

11. Samotugin S.S., Mazur V.A., Litvinenko D.S. Modelirovanie teplovuh procesov pri plazmenon poverhnostnom uprochnenii tonkolezviinogo pochvoobrabatuvushhego instrumenta [Modeling of thermal processes at the plasma surface hardening thin blade tillage tool]. *Vestnik SevNTU: Seriya «Mashinopriborostroenie i transport» – Journal of the Sevastopol National Technical University «Mechanical Instrumentation and Transport»*, 2012, no. 129, pp. 194-198. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 06.03.2017

УДК 641.512+532.135

© Погребняк А.В.*

СТРУКТУРНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВОДОПОЛИМЕРНОЙ СТРУИ

Проведено комплексное изучение структуры и динамики водополимерной высокоскоростной струи. Полученные экспериментальные данные позволили предложить расчетную зависимость в безразмерном виде для определения начальных участков струй водных растворов разных концентраций и молекулярных масс полиэтиленоксида (ПЭО) с учетом реальных параметров струеформирующей головки. С целью установления особенностей динамики водополимерных струй, изучены их энергетические возможности, которые оценивались по силе воздействия струи на стальное препятствие. Обосновано использование структурных и динамических характеристик водополимерных струй при установлении рациональных параметров оборудования для обработки материалов резанием.

Ключевые слова: водополимерная струя, начальный участок, качество струи, струеформирующая головка, раствор полиэтиленоксида.

Погребняк А.В. Структурні та динамічні характеристики тонкого високошвидкісного водополімерного струменя. Проведено комплексне вивчення структури і динаміки водополімерного високошвидкісного струменя. Отримані експериментальні дані дозволили запропонувати розрахункову залежність у безрозмірному вигляді для визначення початкових ділянок струменів водних розчинів різних концентрацій і молекулярних мас поліетиленоксиду (ПЕО) з урахуванням реальних параметрів струменоформуючої голівки. З метою встановлення особливостей динаміки водополімерних струменів вивчені їх енергетичні можливості, які оцінювали за силою впливу струменя на сталеву перешкуду. Обґрунтовано використання структурних та динамічних характеристик водополімерних струменів при встановленні раціональних параметрів обладнання для обробки матеріалів різанням.

Ключові слова: водополімерний струмінь, початкова ділянка, якість струменя, струменоформуюча голівка, розчин поліетиленоксиду.

A.V. Pogrebnyak. The structural and dynamic characteristics of a water-polymer high-speed jet. The aim is to study the structural and dynamic characteristics of the water-polymer jet, what is of decisive importance for understanding the nature of the abnormally high cutting ability. A complex study of the structure and dynamics of a water-polymer high-speed jet has been carried out. Analysis of the photographs of jets of aqueous PEO solution indicates that adding polyethylene oxide (PEO) into water results in a significant increase in the initial sections of the water-polymer jet, which characterizes

* канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр., ГВУЗ «Национальный технический университет нефти и газа», г. Ивано-Франковск, Pogrebnyak.AV@mail.ru

the quality of its formation, and leads to compactness due to a reduction of its diameter. The obtained experimental data made it possible to propose a relationship for determining the dimensionless value of the initial sections of jets of aqueous PEO solutions of different concentration and molecular mass of PEO, taking into account the real parameters of the jet forming head. Investigation of changes in the energy capabilities of water-polymer jets, which were estimated by the force of the jet impact on the steel obstacle, made it possible to establish the features of their dynamics. The obtained experimental data explain the nature of the change in the cutting properties of the water-polymer jet as a function of the distance between the surface of the material that is being cut and the cut of the nozzle. If the distance from the nozzle to the surface of the material is less than the size of the initial sections of the water-polymer jet, an increase in the diameter of the nozzle outlet hole will lead to a reduction in the depth of the cut. If, however, the distance from the nozzle to the surface of the material approaches or exceeds the size of the main part of the water-polymer jet, then the depth of the cut will increase with increasing diameter of the nozzle at a constant pressure. The use of structural and dynamic characteristics of water-polymer jets is substantiated when establishing rational parameters of equipment for water-polymer processing of materials by cutting.

