

УДК 621.914:674:004

В. В. Раповец¹, И. К. Клепацкий¹, С. В. Медведев², Г. Г. Иванец²¹Белорусский государственный технологический университет²Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси**МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LS-DYNA
ЧЕРЕЗ МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛ И СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ
ПРИ ФРЕЗЕРОВНИИ ДРЕВЕСИНЫ**

Объектом исследований являются математические методы мультипроцессорной вычислительной среды LS-DYNA для построения и анализа модели оптимизации технологических процессов при цилиндрическом фрезеровании древесины и древесных материалов.

Для сравнения рассчитанной мощности с результатами натурных экспериментов при различных режимах резания разработана методика определения мощности резания как средней величины произведений значений мгновенных сил резания на значения мгновенных скоростей на интервале измерений, определяемом временем контакта зуба с заготовкой. Мгновенные силы резания и мгновенные координаты точки вершины зуба определяются путем расчета в пакете LS-DYNA на суперкомпьютере.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – полученные результаты выполнения НИР могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволят существенно повысить эффективность действующего производства.

Ключевые слова: фрезерование, компьютерное моделирование, сила резания, скорость резания, древесина, мультипроцессорные вычисления.

V. V. Rapovets¹, I. K. Klepatskiy¹, S. V. Medvedev², G. G. Ivanets²¹Belarusian State Technological University²United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus**METHOD OF CALCULATION OF POWER IN THE LS-DYNA SOFTWARE
THROUGH THE INSTANT VALUES OF FORCES AND CUTTING SPEEDS
AT THE MILLING OF WOOD**

The object of the research is the mathematical methods of the multiprocessor computing environment LS-DYNA for constructing and analyzing the model of optimization of technological processes for cylindrical milling of wood and wood materials.

To compare the calculated power with the results of field experiments with different cutting modes, a technique was developed for determining the cutting power as the average value of the products of instantaneous cutting forces by the values of instantaneous speeds in the measurement interval determined by the time of contact of the tooth with the workpiece. The instantaneous cutting forces and instantaneous coordinates of the point of the vertex of the tooth are determined by calculation in the LS-DYNA package on a supercomputer.

Predictive assumptions about the development of the research object - the obtained results of the research can be used to model and optimize the parameters of complex high-speed processes of mechanical processing of wood and wood materials in the performance of scientific research that will significantly improve the efficiency of existing production.

Key words: milling, computer modeling, cutting force, cutting speed, wood, multiprocessor calculations.

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь для высокоскоростной лезвийной обработки различных древесных материалов применяется дорогостоящий дереворежущий инструмент в основном зарубежного производства. Большая номенклатура используемого современного дереворежущего инструмента обусловлена специфическими особенностями его работы: разнообразием обрабатываемых мате-

риалов (натуральная древесина, древесные плитные материалы и пластики); кинематикой процесса резания (вращательное движение инструмента, криволинейное и прямолинейное и т. д.); видами резания (открытое, полузакрытое, закрытое); расположением лезвия в пространстве относительно оси вращения инструмента или результирующего вектора скорости и т. д. Изменение условий работы инструмента в каж-

дом конкретном случае приводит к изменению характеристик процесса резания (динамических нагрузок, мощности резания, периода стойкости инструмента, качества обработанной поверхности, ресурса инструмента и т. п.). Основной целью проводимых исследований в рамках данной работы является разработка метода и математической модели многокритериальной оптимизации режимов деревообработки на основе базы данных зависимостей характеристик процесса резания от технологических режимов обработки, сформированной посредством натурных и вычислительных экспериментов.

В процессе выполнения работы был проведен анализ средств моделирования в высокопроизводительных вычислительных системах, состав и способ построения компонент математической модели оптимизации технологических процессов деревообработки, экспериментально на установке Biesse Rover B 4.35 определены выходные параметры режимов механической обработки древесины фрезерованием.

Разработана методика аппроксимации экспериментальных зависимостей и предназначена для использования в системах поддержки принятия решений при выборе оптимальных режимов высокоскоростной лезвийной обработки древесных материалов. Научная значимость разработанных методик расчета мощности резания состоит в возможности ее прогноза с помощью суперкомпьютерных технологий. Сформированы базы данных зависимостей характеристик процесса резания (мощность резания, период стойкости инструмента, качество обработанной поверхности, радиус округления режущей кромки лезвия) от технологических режимов обработки.

Практическая направленность заключается в возможности применения разработанных методик при разработке баз данных оптимальных режимов резания для различных древесных материалов. Результаты исследований являются основой для разработки системы расчета оптимальных режимов резания для высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов.

