

630*332.3, 630*375.4, 620.173

*О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов***УПРУГИЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ**

Приведены результаты измерения модуля упругости слоя лесосечных отходов. Получены зависимости модуля упругости слоя лесосечных отходов от вертикальной нагрузки, площади контакта движителя и опоры. Результаты исследований могут использоваться при планировании работ по укреплению трелевочных волоков.

Ключевые слова: лесосечные отходы, модуль упругости, лесозаготовительные машины, рейсовая нагрузка.

Введение. Одно из перспективных и широко реализуемых направлений использования лесосечных отходов лесозаготовок на лесосеке – это применение их в качестве строительного материала, обеспечивающего стабилизацию несущей способности волоков [1, 2]. Это направление использования лесосечных отходов в последние два десятилетия актуально в связи с активным внедрением передовых технологий лесозаготовок на основе использования лесных машин с колесным движителем.

Размерные характеристики лесосечных отходов определялись в работах [3, 4], поведение лесосечных отходов в условиях нагружения исследовано в работах [5, 6].

В работе [7] исследовалось влияние слоя лесосечных отходов на уровень напряжений, возникающих в грунтовом массиве. Отмечается необходимость использования лесосечных отходов для укрепления волоков.

Результаты аналогичного по направленности исследования приведены в работе [8], где изучались возможности использования отходов лесозаготовок при строительстве временных автомобильных дорог. Изучалось взаимодействие слоев дорожных одежд, одним из которых был слой отходов лесозаготовок, при этом прямого определения модуля упругости слоя отходов лесозаготовок не проводилось.

В работах [9–11] оценивается общее экологическое воздействие лесозаготовительных машин на грунт и состояние почв в целом, также отмечается заметное снижение ущерба при использовании лесосечных отходов.

Последствия полного удаления лесосечных отходов путем оценки содержания биологически ценных веществ в почве изучались в работе [12], в целом влияние оставления лесосечных отходов положительно, но отмечается интенсивное поступление органического вещества в первые годы после рубок за счет травянистой растительности.

Обширные данные по результатам движения самоходных машин приведены в работе [13], где грунты рассмотрены как многокомпонентные системы.

Лесосечные отходы существенно отличаются от исследованных случаев следующими особенностями:

- хаотичным расположением элементов, составляющих массу лесосечных отходов;
- большим разбросом размеров – длин и диаметров;
- одновременным действием напряжений изгиба и сжатия поперек волокон;
- расположением лесосечных отходов на упругом основании;
- неправильной формой лесосечных отходов.

Таким образом, необходимым представляется изучение свойств массива лесосечных отходов в целом.

Ранее в лабораторных условиях проводились испытания слоя лесосечных отходов с укладкой их на две опоры [14]. При этом нагрузка прикладывалась в средней части пакета и фиксировалась стрела прогиба. Результаты обработки показали соответствие результатов модулю упругости стволовой древесины.

В реальных условиях отходы лесозаготовок располагаются непосредственно на грунте, и характер взаимодействия нагрузки и слоя лесосечных отходов меняется. Для точного определения параметров движения лесозаготовительных машин по лесосечным отходам лесозаготовок необходимо знать их характеристики прочности.

Цель работы состоит в определении прочностных характеристик слоя лесосечных отходов в условиях изменяющихся условий приложения нагрузки. Характеристики взаимодействия должны позволять аналитически описывать деформацию в условиях реальной эксплуатации.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо разработать методику проведения измерения деформации, расчета модуля упругости, получить устойчивое поведение слоя лесосечных отходов под нагрузкой, обработать полученные данные и построить систему уравнений, описывающую поведение слоя лесосечных отходов в широком диапазоне условий.

Техника эксперимента и методика обработки. *Методика проведения натуральных измерений.* Необходимо обеспечить состояние лесосечных отходов, близкое к реальному на волокнах. Площадка для проведения испытаний расположена непосредственно на лесосеке. Готовятся грузы, представляющие собой мешки с песком, взвешиваются, нумеруются (рекомендуемый вес единичного груза 20 кг). Для получения близких значений деформации для последовательных циклов нагружения рекомендуется использовать максимально возможный суммарный вес грузов, что позволяет довести нагружение до предельного состояния достаточно быстро и не учитывать релаксационные явления.

