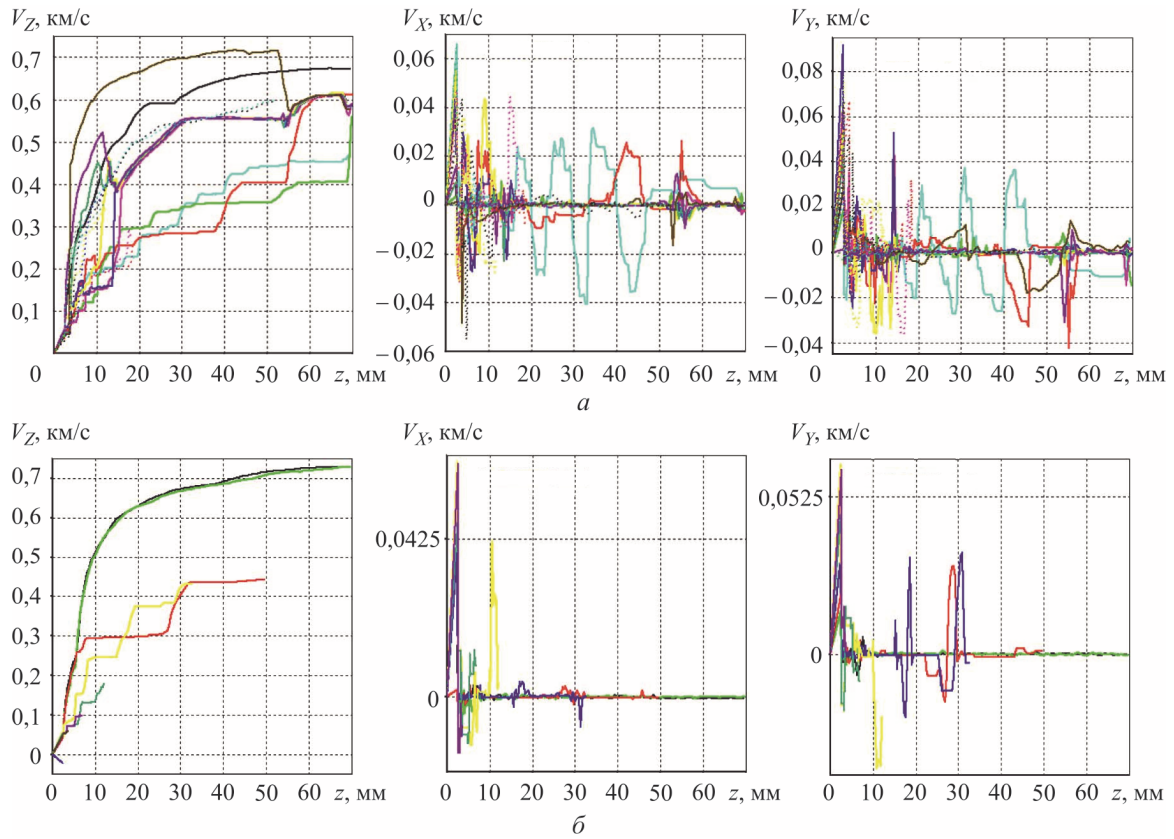


Рис. 6. Зависимости $V_z(z)$, $V_x(z)$, $V_y(z)$ при расстоянии между абразивными частицами $l_a = 1,25$ (а) и 2,5 мм (б)

