DOI: 10.12737/4521
УДК 674.093.6 – 413.82

НОВОЕ ЛЕНТОЧНОПИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕЛЬСКОГО И ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин **П. И. Попиков**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин **А. И. Максименков**
ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»
Popikovpetr@yandex.ru, mai-mlx@yandex.ru

Защитные лесные насаждения за последние более чем 20 лет пришли в такое состояние, когда требуется их реконструкция и восстановление, так как они образуют большие объемы низкокачественной мелкотоварной древесины. Для ее переработки, а также древесины от рубок ухода и санитарных рубок леса создаются малые предприятия в сельском и лесном хозяйстве, использующие достаточно крупные и дорогостоящие ленточнопильные станки различных зарубежных фирм и отечественного производства. Первые из них малодоступны для мелких хозяйств по причине их низкой покупательной способности, а станки отечественного производства не эффективны, так как они предназначены для больших объемов переработки и, как следствие, имеют высокую энергоемкость технологического процесса пиления древесины, что увеличивает себестоимость выпускаемой пилопродукции.

В ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия» разработаны новые конструкции малогабаритных ленточнопильных станков, защищенные патентами на полезные модели № 26475, № 32425, № 73267, № 89445 и на изобретение № 2443546 с обоснованными конструктивно-технологическими параметрам (рис. 1).

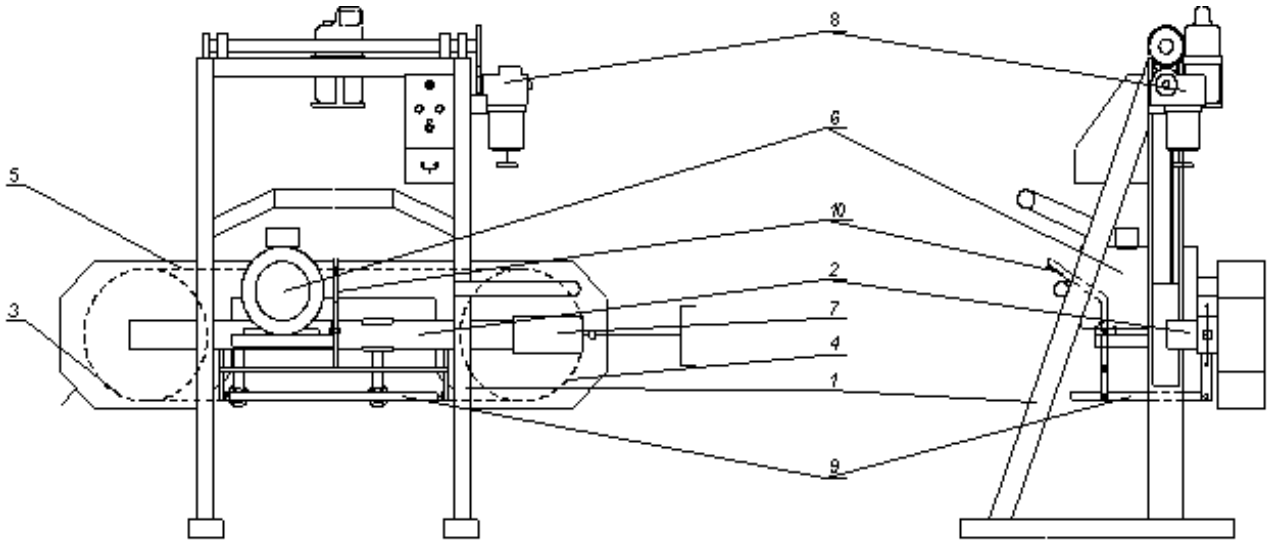

Рис. 1. Малогабаритный ленточнопильный станок

Новая конструкция горизонтального ленточнопильного станка содержит станину 1, пильный узел 2 с приводным 3 и натяжным 4 шкивами, на которые установлена пильная лента 5. На станке смонтирован привод 6 пильного узла 2. Станок снабжен гидравлическим механизмом натяжения 7 пильной ленты, приводом вертикальной регулировки 8 пильного узла 2. На пильном узле 2 с внутренней стороны установлено расклинивающее устройство 9 с подъемным механизмом 10. Пильный агрегат двигается по направляющему пути рельсового типа; распиливаемый материал закрепляется на направляющем пути с помощью специальных зажимов.

Расклинивающее устройство состоит из металлической рейки в форме клина, расположенной на одном уровне с пильной лентой, и набора круглых стержней, расположенных по наклонной прямой, подъемный механизм (рис. 2) представляет собой рычаг с сектором, который позволяет изменять высоту пропила за счет перемещения расклинивающего устройства.

