



УДК 634.0.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.160

МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ И РАЗМЕРОВ ГРУЗОВОГО ОТСЕКА ЛЕСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

И.Р. Шегельман¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [P-9793-2019](#);

ORCID: [0000-0001-5133-4586](#)

П.В. Будник¹, канд. техн. наук, начальник отдела защиты интеллектуальной собственности и изобретательства; ResearcherID: [E-1782-2015](#);

ORCID: [0000-0002-8701-4442](#)

В.Н. Баклагин², канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [M-2265-2016](#);

ORCID: [0000-0002-0060-1653](#)

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: shegelman@onego.ru, budnikpavel@yandex.ru

²Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, просп. Александра Невского, д. 50, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030; e-mail: slava.baklagin@mail.ru

Цель исследования заключалась в формировании объективной информации о массе транспортируемой пачки лесоматериалов для лесопромышленных предприятий и производителей лесных машин, способствующей рациональному выбору конкретных моделей форвардеров и обоснованию их основных параметров для природно-производственных условий Северо-Западного федерального округа. Исследование основано на компьютерном эксперименте и значительном объеме фактических данных о формах стволов деревьев, полученных при помощи средств объективного контроля харвестеров. Место сбора фактических данных о формах стволов – Республика Карелия. Рассматривались следующие модели форвардеров: John Deere 1210E, John Deere 1110E, Ponsse Elk, Ponsse Wisent, Амкодор 2661-01, Rottne F13D, Rottne F15D, Rottne F18D. Результаты показали, что масса пачки лесоматериалов изменяется в широких пределах. В среднем масса пачки, сформированной из елового пиловочника длиной 6,1 м составляет 4,5 т, из елового баланса длиной 4,0 м – 2,8 т. При транспортировке пачки длиной 4,0 м все рассмотренные модели имеют запас по грузоподъемности, при транспортировке пачки из пиловочника длиной 6,1 м все модели форвардеров работают с недостаточной грузоподъемностью. Установлено, что при площади поперечного сечения грузового отсека 4,0 м² грузоподъемность модели должна быть не менее 16 т, при площади 4,8 м² – не менее 19 т. При транспортировке пачки, составленной из сортиментов длиной 6,1 м, необходимо загружать грузовой отсек форвардеров не более чем на 3/4, что позволит с высокой вероятностью исключить превышение рейсовой нагрузки над номинальной грузоподъемностью лесной транспортной машины.

Для цитирования: Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Методика компьютерного эксперимента при определении грузоподъемности и размеров грузового отсека лесной транспортной машины // Лесн. журн. 2019. № 6. С. 160–173. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.160

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по проекту «Разработка среды конструкторского проектирования оптимальных параметров технологического оборудования лесных многооперационных машин» (МК-5321.2018.8).

Ключевые слова: имитационное моделирование, компьютерный эксперимент, масса пачки, грузоподъемность, лесосечные работы, форвардер.

Введение

В Европе и европейской части России широкое распространение получила сортиментная заготовка древесины [13, 14, 28]. В Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) и Скандинавских странах преимущественно используются две основные схемы сортиментной заготовки с применением полностью механизированной системы или бензомоторных пил [13, 14, 35]. Для обеих схем базовой машиной является форвардер, причем выполняемые им операции наиболее трудоемкие и дорогостоящие [23].

Проведенные исследования свидетельствуют, что производительность форвардера очень зависит от параметров рейсовой нагрузки [9, 25, 29]. Известно, что при увеличении расстояния транспортировки влияние параметров пачки лесоматериалов (массы, объема, числа сортиментов) на производительность лесной техники возрастает. Форвардер в зависимости от массы рейсовой нагрузки может наносить существенный ущерб почве [7, 8, 11, 17, 19, 33–36]. Множество публикаций касаются экологических аспектов, в частности расхода топлива, энергоэффективности и выбросов выхлопных газов [12, 18–22, 26]. Расход топлива, а соответственно и выбросы выхлопных газов, зависят от массы пачки лесоматериалов.

Кроме того, исследование влияния массы пачки форвардера важно для оценки проходимости [3] и обеспечения надежности конструкции машины [16]. В последнем вопросе значимой проблемой является обоснование выбора лесной техники необходимой грузоподъемности для определенных природно-производственных условий. Перегрузка машины негативно отражается на компонентах ходовой части и приводит к их преждевременному выходу из строя. Как правило, исследование массы пачки сводится или к ее примерной оценке (например, путем визуальной оценки объема и последующего определения массы), или к ее многократному измерению.

Цель исследования заключалась в формировании объективной информации о массе транспортируемой пачки лесоматериалов, способствующей рациональному выбору лесопромышленными предприятиями конкретных моделей форвардеров и режимов их работы в природно-производственных условиях СЗФО, а также необходимой для производителей лесной техники при обосновании основных параметров форвардеров в процессе совершенствования их конструкций.

Объекты и методы исследования

Для оценки массы пачки лесоматериалов собирались данные о формах стволов деревьев. Источниками данных являлись сведения, полученные с помощью средств объективного контроля харвестеров на лесосеках Республики Карелия, являющихся типичными для СЗФО. На основе этих сведений был сформирован банк данных, содержащий информацию о 53 911 стволах.

Информация формировалась в виде значений диаметров, замеренных через каждые 10 см длины ствола.

