

## Определение упругих свойств слоя лесосечных отходов

О. Н. Галактионов<sup>1</sup>  
П. В. Безлатный

*Петрозаводский государственный университет*

### АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты исследования упругих свойств слоя лесосечных отходов, предназначенных для повышения несущей способности трелевочных волоков. Дано описание изменения модуля упругости слоя лесосечных отходов при сжатии.

**Ключевые слова:** лесосечные отходы, прочность, трелевочный волок.

### SUMMARY

The results of the study of elastic properties of the layer of logging residues for improving the carrying capacity skid trail.

**Keywords:** logging residues, durability, skid trail.

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Использование отходов лесозаготовок на лесосеке в первую очередь направлено на укрепление волоков, что отражается на направленности исследований и публикаций [2, 3, 5]. Актуальными являются и вопросы исследования экологического воздействия лесосечных отходов на трелевочные волока и лес как систему в целом [1, 3]. Значительный ряд исследований направлен на изучение действия движителя на лесной грунт [4]. Белорусскими исследователями проведен ряд измерений упругих свойств сучьев и ветвей в условиях, приблизительно соответствующих их использованию на волоках [6].

На наш взгляд, для точной оценки комплексного влияния отходов лесозаготовок на параметры движения лесозаготовительных машин, и как следствие, на экологическую обстановку, необходимо определить упругие свойства слоя лесосечных отходов, расположенных непосредственно на грунте.

Ранее предпринимались попытки провести испытания в лабораторных условиях. Отходы лесозаготовок укладывались на две опоры, в средней части прикладывалась нагрузка и фиксировалась стрела прогиба. В реальных условиях отходы лесозаготовок располагаются непосредственно на грунте и картина взаимодействия нагрузки и слоя отходов лесозаготовок меняется.

Основное отличие, на наш взгляд, состоит в большом количестве взаимодействующих элементов лесосечных отходов и, следовательно, более сложном характере их взаимодействия.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Испытания проведены непосредственно на лесосеке. Для измерений использовались свежие и подсушенные лесосечные отходы, подсортировки по породам не проводилось. Подготовка грузов включает наполнение гибких емкостей песком, их взвешивание, нумерацию. Масса грузов 20 кг.

Лесосечные отходы формируют в кучу, фиксируют ее размеры – два перпендикулярных диаметра и высоту. Измерения проводят по методу «полного ящика». Лесосечные отходы взвешивают, что позволяет уточнить коэффициент полндревесности.

По краям кучи устанавливаются стойки, на которых на определенной высоте (высота установки зависит от предполагаемой высоты объекта измерения) располагается контрольная рейка, относительно которой измеряется деформация кучи лесосечных отходов. На вершину кучи лесосечных отходов устанавливается опорная площадка известной площади, на которую затем последовательно добавляют грузы. После добавления очередного груза фиксируют текущую высоту деформированной кучи лесосечных отходов. Грузы добавляют до тех пор, пока куча лесосечных отходов сохраняет устойчивость.

Нагружение ведут с максимально возможной скоростью для избегания влияния релаксации напряжений, что позволяет получить однородные данные измерений деформации.

После того как деформация перестанет увеличиваться, грузы снимают, кучи лесосечных отходов перекладывают и испытания производят еще раз. Для одной кучи лесосечных отходов измерения проводят не менее 10 раз.

Определение минимального объема выборки необходимо для получения точного описания зависимости деформации и соответственно модуля упругости от нагрузки измерения для каждой кучи отходов лесозаготовок необходимо проводить несколько раз.

Минимальное количество измерений определено, исходя из результатов измерения деформации и расчета модуля упругости, для одной кучи отходов лесозаготовок после нескольких перекладок. Часть полученных результатов приведена в таблице 1. Коэффициент вариации измерений составил  $v = 27,404$ , необходимое число измерений при 95 % достоверности  $n = 2$ .