Область применения – результаты проведенных исследований при моделировании высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесины и древесных материалов могут использоваться на деревообрабатывающих предприятиях отрасли для разработки баз оптимальных режимов резания при обработке различных древесных материалов, оптимизации режимов эксплуатации дереворежущего фрезерного инструмента на современных линиях и станках с числовым программным управлением.

Экономическая эффективность работы заключается в снижении стоимости и длительности проведения натурных экспериментов за счет моделирования процесса резания в высокопроизводительных вычислительных системах и многокритериальной оптимизации технологических параметров обработки.

Полученные результаты выполнения НИР могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволяет существенно повысить эффективность действующего производства.

Основная часть. В результате расчета в пакете LS-DYNA получается файл `sprcforce`, содержащий значения сил в узлах закрепленного основания (рис. 1).

```

NuMBER3
ls-dyna smp.113621 d      date 01/19/2017

single point constraint forces
output at time = 0.00000E+00

node= 1103588 local x,y,z forces = -2.3593E-07 -1.4610E-07 5.2416E-08 setid= 0
force resultants = -2.3734E-03 3.8925E-02 -1.0487E-09
output at time = 6.40000E-01
node= 207611 local x,y,z forces = -3.8345E-08 -1.8892E-08 -6.8534E-09 setid= 0
node= 207612 local x,y,z forces = -3.9288E-08 -1.9050E-08 -6.9117E-09 setid= 0
node= 207613 local x,y,z forces = -4.0266E-08 -1.9264E-08 -6.9902E-09
  
```

Рис. 1. Структура файла `sprcforce`

Данный файл обрабатывается с помощью программы LS-PREPOST. Получается график изменения суммы вертикальных составляющих силы для всех выбранных узлов, другими словами, вертикальной составляющей реакции опоры (рис. 2).

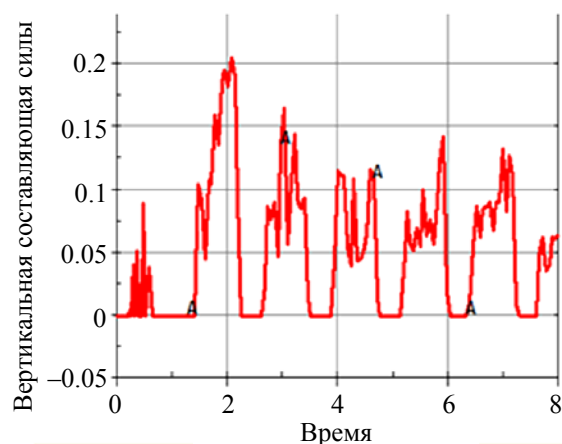


Рис. 2. График изменения силы при резании фрезой

График сохраняется в файле y-force.txt (рис. 3).

```
Curveplot
NUMBER3
Time
Y-force
Node Ids
Comb. Y-force #pts=140
* Minval= -4.219534e-005 at time= 0.520
* Maxval= 2.055270e-001 at time= 2.080
0.000000e+000 0.000000e+000
4.000000e-002 0.000000e+000
1.000000e-001 0.000000e+000
1.600000e-001 0.000000e+000
2.100000e-001 -7.074328e-006
2.400000e-001 5.066515e-003
2.700000e-001 -1.697937e-008
3.000000e-001 4.120263e-002
3.300000e-001 -8.662589e-006
3.600000e-001 5.193780e-002
3.900000e-001 -1.539381e-005
4.200000e-001 -2.230025e-005
4.500000e-001 -1.653212e-008
4.800000e-001 9.002686e-002
```

Рис. 3. Структура табличной кривой изменения силы при резании фрезой

Значения меньше 0.0001 Кн можно считать таковыми для времени, в которое зуб не находится в контакте с заготовкой. Далее для каждого зуба в этом файле выделяется группа строк со значениями сил больших 0.0001 Кн. В группу включается по одной ограничивающей строке в начале и конце группы, где значения силы меньше 0.0001 Кн (рис. 4).