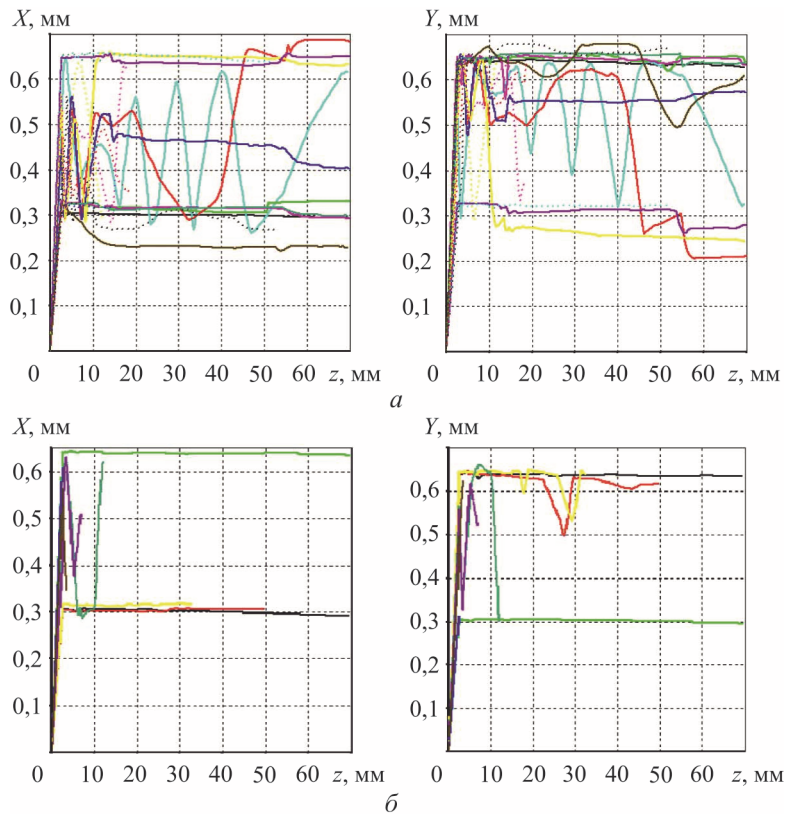


Рис. 7. Траектории движения $X(z)$ и $Y(z)$ частиц абразива при $l_a = 1,25$ (а) и 2,5 мм (б)

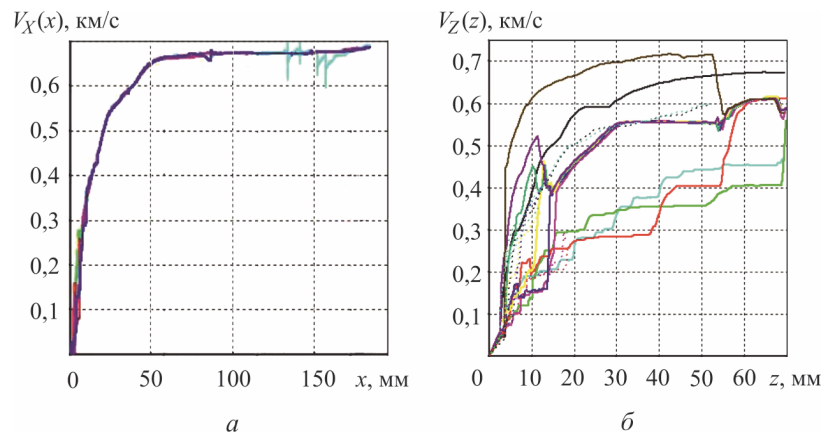


Рис. 8. Графики набора скоростей частицами абразива в осевом направлении для двухмерного (а) и трехмерного (б) представления

На *последнем этапе* исследования проводилось сравнение двух- и трехмерного решений, описывающих движение абразивных частиц в канале струеформирующего сопла. При этом двухмерное решение задачи было выполнено ранее [10–12].

На рис. 8 видно, что в обоих случаях происходит довольно быстрый набор скорости с последующим его замедлением. Однако в трехмерном случае график изменения скорости (рис. 8, б) имеет более плавный наклон по сравнению с двухмерным расчетом (рис. 8, а), что свидетельствует о более плавном наборе скорости.

Основное отличие заключается в том, что если в двухмерном варианте расчета темп набора скорости отдельных частиц практически одинаков, то в трехмерном варианте отдельные частицы абразива разгоняются по-разному. Однако время разгона (~50 мкс) и максимальные осевые скорости движущихся частиц в обоих случаях расчета примерно одинаковы — 0,68 км/с в двухмерном случае (рис. 8, а) и 0,72 км/с в трехмерном случае (рис. 8, б).

Таким образом, несмотря на то, что трехмерные расчеты дают наиболее полное представление о процессах, протекающих в канале струеформирующего сопла, отмеченное обстоятельство свидетельствует о сопоставимости результатов численного моделирования в двухмерном и трехмерном приближении и позволяет в дальнейшем ограничить исследование

рассматриваемого явления решением двумерной задачи, обеспечив при этом заметное сокращение времени расчетов.

Выводы

1. В рассмотренном диапазоне конструктивных параметров канала струеформирующего насадка, кинематических и геометрических параметров жидкой струи (воды) наиболее рациональными с точки зрения обеспечения максимального значения осевой скорости являются абразивные частицы диаметром 0,6 мм ($R_a = 0,3$ мм). В относительном выражении это составляет величину, равную 0,6 по отношению к диаметру движущейся жидкой струи или 0,3 по отношению к диаметру канала насадка.

2. Определено влияние расстояния между частицами абразива на его движение внутри канала фокусирующего сопла, при этом показано, как концентрация абразивных частиц в струе влияет на набор скорости частицами и износостойкость внутреннего канала сопла.

3. Показана сопоставимость результатов численного моделирования движения абразивных частиц в канале соплового насадка под действием высокоскоростного напора жидкости в двухмерном и трехмерном приближении. Указанное обстоятельство позволяет в дальнейшем ограничить исследование рассматриваемого процесса решением двумерной задачи, обеспечив при этом заметное сокращение времени расчетов.