Обработка полученных данных сводится к построению регрессионной зависимости, описывающей изменение модуля упругости в зависимости от величины нагружения и деформации.

<sup>1</sup> Авторы – соответственно доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса и сотрудник отдела ИПРИПИ.

Таблица 1  
Определение числа реализаций эксперимента

Нагрузка, Н	Деформация, мм	Модуль упругости, Па	Стат. характеристики выборки	
			Характеристика	Величина
0	120	–	Среднее	1068,63
60	80	673.41	Дисперсия	85764,4
140	70	1103.94	Ст. отклонение	292,86
200	60	1364.72	Козф. вариации	27,40
0	100	–	Уровень значимости	95
60	82	747.19	Минимальное число	2
140	75	1205.67		
200	58	1316.84		

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Часть результатов измерений приведена в таблице 2. В ней содержатся данные об исходных размерах куч лесосечных отходов, о текущей нагрузке, высоте кучи при нагрузке, площади поперечного сечения кучи, отношения деформации к исходной высоте кучи и экспериментальной величине модуля.

Для выбора окончательного вида зависимости было проверено несколько их видов – простая линейная, полиномиальная, множественная с преобразованием аргумента. Наилучшие показатели точности имеет следующая регрессионная зависимость (характеристики приведены в таблице 2, вид описываемой поверхности в пределах проведенных измерений – на рисунке 1):

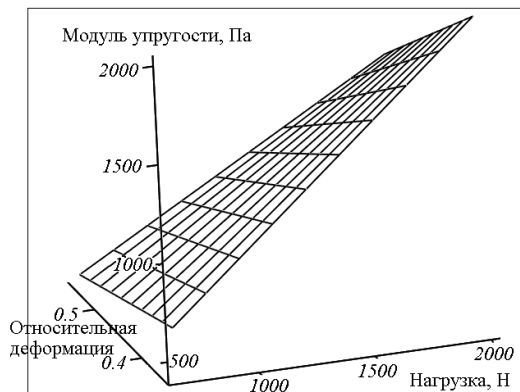


Рис. 1. Модуль упругости отходов лесозаготовок в зависимости от нагрузки и относительной деформации

$$E = 1.71192 \cdot G \cdot \varepsilon + 1.60298 \cdot G, \quad (1)$$

где  $G$  – нагрузка,  $H$ ;  
 $\varepsilon$  – относительная деформация.

Недостатком формулы (1) является необходимость фиксации двух параметров: нагрузки и деформации, поэтому в полевых условиях удобнее пользоваться

формулами приведенными ниже.

Таблица 2  
Характеристики регрессионного уравнения

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	T-стат.		p-знач.
Нагрузка	1,60	0,04	32,95		0,00
$\Pi^* \varepsilon$	-1,71	0,09	-18,07		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	$\Sigma x^2$	Степень свободы	Средний квадрат	F-крит.	p-знач.
Модель	7,27E6	2	3,63E6	5132,65	0,00
Остатки	41,02	3	683,66	–	–
Общий	7,28E6	8	–	–	–
$R^2$				99,9437	
$R^2$ корр. на степень свободы				99,93	
Ст. ошибка оценивания				17,19	
Ср. абсолютная ошибка				2,66	

Выражение для определения модуля упругости, имеющее аргументом только величину нагрузки, имеет вид (характеристики уравнения приведены в таблице 3, вид кривой – на рисунке 2):