Лесосечные отходы формируют в кучу, фиксируют ее размеры: два перпендикулярных диаметра и высота. По возможности отходы взвешиваются для уточнения коэффициента полндревесности.

При формировании слоев лесосечных отходов следует избегать ориентированного расположения материалов; если же лесосечные отходы уже собраны, предлагается использовать их в сложенном состоянии, проводя контрольные замеры с переформированием кучи. При измерении готовых слоев лесосечных отходов необходимо точно фиксировать контакт центральной рейки с грунтом, при возможности контролировать высоту измерением по наружным рейкам. По краям кучи устанавливаются стойки, на которых на определенной высоте (высота установки зависит от высоты объекта измерения) располагается контрольная рейка, относительно которой измеряется деформация.

Возможен вариант (более эффективный) с установкой центрального мерного стержня, в этом случае при формировании кучи необходимо иметь твердое основание (низко срезанный пень, доска и т. п.). На вершину сформированного образца укладывают жесткую опору известной площади, относительно которой измеряют деформацию. Затем на вершину кучи последовательно добавляют грузы, одновременно фиксируя высоту деформированной кучи лесосечных отходов. После того как деформация перестанет существенно увеличиваться (изменение составляет не более 1 см), измерение заканчивают, грузы снимают, кучу перекладывают, и испытания производят еще раз.

По окончании нагружения и снятия нагрузки фиксируется остаточная деформация слоя лесосечных отходов. Полученные результаты сводятся в таблицу. При необходимости делают пометки о характерных особенностях исследуемого слоя лесосечных отходов – преобладание какой-либо породы, большое количество крупномерных материалов, преобладание сухостойного и детритного материала в лесосечных отходах.

Определение необходимого объема выборки. Из-за существенной неоднородности слоя лесосечных отходов важно определение минимального числа реализаций эксперимента, оценка которого получена по предварительной серии экспериментов.

Максимальный коэффициент вариации составил $v = 56,47\%$, необходимое число измерений при 95 % достоверности $N = 14$. Проведенного числа измерений достаточно для достоверной оценки модуля упругости отходов лесозаготовок.

Определение закона распределения полученных выборок. Первоначальное предположение о нормальном характере распределения деформации слоя лесосечных отходов не подтвердилось, поэтому на втором этапе выборка проверена на соответствие логнормальному закону распределения. Результаты проверки (значения соответствующих критериев) и выводы приведены в табл. 1, а вид распределения – на рис. 1.

Установлено, что полученные выборки соответствуют логнормальному распределению.

Таблица 1

Проверка соответствия выборок логнормальному закону распределения

Основные показатели	Статистические характеристики выборки		
	1	2	3
Величина критерия χ^2	25,18	11,34	12,39
Максимальное значение χ^2 в интервале	6,13	3,74	3,83
p-значение	0,00031	0,078	0,054
Уровень доверия, %	99	90	90
Вывод	Соответствует	Соответствует	Соответствует
Среднее значение выборки	15,44	20,81	23,79
Стандартное отклонение	10,64	12,85	12,06

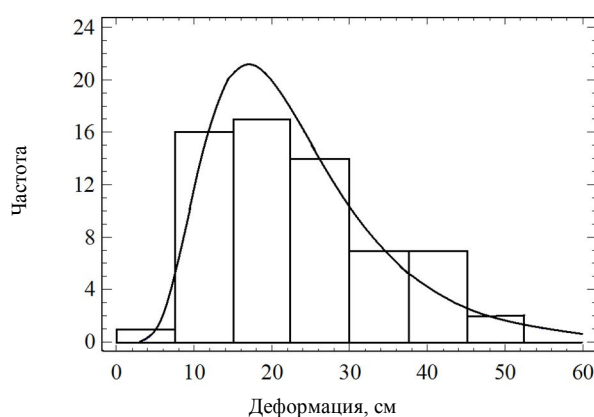


Рис. 1. Гистограмма и подобранное распределение для первой выборки

Обработка данных и построение регрессионных зависимостей. Целью эксперимента является получение значения модуля упругости отходов лесозаготовок, расположенных на волокнах. В процессе исследования производится только сжатие экспериментальных образцов, поэтому можем воспользоваться общей формулировкой закона Гука

для определения модуля упругости:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

где ε – относительная деформация; E – модуль упругости, Па; σ – напряжение, Па.