1.120000e+000	8.093764e-009
1.180000e+000	8.093764e-009
1.240000e+000	8.093764e-009
1.300000e+000	8.093764e-009
1.360000e+000	8.093764e-009
1.420000e+000	8.093764e-009
1.480000e+000	1.047329e-001
1.540000e+000	9.145191e-002
1.600000e+000	4.540900e-002
1.660000e+000	1.080350e-001
1.720000e+000	1.049544e-001
1.780000e+000	1.597973e-001
1.840000e+000	1.357684e-001
1.900000e+000	1.858765e-001
1.960000e+000	1.954544e-001
2.020000e+000	1.832061e-001
2.080000e+000	2.055270e-001
2.140000e+000	1.900487e-001
2.200000e+000	9.379216e-002
2.260000e+000	-8.602638e-008
2.320000e+000	-6.507162e-008
2.380000e+000	-6.507162e-008
2.440000e+000	-6.507162e-008
2.500000e+000	-6.507162e-008
2.560000e+000	-6.507162e-008
2.620000e+000	-6.507162e-008

Рис. 4. Схема расчета угла $ALFA$

Данные из фрагмента заносятся в EXCEL табличный файл (рис. 5).

	A	B	C
1		1,42	0,00
2		1,48	0,10
3		1,54	0,09
4		1,60	0,05
5		1,66	0,11
6		1,72	0,10
7		1,78	0,16
8		1,84	0,14
9		1,90	0,19
10		1,96	0,20
11		2,02	0,18

Рис. 5. Зоны приложения бокового давления, имитирующего предварительно-напряженное состояние древесины после сушки

Фактически в столбцах $C[N-1]$, $C[N]$ содержатся значения силы, которые соответствуют временному участку от $B[N-1]$ до $B[N]$, где N – номер строки. Значение $C[N]$ считается как мгновенное значение силы на этом участке.

Для нахождения мгновенной скорости в программе LS-PREPOST строится график перемещения вершины зуба. В качестве вершины выбирается центр округления резца. Нижнее положение зуба соответствует началу резания (рис. 6).

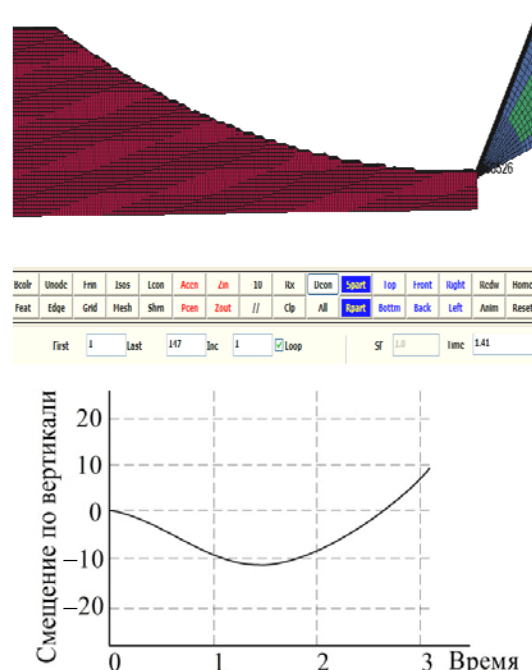


Рис. 6. Исходное состояние для второго зуба перед резанием и график перемещения второго зуба по оси Y

График сохраняется в виде файла табличной кривой $y - displzN$, где N – номер зуба.

В сохраненном файле выделяется группа строк временного интервала, определенного на шаге измерения мгновенных сил. Отметки границ и разность времени между строками может незначительно отличаться от данных фрагмента для силы. Поэтому при передаче данных в EXCEL табличный файл нужно и привести в соответствие с временными интервалами силы. Далее рассчитываются значения приращений по времени dt и перемещения dy . Для расчета перемещений используются средства программы EXCEL расчета данных столбцов по формулам.

Для каждого моделирования резания при заданных параметрах аналогичным образом выполняются расчеты средней мощности еще как минимум для трех зубьев (рис. 7).

t	y	dy	dt	v	t	F	v	$N = F \cdot v$
2,68	-38,25	-0,03			2,74	0,09	0,487	0,42803
2,74	-38,22	0,03	0,06	0,487	2,80	0,08	1,465667	0,112527
2,80	-38,13	0,09	0,06	1,465667	2,86	0,09	2,362333	0,21389
2,86	-37,99	0,14	0,06	2,362333	2,92	0,05	3,397833	0,162453
2,92	-37,79	0,20	0,06	3,397833	2,98	0,14	4,192833	0,567915
2,98	-37,54	0,25	0,06	4,192833	3,04	0,17	5,136333	0,851706
3,04	-37,23	0,31	0,06	5,136333	3,10	0,06	6,31333	0,358744
3,10	-36,85	0,38	0,06	6,311333	3,16	0,11	7,067833	0,758344
3,16	-36,43	0,42	0,06	7,067833	3,22	0,15	7,9955	1,161095
3,22	-35,95	0,48	0,06	7,9955	3,28	0,09	8,872333	0,822226
3,28	-35,41	0,53	0,06	8,872333	3,34	0,09	9,803167	0,833623
3,34	-34,83	0,59	0,06	9,803167	3,40	0,09	10,62033	0,994248
3,40	-34,19	0,64	0,06	10,62033	3,46	0,02	11,53	0,177037
3,46	-33,50	0,69	0,06	11,53	3,52	0,00	12,34217	-1,00E-06
3,52	-32,76	0,74	0,06	12,34217	Среднее		0,470401	