Литература

- [1] Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. *Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей*. Москва, 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] Ерухимович Ю.Э. *Математическое моделирование и совершенствование метода расчета эффективности процесса резания горных пород гидроабразивным инструментом*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1999. 17 с.
- [4] Martin P. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*. Estimated Delivery Time, 2009. 936 p.
- [5] Kennedy D.M., Hashmi M.S.J. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 300, iss. 3–4, pp. 246–253.
- [6] ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения 12 марта 2014).
- [7] Maniadaki K., Kestis T., Bilalis N., Antoniadis A. A finite element-based model for pure waterjet process simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 31, pp. 933–940.
- [8] Mabrouki T., Raissi K., Cornier A. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process. *Wear*, 2000, vol. 239, pp. 260–273.
- [9] Mabrouki T., Raissi K. Stripping process modelling: interaction between a moving waterjet and coated target. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. vol. 42, pp. 1247–1258.
- [10] Герасимова А.М., Колпаков В.И. Численное моделирование движения абразивных частиц в фокусирующей насадке. *Молодежный науч.-техн. вестник*, 2013, № 11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637101.html> (дата обращения 19 мая 2015).
- [11] 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://engbul.bmstu.ru/issue/679386.html> (дата обращения 21 мая 2015).
- [12] Тарасов В.А., Колпаков В.И., Королев А.Н., Баскаков В.Д. Численное моделирование процесса струйно-динамической промывки деталей с глухими отверстиями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 4(85), с. 34–41.

References

- [1] Stepanov Iu.S., Barsukov G.V. *Sovremennye tekhnologicheskie protsessy mekhanicheskogo i gidrostruynogo raskroia tekhnicheskikh tkaney* [Modern technological processes of mechanical cutting and jetting technical fabrics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 239 p.
- [2] Stepanov Iu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. *Progressivnye tekhnologii gidrostruynogo rezaniia materialov* [Advanced technologies jetting cutting materials]. Tula, TulGU publ., 2009. 318 p.
- [3] Erukhimovich Iu.E. *Matematicheskoe modelirovanie i sovershenstvovanie metoda rascheta effektivnosti protsessa rezaniia gornyx porod gidroabrazivnym instrumentom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling and improving the efficiency of the method of calculation of cutting rocks hydroabrasive tool. Cand. tech. sci. diss.]. Tula, 1999. 17 p.
- [4] Martin. M. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*. William Andrew, 2009. 936 p.
- [5] Kennedy D.M., Hashmi M.S.J. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 300, iss. 3–4, pp. 246–253.
- [6] ANSYS. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 12 Mach 2014).
- [7] Maniadaki K., Kestis T., Bilalis N., Antoniadis A. A finite element-based model for pure waterjet process simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 31, iss. 9–10, pp. 933–940.
- [8] Mabrouki T., Raissi K., Cornier A. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process. *Wear*, 2000, vol. 239, pp. 260–273.

- [9] Mabrouki T., Raissi K. Stripping process modelling: Interaction between a moving waterjet and coated target. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 1247–1258.
- [10] Gerasimova A.M., Kolpakov V.I. Chislennoe modelirovanie dvizheniia abrazivnykh chastits v fokusiruiushchem nasadke [Numerical simulation of the motion of the abrasive particles in the focusing cup]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* [Youth Science and Technology Gazette]. 2013, no. 11. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637101.html> (accessed 19 May 2015).
- [11] Gerasimova A.M., Efimova S.A., Prokhorova A.M., Kolpakov V.I. Osobennosti fiziko-matematicheskoi postanovki i chislennogo resheniia tipovykh zadach gidroabrazivnoi rezki razlichnykh materialov [Features of physical and mathematical formulation and numerical solution of typical problems waterjet cutting various materials]. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Herald]. 2014, no. 1, pp. 1–10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/issue/679386.html> (accessed 21 May 2015).
- [12] Tarasov V.A., Kolpakov V.I., Korolev A.N., Baskakov V.D. Chislennoe modelirovanie protsessa struino-dinamicheskoi promyvki detalei s glukhimi otverstiiami [Numerical Simulation of Process of Jet-Dynamic Flushing of Parts with Blind Holes]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2011, no. 4(85), с. 34–41.

Статья поступила в редакцию 29.06.2015

Информация об авторах

ГЕРАСИМОВА Анастасия Михайловна (Москва) — аспирантка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: blakdragonn@rambler.ru).

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

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

Information about the authors

GERASIMOVA Anastasia Mikhailovna (Moscow) — Post Graduate, Department of Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: blakdragonn@rambler.ru).

GALINOVSKY Andrey Leonidovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: galcomputer@yandex.ru).

KOLPAKOV Vladimir Ivanovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kolpakov54@mail.ru).