

УДК 621.9

## МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канд. техн. наук КУРЧ Л. В., инж. ВАРВАРИНА И. А.

Белорусский национальный технический университет

В условиях современной рыночной экономики актуальна проблема снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности продукции, выпускаемой промышленными предприятиями. Поэтому целесообразно осуществлять поиск новых путей и методов совершенствования технологических процессов с учетом возможностей высокопроизводительного инструмента, оснастки и оборудования. Учитывая тенденции развития машиностроения и стремление к объединению и компьютеризации всех этапов производства, повышенные требования к качеству изделий, в рамках теории CALS при помощи простейших аппаратных средств (Microsoft Excel) были разработаны методики технико-экономического анализа технологических процессов производства деталей сельскохозяйственной техники и составлены электронные программы, автоматизирующие процесс расчета и построения диаграмм Парето и кумулятивных графиков [1–3]. Эти методики могут быть успешно применены как для анализа существующих технологических процессов на реальном производстве с целью их улучшения, так и при проектировании новых технологических процессов на предприятиях, в дипломном проектировании или научно-исследовательских работах. Методика доступна широкому кругу пользователей, так как выполнена при помощи известного и повсеместно применяемого программного продукта. Благодаря этому нет необходимости знакомиться с более тяжеловесными и сложными пакетами инженерного проектирования, а тем более устанавливать на компьютеры дорогостоящие модули.

С использованием упомянутого выше программного обеспечения для подтверждения

эффективности предложенного алгоритма проведен технико-экономический анализ технологического процесса механической обработки деталей 1221-2407018Б/-01, 1522-2407018/-01 «Рукав» и предложены варианты технологических решений.

На первом этапе исходная информация по операциям выбранного технологического процесса заносится в электронные таблицы, осуществляющие автоматизированный расчет технико-экономических параметров по заданному алгоритму. Причем информация о режимах обработки и инструментах собирается отдельно по каждому технологическому переходу и затем объединяется в технологические операции. Анализ может быть произведен как внутри технологической операции по переходам, так и между технологическими операциями внутри технологического процесса.

На втором этапе в зависимости от выбранного параметра – себестоимость, трудозатраты, энергопотребление или съем материала автоматизировано – строятся графики (рис. 1), на которых технологические операции выстраиваются по степени убывания заданного анализируемого параметра. Пользователь имеет возможность задать уровень значимости в пределах 70–90 % и определить количество операций, составляющих 70–90 % общего объема выбранного технико-экономического параметра.

На третьем этапе ведется дальнейший анализ и поиск путей совершенствования технологических процессов, но только для этих операций с использованием электронных справочников и автоматизированных методик расчета оптимальных режимов резания и методик подбора прогрессивного металлорежущего инструмента, оснастки

и оборудования. Особенно эффективно на данном этапе применение экспертных систем, автоматизированных справочников, нейронных сетей.

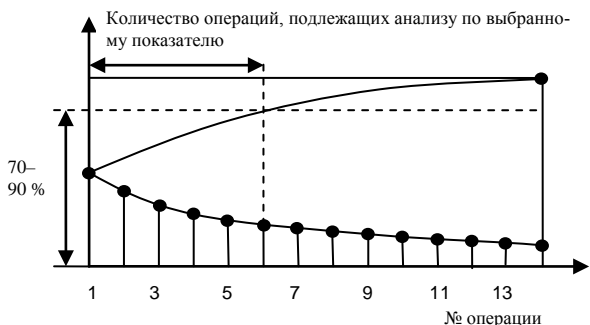


Рис. 1. Последовательность операций механической обработки в порядке убывания по выбранному технико-экономическому параметру

Для иллюстрации метода был проведен технико-экономический анализ технологического процесса по двум показателям – трудоемкость и объем снимаемого металла. В соответствии с требованиями этапа 1 проанализирован тех-процесс и составлена таблица.

Затем (этап 2) были построены графики (рис. 2, 3). На рис. 2 представлен график технико-экономического анализа операций технологического процесса по объему снимаемого металла.

Из рис. 2 видно, что технологические операции 005 и 015 составляют 80 % общего объема снимаемого металла всего технологического процесса. Информация по данным операциям приведена в табл. 1.

