

УДК 674.05(075.8)

Совместное влияние температуры и влажности древесины сосны на энергоемкость процесса поперечного пиления

И.В. Григорьев^{1 a}, Е.Г. Хитров^{1 b}, В.А. Иванов^{2 c}, В.И. Жданович^{2 d}, М.В. Дербин^{3 e}

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия

²Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Набережная Северной Двины 17, Архангельск, Россия

^atlzp@inbox.ru, ^byegorkhitrov@gmail.com, ^civanovva55@mail.ru, ^divanovamv1977@mail.ru, ^elti@narfu.ru

Статья поступила 22.03.2014, принята 21.05.2014

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований взаимного влияния отрицательной температуры и влажности на удельную работу при пилении древесины сосны острой пильной цепью. Эксперименты выполнялись на специализированном стенде сравнительного испытания пильных цепей в лаборатории технологии лесозаготовительных производств СПбГЛТУ. Для опытов использованы образцы древесины сосны размером 150x150x3000 мм с влажностью в диапазоне от 20 до 180 %, при температуре от 0 до -30 °С. Приводятся результаты статистической обработки опытных данных: модель для определения поправочного коэффициента для учета взаимного влияния отрицательной температуры и влажности при определении удельной работы, показатели вариативности коэффициентов полученной модели. Адекватность полученной модели экспериментальным данным подтверждена с использованием критерия Фишера ($F_p = 1,24$). По результатам исследований установлен доверительный интервал изменения поправочного коэффициента ($\pm 3\%$). Результаты исследований показали, что пренебрежение взаимным влиянием отрицательной температуры и влажности при расчете удельной работы резания при пилении древесины сосны приводит к получению заниженных (до 74 %) значений удельной работы. В заключение освещается перспектива дальнейших исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины.

Ключевые слова: поперечное пиление, энергоемкость, влажность, отрицательная температура, удельная работа резания.

Joint influence of a temperature and humidity of a pine tree wood on energy-output ratio of a cross-cutting process

I.V. Grigoriev^{1 a}, E.G. Hitrov^{1 b}, V.A. Ivanov^{2 c}, V.I. Zhdanovich^{2 d}, M.V. Derbin^{3 e}

¹St. Petersburg State Forestry Engineering University under name of S.M. Kirov, 5 Institutsky lane, St. Petersburg, Russia

²Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^atlzp@inbox.ru, ^byegorkhitrov@gmail.com, ^civanovva55@mail.ru, ^divanovamv1977@mail.ru, ^elti@narfu.ru

Received 22.03.2014, accepted 21.05.2014

The article presents results of experimental studies of mutual influence of negative temperature and humidity on the specific work when sawing pine with a sharp saw chain. The experiments were carried out on a dedicated stand "Comparative tests of chain saw" in the laboratory of Logging Technology SPbFTU named after SM Kirov. For the experiment, samples of pine wood 150x150x3000 mm size with a moisture range from 20 to 180 % at a temperature between 0 - 30 °C were used. Given are results of statistical processing of the experimental data: a model for determining the correction coefficient to account for the mutual influence of negative temperature and humidity when determining the specific work, indices of the variation coefficients of the given model. The adequacy of the model to experimental data obtained was confirmed using Fisher's exact test ($F_p = 1,24$). According to the research, set confidence interval changes for the correction coefficient ($\pm 3\%$). The results showed that the neglect of the mutual influence of negative temperature and humidity when calculating the specific work of sawing pine yields underestimated (up to 74%) values of the specific work. The conclusion highlights the prospect of further research of energy consumption of the process timber cross-sawing.

Keywords: cross-sawing, energy consumption, humidity, negative temperature, cross-sawing specific work.

Введение. Поперечное пиление древесины пильными цепями является одной из основных операций в лесозаготовительном производстве. Ранее нами было показано, что существующие методики расчета потребляемой на пиление мощности нуждаются в уточнении, поскольку предлагаемые в литературе попра-

вочные коэффициенты не учитывают взаимного влияния факторов, определяющих энергоемкость процесса пиления [1]. В частности, остается неисследованным взаимное влияние температуры и влажности на удельную работу резания при пилении, что на практике при-

водит к существенным неточностям при расчете потребляемой цепными пилами мощности [1].