Keywords: *water-polymer jet, initial section, jet quality, jet-forming head, polyethylene-oxide solution.*

Постановка проблеми. В качестве рабочей жидкости при гидроструйной обработке материалов используется вода [1] и вода с добавками абразива [2]. Введение в режущую водяную струю абразивных добавок существенно расширяет технологические возможности обработки материалов. Это позволяет вести обработку материалов при относительно низких давлениях, обеспечивая при этом такую же производительность, что и при водоструйной обработке с формированием струи при более высоких давлениях. Вместе с тем гидродинамические параметры (скорость, распыл, длина начального участка) таких водоабразивных струй ухудшаются. Это приводит к увеличению ширины реза и энергоёмкости процесса. Важно, что при этом наблюдается интенсивное изнашивание элементов струеформирующей головки, главным образом сопла, в результате чего возникает необходимость частой их замены.

Анализ последних исследований и публикаций. К решению задачи повышения эффективности процесса гидроструйной обработки материалов резанием можно подойти, используя для этого наблюдаемые «аномалии» при течении растворов полимеров во входной области струеформирующего сопла [3-4]. Поэтому повысить эффективность процесса гидрорезания можно, если режущую материал водяную струю заменить на водополимерную [5-7]. Было установлено, что глубина реза в материале довольно резко возрастает с увеличением концентрации ПЭО в водополимерной струе и достигает максимума при достижении оптимальной величины. Для ПЭО молекулярной массы $3 \cdot 10^6$ оптимальная концентрация равна $0,015 \div 0,020\%$, а для молекулярных масс $4 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$ – $0,007 \div 0,01\%$ и $0,0015 \div 0,0020\%$, соответственно. При гидроструйной обработке материалов равная глубина реза может быть достигнута с использованием водяных и водополимерных струй с давлением $45 \div 65\%$ от давления воды при их обработке водяной струей, а при одинаковом исходном давлении наблюдается увеличение глубины и скорости реза в 1,5-2,5 раза. Эксперимент показал, что качество поверхности разрезов в материале при его разрезании водополимерной струей существенно выше, чем при разрезании водяной и водоабразивными струями. Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что водополимерная струя обеспечивает высокую производительность при высоком качестве поверхности разрезов в материале, что свидетельствует об особом механизме взаимодействия водополимерной струи с разрезаемым материалом.

Для решения технической задачи по разработке процесса гидроструйной водополимерной обработки материалов резанием, а также принципов проектно-расчетных проработок оборудования для его реализации, необходимо установление условий формирования водополимерной струи и закономерностей ее взаимодействия с материалом при вариации концентрации и молекулярной массы полимера. Имеющиеся экспериментальные данные [8, 9] свидетельствуют, что режим работы и параметры гидроструйной обработки материалов резанием, а также производительность гидрорежущего оборудования, режущим органом которого является тон-

кая струя воды, должны непосредственно зависеть от структуры струи и её гидродинамических параметров.

Целью данной работы является изучение структурных и динамических характеристик водополимерной струи, имеющих определяющее значение в понимании природы аномально высокой режущей её способности.

Изложение основного материала. Изучение структуры и динамики даже водяной [9], а тем более высокоскоростной водополимерной струй, – один из наиболее сложных вопросов гидродинамики [10]. Из-за особенностей движения жидкой струи в воздухе, а также отсутствия необходимой измерительной аппаратуры, характеристики этих струй и их структура изучены еще недостаточно. Однако имеющиеся результаты исследований водяных струй [9-14] все же позволяют составить общее представление о тех процессах, которые происходят при формировании гидрорежущей струи и её истечении в атмосферу. Струя рабочей жидкости на выходе из сопла струеформирующей головки состоит из сплошной струи, которая расширяется по определенному закону, и капиллярного потока с плотностью, убывающей в радиальном направлении от оси струи. Непосредственно на выходе из сопла в струе формируется ядро постоянных скоростей конусообразной формы, называемое начальным участком струи (см. рис. 1, а). Вдоль длины начального участка l_n имеет место потенциальное (безвихревое) течение воды.