Предварительный анализ сортиментных планов лесозаготовительных предприятий в СЗФО, а также требований деревообрабатывающих и лесохимических предприятий показал, что наиболее часто производятся следующие виды сортиментов: хвойный пиловочник длиной 6,1 м; хвойный баланс длиной 4,0 м; лиственные дрова длиной 5,0 м. Нами изучены параметры полногрузных пачек лесоматериалов, сформированных из елового пиловочника длиной 6,1 м (лесоматериал № 1) и елового баланса длиной 4,0 м (лесоматериал № 2).

В рамках данного исследования рассматривались наиболее часто используемые в европейской части России модели форвардеров (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики форвардеров

Модель	Грузоподъемность, т	Площадь поперечного сечения грузового отсека, м ²
John Deere 1210E	13	4,0
John Deere 1110E	12	4,0
Ponsse Elk	13	4,5
Ponsse Wisent	12	4,5
Амкодор 2661-01	12	4,4
Rottne F13D	14	4,7
Rottne F15D	15	4,8
Rottne F18D	18	4,8

Оценка вариации массы пачки лесоматериалов для форвардера требует большого числа измерений (сотни измерений на 1 параметр). Поэтому в основу данного исследования был положен метод компьютерного эксперимента, основанного на разработанной имитационной модели. В лесной науке подобные модели широко используются в качестве альтернативы натурным экспериментам [30–32, 37].

Имитационная модель реализована в виде программы (приложения Windows) с использованием синтаксиса языка C#. На основе данной модели имитировался процесс формирования пачки, состоящей из заданного вида лесоматериалов. Входными данными для компьютерного эксперимента служили: характеристики формы стволов; параметры загружаемых сортиментов (порода, длина, ограничения диаметров в верхнем и нижнем отрезках); параметры грузовой платформы; режим загрузки, расстояние от щита грузового отсека до ближайшего коника. Компьютерный эксперимент проводился 10 тыс. раз для каждого сочетания входных параметров. После его завершения осуществлялась статистическая обработка результатов расчета.

Схема компьютерного имитационного эксперимента включала следующие этапы:

- 1 – генерация таксационных характеристик ствола дерева;
- 2 – моделирование параметров лесоматериала;
- 3 – моделирование процесса укладки лесоматериала в грузовой отсек;
- 4 – расчет массы пачки лесоматериалов.

Первые три этапа повторялись до получения полногрузной пачки лесоматериалов (под полногрузной пачкой понимается загрузка грузового отсека

форвардера на высоту стоек коников). На этапе 1 случайным образом из банка стволов выбирался один ствол, на этапе 2 осуществлялись проверка возможности получения заданного лесоматериала из выбранного ствола и определение его параметров. Получаемый лесоматериал представлялся в виде набора идеальных усеченных конусов, высота которых составляла 10 см или менее для конусов, расположенных на краях лесоматериала. Параметры лесоматериала: количество конусов и диаметры их оснований. На этапе 2 рассчитывался объем лесоматериала в коре (Q_{log}), масса (M_{log}), диаметры в нижнем (d_{lower}) и верхнем (d_{upper}) отрезках.

Для моделирования параметров лесоматериалов № 1 и 2 применялись различные алгоритмы. Необходимость использования отдельного алгоритма для лесоматериала № 2 обусловлена тем, что на практике обычно не допускается выпиливание баланса из комлевой части ствола.

При расчете Q_{log} и M_{log} использованы следующие математические выражения:

$$Q_{log} = \sum_{i=1}^n \frac{\pi h_i (d_{1,i}^2 + d_{1,i} d_{2,i} + d_{2,i}^2)}{12}; \quad (1)$$

$$Q_{bark} = Q_{log} - \sum_{i=1}^n \frac{\pi h_i ((d_{1,i} - k)^2 + (d_{1,i} - k)(d_{2,i} - k) + (d_{2,i} - k)^2)}{12}; \quad (2)$$

$$Q_{wood} = Q_{log} - Q_{bark}; \quad (3)$$

$$M_{log} = Q_{wood} \frac{\int_{l_1}^{l_2} \rho(L) dL}{l_2 - l_1} + \rho_b Q_{bark}; \quad (4)$$

$$k = a + b d_k \quad (5)$$

$$\rho(L) = 1,0262 (1 + 0,01 W) (AL^3 + BL^2 + CL + D). \quad (6)$$

Здесь n – количество усеченных конусов, приходящихся на лесоматериал; h_i – высота i -го усеченного конуса ($h_i = 10$ см, за исключением крайних конусов в лесоматериале, для которых h_i определяется интерполяцией); $d_{1,i}$ – диаметр нижнего основания i -го усеченного конуса, для $i = \overline{1, n}$; $d_{2,i}$ – диаметр верхнего основания i -го усеченного конуса, для $i = \overline{1, n}$; Q_{bark} – объем коры в лесоматериале; Q_{wood} – объем лесоматериала без коры; l_1 – расстояние от комля выбранного ствола до нижнего основания первого усеченного конуса в лесоматериале; l_2 – расстояние от комля выбранного ствола до верхнего основания последнего усеченного конуса в лесоматериале; $\rho(L)$ – средняя плотность свежесрубленной древесины ели на расстоянии L ; L – расстояние от комля выбранного ствола; ρ_b – средняя плотность коры свежесрубленной древесины ели; k – двойная толщина коры; a и b – коэффициенты линейного уравнения для расчета k ; d_k – диаметр в коре; W – влажность древесины; A , B , C и D – коэффициенты уравнения для расчета $\rho(L)$.

При расчете k по выражению (5) для Республики Карелия приняты следующие значения коэффициентов: $a = 0,206$ и $b = 0,0356$. Выражение (5) и значения коэффициентов a , b приняты согласно ГОСТ 32594–2013.