Целью настоящей работы является определение взаимного влияния влажности и температуры древесины на энергоемкость процесса поперечного пиления острой пильной цепью, а также уточнение методики расчета удельной работы резания при поперечном пилении с учетом температуры и влажности древесины сосны.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились в два этапа.

1. Разведочные опыты с целью качественной проверки взаимного влияния влажности и температуры древесины сосны на энергоемкость процесса ее поперечного пиления острой пильной цепью и определения вариативности показателей энергоемкости процесса пиления для обоснования необходимого числа опытов при проведении полного факторного эксперимента (осень – зима 2012-2013 гг).

2. Полный факторный эксперимент, спланированный на основании результатов разведочных опытов (осень – зима 2013-2014 гг).

Образцы для испытаний готовили из соснового бруса II сорта с квадратным сечением 150x150 мм, длиной 3000 мм.

При подготовке образцов к разведочным опытам их предварительно выдерживали в бассейне с водой при комнатной температуре в течение 5-50 дней с целью придания различной влажности. После этого извлеченные из бассейна образцы выдерживали в помещении с целью выравнивания влажности в течение 2-3 суток. Далее, после контроля средней влажности образцов при помощи влагомера УЭБИВ-2, образцы помещали в неотопливаемый пандус, где под воздействием отрицательной температуры воздуха образцы находились в течение 2-4 дней, в зависимости от температуры воздуха (контролировалась термометром). При проведении разведочных опытов температура образцов принималась равной средней температуре окружающего их воздуха за предшествующие испытаниям 4-5 часов.

Исследование энергоемкости поперечного пиления проводили с использованием экспериментального стенда для сравнительных испытаний пильных цепей [2], удельную работу пиления k определяли непосредственно на основании показаний ваттметра с учетом рекомендаций [3] и результатов [4, 5], позволяющих рассчитать полезную работу при пилении. При проведении исследований использовалась пильная цепь 3/8".

При проведении разведочных опытов было исследовано 27 образцов бруса, число распилов каждого образца (т. е. число наблюдений n) составляло 15.

Время испытания одного образца не превышало 1,5-2 минут, поэтому возможным оттаиванием образцов в ходе опыта пренебрегли.

Образцы, использованные при проведении полного факторного эксперимента, подготавливали по сходной с образцами для разведочных опытов методике, с тем отличием, что на стадии вымачивания проводился контроль прироста массы образцов весовым методом, таким образом, после нескольких циклов вымачивания образцы приобретали влажность, близкую к заданной. После этого влажность образцов контролировали способом, аналогичным описанному выше. Для придания образцам заданной температуры их выдерживали при температуре, колеблющейся на величину не более 2 °С от требуемой для опыта в течение 4-5 часов (без учета прошедшего до этого времени выдержки на морозе).

Результаты испытаний обрабатывали при помощи пакета программ Microsoft Excel 2013.

Результаты исследований. Результаты разведочных опытов проверяли на наличие anomalно отклоняющихся значений по условию [5]:

$$\frac{k_{ji} - \bar{k}_j}{s_j} \leq [t], \quad (1)$$

где индекс j соответствует номеру опыта, i – номеру наблюдения, k_{ij} – наблюдаемое значение измеряемой величины, \bar{k}_j – среднее значение измеряемой величины в опыте (при определенных значениях влажности древесины W и абсолютного значения отрицательной температуры T), s_j – стандартное отклонение измеряемой величины в опыте, $[t]$ – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = n - 1$.

При нарушении условия (1) результат измерения выбраковывали.

Достаточное число опытов вычисляли по формуле [6]:

$$[n_j] = \frac{t^2 v_j^2}{p_j^2}, \quad (2)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при $f = n_j' - 1$ (n_j' – число наблюдений после выбраковки anomalных значений), v_j – коэффициент вариации, p_j – показатель точности. При вычислении v_i и p_i использовали следующие формулы [6]:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{y}_j}, \quad (3)$$

$$p_i = \frac{m_j}{\bar{y}_j}, \quad (4)$$

где m_j – среднее абсолютное отклонение.