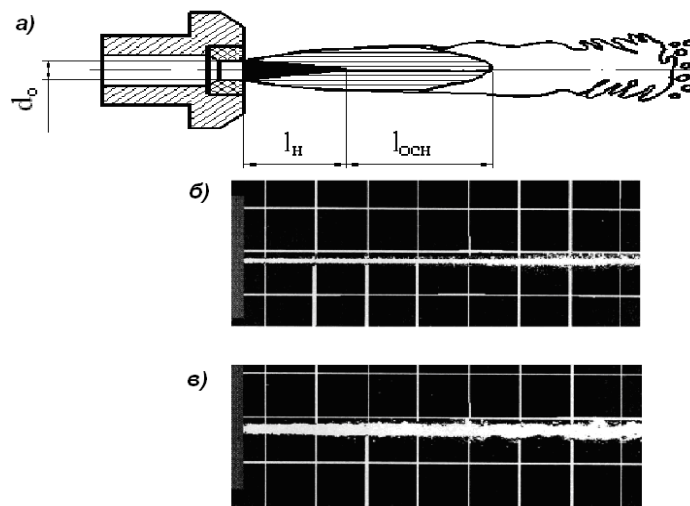


Рис. 1 – Схема структуры водополимерной струи (а), фотографии струи водного раствора ПЭО (б) и водяной струи (в), которые вытекают из сопла диаметром $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при давлении 100 МПа; $M_{ПЭО} = 4 \cdot 10^6$, $C_{ПЭО} = 0,007\%$

За пределами начального участка струи в результате её расширения и распада осевая продольная скорость и динамическое давление постепенно уменьшаются по некоторой гиперболической зависимости, а динамическое давление и скорость в сечении струи резко снижаются от своего максимального значения до минимального в пограничной области. Этот участок струи $l_{осн}$ (за пределами начального участка l_n), на котором струя сохраняет высокую плотность и компактность, называют основным участком струи [11]. В пределах основного участка сохраняется высокая плотность струи при низких значениях угла расширения границ струи. Начальный и основной участки в сумме составляют рабочий участок струи [6, 8].

Основной структурной характеристикой гидроструи является длина начального участка l_n . С помощью безразмерной величины длины начального участка l_n/d_0 (где d_0 – диаметр отверстия сопла) может быть интегрально оценено качество формирования водяной и водополимерной струй, которое зависит от формы профиля, а для водополимерной струи еще от молекулярной массы ПЭО и его концентрации (см. рис. 1, б). Фотография струи водного раствора ПЭО свидетельствует о том, что использование добавок ПЭО в воду приводит к существенному увеличению начального участка у водополимерной струи, который характеризует качество ее формирования, и увеличению компактности за счет уменьшения ее диаметра. Уравнение для расчета безразмерной длины начального участка водяной струи имеет вид [13, 14]:

$$\frac{l_n}{d_0} = 25 \left(\frac{d_0}{R_{az}} \right)^{1/6} \lg K_{II} \left(1 - 1,25 \exp(-0,095 \frac{l_k}{d_k}) \right), \quad (1)$$

где R_{az} – параметр шероховатости внутренней поверхности струеформирующей головки по ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 2.309-73, мкм. Коэффициент поджатия потока в струеформирующей головке гидрорежущей установки принимается равным 10 при $l_k/d_0 > 10$.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений безразмерной величины начальных участков водяной и водополимерной струй были выполнены с использованием экспериментально полученного распределения силы F действия водяной и водополимерной струй на металлическую преграду по оси потока (см. рис. 2). Полученные экспериментальные данные с достаточной точностью описываются следующим выражением:

$$\frac{l_{n,c}}{d_0} = \frac{l_n}{d_0} \dot{\epsilon} \theta_c. \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ – продольный градиент скорости во входной области сопла; θ_c – время релаксации водного раствора ПЭО.