Рис. 7. Отчетные таблицы по расчету мощности резания

Далее проводятся вычислительные эксперименты для построения графиков и вывода аналитических зависимостей. Методика рассматривается на примере вывода закона изменения при постоянной скорости шпинделя 6000 об/мин от скорости подачи. Принимается правило, что при наличии значений экспериментов для вывода формулы использовать именно их. В программе EXCEL при построении графика выводим линию тренда вместе с уравнением и величины достоверности аппроксимации (рис. 8, 9).

Исходя из величины достоверности аппроксимации, выбирается формула аналитической зависимости $y = 0,1205x^{0,5693}$.

При выводе зависимости мощности от скорости резания при постоянной подаче исполь-

зовались данные виртуальных испытаний для оборотов шпинделя от 5000 до 10 000 в минуту. Причем в первом случае данные натурных испытаний не учитывались ввиду их малого количества для подачи 19,2 м/мин. Получена формула полиномиальной зависимости:

$$y = 6e^{-12}x^3 - 2e^{-7}x^2 + 0,0015x - 3,787. \quad (1)$$

Во втором случае учтены данные натурных испытаний. Получилась формула

$$y = 2e^{-12}x^3 - 7e^{-8}x^2 + 0,0009x - 2,3961. \quad (2)$$

Иллюстрация вывода формул показана на рис. 10.

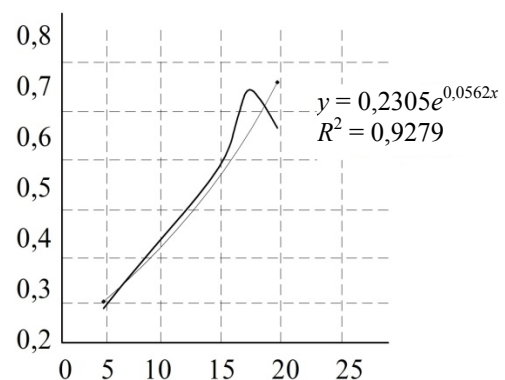


Рис. 8. Линия тренда по экспоненциальной зависимости

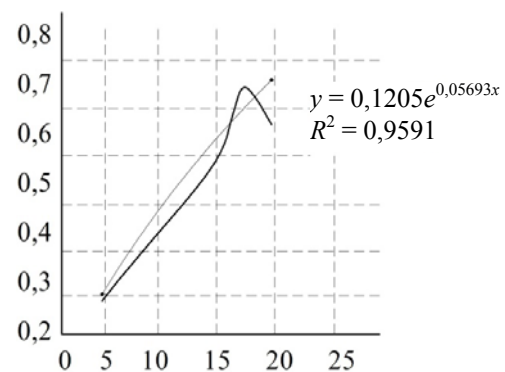


Рис. 9. Линия тренда по степенной зависимости

Для другой толщины съема при тех же скоростях резания и подачи нужно проводить новые расчеты и выводить другие формулы. Так, для толщины слоя 3 мм получена формула полиномиальной зависимости:

$$y = 9e^{-5}x^2 + 0,0113x - 0,3047. \quad (3)$$

Вывод формулы зависимости мощности резания от подачи при постоянной скорости резания (обороты шпинделя 6000 об/мин) и толщине снимаемого слоя 3 мм представлен на рис. 11.

Скорость	Подача	Мощность расчетная	Мощность эксперимента
5000	19,2	0,345677	0,378
6000	19,2	0,602998	
7000	19,2	0,676134	
8000	19,2	0,752335	0,794
10000	19,2	0,716715	

