

УДК 621.967.1

**Сатонин А. В.****Боровик П. В.****Петров П. А.**

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА НОЖНИЦАХ**

В современных условиях очень важным практическим аспектом является обеспечение надежной безаварийной работы металлургического оборудования. Многообразие факторов, влияющих на процесс поперечной резки сортового металлопроката, затрудняет решение данной задачи путем проведения полномасштабных экспериментальных исследований непосредственно в промышленных условиях, поскольку такой способ является весьма трудоемким в реализации и ограниченным по объему получаемой информации. Таким образом, необходимы решения, позволяющие дать дальнейшее развитие теоретическим основам исследуемого процесса.

В различных технологических схемах производства сортового металлопроката широко применяют операции поперечного разделения на ножницах [1–4]. При этом повышение требований к качеству готового металлопроката и стремление расширить технологические возможности оборудования способствуют повышению интереса в данной области [5–7]. В связи с этим разрабатываемые в последнее время методики расчета [8] энергосиловых параметров процесса резки сортовых профилей, требуют дополнения с точки зрения определения спектра рабочих нагрузок.

В этой связи, применение современных методов имитационного моделирования [9, 10] является оправданной и наиболее рациональной возможностью для экспериментатора воспроизвести на модели реальные технологические процессы и производственные ситуации. Учитывая возможности современных вычислительных устройств, следует отметить целесообразность применения метода Монте-Карло, являющегося разновидностью методов имитационного (статистического) моделирования [9, 10] и неплохо себя зарекомендовавшего при решении проектно-конструкторских задач.

Целью представленной работы являлось изучить статистические закономерности, отражающие качественный и количественный характер формирования спектра рабочих нагрузок, что, в свою очередь, будет способствовать повышению надежности работы ножниц в реальных условиях реализации процесса разделения сортового металлопроката.

Для достижения указанной цели в данной работе, на базе разработанной ранее детерминированной математической модели [8], была составлена имитационная математическая модель, в основу которой положен алгоритм генерирования псевдослучайных равномерно и нормально распределенных чисел с последующей соответствующей статистической обработкой полученных данных. На основе общей концепции метода Монте-Карло разыгрывались различные сочетания исходных параметров, автоматически генерируя последовательность псевдослучайных равномерно распределенных чисел  $c_K$  в диапазоне 0,0–1,0, при помощи машинных операторов.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [10], вычислялись нормально распределенные числа  $\beta_K$  в диапазоне  $(-3,0...3,0)$  с математическим ожиданием, равным нулю, и средним квадратичным отклонением, равным единице, на основе следующих зависимостей:

$$\beta_K = \frac{3 - \sqrt{9 - 12\pi\mu_K^2}}{\mu_K \sqrt{2\pi}} \quad \text{при} \quad |\mu_K| \leq 0,487, \quad (1)$$

$$\beta_K = \frac{|\mu_K|}{\mu_K} [2,25867 + 57,0256(|\mu_K| - 0,487)] \quad \text{при } |\mu_K| > 0,487, \quad (2)$$

где  $\mu_K = c_K - 0,5$ .

Нормально распределенные числа  $y_K$  с заданными значениями математического ожидания  $\bar{y}$  и коэффициента вариации  $v_y$  можно определить по формуле:

$$y_K = \bar{y}(1 + \beta_K v_K). \quad (3)$$

Непосредственно имитационное моделирование процесса резки сортовых профилей на ножницах осуществлялось путем многократного разыгрывания по формулам (1)–(3) количественных оценок исходных параметров процесса и последующего определения соответствующей им силы резки.

В качестве варьируемых, т. е. разыгрываемых исходных параметров, учитывая логику функциональных связей в условиях реализации исследуемого технологического процесса [1–7] использовались механические свойства разрезаемого материала: относительное внедрение до скола  $\varepsilon_n$  и предел прочности  $\sigma_b$ , а также геометрические параметры разрезаемых профилей.

В процессе имитационного моделирования номинальные значения всех исходных параметров не изменяли, что адекватно предположению о полной отработке системой регулирования только тех возмущений, вероятностный характер которых не поддается строгому аналитическому описанию.

При разработке и численной реализации рассматриваемой имитационной математической модели не учитывались особенности предыдущего передела и логические связи между номинальными значениями основных технологических параметров и их вариациями.