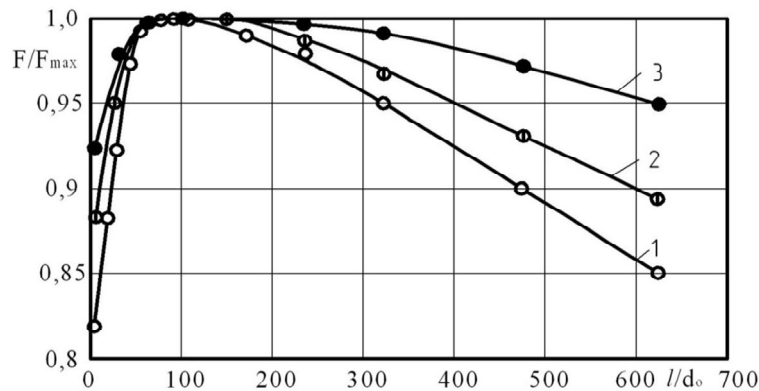


Рис. 2 – Распределение силы воздействия на препятствие по оси потока: 1 – водяной струи; 2 – струи 0,003% водного раствора ПЭО; 3 – 0,007% водного раствора ПЭО

Подставив уравнение (1) в (2), получим уравнение для определения безразмерной величины начальных участков струй водных растворов ПЭО разных концентраций и молекулярных масс ПЭО с учетом реальных параметров струеформирующей головки в виде:

$$\frac{l_{n,c}}{d_0} = 25 \left(\frac{d_0}{R_{az}} \right)^{1/6} \lg K_{II} \left(1 - 1,25 \exp(-0,095 \frac{l_k}{d_k}) \right) \dot{\epsilon} \theta_c. \quad (3)$$

При $\dot{\epsilon} \theta_c < 1$ начальный участок водополимерной струи $l_{n,c}$ равен начальному участку водяной струи l_n . Формула (3) имеет следующие границы применимости: водные растворы ПЭО должна удовлетворять критерию концентрированности по Дебаю – $[\eta]_0 \cdot C < 1$, а $\dot{\epsilon} \theta_c$ удовлетворять условию – $1 \leq \dot{\epsilon} \theta_c < 10$. Было получено, что среднее значение коэффициента вариации при использовании зависимости (3) составило $K_{var} = 13\%$, что свидетельствует о достаточной сходимости расчетных значений безразмерных величин длин начального участка водополимерных струй с экспериментально полученными.

В настоящее время полностью не выяснен характер изменения силы воздействия водополимерной струи в зависимости от удаления препятствия от сопла. По этому поводу даже для водяной струи существуют противоречивые точки зрения. Одни исследователи считают [15], что сила воздействия струи на препятствие существенным образом уменьшается с увеличением расстояния от среза сопла. Другие считают [12], что полная длина водяной струи может быть разбита на два участка: начальный участок, где сила воздействия струи на препятствие возрастает и до-

стигает (на некотором расстоянии от сопла) максимального значения, и следующий участок, на всем протяжении которого эта сила сохраняется неизменной. Для водополимерных струй данные, показывающие зависимость сила воздействия струи на препятствие от расстояния до сопла, кроме работы [6], отсутствуют. Поэтому опыты, о которых говорится ниже, были поставлены с целью установления особенностей динамики водополимерных струй, выяснив которые можно было бы разобратся в имеющихся противоречивых экспериментальных данных.

Энергетические возможности водополимерной струи оценивались по измеряемой силе воздействия струи на стальное препятствие, на котором были закреплены тензодатчики. Препграда была изготовлена со стального (Ст3) листа с размерами $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м. Между плоскостью препграды и столом гидрорежущей установки был зазор $5 \cdot 10^{-2}$ м.

Результаты, которые показывают развитие силы воздействия гидроструи с разным содержанием ПЭО на препятствие по оси потока в безразмерных координатах, представлены на рис. 2. Полученные экспериментальные данные описываются, по крайней мере, двумя участками с линейным изменением силы воздействия гидроструи на препятствие. Видно, что максимальное значение силы воздействия F_{max} водополимерной струи на плоское препятствие зависит от концентрации ПЭО в водополимерной струе и находится в интервале безразмерных расстояний от сопла $30 < l_0/d_0 < 300$. Сравнение распределения силы действия гидроструи на препятствие по оси потока (рис. 2) с её структурными особенностями (рис. 1, б) показывает, что область $l_0/d_0 < 100$ относится к начальному участку струи, а область $30 < l_0/d_0 < 300$ – к основному участку.