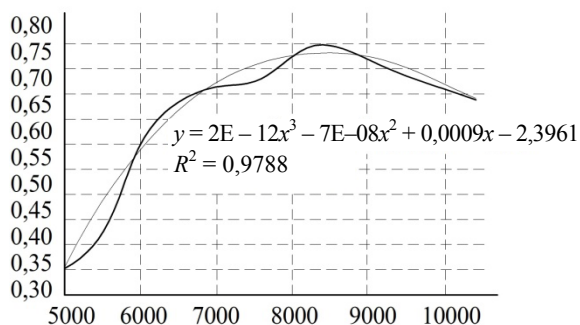
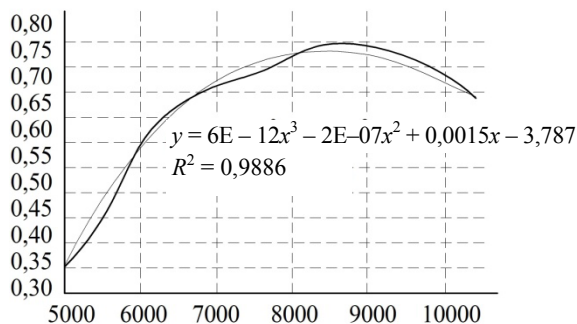


Рис. 10. Вывод формулы зависимости мощности резания от скорости резания (обороты шпинделя) при постоянной подаче 19,2 м/мин

Таким образом, изменяя технологические значимые параметры высокоскоростного процесса лезвийной обработки и проводя соответствующие расчеты, описанные выше по разработанным методикам в совокупности с экспериментальными данными, осуществляется формирование баз данных.

Скорость	Подача	Мощность расчетная	Мощность эксперимента
6000	6,2	0,453	0,378
6000	12,39		0,458
6000	18,59		0,545

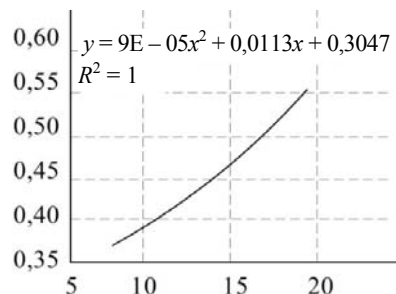


Рис. 11. Вывод формулы зависимости мощности резания от подачи при постоянной скорости резания (обороты шпинделя 6000 об/мин) и толщине снимаемого слоя 3 мм

Заключение. Таким образом, представленная методика позволяет рассчитывать мощность для заданных параметров режимов резания, сравнивать результаты расчета с мощностью, полученной в натурных экспериментах при этих же режимах, верифицировать расчетную модель, а затем использовать расчетную модель для получения значений мощностей при комбинации параметров, для которых не производились натурные испытания. Если проводить расчеты при одном изменяющемся параметре, зафиксировав остальные, то получаются данные, позволяющие строить графики зависимости мощности от значений этого параметра.

В программе EXCEL такой график можно аппроксимировать аналитической зависимостью. Аналитические зависимости можно использовать в системах оптимизации режимов резания с критерием оптимизации по мощности резания.

Литература

1. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996. P. 545–554.
2. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlán T. R., Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. P. 169–180.
3. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В. В. Раповец [и др.] // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды X Междунар. евразийского симпозиума*, Екатеринбург. 2015. С. 170–176.
4. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В. В. Раповец [и др.] // *Труды БГТУ*. 2017. № 2 (198): Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобн. ресурсов. С. 360–364.

References

1. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996, pp. 545–554.

2. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlan T. R. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, pp. 169–180.

3. Rapovets V. V., Grishkevich A. A., Medvedev S. V., Ivanec G. G. The methodology of modeling during machining of wood materials by milling in the soft LS-DYNA. *Trudy Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma* (“*Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment*”) [Proceedings of the International. Evraz. Symposium (“Woodworking: technologies, equipment, management of the X Century”)], Ekaterinburg, 2015, pp. 170–176 (In Russian).

4. Rapovets V. V., Klepatskiy I. K., Medvedev S. V., Ivanets G. G. Computational experiments of high-speed blade cutting of wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2 (198): Forestry, nature management. Processing of renewable resources, pp. 360–364 (In Russian).

Информация об авторах

Раповец Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Клепацкий Игорь Казимирович – магистрант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lucky-35@mail.ru

Медведев Сергей Викторович – доктор технических наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: medv@newman.bas-net.by

Иванец Григорий Григорьевич – главный конструктор проекта. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: ivanec@newman.bas-net.by

Information about the authors

Rapovets Vyacheslav Valer'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Klepatskiy Igor' Kazimirovich – Master's degree student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lucky-35@mail.ru

Medvedev Sergey Viktorovich – PhD (Engineering), Head of the Laboratory. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medv@newman.bas-net.by

Ivanets Grigoriy Grigor'yevich – Chief Designer of the project. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivanec@newman.bas-net.by

Поступила 27.02.2018