Относительная деформация составит:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

где Δl – деформация при приложении нагрузки, м; l – длина образца до приложения нагрузки, Па.

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

где F – деформирующая сила, Н; S – площадь сечения образца, м².

Таким образом, для определения модуля упругости отходов лесозаготовок можем использовать следующее выражение:

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l}. \quad (4)$$

Площадь среднего сечения слоя лесосечных отходов определяем на основании измерения двух перпендикулярных диаметров.

Часть результатов по определению модуля упругости дана в табл. 2. На рис. 2 приведены графики, описывающие изменение модуля деформации в зависимости от нагрузки для нескольких произвольных точек.

Основное отличие деформирования отходов лесозаготовок состоит в том, что даже при малых нагрузках деформация составляет значительные величины (в среднем 0,18, минимальное – 0,12), выходя за рамки линейного участка диаграммы нагружения. Следовательно, необходимо искать регрессионное выражение, описывающее изменение модуля упругости при повышении нагрузки. Кроме того, следует определить величину деформации слоя отходов лесозаготовок в зависимости от нагрузки и первоначальной толщины слоя отходов лесозаготовок.

Таблица 2

Значения модуля упругости отходов лесозаготовок

Высота, м	Нагрузка, Н			Относительная деформация			Площадь, м ²	Модуль упругости, кПа		
	выборка			выборка				выборка		
	1	2	3	1	2	3		1	2	3
0,42	800	1400	2200	0,21	0,29	0,43	1,54	2,12	3,29	3,26
0,60	800	1400	2200	0,25	0,42	0,45	1,54	1,82	2,26	3,11
1,30	800	1400	2200	0,12	0,19	0,27	1,54	3,94	4,90	5,19
0,80	800	1400	2200	0,13	0,25	0,31	1,54	3,64	3,77	4,47
0,77	800	1400	2200	0,48	0,57	0,61	1,13	1,29	2,24	3,12
0,80	800	1400	2200	0,21	0,29	0,31	1,13	2,94	4,46	6,09
1,10	800	1400	2200	0,23	0,32	0,36	1,13	2,72	4,03	5,23
1,20	800	1400	2200	0,25	0,33	0,40	1,13	2,48	3,85	4,76
1,00	800	1400	2200	0,20	0,27	0,35	5,72	6,12	0,94	1,07
1,15	800	1400	2200	0,04	0,06	0,07	5,72	2,81	4,16	5,40
Среднее	800	1400	2200	0,21	0,29	0,33	1,85	3,21	4,35	4,94

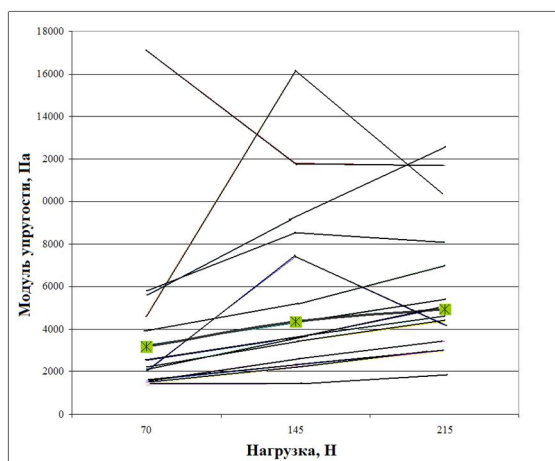


Рис. 2. Графики изменения модуля упругости для различных образцов (квадратами отмечены усредненные данные)

Проверка значимости различия между выборками. Эксперимент проведен на большом материале в различных лесосеках. По данным графиков и таблиц видно, что области данных перекрываются, поэтому необходимо убедиться в том, что между группами нет существенной разницы.

