

УДК 630\*658.511, 630\*658.512, 519.85, 630\*656.073, 630\*37

**ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ**

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, НИИ леса Финляндии (Йоенсуу, Финляндия)  
*yuri.gerasimov@metla.fi*

**АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*a\_sokolov@psu.karelia.ru*

**ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ**

доктор технических наук, профессор, проректор по НИР, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*siounev@psu.karelia.ru*

**ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СУХАНОВ**

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*yurii\_ptz@bk.ru*

**АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ДРЕВЕСИНЫ В БИОЭНЕРГЕТИКЕ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ\***

Описываются результаты апробации компьютерной системы поддержки принятия оптимальных решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике.

Ключевые слова: древесная биомасса, лесосечные отходы, лесосечные работы, логистика, ГИС-технологии

Россия обладает огромным потенциалом для производства биотоплива из древесного сырья. Однако лесная биоэнергетика у нас только начинает развиваться. В этой связи особо актуальными становятся вопросы выбора технологических решений по заготовке и переработке топливной древесины, которые были бы наиболее эффективными в условиях России.

Для решения этой задачи ПетрГУ в сотрудничестве с НИИ леса Финляндии уже несколько лет ведет работы по созданию компьютерной системы поддержки принятия оптимальных решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике [2], [6], [8], [14]. Подробное теоретическое описание этой системы, заложенных в ее основу методик, применяемых подходов и средств содержится в работах [4], [5], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [16].

Компьютерная система поддержки принятия решений позволяет с помощью имитационного моделирования определять эффективность тех или иных технологических решений. При этом учитываются практически все наиболее влияющие факторы, что позволяет найти наиболее рациональный способ организации работ, состав и характеристики используемых машин и оборудования.

Методика учитывает также и экологические последствия изыятия дополнительных объемов

древесины из леса путем расчета для каждой конкретной делянки допустимых объемов лесосечных отходов, которые станут сырьем для производства топлива. Это необходимо для недопущения деградации лесных экосистем.

В статье [1] описаны результаты апробации разработанной системы на примере одного из лесозаготовительных предприятий, имеющего лесосырьевую базу в Республике Карелия. В этой статье приводятся технико-технологические выводы по результатам сравнения нескольких вариантов технологий заготовки и переработки топливной древесины в условиях рассматриваемого предприятия.

Настоящая статья будет посвящена технико-экономической интерпретации полученных результатов. Основной целью исследования было определить вариант технологии производства древесного топлива, наиболее подходящий для условий, в которых работает рассматриваемое лесозаготовительное предприятие. Для увеличения выхода топлива было предложено, наряду с дровяной древесиной, использовать для его производства также и лесосечные отходы.

Для достижения поставленной цели были выбраны четыре часто встречающихся у нас в стране и за рубежом варианта технологии заготовки топливной древесины и для каждого из них осуществлено имитационное моделирование с помощью компьютерной модели [1].

Информация по этим четырем технологиям, а также по используемому оборудованию содержится в табл. 1.

Технология № 1 базируется на применении одного комплекса машин, состоящего из передвижной рубительной машины (ПРМ) производительностью 85 насыпных куб. м щепы в час и двух автомобилей-щеповозов вместимостью 90 насыпных куб. м щепы. Количество задействованных на каждой делянке автомобилей-щеповозов определяется системой в зависимости от объемов сырья и расстояния транспортировки. Для этого решается оптимизационная задача.

Технология № 2 использует два комплекса, идентичных комплексу в технологии № 1. Эта технология отличается тем, что, наряду с лесосечными отходами, вся дровяная древесина перерабатывается передвижной рубительной машиной в топливную щепу прямо на делянках. Таким образом, в данном случае всем 8 потребителям доставляется из леса только готовая щепка.

Технология № 3 заключается в вывозке не щепы, а насыпных лесосечных отходов для дальнейшей переработки непосредственно у потребителей. Все потребители в этом случае должны иметь СРМ. Используется один комплекс из двух автомобилей для перевозки лесосечных отходов вместимостью 90 насыпных куб. м отходов.

Технология № 4 использует самоходный пакетировщик лесосечных отходов, производящий пакеты, которые в дальнейшем транспортируются потребителям обычными автомобилями-сортиментовозами.

Для осуществления моделирования в систему была введена детальная информация по функционированию рассматриваемого лесозаготовительного предприятия в течение полугодия:

- Дорожная сеть с указанием скорости движения по отдельным участкам дорог.
- Местоположение и характеристики 188 делянок, включая потенциальные объемы каждого вида продукции на каждой из них.