Основные статистические характеристики результатов разведочных опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики по результатам обработки данных разведочных опытов

$W, \%$	$T, ^\circ C$	$\bar{k},$ МДж/м ³	m	s	$v, \%$	$p, \%$	$[n]$
20	0	18,9983	0,2548	0,324	1,71	1,34	8
134	23	22,803	0,608	0,7672	3,36	2,67	8
147	11	35,7928	0,9785	1,1456	3,2	2,73	7
21	16	30,6743	0,9088	1,0769	3,51	2,96	7
160	19	28,4415	0,7568	0,8965	3,15	2,66	7
124	27	29,7985	1,09	1,2074	4,05	3,66	6
171	18	30,6077	0,5138	0,6559	2,14	1,68	8
92	23	33,5522	1,191	1,3882	4,14	3,55	7
79	23	26,4959	0,7765	0,9601	3,62	2,93	8
109	12	47,039	1,3868	1,6006	3,4	2,95	7
110	5	21,6629	0,7511	0,8724	4,03	3,47	7
58	11	22,6899	0,6172	0,769	3,39	2,72	8
101	15	31,1284	0,7726	0,9478	3,04	2,48	7
160	23	30,3924	0,8904	1,0749	3,54	2,93	7
141	12	46,9219	1,3645	1,5361	3,27	2,91	6
135	21	32,8491	0,9006	1,0505	3,2	2,74	7
98	19	31,5793	0,8847	1,0315	3,27	2,8	7
80	6	43,3774	1,3888	1,6206	3,74	3,2	7
153	5	31,8086	0,7967	1,0459	3,29	2,5	8
44	4	23,0946	0,7777	0,8928	3,87	3,37	7
53	25	20,5926	0,5551	0,6561	3,19	2,7	7
20	8	34,8429	1,0167	1,2384	3,55	2,92	7
134	0	32,6875	0,7436	0,9245	2,83	2,27	8
170	5	30,2125	0,7358	0,9457	3,13	2,44	8
30	12	21,7485	0,6006	0,7109	3,27	2,76	7
139	14	22,6387	0,7144	0,8568	3,78	3,16	7
76	1	33,2572	0,981	1,111	3,34	2,95	6

Анализ представленных в таблице данных показывает, что во всех случаях число опытов $n = 10$ будет обеспечивать удовлетворительную точность измерения затраченной на пиление мощности.

В табл. 2 представлены результаты корреляционного анализа полученных опытных данных.

Таблица 2

Коэффициент корреляции экспериментальных факторов

	W	T	k
W	–	–0.0988	0.4665
T	–0.0988	–	0.7795
k	0.4665	0.7795	–

Оценка значимости коэффициента корреляции при взаимном влиянии температуры и влажности показывает, что между влажностью W и удельной работой резания k при пилении существует тесная связь, при этом с увеличением влажности работа при пилении увеличивается ($r^2 = 0,4665$); то же самое справедливо и для отрицательной температуры T : с увеличением значения отрицательной температуры работа также увеличивается ($r^2 = 0,7795$).

При этом нужно отметить, что линейная модель в виде:

$$k = a_0 + a_1W + a_2T = 17,8155 + 0,0201649W + 0,147039T \quad (5)$$

описывает опытные данные, на наш взгляд, недостаточно точно ($R^2 = 0,84$), поэтому при проведении полного факторного эксперимента следует планировать

опыты так, чтобы обеспечить возможность получения модели в виде:

$$k = a_0 + a_1W + a_2W \cdot T + a_3T. \quad (6)$$

С учетом требования о ненасыщенности плана эксперимента (число опытов N должно быть больше числа коэффициентов в модели P , $N > P$) необходим трехуровневый эксперимент.

