



УДК 634.0.375.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАСЧЕТНОЙ РЕЙСОВОЙ НАГРУЗКИ НА АНТЕЦЕДЕНТНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСЧОКЕРНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*И.Р. Шегельман, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: P-9793-2019,  
ORCID: 0000-0001-5133-4586*

*П.В. Будник, канд. техн. наук, нач. отдела защиты интеллектуальной собственности и изобретательства; ResearcherID: E-1782-2015, ORCID: 0000-0002-8701-4442*  
Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: shegelman@onego.ru, budnikpavel@yandex.ru

Повышение эффективности лесопромышленного комплекса не может быть обеспечено без совершенствования методик проектирования лесных машин. Анализ исследований, посвященных данной проблематике, показывает, что этому вопросу уделяется недостаточное внимание. Перед нами стояла задача проанализировать влияние вероятностного характера параметров деревьев на нагрузку от перемещаемой пачки деревьев, действующую на бесчokerную трелевочную систему, а также определить на основе результатов анализа диапазон значений необходимой грузоподъемности самоходного шасси бесчokerной трелевочной системы. Исследования основывались на машинном эксперименте, заключающемся в генерации совокупности деревьев, необходимой для полного заполнения захвата трелевочной системы. Параметры генерируемых деревьев определялись таксационными условиями древостоев Республики Карелия. На основе обработки результатов машинного эксперимента было получено 45 вариационных рядов, характеризующих распределение массы трелеваемой пачки деревьев. С увеличением размера захвата вариационная кривая смещалась в правую сторону по оси массы пачки, а ее форма изменялась. Кривая незначительно растягивалась и становилась более пологой, максимальное значение относительной частоты массы пачки снижалось. Масса пачки деревьев при одном и том же размере захвата колебалась в значительных пределах. Разница между максимальными и минимальными значениями массы пачки находилась в диапазоне 3,7...5,6 т. Увеличение размера захвата приводило к росту разницы между максимальным и минимальным значениями массы пачки. Установлена аналитическая зависимость массы пачки, необходимой для определения грузоподъемности самоходного шасси трелевочной системы, от размера захвата. Рекомендованные значения грузоподъемности самоходного шасси в рассмотренном интервале размеров захвата 1,0...2,2 м<sup>2</sup> находятся в диапазоне 5,5...12,4 т. Полученные результаты могут быть использованы на антецедентной стадии проектирования лесных машин, а также при технико-экономической оценке бесчokerных трелевочных систем, эксплуатируемых в условиях Республики Карелия.

**Для цитирования:** Шегельман И.Р., Будник П.В. Особенности оценки расчетной рейсовой нагрузки на антецедентной стадии проектирования бесчokerной трелевочной системы на основе машинного эксперимента // Лесн. журн. 2019. № 3. С. 82–96. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82

**Финансирование:** Исследования проведены в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации № МК-5321.2018.8.

**Ключевые слова:** бесчokerная трелевка, проектирование машины, грузоподъемность шасси, масса пачки, машинный эксперимент, функция распределения, вероятность.

### *Введение*

Лесная и деревообрабатывающая промышленность – важная компонента экономик многих стран мира [13]. Лесопромышленный комплекс также является значимой частью в структуре экономики многих регионов России [1]. Однако в связи с недостаточно эффективным освоением лесных ресурсов [4] перед научно-техническим сообществом отрасли остро стоит задача по решению этой проблемы.

Повышение эффективности лесопромышленного комплекса не может быть обеспечено без рационализации лесозаготовительных работ. Анализ многих исследований отечественных [2, 9, 10] и зарубежных [16, 21, 29] специалистов показывает, что в основе рационализации должен лежать оптимальный выбор технологий и применяемых лесных машин. При этом в качестве критерия оптимальности могут выступать различные характеристики. В целом чем оптимальнее подобраны лесозаготовительные технологии и комплексы машин к природно-производственным и рыночным условиям, тем выше эффективность лесозаготовок (здесь под эффективностью понимается как экономическая результативность, так и экологическая безопасность).

При таком подходе положительный эффект от оптимального выбора лесных машин зависит от их доступного множества. Если в имеющемся множестве параметры лесных машин в недостаточной мере соответствуют природно-производственным условиям лесозаготовок, положительный эффект от оптимального выбора будет снижен. Параметры лесных машин соответствуют природно-производственным условиям в том случае, если они позволяют осваивать машине лесные ресурсы в определенном районе эксплуатации и обеспечивают экономическую эффективность и экологическую безопасность. Такое соответствие может быть предусмотрено на стадии их проектирования, в частности на antecedentном этапе, на котором устанавливаются основные параметры машины, например необходимая грузоподъемность самоходного шасси, мощность двигателя, вылет манипулятора и др.

Многие исследования касаются проблематики проектирования лесных машин и определения их различных параметров [17, 20]. Однако в них недостаточно уделяется внимания анализу влияния вероятностного характера параметров деревьев при расчетах нагрузок, действующих на машину.

Цель исследования – анализ влияния вероятностного характера параметров деревьев на нагрузку от перемещаемой пачки деревьев, действующую на бесчokerную трелевочную систему, а также определение на основе результатов анализа диапазона значений необходимой грузоподъемности самоходного шасси при проектировании этой системы для условий Республики Карелия.