Экспериментальные данные по динамике водополимерной струи целиком объясняют характер изменения режущих свойств струи в зависимости от расстояния между поверхностью материала, который разрезается, и срезом сопла. Становится понятным, почему в одних случаях глубина реза с увеличением диаметра сопла возрастает, а в других – уменьшается. Учитывая данные рис. 2, приходим к выводу, что если расстояние от сопла до поверхности материала меньше размеров начального участка водополимерной струи, то увеличение диаметра выходного отверстия сопла будет приводить к уменьшению глубины реза. Если же расстояние от сопла до поверхности материала приближается к размерам основного участка водополимерной струи или превышает его, то тогда глубина реза будет возрастать с увеличением диаметра сопла при неизменном перепаде давления.

Выводы

Установленные особенности структуры и динамики водополимерной высокоскоростной струи позволили получить расчетные зависимости длины начального участка струи, который характеризует качество ее формирования от молекулярной массы и концентрации ПЭО в водополимерной струе.

Полученные экспериментальные данные подтверждают необходимость использования структурных и динамических характеристик водополимерных струй при установлении рациональных параметров оборудования для водополимерной обработки материалов резанием.

Задачами дальнейших исследований является получение расчетной зависимости для определения глубины реза от физико-механических свойств разрезаемых материалов и режущих параметров водополимерной струи с учетом качества ее формирования.

Список использованных источников:

1. Заплетников И.Н. Оборудование водорезания пищевых продуктов / И.Н. Заплетников, А.В. Гордиенко. – Донецьк : Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі, 2012. – 207 с.
2. Пат. 74608 Україна, МПК В 03 В 4/00. Спосіб різання харчових продуктів високошвидкісним гідроабразивним струменем / А.В. Погребняк, М.В. Наумчук, Е.В. Пономаренко. – № u201202141; заявл. 24.02.12; опубл. 12.11.12, Бюл. № 21. – 3 с.
3. Pogrebnyak A.V. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs / A.V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2015. – № 1 (23). – P. 138-141.
4. Deynichenko G.V. The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products / G.V. Deynichenko, A.V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2015. – № 3 (25). – P. 6-13.
5. Pogrebnyak A.V. Research of the process of hydrocutting food products / A.V. Pogrebnyak,

- G.V. Deynichenko // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2016. – № 3 (29). – P. 48-62.
6. Погребняк А.В. Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов / А.В. Погребняк // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов : I научно-практическая конференция и выставка с международным участием, 25-26 сентября 2008 г. / ГОУ ВПО «МГУПП». – М. : МГУПП, 2008. – С. 173-179.
 7. Волошин В.С. Экологическая технология создания водозащитных экранов / В.С. Волошин, В.Г. Погребняк. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 482 с.
 8. Заплетніков І.М. Структура і динаміка струменя гідрорізки / І.М. Заплетніков, А.В. Погребняк // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2010. – Вип. 10. – С. 3-13.
 9. Никонов Г.П. Исследование динамики и структуры тонкой струи воды с давлением 500 ат. / Г.П. Никонов, С.С. Шавловский, В.В. Хныкин. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1969. – 38 с.
 10. Научная школа Ивана Лукича Повха (к 100-летию со дня рождения) / Под общ. ред. А.Б. Ступина. – Донецк : ДонНУ, 2009, – 317 с.
 11. Шавловский С.С. Влияние угла конусности и длины цилиндрического участка насадки на компактность струи / С.С. Шафровский, В.Е. Бафталовский // Технология добычи угля подземным способом. – 1971. – № 12. – С. 87-92.
 12. Шавловский С.С. Основы динамики струй при разрушении горного массива / С.С. Шавловский. – М. : Наука, 1979. – 174 с.
 13. Бафталовский В.Е. Влияние качества обработки насадки на компактность водяных струй в автотельном режиме истечения / В.Е. Бафталовский // Науч. труды ИГД им. А.А. Скочинского. – 1977. – Вып. 150. – С. 97-105.
 14. Мерзляев В.Г. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве / В.Г. Мерзляев, В.Е. Бафталовский. – М. : ФГУП ННЦ ГП ИГД им. А.А. Скочинского, 2004. – 645 с.
 15. Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М. : Недра, 1974. – 296 с.