Таким образом, факторы при проведении полного факторного эксперимента следует принять в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Основные уровни факторов при проведении полного факторного эксперимента

Фактор	Ед. изм.	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень
W	%	20	100	180
T	$^{\circ}C$	0	15	30

Результаты полного факторного эксперимента представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты полного факторного эксперимента по исследованию влияния влажности и температуры на энергоёмкость поперечного пиления древесины сосны

W	T	k , МДж/м ³	s^2
20	0	18,7447	0,487253
20	15	23,5976	0,588276
20	30	28,3796	0,702926
100	0	20,4892	0,152261
100	15	29,6172	1,673452
100	30	38,9686	1,860202
180	0	21,0471	0,528245
180	15	36,0165	0,71015
180	30	49,2833	2,370082

Опыты следует признать воспроизводимыми, поскольку выполняется условие [7]:

$$G_P = \frac{s_{\max}^2}{N \sum_{j=1}^N s_j^2} = 0,2612 < G_T = 0,27, \quad (7)$$

где G_T – табличное значение критерия Кохрена при числе степеней свободы выборки $f = 9$ и числе выборок $N = 9$.

Реализация полного факторного эксперимента позволила получить модель для определения удельной работы k в следующем виде:

$k = a_0 + a_1W + a_2W \cdot T + a_3T =$	(8)
--	-----

$= 18,5709 + 0,0160889W + 0,003875W \cdot T + 0,2386T$	
--	--

Проверка адекватности полученной модели осуществлялась с использованием критерия Фишера [7]:

$F_P = \frac{s_{ад}^2}{s_{восп}^2} = \frac{N \cdot n \cdot \sum_{j=1}^N (\bar{k}_j - \bar{k})^2}{(N - P) \cdot \sum_{j=1}^N s_j^2} =$ $= \frac{1,2532}{1,0081} = 1,24 < F_T = 2,20,$	(9)
--	-----

где F_T – табличное значение критерия Фишера при числе степеней свободы для меньшей дисперсии (дисперсия воспроизводимости) $f_1 = 81$ и $f_2 = 5$ для большей дисперсии (дисперсия адекватности).

Таким образом, модель (8) можно считать адекватной полученным экспериментальным данным в силу (9).

В табл. 5 представлены доверительные интервалы для коэффициентов модели (8), полученные с использованием рекомендаций [6].

Таблица 5

Доверительные интервалы для коэффициентов модели (8)

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	Значение	
			на нижней границе	на верхней границе
a_0	18,5709	0,317474	17,9398	19,202
a_1	0,0160889	0,00265795	0,010805	0,0213727
a_2	0,003875	0,000137256	0,00360246	0,00414817
a_3	0,2386	0,0163943	0,205994	0,271175

Для перехода от формулы для удельной работы резания к более привычным поправочным коэффициентам для основной удельной работы резания примем за основную удельную работу резания k_0 удельную работу при $W = 20\%$ и $T = 0^{\circ}C$, тогда из формулы (8) с использованием данных табл. 4 поправочный коэффициент на влажность и температуру определится так:

$a_{WT} = 0,983 + 0,000852 \cdot W + 0,000205 \cdot W \cdot T +$ $+ 0,0126 \cdot T.$	(10)
--	------

Номограмма на рис. 1 иллюстрирует формулу (10).

Сравним результаты расчетов с использованием полученной зависимости (10) с результатами расчетов при использовании поправочных коэффициентов, полученных без учета совместного влияния температуры и влажности. В последнем случае основную удельную работу определяют после умножения на перемноженные коэффициенты по формуле:

$$a_{WT} = 0,7866 \cdot W^{0,0736} \cdot \left(1 + 0,1T^{\frac{1}{3}} \right). \quad (11)$$