- Местоположение и характеристики 13 пунктов доставки, включая помесечные планы поставок по каждому виду продукции.
- Характеристики 6 используемых лесозаготовительных комплексов типа «харвестер – форвардер», включая их достигнутую производительность с учетом применяемых на рассматриваемом предприятии несплошных рубок.
- Характеристики 4 автомобилей-сортиментовозов, включая их места базирования в двух гаражах.

На предварительном этапе с помощью системы были определены:

- Оптимальный заготовительный план, то есть распределение делянок по заготовительным комплексам и порядок их заготовки.
- Оптимальные маршруты и время движения от каждой точки (потребитель, делянка, гараж) до всех остальных.
- Доступные объемы лесосечных отходов для каждой делянки с учетом лесорастительных условий, сезона заготовки, технологических и эколого-лесоводственных ограничений.

В результате моделирования для каждого варианта технологии были получены детальные данные по работе каждого комплекса на заготовке деловой и топливной древесины, а также автомобилей на вывозке древесины для каждого дня рассматриваемого полугодия. Они были проанализированы в работе [1].

Для того чтобы выполнить анализ рассматриваемых технологий с экономической точки зрения, был сделан сравнительный расчет прямых производственных затрат [3]. Исходные данные и результаты этого расчета приведены в табл. 2.

Дополнительные и прочие расходы не принимались во внимание, так как целью было именно сравнение технологий между собой при прочих равных условиях, имеющих место на рассматриваемом предприятии. Поэтому реальная себестоимость может отличаться от рассчитанной, но соотношение ее значений для разных технологий должно сохраниться.

Таблица 1

Рассматриваемые технологии

Технология	Комплекс машин	Машина	Количество	Производительность
1. Переработка отходов	№ 1	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м <sup>3</sup> /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м <sup>3</sup> /рейс
2. Переработка отходов и дров	№ 1	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м <sup>3</sup> /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м <sup>3</sup> /рейс
	№ 2	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м <sup>3</sup> /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м <sup>3</sup> /рейс
3. Вывозка отходов	№ 1	Автомобиль для перевозки лесосечных отходов	2	90 насыпн. м <sup>3</sup> /рейс
4. Пакетирование	№ 1	Пакетировщик лесосечных отходов	1	60 насыпн. м <sup>3</sup> /ч

Таблица 2

## Сравнительный расчет затрат

Машина	Технология										
	№ 1			№ 2			№ 3		№ 4		
	Форвардер	Рубительная машина	Щеповоз	Форвардер	Рубительная машина	Щеповоз	Форвардер	Автомобиль для перевозки лесосечных отходов	Форвардер	Пакетировщик	Сортиментовоз
Стоимость машины, тыс. руб.	8500	8000	11500	8500	8000	11 500	8500	11 500	8500	18 000	–
Число машин	1	1	2	1	2	4	1	2	1	1	–
Расход топлива, л/ч	10	37	–	10	37	–	10	–	10	27	–
Расход топлива, л/100 км	–	–	23	–	–	23	–	23	–	–	23
Цена топлива, руб./л	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Отработано часов по результатам моделирования	3564	379,9	1115,3	2946,8	1048,4	2813,6	3513,6	1556,1	2201,1	313	837,3
Пробег по результатам моделирования, км	–	–	40 290	–	–	92 085		50 674	–	–	14 103
Норма амортизационных отчислений, %	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Норма расходов на ТО и Р, % от стоимости машины	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Норма оплаты труда, руб./ч	180	180	200	180	180	200	180	200	180	200	200
Общая выработка по результатам моделирования, пл. куб. м	12 474			34 425			12 297,6		13 757		
Условно-постоянные затраты, тыс. руб.											
Амортизационные отчисления	1402,5	1320	3795	1402,5	2640	7590	1402,5	3795	1402,5	2970	0
Переменные затраты, тыс. руб.											
Расходы на ГСМ	1069,2	421,7	278	884	1163,7	635,4	1054,1	349,6	660,3	253,5	97,3
Расходы на ТО и Р	255	240	690	255	480	1380	255	690	255	540	0
Оплата труда	641,5	68,4	223,1	530,4	188,7	562,7	632,4	311,2	396,2	62,6	167,5
Социальные отчисления	192,5	20,5	66,9	159,1	56,6	168,8	189,7	93,4	118,8	18,8	50,2
Итого переменных затрат	2158,1	750,6	1258	1828,6	1889	2746,9	2131,3	1444,2	1430,4	874,9	315
Всего затрат, тыс. руб.	3560,7	2070,6	5053	3231,1	4529	10 336,9	3533,8	5239,2	2832,9	3844,9	315
Итого затрат, тыс. руб.	10684,2			18097,1			8773		6992,8		
Себестоимость продукции, руб./куб. м	857			526			713		508		