Принцип действия расклинивающего устройства показан на рис. 3.

Перемещая рукоять по сектору подъемного механизма на необходимый угол, производят регулировку в вертикальной плоскости зазора, между обрабатываемым бревном и отпиливаемой пластью в зависимости от длины и породы древесины.

При использовании в конструкции станка расклинивающего элемента удается избежать следующих негативных процессов, характерных для ленточнопильных станков: повышенный нагрев пилы и увеличение напряжений в пильной ленте, ко-

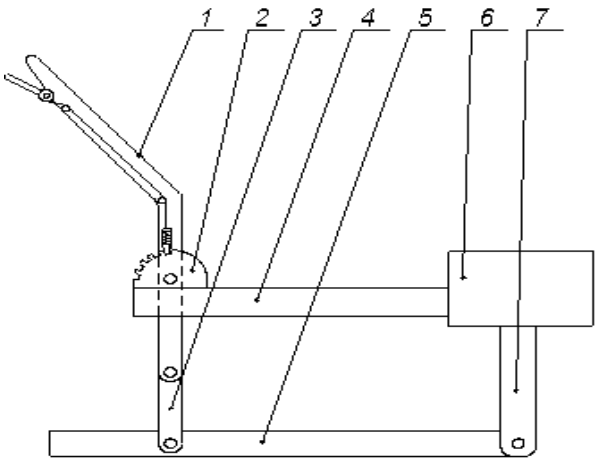

Рис. 2. Принципиальная схема расклинивающего устройства с подъемным механизмом: 1 – рычаг; 2 – сектор; 3 – опора подвижная; 4 – плита электродвигателя привода ленточной пилы; 5 – расклинивающее устройство; 6 – балка пильного узла; 7 – опора, жестко закрепленная с одного конца

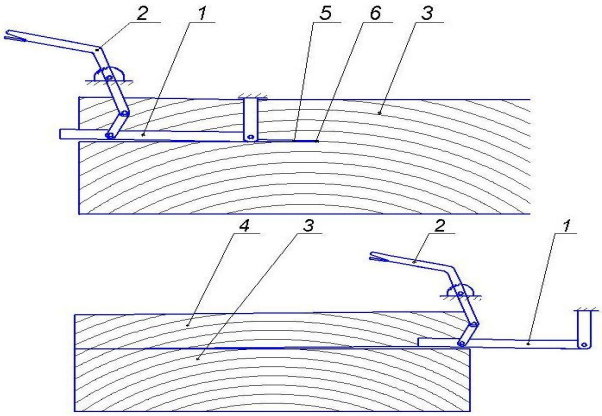

Рис. 3. Технологическая схема работы расклинивающего устройства и подъемного механизма: 1 – расклинивающее устройство; 2 – подъемный механизм; 3 – бревно; 4 – отпиленная пласть; 5 – пропил; 6 – ленточная пила

торое происходит из-за зажатия пильной ленты отпиливаемой доской в пропиле; неудовлетворительное качество пилопро-

дукции из-за вибрационного воздействия на заднюю кромку ленточной пилы отпиленной части доски, что дополнительно приводит к снижению эксплуатационного срока службы ленточной пилы.

В процессе пиления расклинивающее устройство позволяет пильной ленте находиться свободно в пропиле и тем самым уменьшает напряжение и нагрев пильной ленты, а также предотвращает биение отпиленной части по задней кромке пильной ленты, устраняя вибрационные нагрузки на пилу, тем самым повышая качество получаемой пилопродукции.

Для обоснования параметров ленточнопильного оборудования проведены исследования процесса распиловки лесоматериалов. Наиболее важными факторами, влияющими на качество получаемой пилопродукции, являются следующие факторы: скорость подачи U, м/мин (X_1); ширина пропила $в_{пр}$, мм (X_2); температура окружающей среды t ^oC (X_3). Для проведения полнофакторного эксперимента по изучению процесса качественной распиловки лесоматериалов использовался B_k – план второго порядка, с количеством факторов k = 3. Для математического описания указанного процесса использовался полином второго порядка. В качестве выходных величин приняты разнотолщинность λ и шероховатость $R_{m\ max}$ пиломатериалов [1].