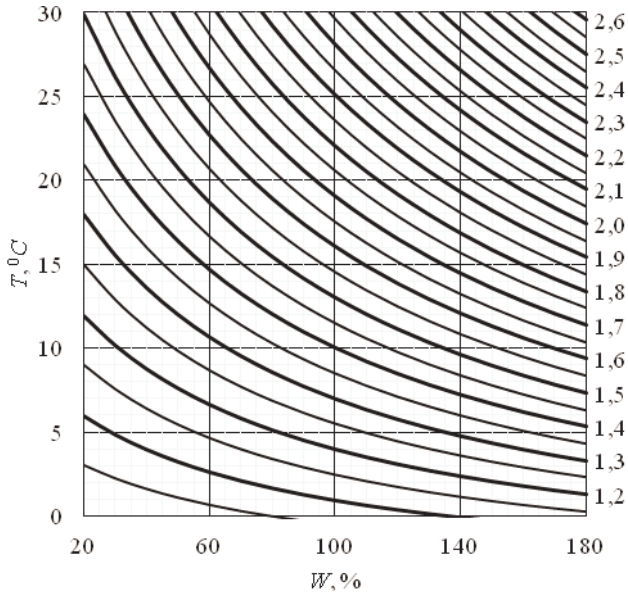


Рис. 1. Номограмма для определения поправочного коэффициента a_{WT} на совместное влияние температуры и влажности древесины сосны при расчете удельной работы резания при поперечном пилении цепями

Отклонения расчетных значений по формуле (10) от значений по формуле (11), выраженные в процентах от a_{WT} в зависимости от влажности W и отрицательной температуры T , представлены в табл. 6.

Таблица 6

Отклонение расчетных значений поправочного коэффициента с учетом совместного влияния отрицательной температуры и влажности от произведения поправочных коэффициентов, не учитывающих совместное влияние температуры и влажности на удельную работу резания при пилении древесины цепями

W, %	T, °C						
	0	5	10	15	20	25	30
20	2	-6	-2	2	7	12	17
40	-1	-7	-2	3	9	15	21
60	-3	-7	-1	6	13	21	28
80	-3	-6	2	10	18	27	35
100	-3	-5	4	14	23	33	43
120	-3	-3	7	18	29	39	50
140	-3	-1	10	22	34	46	58
160	-2	1	13	26	40	53	66
180	-1	3	16	31	45	59	74

Из данных таблицы видно, что отличие a_{WT} от a_{WT} существенно и достигает 74 %, причем с ростом отрицательной температуры и влажности отклонение возрастает непропорционально.

Ввиду этого можно заключить, что проведенные исследования показали, что пренебрежение совместным влиянием отрицательной температуры и влажности

приводит к существенным неточностям при оценке энергоемкости пиления древесины цепями; на практике при определении потребляемой на пиление мощности рекомендуется при расчете удельной работы пользоваться зависимостью (10).

В заключение определим доверительный интервал для поправочного коэффициента a_{WT} . Для этого воспользуемся формулой для определения среднего $Y(z, x)$ значения функции двух переменных $y(z, x)$ в интервале $x [x_1; x_2]$, $z [z_1; z_2]$:

$$Y(x, z) = \frac{1}{(x_2 - x_1) \cdot (z_2 - z_1)} \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} y(x, z) dx dz \quad (12)$$

В рассматриваемом случае отклонение поправочного коэффициента от расчетного значения по формуле (10) в меньшую сторону:

$$\Delta_- = \frac{1}{(180-20) \cdot (30-0)} \int_0^{30} \int_{20}^{80} 100 \frac{a_{WTmin} - a_{WT}}{a_{WT}} dWdT = -3,01\% \quad (13)$$

в большую сторону:

$$\Delta_+ = \frac{1}{(180-20) \cdot (30-0)} \int_0^{30} \int_{20}^{80} 100 \frac{a_{WTmax} - a_{WT}}{a_{WT}} dWdT = 2,79\% \quad (14)$$

где a_{WTmin} – минимальное значение поправочного коэффициента (с использованием значений коэффициентов модели на нижней границе доверительного интервала по табл. 5), a_{WTmax} – максимальное значение поправочного коэффициента (с использованием значений коэффициентов модели на верхней границе доверительного интервала по табл. 5).

С учетом результатов расчетов по формулам (13), (14) рекомендуем учитывать возможное отклонение расчетных значений поправочного коэффициента a_{WT} в пределах $\pm 3\%$.

Ввиду полученных сведений о заметном взаимном влиянии факторов W и T на удельную работу k с учетом результатов [1, 3] считаем перспективными дальнейшие исследования по изучению взаимного влияния этих факторов при пилении других пород древесины. Также в этой связи представляются целесообразными исследования взаимного влияния факторов для уточнения методики учета времени работы пилы без заточки.