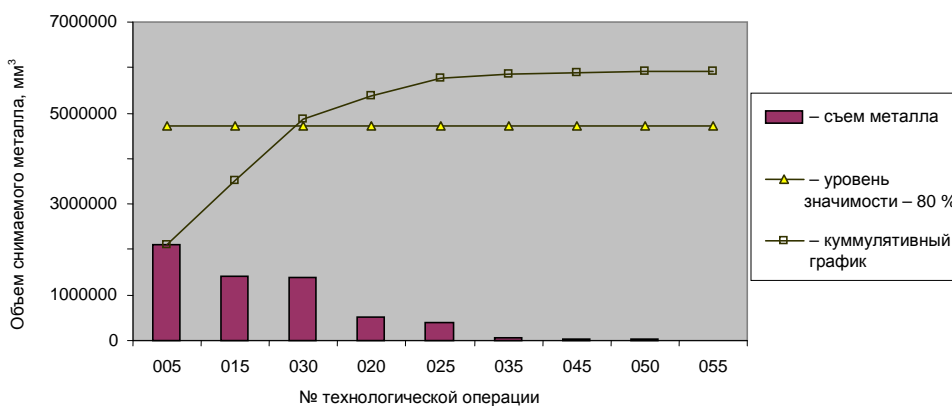


Рис. 2. Результаты технико-экономического анализа операций технологического процесса в порядке убывания объема снимаемого металла

Таблица 1

№ п/п	№ технологической операции	Наименование	Оборудование	V, мм <sup>3</sup>
1	005	Токарная с ЧПУ	1А734Ф3.Н264-410	2099499
2	015	Комплексная на ОЦ с ЧПУ	ИР500ПМФ4	1404318

Для выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на объем снимаемого металла по данному технологическому процессу, был проведен более детальный анализ внутри каждой из выделенных технологических операций по технологическим переходам.

На рис. 3 представлен график технико-экономического анализа операций технологического процесса по трудоемкости. Из рисунка видно, что пять технологических операций составляют 80 % трудоемкости всего технологического процесса. Информация по данным операциям приведена в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	№ технологической операции	Наименование	Оборудование	T, мин
1	005	Токарная с ЧПУ	1А734Ф3.Н264-410	15,44
2	045	Радиально-сверлильная	ОВР 50	11,56
3	020	Токарная с ЧПУ	1П732РФ3	10,84
4	030	Токарная с ЧПУ	1А734РФ3.Н265	9,23
5	035	Алмазно-расточная	ОС 2034	7,84

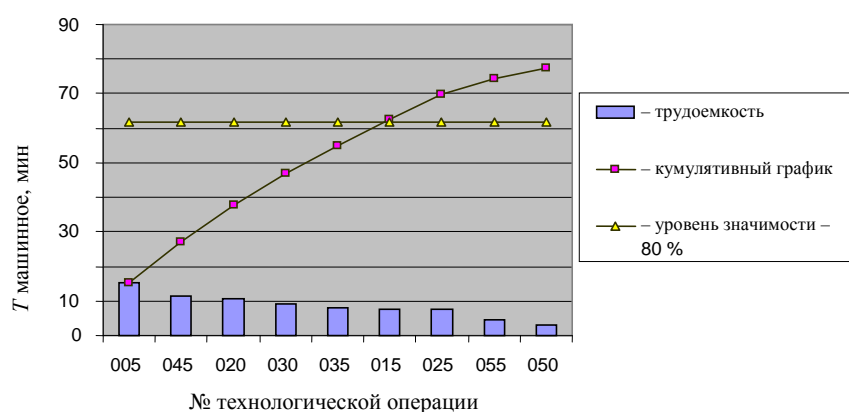


Рис. 3. Результаты технико-экономического анализа операций технологического процесса в порядке убывания их трудоемкости

Для выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на трудоемкость технологического процесса, был проведен более детальный анализ внутри каждой из выделенных технологических операций по технологическим переходам. Наибольший интерес представляет операция 005, потому что именно она была выявлена как наиболее нагруженная по двум показателям. Анализ технологической операции 005 показывает, что переход 4 является самым нагруженным. Дальнейший поиск путей совершенствования проводился именно по этому переходу в соответствии с рекомендациями (этап 3).