В результате обработки полученных данных, определены коэффициенты уравнений регрессии и их значения. Уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс распиловки лесоматериалов твердолиственных (дуб) и хвойных (сосна) пород на малогабаритном ленточнопильном оборудовании, имеют следующий вид:

для дуба

$$\lambda_{ТЛ} = 0{,}116 + 0{,}437\ U - 0{,}00116\ B + 0{,}000263\ B\ U - 0{,}0161\ U^2 + 9{,}60\cdot10^{-7}\ B^2; \quad (1)$$

$$R^{ТЛ}_{m\max} = 45{,}62 + 180{,}9\ U - 0{,}02246\ B + 0{,}006853 B\ U - 16{,}83 U^2 + 0{,}0000482 B^2; \quad (2)$$

для сосны

$$\lambda_{ХВ} = -0{,}6099 + 1{,}103\ U - 0{,}0006134\ B + 0{,}0002896\ B\ U - 0{,}0933\ U^2 + 1{,}045\cdot10^{-6} B^2; \quad (3)$$

$$R^{ХВ}_{m\max} = 196 + 427{,}7\ U - 0{,}3038\ B - 42{,}92\ U^2 + 0{,}0001736\ B^2 + 0{,}1154\ B\ U, \quad (4)$$

где $R^{ТЛ}_{m\max}$, $R^{ХВ}_{m\max}$ – допустимая величина шероховатости пилопродукции твердолиственных и хвойных пород;

$\lambda_{ТЛ}$, $\lambda_{ХВ}$ – допустимая величина разнотолщинности пилопродукции твердолиственных и хвойных пород;

U – скорость подачи;

B – ширина пропила.

Численные значения скорости подачи для различной ширины пропила, полученные с использованием (1) и (3), представлены в табл. 1, 2.

Из табл. 1 видно, что для изучаемых условий пиления древесины дуба при требованиях, ограничивающих разнотолщинность получаемой пилопродукции значениями λ_{max} =1, 2 мм, можно рекомендовать скорость подачи U= 2,2; 4,3 м/мин соответственно.

Из табл. 2 видно, что для изучаемых условий пиления древесины сосны при требованиях, ограничивающих разнотолщинность пилопродукции значениями λ = 2, 2,5 и 3 мм, можно рекомендовать скорость подачи U=2,5; 3,2 и 4,1 м/мин соответственно.

При этом следует заметить, что в случае, если заданы наименее строгие требования по разнотолщинности пиломатериалов сосны (например, λ = 3 мм), то допустимо существенное увеличение скорости подачи при уменьшении ширины пропила.

Численные значения скорости подачи для различной ширины пропила, полученные с использованием (2) и (4) представлены в табл. 3, 4.

Таблица 1

Расчетные значения максимальной скорости подачи при различной ширине пропила бревен дуба для достижения разнотолщинности пилопродукции, непревышающей требований ГОСТа 25135–82

N п/п	B,мм	U_{max}, м/мин	
		λ = 1 мм	λ = 2 мм
1	100	2,32566	5,25623
2	150	2,36412	5,18126
3	200	2,3886	5,09816
4	250	2,40032	5,00805
5	300	2,4004	4,91188
6	350	2,38986	4,81043
7	400	2,36961	4,70437
8	450	2,3405	4,59427
9	500	2,30327	4,4806
10	550	2,25863	4,36376

Таблица 2

Расчетные значения максимальной скорости подачи при различной ширине пропила бревен сосны для достижения разнотолщинности пилопродукции, непревышающей требований ГОСТа 25135–82

N п/п	B,мм	U_{max}, м/мин		
		λ =1 мм	λ =2 мм	λ =2,8 мм
1	100	2,15365	3,34245	5,16088
2	150	2,21658	3,4268	5,45882
3	200	2,22945	3,43726	5,43811
4	250	2,19246	3,37446	5,14302
5	300	2,10773	3,24489	4,77184
6	350	1,97892	3,05862	4,37879
7	400	1,81066	2,82654	3,97712
8	450	1,60792	2,55855	3,57123
9	500	–	2,26278	3,16299
10	550	–	1,94557	2,7533

Таблица 3

Расчетные значения максимальной скорости подачи при различной ширине пропила бревен дуба для достижения шероховатости пилопродукции, непревышающей требований ГОСТа 7016–82

N/п	B,мм	U_{max}, м/мин		
		R_{mmax}=320 мкм	R_{mmax}=400 мкм	R_{mmax}=500 мкм
1	100	1,82954	2,57209	3,96299
2	150	1,82867	2,56833	3,94598
3	200	1,8258	2,56209	3,92461
4	250	1,82097	2,55342	3,89914
5	300	1,81419	2,54236	3,86985
6	350	1,80549	2,52896	3,83702
7	400	1,79491	2,51328	3,80093
8	450	1,78247	2,49539	3,76183
9	500	1,7682	2,47533	3,71999
10	550	1,75215	2,45318	3,67562

Таблица 4

Расчетные значения максимальной скорости подачи при различной ширине пропила бревен сосны для достижения шероховатости пилопродукции, непревышающей требований ГОСТа 7016–82