Проверка, проведенная на основании критерия Фишера (табл. 3) и множественного рангового теста (табл. 4), показала, что F -критерий, отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой равно 12,43, что при p -значении менее 0,01 показывает статистически значимую разницу дисперсий выборки с уровнем доверия 99,0 %.

Таблица 3

Анализ дисперсий величины деформации

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F -критерий	p -значение
Между группами	2339,04	2	1169,52	12,43	0,00
Внутри группы	17780,6	189	94,08		
Общий	20119,6	191			

Множественный ранговый тест позволяет оценить различие между каждой парой средних выборок (табл. 4).

Таблица 4

Результаты проверки значимости разницы выборок

Выборка	Объем	Среднее значение	Однородные группы
Выборка 1	64	15,11	X
Выборка 2	64	20,364	X
Выборка 3	64	23,58	X
Контраст		разница	\pm пределы
Выборка 1 – Выборка 2		*-5,25	2,84
Выборка 1 – Выборка 3		*-8,47	2,84
Выборка 2 – Выборка 3		*-3,22	2,84

Примечание: пары, отмеченные звездочкой (*), имеют статистически значимую разницу на уровне доверия 90,0 %. Значком (X) отмечены однородные группы.

Для сравнения использован метод наименьшей значимой разницы, основанный на процедуре Фишера. Точность метода составляет 10,0 %.

Низкая величина разницы для контраста Выборка 2 – Выборка 3 объясняется тем, что при экспериментах достигалась довольно большая величина сжатия, и соответственно величины деформации при втором и третьем этапах нагружения близки и имеют пересекающиеся доверительные интервалы.

На рис. 3 приведено положение некоторых характеристик полученных экспериментальных данных.

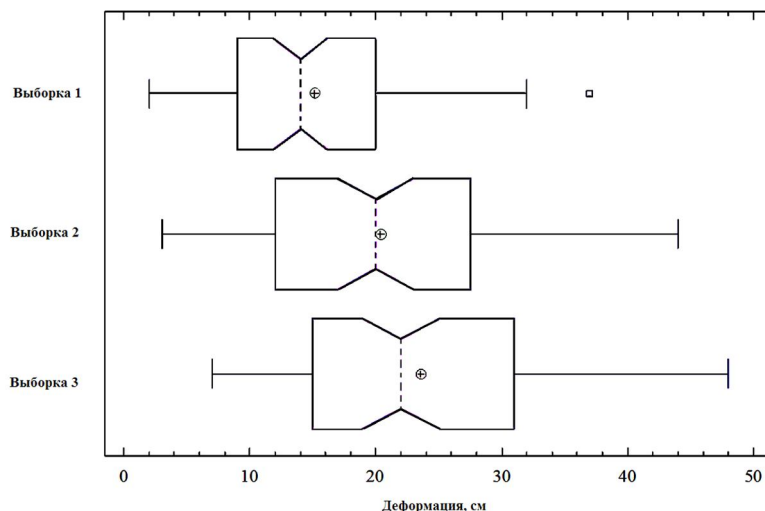


Рис. 3. Соотношение статистических характеристик экспериментальных выборок: медиана (пунктирная линия); средние значения (+); доверительный интервал (сплошная линия)

Для дальнейшей обработки использовались средние значения относительной деформации (табл. 5), с помощью которых рассчитывался модуль упругости.

Таблица 5

Средние величины деформации

Параметр	Высота, м	Нагрузка, Н	Относительная деформация	Модуль упругости, Па
Исходная высота	0,76	–	–	–
Высота после нагружения	1	700	0,214	3207,37
	2	1450	0,287	4346,22
	3	2150	0,331	4944,10
Остаточная высота	0,64	–	–	–

Таким образом, показана значимость выборок, достоверность описания процесса нагружения образцов лесосечных отходов.

Интерпретация результатов. Зависимость свойств слоя отходов лесозаготовок от нагрузки. Для использования результатов экспериментов в технологических расчетах необходимо построить следующие регрессионные зависимости:

- 1) модуль упругости слоя отходов лесозаготовок от приложенной нагрузки;
- 2) модуль упругости слоя отходов лесозаготовок от деформации;
- 3) модуль упругости слоя отходов лесозаготовок от деформации и приложенной нагрузки;
- 4) деформацию слоя отходов лесозаготовок от нагрузки и площади контакта движителя и опоры.