С учетом всех справочных рекомендаций были проанализированы факторы и процессы, происходящие в системе СПИЗ при резании с использованием методов многофакторного анализа. В результате были выделены наиболее значимые показатели, влияющие на точность процесса обработки, такие как изнашивание деталей станков, вибрации узлов, износ режущего инструмента и неравномерность свойств материала заготовки. Проанализируем возможность влияния на рассматриваемые параметры техпроцесса каждого из этих факторов и по теории многофакторного эксперимента возможность сочетания этих факторов

$$y_j = \Phi_j(x_1, x_2, \dots, x_k, x_1x_2, x_2x_3, \dots). \quad (1)$$

Рассмотрение всего многообразия критериев и их сочетания является сложной задачей, которую решить без применения специальных алгоритмов невозможно. Выберем только некоторые основополагающие критерии, опираясь

на опыт инженерных решений или на варианты, предложенные соответствующей экспертной системой.

В качестве определяющего критерия возьмем возможность влиять извне на выбранный параметр с наименьшими затратами, т. е. (что наиболее актуально для промышленных предприятий Республики Беларусь) без вложения оборотных средств в новое оборудование.

Для уменьшения изнашивания узлов станков и эффективного гашения вибраций в системе необходимы очень большие затраты, которые обусловлены необходимостью переоборудования цехов новой станочной базой и системами контроля окружающей среды (влажность, температура). Получение равномерных свойств по всему объему материала – сложная задача как в плане привлечения нового оборудования, так и разработки новых технологий заготовительного производства, которая зависит от конкретных способов изготовления заготовок.

Наиболее простой с точки зрения реализации и выгодный с экономической точки зрения способ совершенствования параметров техпроцесса – замена режущего инструмента на более производительный и обладающий большей стойкостью.

В рамках данной научно-исследовательской работы был предложен следующий путь: на операции с ЧПУ 005 (технологический переход № 4) вместо твердосплавной сменной непереключаемой пластины (СНП) CNMA 190616 из сплава MT2 (производство фирмы «Сандвик» MKTC) применена СНП CNMA 190616 из

сплава SK15M (производство фирмы «Сандвик» МКТС). Сравнительные испытания проводились с сохранением заданных по технологическому процессу режимов резания и условий обработки. Цель проводимых испытаний – выявить СНП, обладающие наибольшей износостойкостью, и произвести анализ экономической эффективности предложенных технологических изменений. В испытаниях в качестве измеряемого параметра была взята стойкость одной режущей кромки СНП.

В основе используемого базового сплава MT2 – марка без износостойкого покрытия для полустогового точения и черновой обработки серого и ковкого чугуна, жаропрочных и титановых сплавов в условиях высоких скоростей резания и температур при легких и умеренных нагрузках на режущую кромку, обладает средним или увеличенным сечением среза.

Предложенная СНП сплава SK15M имеет основу с высокой твердостью и износостойкостью. Покрытие СНП MT-CVD типа TiCN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В качестве первого слоя используется карбонитрид титана TiCN, который обладает высокой износостойкостью и твердостью, хорошо работает на задней поверхности СНП. Пластина с использованием сплава SK15M работает при точении чугуна в условиях высоких скоростей резания и температур при более высоких нагрузках на режущую кромку, чем при использовании сплава MT2. Слой оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сохраняет твердость и химическую инертность при высоких температурах. Этот слой обеспечивает прекрасную износостойкость, особенно стойкость к абразивному износу и окислению при обработке стали или чугуна. Область применения описываемых СНП проиллюстрирована в табл. 3.

Таблица 3

Код		Сплав с покрытием	Сплав без покрытия
ИСО	АНСИ		
01	C4		
10	C3	SK15M	
20	C2		MT2
30	C1		

На следующем этапе исследования был произведен статистический анализ, который

позволил подтвердить предположение о том, что такой показатель, как стойкость сравниваемых СНП, подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса), а также определить среднестатистическое значение  $\bar{x}$  стойкости одной грани пластины и с вероятностью 99,73 % – поле рассеивания стойкости пластин  $\omega$ .