N/п	B,мм	U_{max}, м/мин		
		R_{mmax}= 400 мкм	R_{mmax}= 500 мкм	R_{mmax}= 600 мкм
1	100	2,38446	3,32582	4,52355
2	150	2,44752	3,39505	4,60575
3	200	2,45641	3,39874	4,59851
4	250	2,41184	3,33818	4,50501
5	300	2,31603	3,21716	4,33425
6	350	2,17239	3,04133	4,09829
7	400	1,9851	2,81725	3,80953
8	450	1,75873	2,55166	3,47905
9	500	–	2,2509	3,11594
10	550	–	1,92063	–

Из табл. 3 видно, что для изучаемых условий пиления древесины дуба при требованиях, ограничивающих максимальную шероховатость значениями $R_{m\ max}$= 320, 400, 500 мкм, можно рекомендовать скорость подачи U=1,7; 2,4; 3,6 м/мин соответственно.

Из табл. 4 видно, что для изучаемых

условий пиления древесины сосны при требованиях, ограничивающих максимальную шероховатость пилопродукции значениями $R_{m\ max}$= 800, 900, 1000 мкм, можно рекомендовать скорость подачи U=1,7; 2; 2,3 м/мин соответственно. Прочерки в таблице относятся к тем значениям скорости подачи, которые лежат за пределами изучаемого диапазона U.

В результате проведенных исследований было установлено, что на качество пилопродукции наибольшее влияние оказывает величина скорости подачи пильного механизма.

В процессе пиления на ленточную пилу действуют силы, стремящиеся сместить ее со шкивов. Для предотвращения сползания пилы со шкивов в полотне пилы создают начальные напряжения, а шкивы наклоняют навстречу направлению подачи распиливаемого материала. Величина внутренних напряжений должна соответствовать профилю и углу наклона шкивов. За счет этого меняется поведение пилы под нагрузкой, что отражается на ее устойчивости на шкивах и способности осуществлять процесс резания. Непрямолинейность зубьев и задней кромки существенно влияет на устойчивость и прочность ленточной пилы, недопустима общая вогнутость задней кромки (которая обусловлена внутренним напряженным состоянием полотна) из условия устойчивости пилы на шкивах [2].

Предлагается для идентификации режущего инструмента ленточнопильного станка использовать итерационный метод (последовательного приближения). Учитывая плоское сечение ленточной пилы, достаточно рассмотреть одномерный вариант.

Частота и амплитуда собственных колебаний пильной ленты в режиме холостого хода (без контакта режущего инструмента с бревном) являются функцией поперечного сечения, свободной длины ветвей пилы, силы натяжения и скорости ее движения. Для уменьшения амплитуды поперечных колебаний рабочую зону пилы ограничивают направляющими и применяют успокоительный ролик. Анализируя записи колебаний пилы можно, сделать, что частота колебаний не бывает менее 60 Гц, т.е. укладывается в звуковой диапазон частот.

Для обоснования динамических характеристик в постановке задачи для решения в первом приближении предлагается гипотеза квазистационарного состояния стоячей волны, т.е. отсутствие перемещения первой гармоники и точек покоя высших гармоник по координате $0 \le x \le L$, где L – длина пилы между точками опоры. Предложенная гипотеза позволяет сохранить однородность волнового уравнения.

В неподвижном состоянии и отсутствии внешних воздействий поперечные смещения упругой струны Ф удовлетворяют одномерному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0, \qquad (5)$$

начальным условиям:

$$\Phi(x,0) - \Phi_0(x), \left.\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right|_{t=0} = v_0(x), (0 \le x \le L). \qquad (6)$$

и краевым условиям:

$$\Phi(0, t) = \Phi_a(t), \ \Phi(L, t) = \Phi_b(t). \qquad (7)$$

где с – коэффициент, зависящий от упругих и инерционных свойств струны;

t – время;

$\Phi_o(x)$ и v_o – начальное поперечное

смещение струны и начальная скорость движения в поперечном направлении точки с координатой x.