$$E = -11,8283 + 30,1153\sqrt{G}. \quad (1)$$

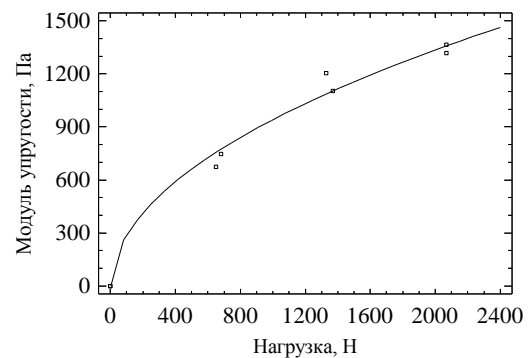


Рис. 2. Зависимость модуля упругости отходов лесозаготовок от нагрузки

Указанное выражение может быть использовано для расчетов энергии, затрачиваемой подвижными средствами лесозаготовительных машин на деформацию слоя отходов лесозаготовок. На основании этого можно рассчитать общие энергозатраты на движение по волоку, укрепленному лесосечными отходами, и оценить эффективность проведения мероприятий по строительству и укреплению трелевочных волоков.

Таблица 3  
Характеристики регрессионного уравнения

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t-стат.		p-знач.
Козф-т	-11,83	41,62	-0,28		0,79
Наклон	30,12	1,30	23,13		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	$\Sigma x^2$	Степень свободы	Ср. квадрат	F-крит.	p-знач.
Модель	2,12E6	1	2,12E6	534,79	0,0000
Остатки	23762,6	6	3960,43		
Общий	2,14E6	7			
$R^2$				98,89	
$R^2$ корр. на степень свободы				98,70	
Ст. ошибка оценивания				62,93	

Ср. абсолютная ошибка	37,58
-----------------------	-------

По графику видно, что линия асимптотически приближается к горизонтальной линии, есть основания предполагать, что асимптотическим пределом кривой является предел прочности на сжатие древесины поперек волокон. Это позволяет считать, что по достижении критического уровня нагрузки на хворостяную подушку машина движется по жесткому деревянному основанию, что позволяет снизить затраты на движение.

Третий вариант для выражения модуля упругости отходов лесозаготовок может иметь значение при возможности измерить деформацию хворостяного слоя, но невозможности оценить нагрузку на участок волока.

Полученное выражение для взаимосвязи модуля упругости и относительной деформации слоя лесосечных отходов выглядит следующим образом:

$$E = (1.61624 + 68.5033\varepsilon)^2. \quad (2)$$

Характеристики найденной зависимости приведены в таблице 4, вид кривой – на рисунке 3.

Таблица 4

Характеристики регрессионного уравнения					
Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t-стат.		р-знач.
Коеф-т	1,62	2,32	0,69		0,51
Наклон	68,50	594,62	11,52		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	$\Sigma x^2$	Степень свободы	Ср. квадрат	F-крит.	р-знач.
Модель	1611,88	1	1611,88	132,72	0,00
Остатки	72,86	6	12,14	–	–
Общий	1684,75	7	–	–	–
$R^2$			95,67		
$R^2$ корр. на степень свободы			94,95		
Ст. ошибка оценивания			3,48		
Ср. абсолютная ошибка			2,49		

Полученное выражение имеет высокий уровень достоверности и может служить основой для определения модуля упругости, как в процессе натуральных измерений, так и при моделировании движения лесозаготовительных агрегатов.

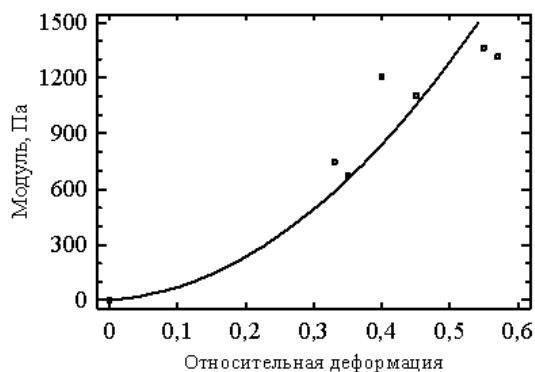


Рис. 3. Зависимость модуля упругости отходов лесозаготовок от относительной деформации слоя отходов лесозаготовок

Для определения характеристик движения лесозаготовительной машины воспользуемся понятием жесткости. Для случая простого продольного сжатия:

$$\lambda = ES, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения деформируемого образца (кучи отходов лесозаготовок),  $m^2$ .