Выражение (6) получено на основе работ [1, 2, 5]. Коэффициенты A , B , C и D для ели в свежесрубленном состоянии при средней влажности 91 % приняты соответственно: 0,000105; –0,005; –0,35; 380. В данном исследовании для ели $\rho_b = 1239$ кг/м³ [6].

Этап 3 заключался в моделировании укладки в грузовой отсек сечения лесоматериала, расположенного на уровне ближайшего к щиту коника.

Определение размеров сечения осуществлялось с учетом того, что лесоматериалы размещаются в грузовом отсеке комлями в разные стороны, причем лесоматериалы из одного ствола укладывались комлями в одну сторону.

На этапе 4 вычислялась масса (M) полногрузной пачки лесоматериалов как сумма M_{log} всех лесоматериалов, входящих в сформированную пачку.

На этапе 5 осуществлялось построение вариационных кривых для M , а также рассчитывались среднее значение и размах выборки. Кроме того, определялись конкретные значения при интегральной функции распределения $F(M) = 0,9$ и $0,99$.

Грузовой отсек форвардера представляет собой полураму, на которой установлены щит и коники. Объем перевозимых лесоматериалов в грузовом отсеке определяется высотой стоек коников. Формально коник представляется как совокупность элементов, характеризующих форму его внешней поверхности (рис. 1).

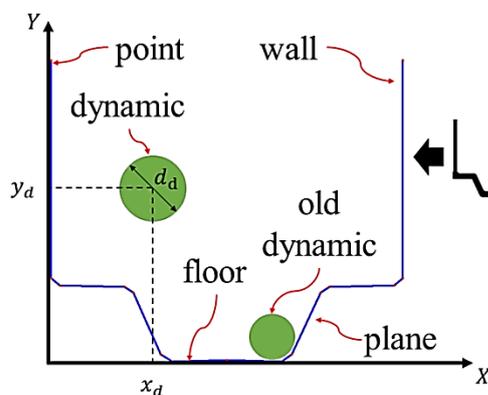


Рис. 1. Схема представления коника в имитационной модели

Fig. 1. The representation scheme of a truck bolster in a simulated model

Для описания формы коника использовались следующие элементы: «wall» (вертикальный отрезок); «floor» (горизонтальный отрезок); «plane» (наклонный отрезок); «point» (точка соединения элементов). Каждому элементу присваивались координаты в декартовой системе координат. Лесоматериал представлялся элементом «dynamic» и характеризовался координатами центра (x_d, y_d) , диаметром (d_d) и окружностью с функцией $(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2 = d_d^2/4$. Параметр d_d определялся диаметром поперечного сечения лесоматериала, расположенного на заданном расстоянии от его края (α), величина α – как расстояние от щита до ближайшего коника для соответствующей модели форвардера.

Моделирование процесса укладки лесоматериала в грузовой отсек форвардера заключалось в имитации движения поперечного сечения лесоматериала в площади коника на основе заданных математических выражений, описывающих законы взаимодействия сечения с другими элементами системы. Погрузка моделировалась поштучно, при этом был разработан алгоритм, обеспечивающий равномерную загрузку грузового отсека форвардера.

Моделирование осуществлялось с шагом $\Delta y = 1$ мм. На каждом шаге моделирования проверялись условия столкновения элемента «dynamic» с другими элементами в следующей последовательности: «floor», «point», «plane», «old dynamic». Если взаимодействия не происходило, сечение (элемент

«dynamic») продвигалось в том же направлении на Δy . Если взаимодействие с элементом происходило, то сечение получало точку опоры и далее начинало двигаться по элементу с шагом Δy . На каждом шаге осуществлялась проверка взаимодействия с другими элементами. При взаимодействии сечения со вторым элементом выполнялась проверка условия устойчивости. В случае удовлетворения условию устойчивости сечение останавливалось. После чего генерировалось новое сечение и цикл возобновлялся. Если условие равновесия не выполнялось, то сечение меняло точку опоры на точку взаимодействия с элементом, с которым столкнулось, и начинало двигаться вдоль (или вокруг) данного элемента. Если при очередном смещении сечения вдоль элемента на Δy переставало действовать условие взаимодействия и выполнялось условие отрыва, то происходил отрыв сечения от элемента и его последующее свободное падение (движение вдоль оси y).

Результаты исследования и их обсуждение

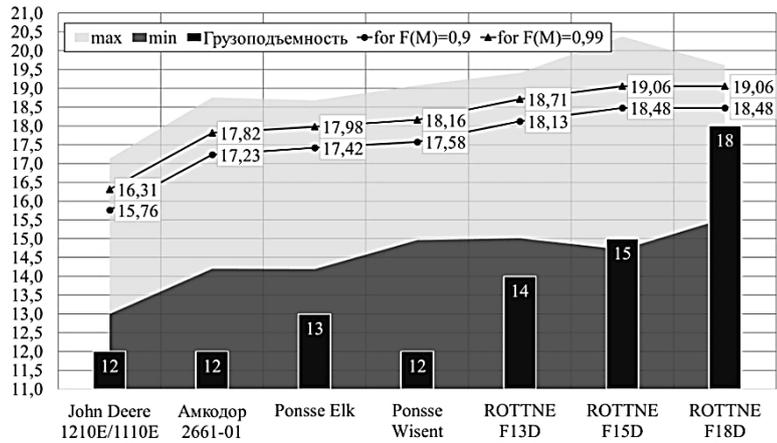
В табл. 2 приведены полученные значения размаха выборок для массы (M): пачки, составленные из лесоматериалов № 1, – 4,0...5,7 т (в среднем по всем рассмотренным моделям 4,5 т); пачки, сформированные из лесоматериалов № 2, – 1,4...1,8 т (в среднем 1,6 т), т. е. среднее значение массы пачки, сформированной из лесоматериалов № 1, в 1,5 раза больше, чем у пачки из лесоматериалов № 2. В зависимости от модели форвардера варьирование массы пачки, сформированной из сортиментов № 1, было 2,3–3,4 раза (в среднем 2,8 раза) больше, чем из сортиментов № 2.