Исследования проводились на одном станке за межнастроечный период. Режимы и условия обработки оставались постоянными для базовой и предлагаемой пластин. Для расчета была взята выборка из пяти базовых и пяти предлагаемых СНП, каждая из которых имела по четыре режущих кромки. Протокол измерения стойкости базовой и предложенной СНП представлен в табл. 4.

Таблица 4

	Базовая СНП					Предложенная СНП					
	№ пластины	№ кромки	Стойкость режущей кромки	№ пластины	№ кромки	Стойкость режущей кромки	№ пластины	№ кромки	Стойкость режущей кромки		
1	1	20	6	1	19	1	1	25	6	1	27
	2	18		2	17		2	23		2	24
	3	20		3	20		3	25		3	26
	4	19		4	21		4	30		4	27
2	1	22	7	5	21	2	1	26	7	1	23
	2	19		6	20		2	27		2	25
	3	17		7	19		3	22		3	27
	4	23		8	23		4	25		4	28
3	1	21	8	9	22	3	1	28	8	1	24
	2	20		10	16		2	28		2	26
	3	20		11	22		3	29		3	26
	4	19		12	21		4	26		4	27
4	1	21	9	13	20	4	1	26	9	1	26
	2	18		14	20		2	25		2	27
	3	18		15	20		3	25		3	24
	4	17		16	18		4	26		4	26
5	1	20	10	17	18	5	1	27	10	1	25
	2	20		18	19		2	27		2	25
	3	24		19	21		3	28		3	23
	4	19		20	20		4	29		4	29

В соответствии с [1, с. 624–686] проведены статистические расчеты, представленные ниже (табл. 5, 6).

Таблица 5

Результаты расчета эмпирических и теоретических частот нормального распределения (базовая СНП)

Интервал			$m_i$	$Y_i$	$Y'_i$	$m_i^* Y'_i$	$m_i^* (Y'_i)_2$	$t$	$\Phi(t)$	$F(x)$	$m_i'$	$m_i^*$
1			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15,5	–	16,5	1	16	–4	–4	16	–2,13264	–0,4778	0,0222	0,888	1
16,5	–	17,5	3	17	–3	–9	27	–1,55625	–0,4357	0,0643	1,684	2
17,5	–	18,5	5	18	–2	–10	20	–0,97986	–0,334	0,166	4,068	4
18,5	–	19,5	7	19	–1	–7	7	–0,40347	–0,1628	0,3372	6,848	7
19,5	–	20,5	12	20	0	0	0	0,172917	0,1255	0,6255	11,532	12
20,5	–	21,5	6	21	1	6	6	0,749308	0,2642	0,7642	5,548	6
21,5	–	22,5	3	22	2	6	12	1,325698	0,3888	0,8888	4,984	5
22,5	–	23,5	2	23	3	6	18	1,902088	0,4608	0,9608	2,88	3
23,5	–	24,5	1	24	4	4	16	2,478479	0,4878	0,9878	1,08	1
Σ			40			8	122					41

Таблица 6

Результаты расчета эмпирических и теоретических частот нормального распределения (предложенная СНП)

Интервал			$m_i$	$Y_i$	$Y'_i$	$m_i^* Y'_i$	$m_i^* (Y'_i)_2$	$t$	$\Phi(t)$	$F(x)$	$m_i'$	$m_i^*$
1			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21,5	–	22,5	1	22	–4	–4	16	–1,96994	–0,4778	0,0222	0,888	1
22,5	–	23,5	3	23	–3	–9	27	–1,41503	–0,4357	0,0643	1,684	2
23,5	–	24,5	3	24	–2	–6	12	–0,86012	–0,334	0,166	4,068	4
24,5	–	25,5	8	25	–1	–8	8	–0,3052	–0,1628	0,3372	6,848	7
25,5	–	26,5	9	26	0	0	0	0,249711	0,1255	0,6255	11,532	12
26,5	–	27,5	8	27	1	8	8	0,804625	0,291	0,791	6,62	7
27,5	–	28,5	4	28	2	8	16	1,359538	0,3869	0,8869	3,836	4
28,5	–	29,5	3	29	3	9	27	1,914452	0,4332	0,9332	1,852	2
29,5	–	30,5	1	30	4	4	16	2,469366	0,4686	0,9686	1,416	1
Σ			40			2	130					40

Здесь  $m_i$  – частоты в каждом из интервалов;  $Y_i$  – середина соответствующего интервала,  $Y'_i = (Y_i - Y_0)/h$ , где  $Y_0$  – новое начало отсчета, за которое принимается середина интервала, имеющего наибольшую частоту;  $m_i^* Y'_i$  – момент первого порядка;  $m_i^* (Y'_i)_2$  – момент второго порядка.