Указанные модели позволят полностью описать взаимодействие лесозаготовительной машины и отходов лесозаготовок на поверхности грунта.

Замечание. Для более точного описания предварительно выберем такой тип модели, при использовании которой предсказанная относительная деформация не превышает единицы.

Выбор типа модели. Выбор типа модели проведем при поиске регрессионной модели четвертого вида – деформация слоя отходов лесозаготовок от нагрузки.

Поиск вида модели осуществляем средствами системы Statgraphics.

Все предлагаемые системой двенадцать типов моделей адекватны (минимальное значение коэффициента детерминации 94,7 %).

Из имеющегося разнообразия выберем модель на основании следующих доводов:

1) расчетные данные, полученные с использованием модели, не превышают единицы в пределах реальных нагрузок (достижение, а тем более превышение этого предела физически представляет собой доведение толщины слоя отходов лесозаготовок до нуля, что в реальных условиях эксплуатации невозможно);

2) кривая, описываемая уравнением модели, имеет асимптоту, параллельную оси x , или не пересекает значение, равное единице в пределах реальной нагрузки.

Первому условию удовлетворяют следующие модели: гиперболическая, обратная гиперболическая 1-го порядка, логарифмическая, S-образная модель, пробит-модель.

Асимптоту найдем, воспользовавшись следующими формулами:

$$\varepsilon = f(G), \quad (5)$$

$$a = \lim_{G \rightarrow \pm\infty} \frac{f(G)}{G}; \quad (6)$$

$$b = \lim_{G \rightarrow \pm\infty} [f(G) - aG],$$

где a , b – коэффициенты уравнения прямой (асимптоты).

Анализируя модели, можно сделать следующие выводы:

1) пробит-модель обладает наибольшим коэффициентом детерминации, но ее график пересекает единицу при нагрузках, соответствующих половине рейсовой нагрузки лесозаготовительной машины, и далее процесс описывается неадекватно;

2) из остальных моделей наибольшим коэффициентом детерминации обладает логарифмическая модель – 99,91 %, ее асимптота находится на бесконечном расстоянии от оси x , в пределах нагрузки до 50 кН не пересекает значения единицы;

3) оставшиеся модели имеют асимптоту, проходящую ниже единицы, и обладают высоким коэффициентом детерминации. Ранее проведенным исследованием [1] установлено, что на волокнах величина относительной деформации составляет до 0,5181 и наиболее близка к этому значению обратная гиперболическая модель 1-го порядка.

Таким образом, останавливаемся на логарифмической и обратной гиперболической моделях. Пробит-модель, хотя и имеет высокий коэффициент детерминации, используется для описания бинарных результатов, и использование ее в данном случае вызвано поиском наиболее адекватной модели. Регрессионные уравнения моделей:

$$\varepsilon = 0,465768 + 0,103657 \ln(G). \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2,27482 + \frac{168,676}{G}}. \quad (8)$$

Для окончательного выбора используем ранее полученные результаты [1] по измерению высоты слоя отходов лесозаготовок – 0,52 м, фракционный состав совпадает, нагрузка на слой (с учетом веса лесозаготовительной машины, рейсовой нагрузки, коэффициента использования лесозаготовительной машины, компоновки машины – три оси) 32000 Н, относительная деформация 0,518, средняя высота слоя 0,31 м, ширина пятна контакта 0,12 м².

Обработка с внесенными изменениями показала, что логарифмическая модель имеет более высокий коэффициент детерминации и лучшее F -отношение. На этом основа-

нии выбираем в качестве основной логарифмическую модель роста относительной деформации слоя отходов лесозаготовок, в зависимости от приложенной нагрузки ее окончательный вид:

$$\varepsilon = 0,278996 + 0,0773525 \ln(G). \quad (9)$$

График модели с границами предсказанных значений и 95 %-м доверительным интервалом приведен на рис. 4. Визуально можно оценить прохождение подобранной линии по экспериментальным точкам.