References:

1. Zapletnikov I.N., Gordienko A.V. *Oborudovanie vodorezaniia pishchevykh produktov* [Equipment of food products hydrocutting]. Donetsk, Donetsk national university of economics and trade Publ., 2012. 207 p. (Rus.)
2. Pogrebnyak A.V., Naumchuk M.V., Ponomarenko E.V. *Sposib rizannia kharchovikh produktiv visokoshvidkivnim gidroabrazivnim strumenem* [The method of food products cutting by high-speed hydroabrasive-jet] Patent UA, no. 74608, 2012. (Ukr.)
3. Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs. *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment*, 2015, no. № 1 (23), pp. 138-141. (Eng.)
4. Deynichenko G.V., Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. The nature of increased cutting ability of a polyethyleneoxide solution jet while processing food products. *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment*, 2015, no. 3 (25), pp. 6-13. (Eng.)
5. Pogrebnyak A.V., Deynichenko G.V. Research of the process of hydrocutting food products. *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment*, 2016, no. 3 (29), pp. 48-62. (Eng.)
6. Pogrebnyak A.V. *Vysokoeffektivnoe gidrorezanie tverdykh pishchevykh produktov i materialov. Anotatsii dopovidei I nauk.-prakt. konf. «Upravlenie reologicheskimi svoistvami pishchevykh produktov»* [Highly effectient hydrocutting hard food products and materials. Abstracts of 1st Sci-Pract. Conf. «Management of rheological properties of food products»]. Moscow, 2008, pp. 173-179. (Rus.)
7. Voloshin V.S., Pogrebnyak V.G. *Ekologicheskaiia tekhnologiia sozdaniia vodozashchitnykh ekranov* [Ecological technology of creating waterproof screens]. Donetsk, Knowledge Publ., 2010. 482 p. (Rus.)
8. Zapletnikov I.N., Pogrebnyak A.V. *Struktura i dinamika strumenia gidrorizki* [The structure and dynamics jet hydrocutting]. *Pratsi Tavriis'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu – Journal Tauride state university agrotechnological*, 2010, iss. 10, pp. 3-13. (Ukr.)

9. Nikonov G.P., Shavlovsky S.S., Khnykin B.B. *Issledovanie dinamiki i struktury tonkoi strui vody s davleniem 500 at.* [Investigation the dynamics and structure of a thin jet water with pressure 500 atm.]. Moscow, IGD named after A.A. Skochinsky Publ., 1969. 38 p. (Rus.)
10. Under total. ed. Stupin A.B. *Nauchnaia shkola Ivana Lukicha Povkha (k 100-letiiu so dnia rozhdeniia)* [Scientific school of Ivan Lukich Povkh (to the 100th anniversary of his birth)]. Donetsk, DonNU Publ., 2009. 317 p. (Rus.)
11. Shavlovsky S.S., Baftalovsky V.E. Vliyanie ugla konusnosti i dliny tsilindricheskogo uchastka nasadki na kompaktnost' strui [Effect of the taper angle and the length of the cylindrical portion nozzle on the compactness jet]. *Tekhnologiia dobychi uglia podzemnym sposobom – Technology of coal mining by underground method*, 1971, no. 12, pp. 87-92. (Rus.)
12. Shavlovsky S.S. *Osnovy dinamiki strui pri razrushenii gornogo massiva* [Fundamentals of jet dynamics in the destruction of the mountain massif]. Moscow, Science Publ, 1979. 174 p. (Rus.)
13. Baftalovsky V.E. Vliianie kachestva obrabotki nasadki na kompaktnost' vodianykh strui v avtomodel'nom rezhime istecheniia [Influence of the nozzle processing quality on the water jets compactness in the automodel flow regime]. *Nauch. trudy IGD im. A.A. Skochinskogo – Scientific Works IGD named after A.A. Skochinsky*, 1977, iss. 150, pp. 97-105. (Rus.)
14. Merzlyayev V.G., Baftalovsky V.E. *Fiziko-tekhnicheskie osnovy gidrostruinykh tekhnologii v gornom proizvodstve* [Physico-technical foundations of hydro-jet technologies in mining production]. Moscow, FSUE NSC of GP IGD named after A.A. Skochinsky Publ., 2004. 645 p. (Rus.)
15. Rabinovich E.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 296 p. (Rus.)

Рецензент: А.В. Пашенко

д-р физ.-мат. наук, доц., ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины

Статья поступила 15.03.2017