Таблица 2

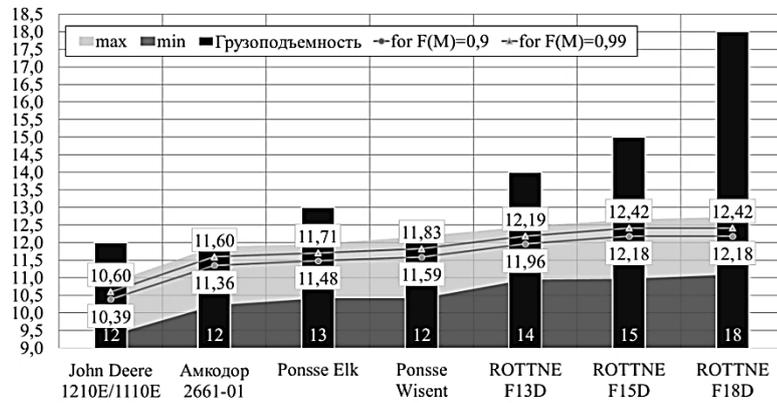
Варьирование массы пачки (M , кг) моделей форвардеров

Модель	Лесоматериал № 1			Лесоматериал № 2		
	min	mean	max	min	mean	max
John Deere 1210E/1110E	9,36	10,13	10,86	13,00	15,09	17,13
Амкодор 2661-01	10,22	11,07	11,89	14,21	16,48	18,76
Ponsse Elk	10,42	11,21	11,96	14,20	16,69	18,68
Ponsse Wisent	10,42	11,32	12,18	14,97	16,86	19,08
Rottne F13D	10,95	11,71	12,46	15,01	17,43	19,41
Rottne F15D	10,97	11,90	12,66	14,71	17,75	20,38
Rottne F18D	11,10	11,92	12,73	15,54	17,73	19,61

На рис. 2 приведены результаты сопоставления значений грузоподъемности для рассматриваемых моделей форвардеров с минимальными и максимальными значениями полученных выборок, а также со значениями масс пачек лесоматериалов при $F(M) = 0,9$ и $F(M) = 0,99$. Для пачек, сформированных из лесоматериалов № 1, значение грузоподъемности меньше минимального значения выборок, за исключением моделей Rottne F15D, Rottne F18D. Для пачек из лесоматериалов № 2, значение грузоподъемности превышало максимальное значение выборок для всех рассматриваемых моделей.



a



б

Рис. 2. Сопоставление грузоподъемностей (τ) форвардеров с характеристиками вариационных рядов для пачек, сформированных из лесоматериалов № 1 (а) и № 2 (б)
 Fig. 2. Comparison of load capacities (τ) of the forwarders with the characteristics of the variation series for bundles made up of timber No. 1 (a) and No. 2 (b)

Зависимость среднего значения массы пачки от площади поперечного сечения грузового отсека форвардера имела линейный характер (рис. 3).

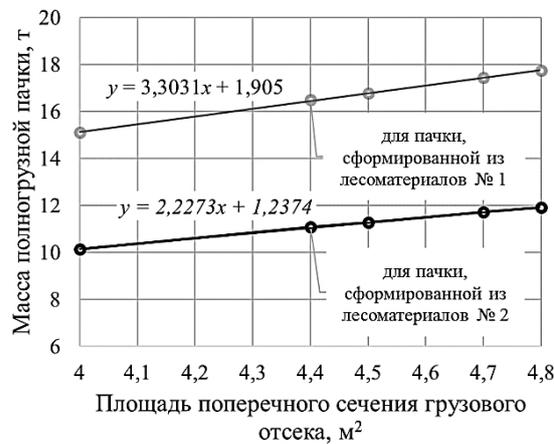
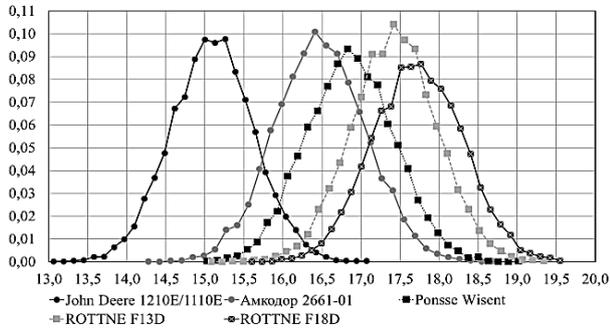


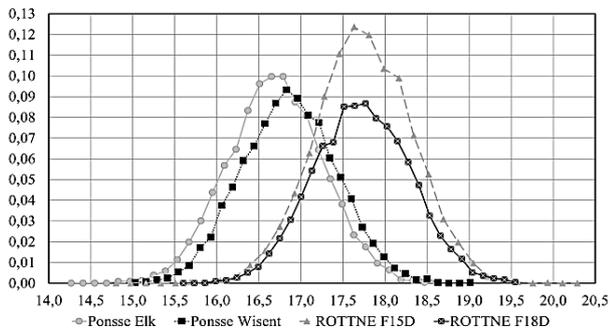
Рис. 3. Влияние площади поперечного сечения грузового отсека на среднее значение массы пачки