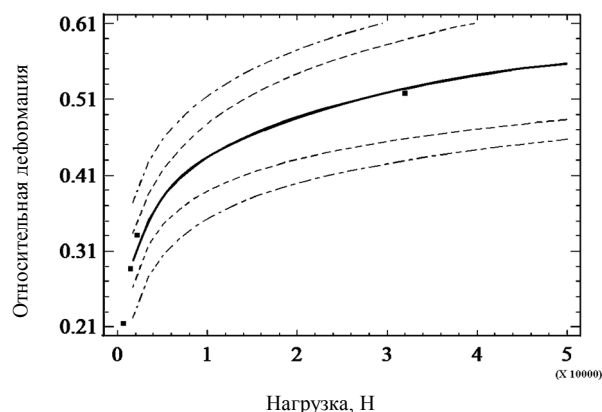


Рис. 4. График регрессионной зависимости $\varepsilon (G)$: штрих-пунктирная линия — границы предсказанных значений; штриховая линия — 95 %-й доверительный интервал

Характеристики полученной модели приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики регрессионной зависимости относительной деформации слоя отходов лесозаготовок от приложенной к нему нагрузки

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t-статистика	p-значение	
Коэффициент	-0,28	0,04	-6,35	0,02	
Наклон	0,08	0,01	14,25	0,01	
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F-критерий	p-значение
Модель	0,05	1	0,05	203,11	0,005
Остатки	0,001	2	0,0002		
Общий	0,05	3			
Коэффициент корреляции	0,99				
R^2 , скорректированный на степень свободы	98,54				
Ст. ошибка оценивания	0,02				
Ср. абсолютная ошибка	0,01				

Подобранную модель используем как предпочтительную.

Регрессионная модель изменения модуля упругости слоя лесосечных отходов в зависимости от деформации предназначена для анализа энергозатрат при движении лесозаготовительной машины и определения минимальной толщины слоя отходов лесозаготовок.

В качестве дополнительной выберем логарифмическую модель:

$$E = 932285 + 397021 \ln(\varepsilon), \text{ Па}, \quad (10)$$

характеристики которой приведены в табл. 7, график — на рис. 5

Таблица 7

Характеристики регрессионной зависимости модуля упругости слоя лесосечных отходов от его относительной деформации

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	T-статистика		p-значение
Коэффициент	9322,85	94,1133	99,06		0,00
Наклон	3970,21	71,7589	55,33		0,01
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии:	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F-критерий	p-значение
Модель	1,56E6	1	1,56E6	3061,09	0,01
Остатки	508,44	1	508,44		
Общий	1,56E6	2			
Коэффициент корреляции	0,99				
R ² , скорректированный на степень свободы	99,93				
Ст. ошибка оценивания	22,55				
Ср. абсолютная ошибка	12,04				

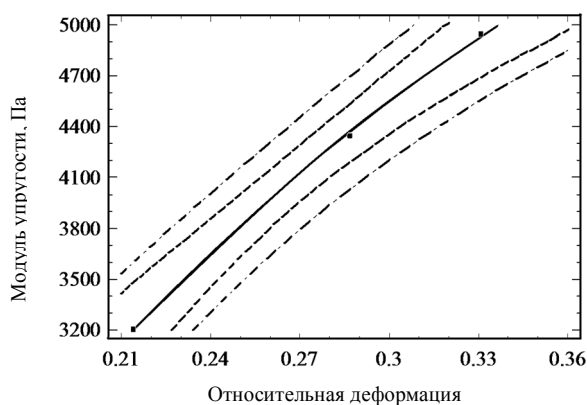


Рис. 5. График регрессионной зависимости $E(\epsilon)$; штрих-пунктирная линия – границы предсказанных значений; штриховая линия – 95 %-й доверительный интервал

$$E = 6942,29 + 1549,72 \cdot \ln(G), \text{ Па.} \quad (11)$$

Характеристики модели приведены в табл. 8, вид модели – на рис. 6.