Распределения исходных параметров строили по нормальному закону, а их номинальные значения и коэффициенты вариации принимались на основе производственных и экспериментальных данных.

На основе, разработанного ранее алгоритма [8] по определению энергосиловых параметров, был произведен анализ каждой отдельной реализации. Последующая обработка представляемых многократными реализациями массивов интегральных значений силы резки производилась на основе методов математической статистики [11, 12], при этом были определены основные статистические показатели и построены расчетные гистограммы распределения.

Для программной реализации выше изложенного алгоритма имитационной математической модели процесса резки фасонных профилей на ножницах была использована среда системы автоматизации математических расчетов MathLab.

С целью оценки влияния вариации исходных параметров на коэффициенты вариации силы  $v_p$  резки осуществлялась численная реализация имитационной модели при условии варьирования одного из входных параметров и номинальных значениях остальных величин. Данные расчеты проводились применительно к резке фасонных профилей из алюминиевого сплава АА6066 для номинальных значений исходных размеров (табл. 1), предела прочности  $\bar{\sigma}_b = 395$  МПа, а также величины «базового» значения относительного внедрения до скола  $\bar{\varepsilon}_n = 0,25$ .

Полученные расчетные распределения коэффициентов вариации силы  $v_p$  резки для различных форм поперечного сечения представлены на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей указывает на следующее (рис. 1):

– значимость коэффициентов вариации предела прочности  $v_{\sigma_b}$  и «базового» значения относительного внедрения до скола  $v_{\varepsilon_n}$  практически не изменяется при изменении формы разрезаемого профиля, при этом значимость коэффициента вариации относительного внедрения до скола является достаточно малой величиной в сравнении с остальными варьируемыми параметрами;

– наиболее значимыми для коэффициента вариации силы резки при разделении квадрата и круга являются соответственно коэффициенты вариации высоты  $v_H$  и диаметра  $v_D$  разрезаемого профиля, а при разделении швеллера и уголка – коэффициенты вариации предела прочности  $v_{\sigma_b}$  и высоты полки  $v_H$ ;

– значимость коэффициентов вариации геометрических параметров сечения при разделении швеллера несколько ниже, чем при разделении уголка.

Таблица 1

Номинальные значения размеров фасонных профилей

Профиль	Номинальный размер, мм				
	$H$	$D$	$B$	$\bar{t}_s$	$\bar{t}_p$
Квадрат	10	–	–	–	–
Круг	–	12	–	–	–
Швеллер	10	–	20	1,75	1,75
Уголок равнобокий	25	–	–	1,9	–