Fig. 3. The dependence of the average value of bundle weight on the cross-sectional area of a carrying compartment

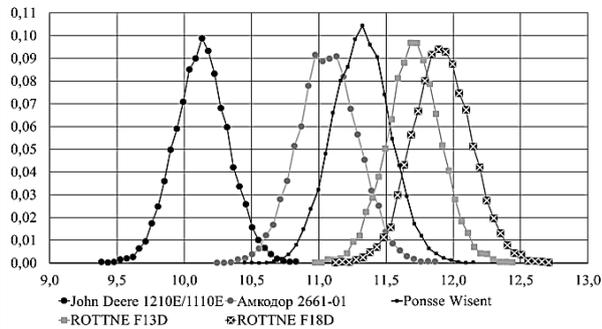
На рис. 4 приведены вариационные кривые масс пачек для рассматриваемых моделей форвардеров.



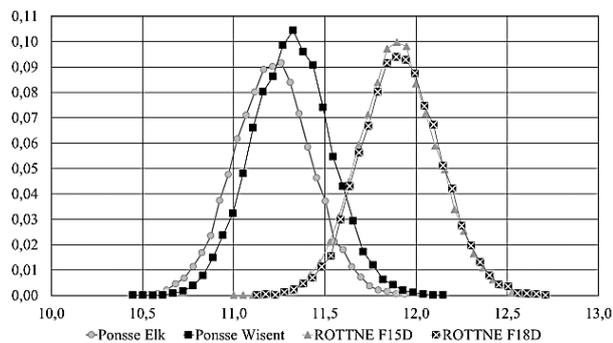
a



б



в



г

Рис. 4. Вариационные кривые для масс пачек, сформированных из лесоматериалов: *a, б* – № 1; *в, г* – № 2 (по оси абсцисс – интервалы значений масс, τ ; по оси ординат – относительная частота интервалов)

Fig. 4. Variation curves for bundle weights: *a, б* – bundles made up of timber No. 1; *в, г* – No. 2 (at the x-axis – range of weight values, τ ; at the y-axis – relative frequency of ranges)

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, вариационные кривые приблизительно симметричны и имеют единичные характерные пики. Наиболее вероятное значение массы пачки (мода) примерно равно среднему значению. Увеличение площади поперечного сечения грузового отсека приводило к смещению вариационной кривой в правую сторону от нуля (рис. 4, *а* и *в*). Формы вариационных кривых для разных моделей форвардеров с одинаковыми значениями площади поперечного сечения грузового отсека отличались (рис. 4, *б* и *з*). Установлено, что при площади поперечного сечения грузового отсека форвардера $4,0 \text{ м}^2$ в среднем масса полногрузной пачки лесоматериалов, сформированной из елового пиловочника длиной 6,1 м, составляет 15,09 т, а при площади $4,8 \text{ м}^2$ – 17,74 т. При площади поперечного сечения грузового отсека $4,0 \text{ м}^2$ масса пачки, составленной из елового баланса длиной 4,0 м, в среднем составляет 10,13 т, при площади поперечного сечения грузового отсека $4,8 \text{ м}^2$ – 11,91 т. Среднее значение массы пачки имеет линейную зависимость от площади поперечного сечения коника. В среднем масса пачки, сформированной из елового пиловочника длиной 6,1 м, в 1,5 раза больше аналогичных показателей пачки из елового баланса длиной 4,0 м. Колебание массы пачки лесоматериалов из елового пиловочника длиной 6,1 м в среднем составляет 4,5 т, для пачки из елового баланса длиной 4,0 м – 2,8 т.

Полученные результаты не позволили сделать однозначный вывод о влиянии формы коников грузового отсека на массу пачки лесоматериалов. С одной стороны, результаты свидетельствуют, что на средние показатели форма коников грузового отсека практически не влияет, с другой стороны, отличия в формах вариационных кривых для моделей форвардеров с одинаковыми площадями поперечного сечения грузовых отсеков указывают на наличие влияния формы коников. Вероятно, характер распределения значений параметров пачки в определенной степени зависит от формы коников грузового отсека лесных машин.

Сравнение грузоподъемностей и результатов компьютерного эксперимента показало, что все рассмотренные модели форвардеров обладают достаточной грузоподъемностью для транспортировки пачки, сформированной из елового баланса длиной 4,0 м, однако «Амкодор 2661-01» и Ponsse Wisent находятся на грани допустимости. Следует учитывать, что все расчеты проведены для древесины ели. В среднем плотность ели меньше плотности сосны, березы и осины, а плотность свежесрубленной древесины в зависимости от времени года подвержена изменениям [5]. Таким образом, масса пачки при транспортировке сортиментов другой породы может превосходить значения, полученные нами в ходе компьютерного эксперимента. Для транспортировки полногрузной пачки, сформированной из елового пиловочника длиной 6,1 м, все рассмотренные модели форвардера обладают недостаточной грузоподъемностью. Для большинства моделей даже минимальное значение массы пачки по полученным выборкам превосходит их грузоподъемность.

Данные о вариации параметров пачки хорошо согласуются с результатами исследований, проведенных в Европе [10, 27, 29], а также в других регионах СЗФО [4].

Проведенные исследования основаны на имитационной модели, которая отличается от реальных объектов и протекающих процессов, что приводит к появлению погрешностей в расчетах. Перечислим основные их причины.