Таблица 8

Характеристики регрессионной зависимости модуля упругости слоя лесосечных отходов от приложенной к нему нагрузки

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	T-статистика		p-значение
Коэффициент	-6942,29	84,44	-82,21		0,00
Наклон	1549,72	11,76	131,82		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии:	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F-критерий	p-значение
Модель	1,561E6	1	1,56E6	17376,96	0,00
Остатки	89,595	1	89,59		
Общий	1,56E6	2			
Коэффициент корреляции	0,99				
R ² , скорректированный на степень свободы	99,99				
Ст. ошибка оценивания	9,47				
Ср. абсолютная ошибка	5,08				

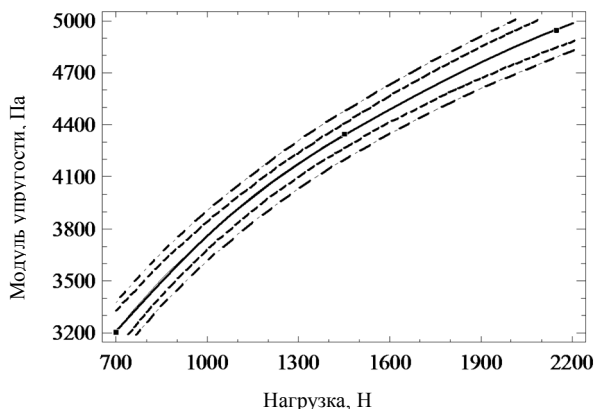


Рис. 6. График регрессионной зависимости $E(G)$; штрих-пунктирная линия – границы предсказанных значений; штриховая линия – 95 %-й доверительный интервал

В некоторых случаях, когда известны нагрузка и площадь, на которую она приходится, полезна модель, связывающая указанные параметры.

Регрессионная зависимость имеет вид:

$$E = 1472250 + 161859,0 \ln\left(\frac{G}{s}\right), \quad (12)$$

где s – площадь опорной поверхности, m^2 .

Отношение G/s представляет собой давление на опорной поверхности.

Характеристики модели приведены в табл.9, вид модели – на рис. 7.

Таблица 9

Характеристики регрессионной зависимости модуля упругости слоя лесосечных отходов от соотношения приложенной нагрузки и площади контакта

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	T-статистика		p-значение
Коэффициент	-1,47E6	7840,09	187,79		0,00
Наклон	161859,0	778,473	207,92		0,00
Анализ дисперсии					
Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F-критерий	p-значение
Модель	2,23E11	1	2,23E11	43230,15	0,00
Остатки	1,03E7	2	5,17E6		
Общий	2,23E11	3			
Коэффициент корреляции	0,99				
R^2 , скорректированный на степень свободы	99,99				
Ст. ошибка оценивания	2273,47				
Ср. абсолютная ошибка	1172,25				

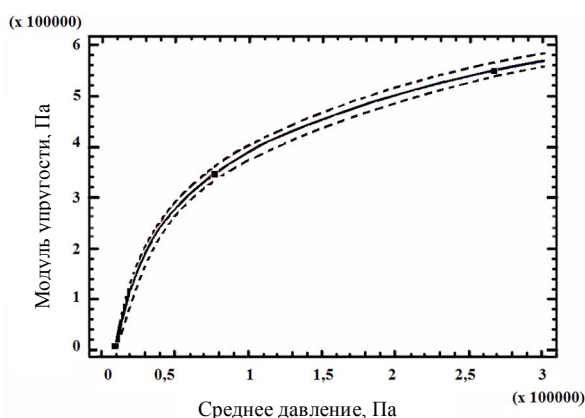


Рис. 7. График регрессионной зависимости $E(G/s)$: штриховая линия – 95 %-й доверительный интервал

Таким образом, проведен комплекс исследований, позволивших с достаточной для технических расчетов точностью описать состояние слоя лесосечных отходов при воздействии на него веса грузовой лесозаготовительной машины.

Выводы

1. Установлена взаимосвязь между приложенной нагрузкой и упругими характеристиками массива лесосечных отходов, позволяющая описывать их состояние в диапазоне воздействия рабочих рейсовых нагрузок при движении лесозаготовительных машин.

2. Разработана система уравнений регрессии, описывающая взаимодействие лесозаготовительной машины и слоя отходов лесозаготовок на волоке, и доказана их адекватность.