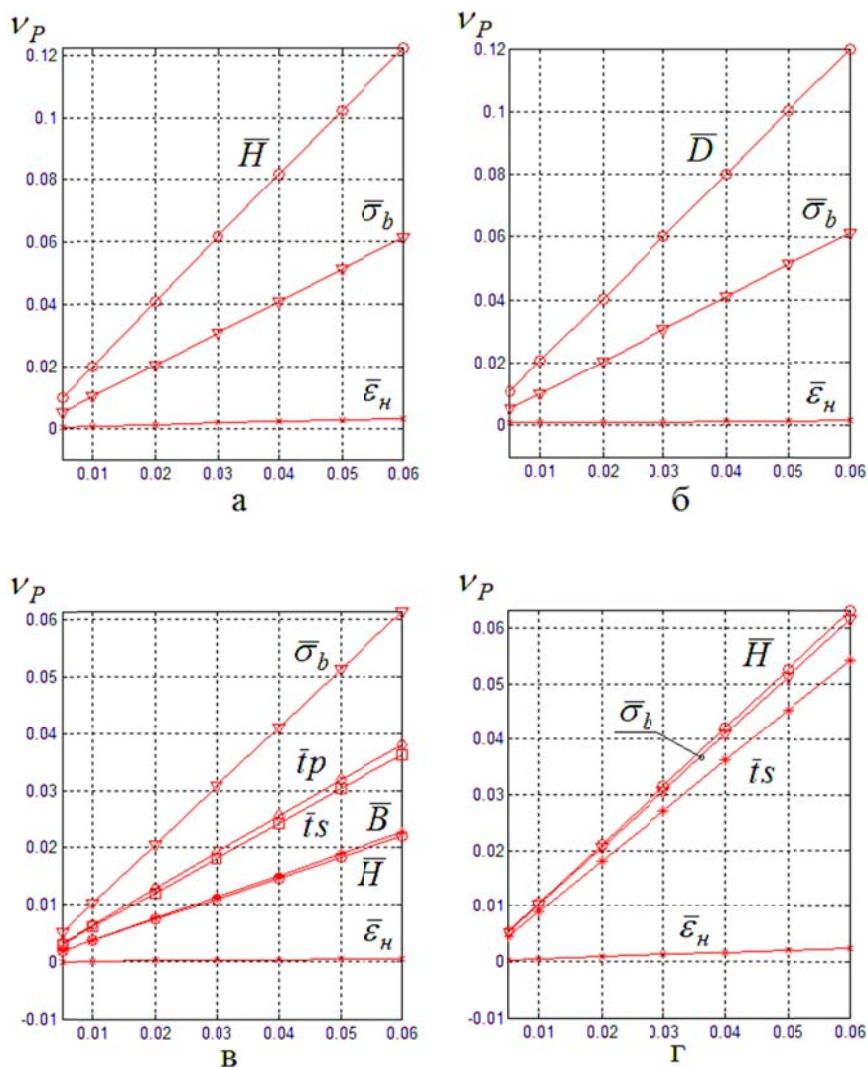


Рис. 1. Расчетные распределения коэффициентов вариации максимальной силы резки в зависимости от дифференциального изменения коэффициентов вариации исходных параметров при резке фасонными ножами:

а – квадрата; б – круга; в – швеллера; г – уголка при симметричном расположении

Исходя из условий промышленной реализации процесса, были установлены следующие коэффициенты вариации входных параметров: предел прочности –  $v_{\sigma_b} = 0,02$ , «базового» значения относительно внедрения до скола –  $v_{\varepsilon_n} = 0,04$ , для всех геометрических параметров коэффициент вариации составил 0,01.

В ходе численной реализации программных средств были построены гистограммы стохастического изменения исходных параметров для различных профилей поперечного сечения. Анализ распределений расчетных гистограмм показывает, что распределения исходных технологических параметров соответствуют нормальному закону, а их средние выборочные значения практически эквивалентны номинальным. Гистограммы стохастического изменения результирующих показателей силы резки сортовых профилей (рис. 2) подчиняются нормальному закону для всех рассмотренных профилей. Коэффициенты вариации в каждом из рассмотренных случаев составили: квадрат – 0,0279; круг – 0,0281; швеллер – 0,0235; уголок – 0,0254.