В технологии № 4 не учитываются амортизационные отчисления на сортиментовоз, так как в нашем случае вывозка пакетов отходов осуществляется наряду с вывозкой деловых и дровяных сортиментов теми же автомобилями и привлечение дополнительного автомобиля не требуется. Отработанные часы и пробег в данном случае – это разность общих отработанных

часов и общего пробега на вывозке для технологий № 4 и № 1.

В результате в целом наименьшее значение себестоимости показала технология № 4, несмотря на весьма значительную стоимость машины пакетировщика. Таким образом, среди технологий, где конечным продуктом выступают лесосечные отходы, эта технология является наи-

лучшей, технология № 3 может быть исключена из дальнейшего рассмотрения.

Напрямую сравнивать технологии № 1 и № 2 с технологией № 4 нельзя, так как цена на щепу будет заведомо выше цены на лесосечные отходы. Поэтому сначала необходимо определиться с лидером среди двух технологий, где конечным продуктом является щепа, то есть среди технологий № 1 и № 2.

По значению себестоимости технология № 2 существенно опережает технологию № 1. Однако имеются факторы, которые не дают сразу отдать предпочтение технологии № 2. Эти факторы связаны с дровяной древесиной. Действительно, при использовании технологии № 1 предприятие продает потребителям круглую дровяную древесину, а при использовании технологии № 2 она полностью перерабатывается в щепу. Поэтому при сравнении этих двух технологий необходимо учесть экономический эффект от продажи дровяной древесины в случае использования технологии № 1. Лучшим способом было бы для каждого варианта рассчитать потенциальную прибыль и по ее значению выбрать лучшую технологию. Однако для этого расчета у нас не хватает данных в части себестоимости заготовки дровяной древесины. Чтобы упростить задачу, было предложено рассчитать разницу прибыли для этих двух технологий:

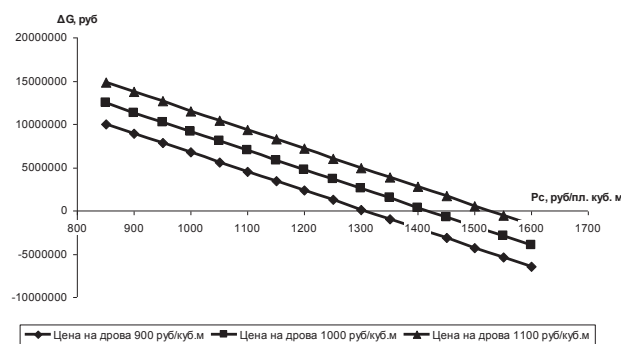
$$\Delta G = G_1 - G_2 = (P_c \cdot V_{c1} + P_f \cdot V_f - C_{c1} \cdot V_{c1} - C_{f1} \cdot V_f) - (P_c \cdot V_{c2} - C_{c2} \cdot V_{c2} - C_{f1} \cdot V_f) = (P_c - C_{c1}) \cdot V_{c1} + (P_f - C_{f1}) \cdot V_f - (P_c - C_{c2}) \cdot V_{c2},$$

где  $G_1$  – прибыль при использовании технологии № 1;  $G_2$  – прибыль при использовании технологии № 2;  $P_c$  – цена на щепу с доставкой;  $V_{c1}$  – объем щепы, получаемый при использовании технологии № 1;  $P_f$  – цена на дровяную древесину с доставкой;  $V_f$  – заготавливаемый объем дровяной древесины;  $C_{c1}$  – себестоимость получения щепы при использовании технологии № 1;  $C_{f1}$  – себестоимость заготовки дровяной древесины;  $C_{c2}$  – себестоимость транспортировки дровяной древесины;  $V_{c2}$  – объем щепы, получаемый при использовании технологии № 2;  $C_{c2}$  – себестоимость получения щепы при использовании технологии № 2.

При выводе этой зависимости себестоимость заготовки дровяной древесины  $C_{f1}$  сокращается, что избавляет нас от лишних расчетов. Полученная по результатам имитационного моделирования зависимость величины  $\Delta G$  от уровня цен на щепу и дровяную древесину показана на рисунке.