Среднее значение стойкости СНП определялось по формуле

$$\bar{x} = y_0 - h \frac{\sum m_i y'_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

Оно составило:

- для базовой СНП

$\bar{x}_{\text{баз}} = 20,2 \approx 20$  (деталей на одну режущую кромку пластины);

- для проектной СНП

$\bar{x}_{\text{проект}} = 26,05 \approx 26$  (деталей на одну режущую кромку пластины).

Среднее квадратичное отклонение параметра стойкости определялось по формуле

$$s = h \sqrt{\frac{\sum m_i y_i^2}{\sum m_i} - \left( \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} \right)^2} \quad (3)$$

Поле рассеивания стойкости СНП с вероятностью в пределах 99,73 % для нормального распределения рассчитывается по формуле  $\omega = 6s$ .

Оно составило:

- для базовой СНП

$\omega_{\text{баз}} = 6 \cdot 1,73 = 10,38 \approx 10$  (деталей на одну режущую кромку пластины);

- для проектной СНП

$\omega_{\text{проект}} = 6 \cdot 1,8 = 10,8 \approx 11$  (деталей на одну режущую кромку пластины).

Для построения кривой Гаусса были рассчитаны теоретические частоты нормального распределения при помощи функции  $\Phi(t)$

$$t = \frac{x_{\text{нб}} - \bar{x}}{s};$$

где  $x_{\text{нб}}$  – наибольшее значение данного интервала;  $\bar{x}$  и  $s$  – среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

Затем определены значения функции Лапласа, по которым для каждого интервала подсчитана интегральная функция

$$F(t) = 0,5 + \Phi(t).$$

По  $F(t)$  теоретические частоты:

$$m_i = F(t)n;$$

$$m'_i = [F(t) - F(t)]n \text{ и т. д.}$$

Далее сопоставлены эмпирическое распределение, предположительно принятое как нормальное, с теоретическим. Для этого в одних и тех же координатах построены эмпирический полигон и кривая нормального распределения (рис. 4, 5). Это дало возможность судить о степени совпадения эмпирического распределения с теоретическим.



Рис. 4. Эмпирический полигон и кривая нормального распределения параметра стойкости для исходной СНП: 1 – эмпирический полигон; 2 – теоретическая кривая нормального распределения

Для количественного сопоставления эмпирического и теоретического распределений был использован критерий согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^z \frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i},$$

где  $z$  – число сравниваемых частот;  $m_i, m'_i$  – эмпирическая и теоретическая частоты в  $i$ -м интервале.

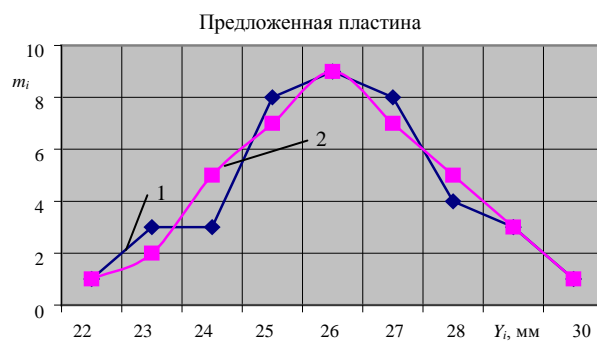


Рис. 5. Эмпирический полигон и кривая нормального распределения параметра стойкости для предложенной СНП: 1 – эмпирический полигон; 2 – теоретическая кривая нормального распределения

Область допустимых значений критерия Пирсона или область принятия гипотезы характеризуется неравенством

$$\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k),$$

где  $\chi^2_{\text{набл}}$  – значение критерия, вычисленное по данным наблюдения;  $\chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k)$  – критические значения критерия при заданных  $\alpha$  и  $k$ ;  $\alpha$  – уровень значимости, в технике обычно – 0,05.