Выводы

1. Оценка значимости коэффициента корреляции при взаимном влиянии температуры и влажности показала, что между влажностью W и удельной работой резания k при пилении существует тесная связь, при этом с увеличением влажности работа увеличивается ($r^2 = 0,4665$); то же самое справедливо и для отрицательной температуры T : с увеличением значения отрицательной температуры работа также увеличивается ($r^2 = 0,7795$).

2. По результатам обработки данных разведочных опытов установлено, что при определении удельной работы резания при пилении древесины сосны острой цепью число наблюдений, обеспечивающих удовлетворительную точность, не превышает 10, что следует принимать во внимание при планировании последующих исследований.

3. Экспериментальный стенд для сравнительного испытания пильных цепей обеспечивает возможность получения воспроизводимых результатов опытов при проведении исследований энергоёмкости поперечного пиления древесины цепями.

4. Совместное влияние влажности и отрицательной температуры на удельную работу пиления можно учесть использованием поправочного коэффициента a_{WT} , формула для его определения по результатам проведенных экспериментов имеет вид (10), границы доверительных интервалов для коэффициентов в формуле (10) представлены в табл. 5. Предложенная модель адекватна полученным экспериментальным данным, что подтверждается сопоставлением расчетного значения критерия Фишера ($F_p = 1,24$) с табличным.

5. С учетом результатов расчетов по формуле для среднего значения функции двух переменных (12) и данных о вариативности коэффициентов полученной модели можно заключить, что отклонение значения поправочного коэффициента a_{WT} от расчетного значения по формуле (10) находится в пределах $\pm 3\%$.

6. Пренебрежение взаимным влиянием влажности и отрицательной температуры древесины при расчетах приводит к получению заниженных (до 74 %, табл. 6) значений удельной работы резания.

7. Перспективой дальнейших исследований следует признать изучение взаимного влияния температуры и влажности при пилении других пород древесины, а также изучение влияния усло-

вий работы на поправочный коэффициент, учитывающий время работы пилы без заточки.

Литература

1. Иванов В.А., Попов А.Д. Влияние физико-химических свойств топяковой древесины на получение пиломатериалов // Вестник КрасГАУ. 2007. № 4 (19). С. 227-229.
2. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Вернер Н.Н. Стенд для сравнительных испытаний пильных цепей: пат. 74337 Рос. Федерация; опубл. 27.06.08, Бюл. № 18.
3. Кочегаров В.Г., Федяев Л.Г., Лавров И.А. Технология и машины лесосечных и лесовосстановительных работ. М.: Лесная пром-сть, 1970. 400 с.
4. Григорьев И.В., Иванов В.А., Вернер Н.Н., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Влияние качества изготовления пильных цепей на энергетическую эффективность процесса пиления // Вестн. Краснояр. гос. агр. ун-та. 2011. № 4. С. 140-144.
5. Александров И.К., Григорьев И.В., Иванов В.А., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Методика определения топливной экономичности бензиномоторных пил // Там же. 2010. № 2. С. 112-117.
6. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. Кн. 2. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.

References

11. Ivanov V.A., Popov A.D. Influence of physical and chemical properties of sunken wood on timber production // Vestnik KrasGAU. 2007. № 4 (19). P. 227-229.
2. Tihonov I.I., Grigoriev I.V., Verner N.N. Stand for comparative tests of saw chains: pat. № 74337 Rus. Federation; publ. 27.06.2008, Bul. № 18.
3. Kochegarov V.G., Fedjaev L.G., Lavrov I.A. Technology and machinery of cutting area and forest restoration work. M.: Lesnaja promyshlennost, 1970. 400 p.
4. Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Verner N.N., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. Influence of the quality of saw chains production on power effectiveness of saw process // Vestn. Krasnojarsk. gos. agr. un-ta. 2011. № 4. P. 140-144.
5. Aleksandrov I.K., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. Fuel economy technique for petrol saw // Vestn. Krasnojarsk. gos. agr. un-ta. 2010. № 2. P. 112-117.
6. Glants S. Medical and biological statistics. M.: Praktika, 1998. 459 p.
7. Dreyper N., Smit G. Applied regressive analysis: in 2 vol. Vol. 2. M.: Finansy i statistika, 1987. 351 p.