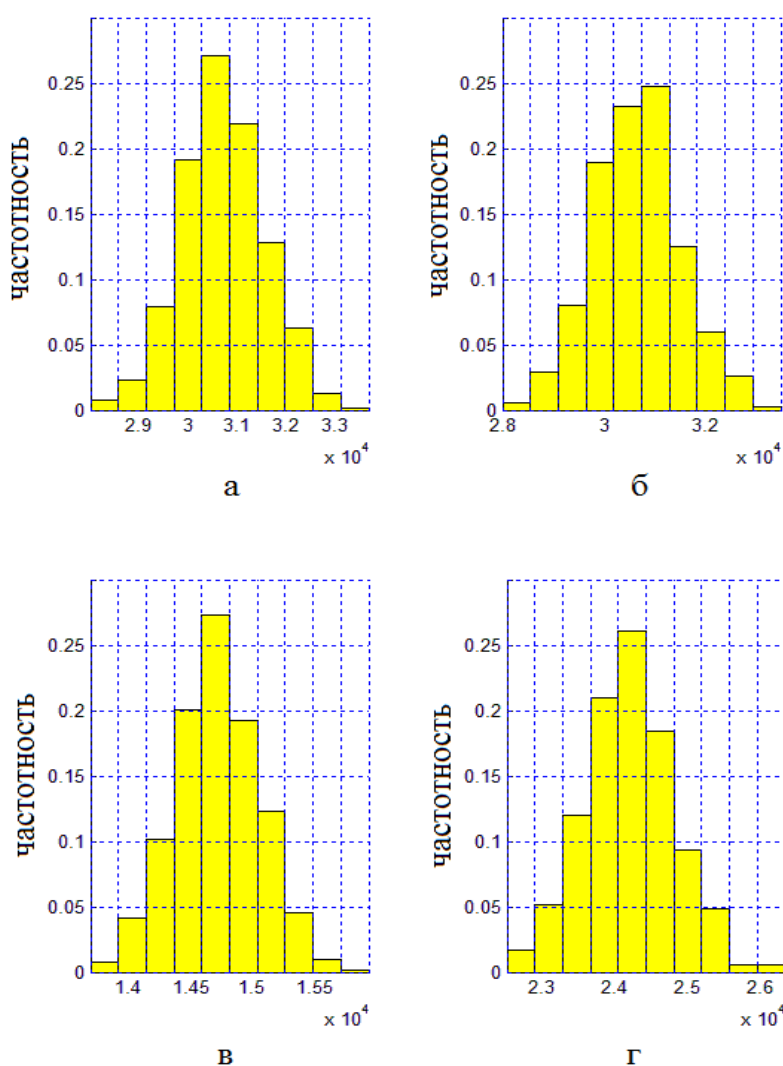


Рис. 2. Расчетные гистограммы распределения максимальных значений сил резки (H) при реализации процесса разделения фасонными ножами:

а – квадрата; б – круга; в – швеллера; г – уголка

Учитывая тот факт, что в практике расчета оборудования для разделения сортовых профилей используют подход, когда сила резки профиля рассчитывается как сила резки параллельными ножами эквивалентного по площади квадрата [1], то был произведен

статистический эксперимент с профилями эквивалентными по площади квадрату  $10 \times 10$  мм (табл. 2). При этом коэффициенты вариации входных параметров, а также частотность распределения характеристик оставались неизменными.

Таблица 2

Номинальные значения размеров фасонных профилей эквивалентных по площади квадрату  $10 \times 10$  мм при разделении фасонными ножами

Профиль	Номинальный размер, мм				
	$H$	$D$	$B$	$\bar{t}_s$	$\bar{t}_p$
Квадрат	10	–	–	–	–
Круг	–	11,3	–	–	–
Швеллер	12,5	–	25	2,2	2,2
Уголок равнобокий	26,1	–	–	2	–

В результате, была получена обобщенная гистограмма распределения максимальных значений сил резки при реализации процесса разделения фасонными ножами различных по форме поперечного сечения заготовок (рис. 3). Дальнейший анализ осуществлялся с использованием прикладной программы STATISTICA. Как можно видеть из представленной гистограммы закон распределения близок к нормальному.