Для проводимого расчета  $\chi^2_{\text{кр}}(0,05; 2) = 6,0$ . Так как для исходной пластины  $0,857 < 6,0$  и для предложенной пластины  $0,379 < 6,0$ , можно утверждать, что распределение параметров стойкости пластин, проверенное по критерию Пирсона, соответствует нормальному закону распределения.

Кроме того, была произведена проверка соответствия статистических данных нормальному закону распределения и по критерию Романовского

$$A = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}}.$$

Если  $A < 3$ , то гипотеза принимается. Если  $A \geq 3$ , то гипотеза отвергается. В данном случае  $A = 0,571$  – для исходной СНП и  $A = 0,811$  – для предложенной СНП, следовательно, эмпирическое распределение соответствует нормальному закону.

Суммарные значения технико-экономического анализа эффективности предложенных технологических изменений представлены в табл. 7.

Таблица 7

№	Наименование показателя	Значение	Размерность
1	Ранее используемые СНП CNMA 190616 из сплава MT2 (производство фирмы «Сандвик»)		
1.1	Среднестатистическое значение стойкости одной режущей кромки, $\bar{x}_{\text{баз}}$	20	деталей на 1 реж. кромку пластины
1.2	Поле рассеивания среднестатистического значения стойкости одной режущей кромки $\omega_{\text{баз}} = 6 \cdot 1,73 = 10,38 \approx 10$	$\pm 5$	деталей на 1 реж. кромку пластины
1.3	Количество режущих кромок	4	шт.
1.4	Стойкость СНП	$20 \cdot 4 = 80$	деталей на 1 пластину
1.5	Норма расхода пластин на обработку 1000 деталей	97,54	шт.
2	Предложенные СНП CNMA 190616 из сплава SK15M (производство фирмы «Сандвик»)		
2.1	Среднестатистическое значение стойкости одной режущей кромки, $\bar{x}_{\text{проект}}$	26	деталей на 1 реж. кромку пластины
2.2	Поле рассеивания среднестатистического значения стойкости одной режущей кромки $\omega_{\text{баз}} = 6 \cdot 1,8 = 10,8$	$\pm 5,4$	деталей на 1 реж. кромку пластины
2.3	Количество режущих кромок	4	шт.
2.4	Стойкость СНП	$26 \cdot 4 = 104$	деталей на 1 пластину
3	План выпуска деталей на 2005 г. (рукав полуоси правый 1221-2407018Б/-01, 1522-2407018/-01)	12250,0	шт./год

### ВЫВОД

Результаты сравнительных стойкостных испытаний были подтверждены соответствующими актами внедрения и показали, что, несмотря на некоторое увеличение стоимости предложенной СНП по отношению к ранее используемой, за счет правильного подбора нового износостойкого покрытия предлагаемой СНП были достигнуты следующие суммарные экономические показатели предложенных изменений технологического процесса изготовления деталей – рукав полуоси правый 1221 – 2407018Б/-01, 1522-2407018/-01:

- стойкость предложенных СНП увеличилась на 30 % по сравнению с ранее используемыми пластинами, соответственно произошло снижение нормы расхода СНП на обработку 1000 деталей на 30 %;
- количество сэкономленных СНП за 2005 г. при переходе на новый сплав составило 367 шт.;

- затраты на СНП в 2005 г. при переходе на новый сплав снизились 19,5 %;
- годовой экономический эффект от предложенных изменений составил 4557157 руб.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Проектирование** технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие для вузов / И. П. Филонов [и др.]; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.
2. **Filonov, I. P.** An expert system for new approaches for development concurrent design for assembly and manufacturing processes: тезисы докладов / I. P. Filonov, L. V. Kourtch, A. M. Daabub // Машиностроение: республик. межвед. сб. науч. тр. – 2004. – Вып. 20. – Т. 1. – С. 77–80.
3. **Филонов, И. П.** Разработка и апробация методики технико-экономического анализа технологических процессов / И. П. Филонов, Л. В. Курч, И. А. Варварина // Машиностроение и техносфера XXI: сб. тр. XII международ. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 12–17 сент. 2005 г.; в 5 т. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т. 4. – С. 34–39.

Поступила 25.01.2006