Во-первых, моделирование загрузки лесоматериалов осуществляется в плоскости, а не в объеме. В связи с этим не учитываются кривизна лесоматериалов, различные пороки, сучки, а также физика взаимодействия лесоматериалов по всей их длине. Вероятно, это приводит к завышению значений массы пачки лесоматериалов.

Во-вторых, модель не учитывает силы инерции и силу тяжести, которые способствуют дополнительному уплотнению лесоматериалов в грузовом отсеке форвардера и повышению коэффициента полнодревесности пачки.

В связи с тем, что формы стволов в исследовании основывались на данных средств объективного контроля харвестеров, третья причина неточностей в расчетах связана с погрешностями измерения средств объективного контроля оборудования. Например, в требованиях Финляндии оговаривается, что погрешность в измерении должна быть в пределах $\pm 4\%$ [24]. Однако при должной калибровке современные системы измерения харвестера могут обеспечивать точность в пределах $\pm 2\%$ [15]. Проведенные в Ирландии исследования показывают, что точность измерения в основном находится в пределах $\pm 5\%$, но фиксировались случаи, когда точность выходила за $\pm 7\%$ [24]. В России нормативные документы допускают отклонения и погрешности измерения при определении объемов круглых лесоматериалов в пределах $\pm 5\%$.

Дополнительные погрешности при нахождении параметров полногрузных пачек на основе данных средств объективного контроля харвестеров связаны со спецификой измерения диаметра. Если при измерении диаметра его значение больше значения, измеренного в предыдущий момент времени, то в зачет принимаются данные предыдущего измерения. Это позволяет нивелировать наличие шишек на стволе и утолщений в месте роста сучьев при определении объема лесоматериала. Однако именно эти элементы при укладке лесоматериалов в грузовой отсек влияют на коэффициент полнодревесности пачки, а соответственно и на ее массу.

Четвертая причина появления погрешностей в расчетах связана с определением плотности древесины и коры лесоматериалов. Известно, что плотность древесины изменяется не только по высоте дерева, но и по толщине [5]. Кроме того, она зависит от влажности древесины, которая может сильно колебаться в зависимости не только от периода времени, но и от места произрастания дерева в древостое. В наших исследованиях мы ориентировались на изменение средней влажности свежесрубленной древесины в продольном направлении ствола. Изменение плотности коры по длине ствола дерева не учитывалось, а использовалось среднее значение.

Пятая причина вызвана ограниченностью используемого банка стволов деревьев, который не может абсолютно характеризовать все многообразие их форм на рассматриваемой территории.

Заключение

Исследования показали, что параметры пачек изменяются в значительных пределах. В среднем колебание массы пачки лесоматериалов, сформированной из елового пиловочника длиной 6,1 м, составляет 4,5 т, из елового баланса длиной 4,0 м – 2,8 т. Чем длиннее сортименты, из которых сформированы пачки, тем вариация массы больше. Грузоподъемность рассмотренных моделей форвардеров на транспортировке полногрузной пачки, составленной из лесоматериалов длиной 6,0 м и более, недостаточна. Для обеспечения высокой вероятности

исключения превышения рейсовой нагрузки над номинальной грузоподъемностью машины необходимо загружать грузовой отсек не более чем на 3/4. При площади поперечного сечения грузового отсека форвардера 4,0 м² грузоподъемность шасси для районов СЗФО должна быть не менее 16,0 т, при площади 4,8 м² – 19,0 т. Промежуточные значения могут быть найдены интерполяцией. Данные значения грузоподъемности не учитывают запас, который обычно составляет 20...30 %. Ввиду существования проблемы перегруза форвардеров целесообразно снабжать их системами взвешивания транспортируемого груза и сигнализации перегрузки. Кроме того, рекомендуется наличие индикации уровня загрузки стоек грузового отсека для различных видов лесоматериалов.

Полученные результаты могут быть использованы производителями и предприятиями-потребителями лесозаготовительной техники, а также операторами форвардеров. Приведенные методика и инструментальные средства осуществления компьютерного имитационного эксперимента могут быть распространены на широкий спектр природно-производственных условий лесосечных работ при использовании различных существующих и перспективных марок форвардеров.

Данная работа направлена на расширение знаний в области моделирования параметров транспортируемых форвардерами пачек лесоматериалов и не претендует на исчерпывающий характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богданов Е.С., Козлов В.А., Пейч Н.Н. Справочник по сушке древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 192 с. [Bogdanov E.I., Kozlov V.A., Peych N.N. *Handbook on Wood Drying*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 192 p.]
2. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с. [Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Handbook on Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 296 p.]
3. Войнаш А.С., Войнаш С.А. Исследование влияния рейсовой нагрузки на проходимость гусеничного сортиментовоза // Лесн. журн. 2011. № 5. С. 47–53. [Voinash A.S., Voinash S.A. Study of Run Load Impact on Cross-Country Ability of Track-Type Short Log Truck. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2011, no. 5, pp. 47–53.]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/32f/hihx1.pdf>
4. Катаров В.К., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // Resources and Technology. 2012. № 9(2). С. 73–81. [Katarov V.K., Syunev V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Resources and Technology*, 2012, no. 9(2), pp. 73–81].
5. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с. [Poluboyarinov O. I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p.]
6. Цывин М.М. Использование древесной коры. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 96 с. [Tsyvin M.M. *The Use of Wood Bark*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 96 p.]
7. Akay A.E., Yilmaz M., Tonguc F. Impact of Mechanized Harvesting Machines on Forest Ecosystem: Residual Stand Damage. *Journal of Applied Sciences*, 2006, vol. 6, iss. 11, pp. 2414–2419.
8. Ampoorter E., de Schrijver A., van Nevel L., Hermy M., Verheyen K. Impact of Mechanized Harvesting on Compaction of Sandy and Clayey Forest Soils: Results of a Meta-Analysis. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, iss. 5, pp. 533–542. DOI: [10.1007/s13595-012-0199-y](https://doi.org/10.1007/s13595-012-0199-y)
9. Brunberg T. *Underlag till produktionsnormer för skotare* [Productivity-Norm Data for Forwarders]. Redogörelse nr. 3. Uppsala, Skogforsk, 2004. 12 p.