Регрессионное уравнение, связывающее нагрузку и жесткость (рис. 4):

$$\lambda = 21618,1 - \frac{67001,0}{\lg G}. \quad (4)$$

Характеристики регрессионного уравнения приведены в таблице 5.

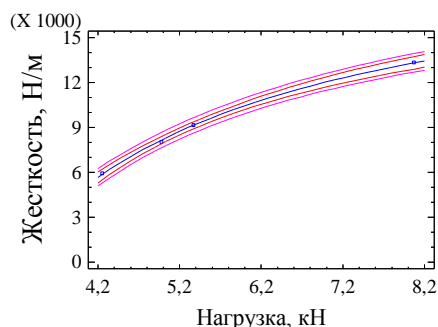


Рис. 4. Жесткость слоя отходов лесозаготовок в зависимости от приложенной нагрузки

Появление в уравнении (4) логарифмической функции, имеющей асимптотическое приближение к некоторому пределу, характерно.

В процессе выдвижения рабочих гипотез авторами высказывалось мнение, что жесткость слоя лесосечных отходов имеет пределом жесткость массива древесины. Это предположение получило предварительное подтверждение и будет исследовано в ходе дальнейшей работы.

Таблица 5  
Характеристики регрессионного уравнения

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t-стат.		р-знач.
Коеф-т	21618,1	250,49	86,30		0,00
Наклон	-67001,0	1312,03	-51,06		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	$\Sigma x^2$	Ст. свободы	Средний квадрат	F-крит.	р-знач.
Модель	$2,92 \cdot 10^7$	1	$2,92 \cdot 10^7$	2607,82	0,00
Остатки	22433,3	2	11216,6	–	–
Общий	$2,93 \cdot 10^7$	3	–	–	–
$R^2$			99,92		
$R^2$ корр. на степень свободы			99,88		

Ст. ошибка оценивания	105,91
Ср. абсолютная ошибка	60,05

### ВЫВОДЫ

В результате полевых исследований и последующей обработки результатов получены регрессионные зависимости, обладающие достаточной предсказательной силой ( $R^2$  от 95,67 до 99,92), позволяющие с достаточной точностью характеризовать состояние слоя лесосечных отходов при движении по ней лесозаготовительной техники в различных условиях эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галактионов О. Н. Состояние нагруженности волоков при функционировании комплексных лесосечных систем / О. Н. Галактионов, И. Р. Шегельман, А. В. Кузнецов // Вестник МАНЭБ. № 14(1). 2009. С. 68–72.
2. Федоренчик А. С. Деформация грунтов на технологических элементах лесосеки, укрепленных отходами лесозаготовок / А. С. Федоренчик, С. С. Макаревич, П. А. Протас // Изв. вузов. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 33–39.
3. Анисимов Г. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами / Г. М. Анисимов, Б. М. Большаков. СПб.: ЛТА, 1998. 108 с.
4. Ansoerge D. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction. Part 1: Single axle-studies / D. Ansoerge; R. J Godwin // Biosystems Engineering [Elektronic resource]. – Elektronic data. – 2007. № 98(1). P. 115–126. – Mode access: <http://dSPACE.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/2485>
5. Галактионов О. Н. Теоретические и экспериментальные исследования направлений промышленного освоения отходов лесозаготовок / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Проблемы лесопромышленных регионов: Материалы всероссийской научно-практической конференции. М.: ИПИИ, 2002. С. 21–22.
6. Федоренчик А. С. Вязкоупругие свойства отходов лесозаготовок, используемых для укрепления трелевочных волоков / А. С. Федоренчик, П. А. Протас, А. В. Дорожко [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – 2004. – Режим доступа: [http://science-bsea.narod.ru/2004/les\\_2004/fedorenchik\\_protas.htm](http://science-bsea.narod.ru/2004/les_2004/fedorenchik_protas.htm)