На графике (см. рисунок), если точка, соответствующая текущим ценам на щепу и дровяную древесину, оказывается выше оси абсцисс,

это означает, что в данных условиях предпочтительнее технология № 1. Если эта точка окажется ниже оси абсцисс – выгоднее использовать технологию № 2.



Зависимость величины  $\Delta G$  от уровня цен на щепу и дровяную древесину

В нашем случае технология № 2 будет выгодной, если при цене на дровяную древесину в 900 руб./куб. м щепа будет стоить дороже 1300 руб. за плотный кубометр. При цене на дровяную древесину в 1000 руб. щепа должна стоить уже больше 1400 руб. и т. д.

На сегодняшний день цена на дровяную древесину, как правило, выше цены на топливную щепу. Поэтому можно сделать вывод, что в рассматриваемых условиях при наличии спроса на дровяную древесину предпочтительнее использовать технологию № 1.

Для того чтобы сделать окончательный выбор между технологиями № 1 и № 4, необходимо руководствоваться уровнем цен на щепу и лесосечные отходы. В нашем случае, если цена на щепу окажется выше цены на лесосечные отходы более чем на 349 руб./пл. куб. м, будет выгоднее использовать технологию № 1. Если разница цен будет меньше этой величины, большую эффективность покажет технология № 4.

Таким образом, проведенное исследование позволяет заключить, что в условиях рассматриваемого лесозаготовительного предприятия для производства топливной древесины целесообразно использовать один комплекс машин, включающий в себя форвардер, рубительную машину и два автомобиля-щеповоза. Дровяную древесину лучше перевозить потребителям в круглом виде.

В случае, если разность цен топливной щепы и лесосечных отходов в плотной мере с учетом доставки будет меньше 349 руб. за куб. м, целесообразным становится использование самоходного пакетировщика лесосечных отходов с вывозкой пакетов с помощью имеющегося парка автомобилей-сортиментовозов.

\* Работа выполнена в соответствии с Программой стратегического развития (ПСР) Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 гг. в рамках проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», финансируемого Европейским союзом по программе приграничного сотрудничества KareliaENPI.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю., Давыдов Г. А., Катаров В. К., Кильпелайнен С. А., Перский С. Н., Рожин Д. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С. Апробация системы поддержки принятия решений в лесной биоэнергетике: технико-технологическое обоснование // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 8 (82). С. 564–588.
2. Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С. Основные факторы планирования производства древесного топлива из древесной биомассы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 73–76.
3. Герасимов Ю. Ю., Сибиряков К. Н., Мошков С. Л., Вяльккю Э., Карвинен С. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин. Йоэнсуу: Изд-во НИИ леса Финляндии, 2009. 48 с.
4. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Методика принятия решений по оптимизации лесозаготовительных планов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 5 (69). С. 320–334.
5. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П. Алгоритмы определения оптимальных маршрутов на графах для решения задач управления системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. Вып. 8. С. 30–33.
6. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П., Селиверстов А. А., Катаров В. К., Суханов Ю. В., Рожин Д. В., Тюрлик И. И., Фирсов М. В. Рациональное использование древесины и лесосечных отходов в биоэнергетике: оценка потенциалов и технологических подходов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 9 (73). С. 576–587.
7. Селиверстов А. А., Герасимов Ю. Ю., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С., Катаров В. К. Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 25–27.
8. Селиверстов А. А., Сюнёв В. С., Герасимов Ю. Ю., Суханов Ю. В., Катаров В. К. Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 25–27.
9. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Алгоритм синтеза оптимального транспортного плана в системе поддержки принятия решений для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. Вып. 8. С. 144–148.
10. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Геоинформационная система для решения оптимизационной задачи транспортной логистики круглых лесоматериалов // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». 2009. № 3. С. 78–85.
11. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А. Методика оптимизации парка автомобилей на вывозке сортиментов на основе имитационного моделирования в среде ГИС // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 11(105). С. 72–77.
12. Суханов Ю. В., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Соколов А. П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(12). С. 101–107.
13. Суханов Ю. В., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Сюнёв В. С. Системы машин для производства топливной щепы из древесной биомассы по технологии заготовки деревьями // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 1. С. 7–13.
14. Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy. 2011. Vol. 35. P. 1655–1662.
15. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P., Karjalainen T. GIS-based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. Vol. 29. Issue 2. P. 163–175.
16. Gerasimov Y., Sokolov A., Siounev V. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 3 (11). P. 118–124.