10. Danilović M., Stojnić D., Karić S., Sučević M. Transport of Technical Round-Wood by Forwarder and Tractor Assembly from Poplar Plantations. *Nova mehanizacija šumarstva*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 11–22.

11. Eliasson L. Effects of Forwarder Tyre Pressure on Rut Formation and Soil Compaction. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 549–557. DOI: [10.14214/sf.366](https://doi.org/10.14214/sf.366)

12. Engel A.-M., Wegener J., Lange M. Greenhouse Gas Emissions of Two Mechanised Wood Harvesting Methods in Comparison with the Use of Draft Horses for Logging. *European Journal of Forest Research*, 2012, vol. 131, iss. 4, pp. 1139–1149. DOI: [10.1007/s10342-011-0585-2](https://doi.org/10.1007/s10342-011-0585-2)

13. Gerasimov Y., Senkin V., Väätäinen K. Productivity of Single-Grip Harvesters in Clear-Cutting Operations in the Northern European Part of Russia. *European Journal of Forest Research*, 2012, vol. 131, iss. 3, pp. 647–654. DOI: [10.1007/s10342-011-0538-9](https://doi.org/10.1007/s10342-011-0538-9)

14. Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic Evaluation and Comparison of Wood Harvesting Systems in Northwest Russia. *Applied Ergonomics*, 2014, vol. 45, iss. 2, part B, pp. 318–338. DOI: [10.1016/j.apergo.2013.04.018](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018)

15. Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving Cut-to-Length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, iss. 1, pp. 89–105.

16. Gingras J-F. *Recent Developments in Chip Cleaning and Cut-to-Length Harvesting Technologies in Finland*. Internal Report IR-1995-06-01. Forest Engineering Research Institute of Canada, Eastern Division, 1995.

17. Golyakevich S.A., Goronovskii A.R. Evaluation of Loading Dynamics and Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, iss. 5, pp. 463–471. DOI: [10.3103/S1052618817050077](https://doi.org/10.3103/S1052618817050077)

18. Goutal N., Keller T., Défossez P., Ranger J. Soil Compaction Due to Heavy Forest Traffic: Measurements and Simulations Using an Analytical Soil Compaction Model. *Annals of Forest Science*, 2013, vol. 70, iss. 5, pp. 545–556. DOI: [10.1007/s13595-013-0276-x](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0276-x)

19. Klvač R., Fischer R., Skoupy A. Energy Use of and Emissions from the Operation Phase of a Medium Distance Cableway System. *Croatian Journal of Engineering*, 2012, vol. 33, iss. 1, pp. 79–88.

20. Labelle E.R., Jaeger D. Effects of Steel Flexible Tracks on Forwarder Peak Load Distribution: Results from a Prototype Load Test Platform. *Croatian Journal of Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 1, pp. 1–23.

21. Lijewski P., Merkisz J., Fuć P., Ziółkowski A., Rymaniak L., Kusiak W. Fuel Consumption and Exhaust Emissions in the Process of Mechanized Timber Extraction and Transport. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, iss. 1, pp. 153–160. DOI: [10.1007/s10342-016-1015-2](https://doi.org/10.1007/s10342-016-1015-2)

22. Lindholm E.-L., Berg S. Energy Requirement and Environmental Impact in Timber Transport. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 20, iss. 2, pp. 184–191. DOI: [10.1080/02827580510008329](https://doi.org/10.1080/02827580510008329)

23. Lindholm E.-L., Berg S., Hansson P.-A. Energy Efficiency and the Environmental Impact of Harvesting Stumps and Logging Residues. *European Journal of Forest Research*, 2010, vol. 129, iss. 6, pp. 1223–1235. DOI: [10.1007/s10342-010-0412-1](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0412-1)

24. Mousavi S.R. *Comparison of Productivity, Cost and Environmental Impacts of Two Harvesting Methods in Northern Iran: Short-Log versus Long-Log*. Ph.D. Thesis. University of Joensuu, Finland. 2009.

25. Nieuwenhuis M., Dooley T. The Effect of Calibration on the Accuracy of Harvester Measurements. *International Journal of Forest Engineering*, 2006, vol. 17, iss. 2, pp. 25–33. DOI: [10.1080/14942119.2006.10702533](https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702533)

26. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, pp. 335–363. DOI: [10.14214/sf.346](https://doi.org/10.14214/sf.346)

27. Oberscheider M., Zazgornik J., Henriksen C.B., Gronalt M., Hirsch P. Minimizing Driving Times and Greenhouse Gas Emissions in Timber Transport with a Near-Exact Solution Approach. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, iss. 5, pp. 493–506. DOI: [10.1080/02827581.2012.758309](https://doi.org/10.1080/02827581.2012.758309)

28. Pandur Z., Horvat D., Šušnjar M., Zorić M., Knežević M. Load Space Utilization of a Valmet 860.4 Forwarder. *Forest Engineering: "Making a Positive Contribution". Abstracts and Proceedings of the 48th Symposium on Forest Mechanization, Linz, Austria, October 4–8, 2015*. Linz, Austria, 2015, pp. 271–275.