3. Наибольшим коэффициентом детерминации обладает логарифмическая модель – 99,91 %, ее асимптота находится на бесконечном расстоянии от оси x , в пределах нагрузки до 50 кН не пересекает значения единицы.

4. Совместное использование результатов исследований, изложенных в работе [4], и представленной системы уравнений, позволит определять эффективность использования лесосечных отходов для строительства трелевочных волоков и влияние на параметры движения лесозаготовительных машин по массивам лесосечных отходов.

Список литературы

1. Галактионов, О. Н. Характеристики настила из лесосечных отходов и состояние грунта на трелевочном волоке / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов, М. А. Пискунов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2009. – № 7 (101). – С. 90-95.

2. Lassila, K. Mechanical strengthening of ground to decrease rut-formation in forwarding / K. Lassila // University of Helsinki, Department of Forest Resource Management [Electronic resource]. – Electronic data. – 2002. – Mode access: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/mechanic.pdf>. (дата обращения: 18.08.11).

3. Иванчиков, А. А. Масса и структура лесосечных отходов при сплошных рубках в сосняках Карелии / А. А. Иванчиков // Лесоводственные и экологические последствия рубок в лесах Карелии. – Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1986. – С. 50–61.

4. Галактионов, О. Н. Концентрация отходов лесозаготовок на лесосеке / О. Н. Галактионов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2008. – № 1. – С. 131–139.

5. 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/fedorenhik_protas.htm (дата обращения: 18.08.11).

6. 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.

7. Вестерлюнд, И. Механические повреждения корней и почвы / И. Вестерлюнд // Лесное хозяйство. – 1988. – № 6. – С. 55–56.

8. Удилов, В. И. Исследование некоторых характеристик временных автомобильных дорог с подстилающим слоем из лесосечных отходов: автореф. ... канд. техн. наук / В. И. Удилов. – Свердловск: Уральский лесотехнический институт, 1967. – 26 с.

9. Алексеев, И. А. Экологическая оценка лесных машин / И. А. Алексеев // Лесная промышленность. – 1992. – № 2. – С. 16.

10. Баранцев, А. С. Сравнительная экологическая оценка отечественной и зарубежной техники / А. С. Баранцев // Лесная промышленность. – 1995. – № 4. – С. 20.

11. Кайрюкитис, Л. Воздействие лесных машин на почву / Л. Кайрюкитис, З. Шакунас // Лесное хозяйство. – 1990. – № 6. – С. 37–40.

12. Егорова, Н. В. К вопросу об изменении химических свойств почвы в результате очистки лесосек / Н. В. Егорова, В. Н. Куликова // Лесные почвы Карелии и изменение их под влиянием лесохозяйственных мероприятий. – Петрозаводск: КФ АН СССР, 1962. – С. 58–70.

13. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность–машина / М. Г. Беккер – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.

14. ГОСТ 16483.9-73. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. – переиздание (сентябрь 1999 г.) с изм. №1, 2, утв. в январе 1980 г., октябре 1988 г. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 7 с.

Статья поступила в редакцию 20.09.11.

O. N. Galaktionov, A. V. Kuznetsov

CUTTINGS ELASTIC CHARACTERISTICS

Results of elasticity coefficient change of cuttings are presented. Cuttings elasticity coefficient dependance on sheer weight, mover contact area and bearing is obtained. Research results may be used in work planning of logger road strengthening.

Key words: *cuttings, elasticity coefficient, harvesting equipment, scheduled load.*

ГАЛАКТИОНОВ Олег Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса Петрозаводского государственного университета (Россия, Петрозаводск). Область научных интересов – исследование и оптимизация процессов лесозаготовок, поиск оптимальных условий заготовки и утилизации лесосечных отходов, моделирование технологических процессов лесозаготовок с полной утилизацией древесной биомассы. Автор 82 публикаций.

E-mail: galakt@psu.karelia.ru

КУЗНЕЦОВ Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного Петрозаводского государственного университета (Россия, Петрозаводск). Область научных интересов – решение задач оптимизации транспортных потоков лесного комплекса, исследование технологических процессов утилизации древесной биомассы. Автор 47 публикаций.

E-mail: kuzalex@psu.karelia.ru