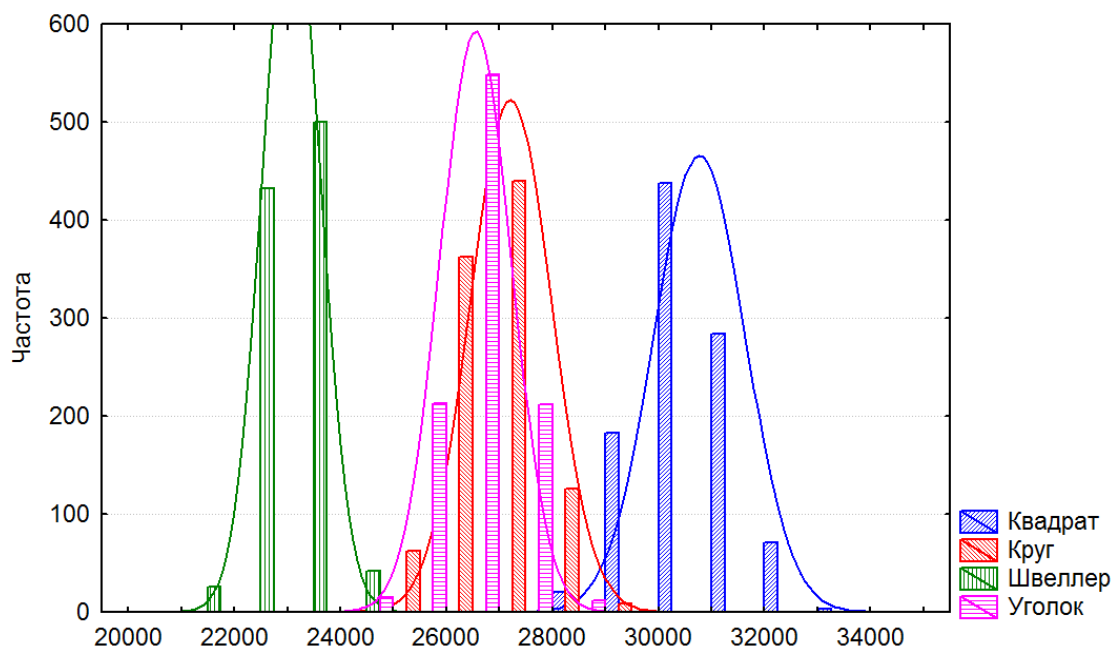


Рис. 3. Расчетные гистограммы распределения максимальных значений сил резки ( $H$ ) при реализации процесса разделения фасонными ножами квадрата, круга, швеллера и уголка эквивалентных по площади квадрату  $10 \times 10$  мм

При этом расчетное значение силы резки параллельными ножами составило 26,54 кН, что является весьма близким к среднему значению 26,863 кН (табл. 3) полученному при резке всех профилей, но на 15,7 % меньше, чем среднее значение максимальной силы резки квадрата фасонными ножами (30,715 кН).

Обобщенный коэффициент вариации для данных условий реализации составил 0,1047, что указывает на нецелесообразность расчета нагрузок через площадь эквивалентного квадрата.

Таблица 3

Расчетные значения основных статистических показателей  
оценки вариабельности силы (Н) резки фасонных профилей эквивалентных  
по площади квадрату 10×10 мм при разделении фасонными ножами

Статистические показатели	Разрезаемый профиль				
	квадрат	круг	швеллер	уголок	Все
Среднее значение	30715	27170	23053	26513	26863
Центр распределения	30714	27171	23042	26517	26809
Среднеквадратическое отклонение	855	763	543	673	2813
Минимальное значение	28006	24833	21449	24676	21449
Максимальное значение	33695	29700	24970	28852	33695
Максимальное значение в 25 %	30145	26637	22683	26044	24679
Максимальное значение в 75 %	31288	27658	23400	26946	28892

Исходя из формы гистограмм распределения максимальных значений сил резки для исходных профилей и для профилей в пересчете на эквивалентный квадрат можно констатировать, что закон распределения нормальный (рис. 2) или близок к нормальному (рис. 3), и помогает отследить характер формирования спектра рабочих нагрузок в зависимости от основных варьируемых параметров.

Представленные в табл. 3 результаты позволяют количественно оценить степень разброса силы резки (от 21,45 кН до 33,70 кН) относительно среднего значения  $\bar{x}_{cp} = 26,54$  кН при разделении указанных типов профилей в пересчете на площадь эквивалентного квадрата 10×10 мм, и с вероятностью 95 % при среднеквадратическом отклонении  $\sigma = 2,81$  кН утверждать, что основные технологические нагрузки будут укладываться в диапазон  $[\bar{x}_{cp} \pm 2\sigma] = 20,92-32,16$  кН.

### ВЫВОДЫ

В ходе имитационного математического моделирования процесса резки сортовых профилей на ножницах были исследованы количественные и качественные закономерности вариаций основных технологических параметров процесса резки сортовых профилей на ножницах.

Также, по полученным результатам было установлено, что при разделении отдельно взятого разрезаемого профиля коэффициент вариации силы резки не превышает 0,03. В то же время, при рассмотрении различных по конфигурации, но равных по площади поперечного сечения профилей, коэффициент вариации силы резки составил 0,1047, что указывает на нецелесообразность учета формы поперечного сечения разрезаемого профиля при расчете рабочих нагрузок на ножницы и, как следствие, при последующей оценке надежности работы конкретных ножниц.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях процесса резки фасонных профилей на ножницах, а также при автоматизированном расчете энергосиловых параметров процесса.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целиков А. И. *Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Металлургиздат, 1958. – 432 с.*
2. Королев А. А. *Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : Металлургия, 1985. – 375 с.*
3. Иванченко Ф. К. *Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. Навч. посіб. / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяев – К. : Вища шк., 1995. – 455 с. : ил.*
4. Лукашин Н. Д. *Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов : учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с. : ил.*

5. Трусовский В. И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В. И. Трусовский, Р. А. Закиров // *Наука и технологии. Избр. тр. Российской школы. Серия «Технологии и машины обработки давлением»*. – М. : РАН, 2005. – С. 129–133.