29. Proto A.R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. A Case Study on the Productivity of Forwarder Extraction in Small-Scale Southern Italian Forests. *Small-Scale Forestry*, 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 71–87. DOI: [10.1007/s11842-017-9376-z](https://doi.org/10.1007/s11842-017-9376-z)

30. Proto A.R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European Journal of Forest Research*, 2018, vol. 137, iss. 2, pp. 143–151. DOI: [10.1007/s10342-017-1088-6](https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6)

31. Ringdahl O., Hellström T., Lindroos O. Potentials of Possible Machine Systems for Directly Loading Logs in Cut-to-Length Harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, no. 5, pp. 970–985. DOI: [10.1139/x2012-036](https://doi.org/10.1139/x2012-036)

32. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of Harvester Productivity in Selective and Boom-Corridor Thinning of Young Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 56–73. DOI: [10.1080/02827581.2011.628335](https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335)

33. Sängstuvall L., Lämås T., Nordfjell T. Application of a Primarily Deductive Framework Describing Time Consumption for Hauling of Logs to Road-Side. *Annals of Operations Research*, 2014, vol. 219, iss. 1, pp. 477–489. DOI: [10.1007/s10479-012-1172-8](https://doi.org/10.1007/s10479-012-1172-8)

34. Sirén M., Salmivaara A., Ala-Ilomäki J., Launiainen S., Lindeman H., Uusitalo J., Sutinen R., Hänninen P. Predicting Forwarder Rut Formation on Fine-Grained Mineral Soils. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, iss. 2, pp. 145–154. DOI: [10.1080/02827581.2018.1562567](https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1562567)

35. Talbot B., Nordfjell T., Suadican K. Assessing the Utility of Two Integrated Harvester-Forwarder Machine Concepts through Stand-Level Simulation. *International Journal of Forest Engineering*, 2003, vol. 14, iss. 2, pp. 31–43. DOI: [10.1080/14942119.2003.10702476](https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702476)

36. Vossbrink J., Horn R. Modern Forestry Vehicles and Their Impact on Soil Physical Properties. *European Journal of Forest Research*, 2004, vol. 123, iss. 4, pp. 259–267. DOI: [10.1007/s10342-004-0040-8](https://doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8)

37. Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, vol. 16, iss. 2, pp. 11–27. DOI: [10.1080/14942119.2005.10702510](https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510)

COMPUTER EXPERIMENT TECHNIQUE FOR DETERMINING THE LOAD CAPACITY AND DIMENSIONS OF THE CARRYING COMPARTMENT OF A FOREST VEHICLE

I.R. Shegelman¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [P-9793-2019](https://orcid.org/0000-0001-5133-4586);

ORCID: [0000-0001-5133-4586](https://orcid.org/0000-0001-5133-4586)

P.V. Budnik¹, Candidate of Engineering, Head of the Department of Intellectual Property and Invention Protection; ResearcherID: [E-1782-2015](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442); ORCID: [0000-0002-8701-4442](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442)

V.N. Baklagin², Candidate of Engineering, Research Scientist; ResearcherID: [M-2265-2016](https://orcid.org/0000-0002-0060-1653);

ORCID: [0000-0002-0060-1653](https://orcid.org/0000-0002-0060-1653)

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: shegelman@onego.ru, budnikpavel@yandex.ru

²Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prosp. Aleksandra Nevskogo, 50, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030, Russian Federation; e-mail: slava.baklagin@mail.ru

The research purpose involved the formation of objective information on the weight of a hauled bundle of logs for wood enterprises and forest machinery manufacturers; contributing to the rational choice of specific models of forwarders and justification of their basic parameters for the natural and production conditions of the Northwestern Federal District. The research is based on a computer experiment and a large amount of actual data on the forms of tree trunks obtained with the help of the data recorders of harvesters. The Republic of Karelia was the collecting point of actual data on the forms of trunks. The following forwarder models were considered: John Deere 1210E, John Deere 1110E, Ponsse Elk, Ponsse Wisent, Amkodor 2661-01, Rottne F13D, Rottne F15D, and Rottne F18D. The results have shown that the weight of a bundle varies within wide limits. On average, the weight of a bundle made up of 6.1 m long spruce sawlog is 4.5 t, and 4.0 m long spruce pulpwood is 2.8 t. All the considered models have a stock of load capacity in transporting a bundle made up of 4 m long pulpwood. All the models of forwarders have insufficient load capacity in transporting a bundle made up of 6.1 m long sawlog. We recommend providing load capacity of at least 16 t for a cross-sectional area of the carrying compartment 4 m², and not less than 19 t for the area of 4.8 m² for logging machines designers. It is necessary to upload the carrying compartment of forwarders not more than to three-fourths when transporting a bundle made up of 6.1 m long assortment. This will highly likely allow to exclude the overloading of scheduled capacity over the rated load capacity of a forest transport vehicle.

For citation: Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Computer Experiment Technique for Determining the Load Capacity and Dimensions of the Carrying Compartment of a Forest Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 160–173. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.160

Funding: The research was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists on the project “Development of an Environment for the Design of Optimal Parameters of Technological Equipment for Forest Multioperational Machines” (МК-5321.2018.8).

Keywords: simulation modeling, computer experiment, bundle weight, load capacity, logging operations, forwarder.

Поступила 19.06.19 / Received on June 19, 2019