В первом приближении будем рассматривать частный случай, когда края струны ($x = 0$, $x = L$) неподвижны. Тогда краевые условия можно записать следующим образом

$$\Phi_a(t) = \Phi_b(t) = 0. \qquad (8)$$

В этом случае уравнение колебания струны решается методом разделения переменных (методом Фурье). Решение дифференциального уравнения представляет собой сумму частных решений, т.е. сумму гармонических стоячих волн, возбужденных заданными начальными условиями

$$\Phi(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{pmatrix} a_n \cos\frac{n\pi c}{L}t + \\ +b_n \sin\frac{n\pi c}{L}t \end{pmatrix} \sin\frac{n\pi x}{L}, \qquad (9)$$

где n – порядок гармоники;

коэффициенты a_n и b_n определяются из начальных условий, по формулам Фурье:

$$a_n = \frac{2}{L}\int_0^L \Phi_0(x)\sin\frac{n\pi x}{L}dx, \qquad (10)$$

где (n = 0, 1, 2…);

$$b_n = \frac{2}{n\pi c}\int_0^L v_0(x)\sin\frac{n\pi x}{L}dx, \qquad (11)$$

где (n = 0, 1, 2…).

Во втором приближении необходимо учесть возмущающие воздействия при движении ленточной пилы, которые оказывает ее стык, образованный при сварке начала и конца пилы. Ударяясь о шкив, он оказывает на систему ступенчатое воздействие, которое необходимо учесть в краевых условиях (7). На данном этапе предлагается не рассматривать быстротечные переходные процессы, вызванные столкновением стыка ленточной пилы со шкивом. Тогда в волновом уравнении (5) не появится правая часть (неоднородность) и решение уравнения (9) не потребуется дополнять частным решением нового неоднородного уравнения.

В третьем приближении осуществляется переход от рассматриваемого до настоящего момента режима холостого хода к рабочему режиму. Для этого необходимо учесть контакт ленточной пилы с ограничительными упорами, успокоительным роликом и распиливаемым пиломатериалом, что приведет к «членению» режимов движения ленточной пилы по принципу кусочной аппроксимации.

От отечественных и зарубежных аналогов подобного класса предлагаемые станки отличаются упрощенным и надежным узлом натяжения пилы, состоящего из натяжного шкива, соединенного осью с кареткой, перемещаемой вдоль неподвижной направляющей. Соединение между кареткой и направляющей имеет форму «ласточкиного хвоста», а натяжная пружина выполнена тарированной для различных скоростей пиления и усилий резания. Узел «ласточкин хвост» и тарированная пружина служат одновременно натяжителем и компенсатором линейного расширения ленточной пилы (патенты на полезные модели № 26475 и № 32425).

Станки не имеют каких-либо сложных электронных схем, затрудняющих ремонт и повышающих его стоимость. Конструкция ходовых колес и малый вес обеспечивают легкое перемещение механизма пиления оператором. Станки полностью адаптированы к российским условиям, имеют прочную конструкцию, малые габа-

ритные размеры, низкую энергоемкость технологического процесса.

Разработанные конструкции малогабаритных ленточнопильных станков могут обеспечить повышение качества пилопродукции от рубок ухода и реконструкции лесных насаждений.

Библиографический список

1. Свиридов, Л. Т. Ленточнопильное оборудование для лесоматериалов: теория, конструкция, расчет [Текст] : монография / Л. Т. Свиридов, А. И. Макси-менков; ВГЛТА. – Воронеж, 2007. – 325 с.

2. Попиков, П. И. О динамике режущего инструмента в ленточнопильном станке [Текст] / П. И. Попиков, С. А. Чепелев, К. А. Чернышков // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления : межвуз. сб. науч. тр. / ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – Вып. 15. – 175 с.

DOI: 10.12737/4522
УДК 004.94-674.047

MATHEMATICAL MODELING OF TIMBER ELASTIC-VISCOUS-PLASTIC DEFORMATION IN THE DRYING PROCESS

head of the department of computer science and modelling of technological processes, doctor of Sc., professor **Ya. I. Sokolowskyy**
philosophy doctor, teacher of the department of computer science and modelling of technological processes **I. N. Kroshnyy**
postgraduate **Yu. V. Prusak**
National University of Forestry and Wood-Technology of Ukraine
sokolowskyy@ukr.net, kroshny.igor@gmail.com, prsk@ukr.net

Actuality of theme. During drying of hygroscopic capillary-porous bodies irreversible physical processes arise up and cooperate between itself, there are phase transitions, which predetermine changes in physical mechanical properties of materials in general, initial form of body, formation of cracks in it and its possible destruction. These phenomena which take place in the conditions of high changeability of structural and physical properties of hygroscopic materials are basic restrictive factors for development of effective methods of management the capillary-porous materials drying processes. The improvement of existing and creation of new resources saving technologies of drying is closely related to the detailed study deformation-relaxation and heat-and-mass transfer processes in capillary-porous materials. Applying only experimental methods of the deformation run and heat-and-mass transfer research in such systems is connected with considerable financial expenses and technical difficulties. Therefore there is an objective necessity of development of two-dimensional mathematical models and effective programmatic-algorithmic facilities of their