6. Трусовский В. И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В. И. Трусовский, В. Г. Шеркунов // *Металлург. 2012*. – № 11. – С. 63–66.

7. Анализ энергосиловых параметров процесса разделения на ножницах сортовых профилей в горячем состоянии / П. Н. Денищенко, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 172–175.

8. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // *Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013*. – № 5 (284). – С. 41–44.

9. Савелова Т. И. Метод Монте-Карло: Учебное пособие / Т. И. Савелова. – М. : НИЯУ МИФИ, 2011. – 152 с.

10. Сатонин А. В. Методики и программные средства по имитационному математическому моделированию различных технологических схем листопрокатного производства / А. В. Сатонин; Крамат. индустр. ин-т. – Краматорск, 1994. – Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, №1661 – Ук 94.

11. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.

12. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа : руководство для экономистов : пер. с нем. и предисл. В. М. Ивановой / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 302 с. : ил.

## REFERENCES

1. Celikov A. I. *Prokatnye stany : uchebnik dlja vuzov* / A. I. Celikov, V. V. mirnov. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 432 s.

2. Korolev A. A. *Konstrukcija i raschet mashin i mehanizmov prokatnyh stanov* / A. A. Korolev. – М. : Metallurgija, 1985. – 375 s.

3. Ivanchenko F. K. *Rozrahnok mashin i mehanizmov prokatnih cehiv. Navch. posib.* / F. K. Ivanchenko, V. M. Grebenik, V. I. Shirjaev – K. : Vishha shk., 1995. – 455s. : il.

4. Lukashin N. D. *Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov : uchebnik dlja vuzov* / N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev – М. : ИКС «Академкнига», 2003. – 456 s. : il.

5. Truskovskij V. I. *Razvitie i sovershenstvovanie sposobov i mehanicheskikh shem rezki sortovogo prokata* / V. I. Truskovskij, R. A. Zakirov // *Nauka i tehnologii. Izbr. tr. Rossijskoj shkoly. Serija «Tehnologii i mashiny obrabotki davleniem»*. – М. : РАН, 2005. – С. 129–133.

6. Truskovskij V. I. *Nozhnicy dlja rezki sortovogo prokata i tolstostennyh trub* / V. I. Truskovskij, V. G. Sherkunov // *Metallurg. 2012*. – № 11. – С. 63–66.

7. Analiz jenergosilovyh parametrov processa razdelenija na nozhnicah sortovyh profilej v gorjachem sostojanii / P. N. Denishhenko, P. V. Borovik, P. A. Petrov, S. M. Strichenko // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2011. – № 4 (29). – С. 172–175.

8. Borovik P. V. *Teoreticheskoe opredelenie sily rezki nozhnicami fasonnyh profilej* / P. V. Borovik, P. A. Petrov // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. 2013. – № 5 (284). – С. 41–44.

9. Savelova T. I. *Metod Monte-Karlo : Uchebnoe posobie* / T. I. Savelova. – М. : NIJaU MIFI, 2011. – 152 s.

10. Satonin A. V. *Metodiki i programmnye sredstva po imitacionnomu matematicheskomu modeli-rovaniju razlichnyh tehnologicheskikh shem listoprokatnogo proizvodstva* / A. V. Satonin; Kramat. industr. in-t. – Kramatorsk, 1994. – Dep. v GNTB Ukrainy 15.08.94, №1661 – Ук 94.

11. L'vovskij E. N. *Statisticheskie metody postroenija jempiricheskikh formul : ucheb. posobie dlja vtuzov* / E. N. L'vovskij. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Vyssh. shk., 1988. – 239s.

12. Fjorster Je. *Metody korreljacionnogo i regressionnogo analiza : rukovodstvo dlja jekonomistov : per. s nem. i predisl. V. M. Ivanovoj* / Je. Fjorster, B. Rjonc. – М. : Finansy i statistika, 1983. – 302 s. : il.

**Сатонин А. В.** – д-р техн. наук, проф. ДГМА

**Боровик П. В.** – канд. техн. наук, доц. ДГМА

**Петров П. А.** – ст. преп. ДонГТУ

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;  
ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: [borovikpv@mail.ru](mailto:borovikpv@mail.ru), [pavelpetrov@list.ru](mailto:pavelpetrov@list.ru)