### *Объекты и методы исследования*

Под бесчokerной трелевочной системой (БТС) понимается как лесная машина, оснащенная зажимным коником и манипулятором, так и машина, снабженная арочным захватом (скиддером). Новизна подхода заключается в учете на основе машинного эксперимента вероятностного характера параметров деревьев при определении диапазона значений необходимой грузоподъемности самоходного шасси БТС.

Расчет нагрузки от перемещаемой пачки деревьев на БТС требует определения ее массы. Из ранее проведенных исследований известно, что масса пачки деревьев на трелевке при одинаковом размере захвата варьируется в значительной степени [23, 25, 28]. Здесь под захватом имеется в виду как арочный захват скиддера, так и зажимной коник бесчokerного трелевочного трактора.

Варьирование преимущественно объясняется вероятностным характером параметров деревьев в пачке. Использование значения массы пачки, рассчитанного на основе средних параметров деревьев, помещающихся в захвате, не приемлемо для определения грузоподъемности самоходного шасси при проектировании БТС. Значительное количество пачек будет иметь большую массу, чем среднее значение, и машина будет работать с частыми перегрузками. Применение значения массы пачки, состоящей из наиболее крупных деревьев в древостое, приведет к тому, что машина будет обладать избыточными параметрами, так как вероятность сбора такой пачки близка нулю. Ввиду варьирования массы трелюемой пачки деревьев существует проблема определения расчетного значения, по которому может быть выбрана необходимая грузоподъемность самоходного шасси БТС.

По нашему мнению, для расчета нагрузки на БТС следует принимать такое значение массы пачки деревьев, которое на практике не будет превышено с определенной вероятностью. Пусть  $M_i$  – масса  $i$ -й пачки деревьев и  $M_i \in \omega$ , где  $\omega$  – некоторое множество пачек деревьев, которые могут быть сформированы в определенных природно-производственных условиях эксплуатации БТС. Множество  $\omega$  имеет минимальное ( $M_{\min}$ ) и максимальное ( $M_{\max}$ ) значения. Примем в качестве  $Q_j$  – некоторое заданное значение массы пачки, используемое для расчета нагрузки на БТС и находящееся в интервале  $[Q_j^{\min}; Q_j^{\max}]$ . Обозначим  $F(M_i)$  – вероятность события, состоящего в том, что  $M_i < X$ , где  $X$  – некоторое значение из интервала  $(M_{\min}; M_{\max})$ . Так как  $M_i$  переменная величина, то  $F(M_i)$  также изменяется и является интегральной функцией распределения значений массы пачки деревьев. Значение  $Q_j$ , по нашему мнению, может быть выбрано из диапазона, в котором  $F(M_i)$  принимает значения 0,90...0,99 ( $F(Q_j^{\min}) = 0,90$ ;  $F(Q_j^{\max}) = 0,99$ ). Оптимальное значение  $F(M_i)$  может быть определено на основе технико-экономического анализа, но в рамках данного исследования этот вопрос не рассматривался. На рис. 1 приведена схема определения значения расчетной массы пачки.

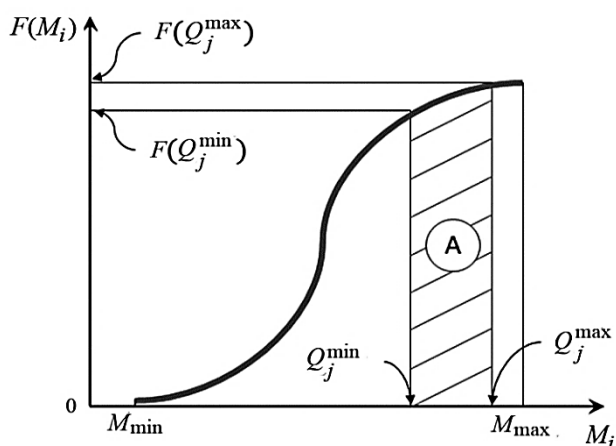


Рис. 1. Схема, поясняющая концепцию определения массы пачки деревьев при проектировании БТС (А – интервал выбора расчетных значений массы пачки)

Fig. 1. Scheme explaining the concept of mass calculation of a tree bundle in the design of a chokerless skidding system (A – interval for selecting calculation values of a tree bundle)

Влияние вероятностного характера параметров деревьев на нагрузку от перемещаемой пачки деревьев можно проанализировать на основе интегральной функции распределения  $F(M_i)$ , диапазон значений необходимой грузоподъемности самоходного шасси БТС определим путем расчета  $Q_j^{\min}$  и  $Q_j^{\max}$ . Таким образом, задача состоит в построении функции распределения значений массы пачки деревьев, которая может разместиться в захвате БТС, и вычисления на ее основе значений  $Q_j^{\min}$  и  $Q_j^{\max}$  при заданных  $F(Q_j^{\min})$  и  $F(Q_j^{\max})$  соответственно.

Существует значительное количество исследований, посвященных изучению эффективности различных моделей трелевочных тракторов [14, 22]. В рамках этих работ накапливаются статистические данные об объемах трелеваемых пачек деревьев, на основе которых с определенной точностью могут быть рассчитаны значения масс пачек. Количество наблюдений в таких исследованиях колеблется от 30 до 300 [15], так как получение данных чрезвычайно трудоемко. Однако этого количества наблюдений недостаточно для определения интегральной функции распределения.

Для решения данной задачи предлагается использовать разработанную авторами методику, основывающуюся на машинном эксперименте и позволяющую спрогнозировать функцию распределения значений массы пачки деревьев. В настоящем исследовании методика, приспособленная к природным условиям Республики Карелия, включает следующие этапы.

На первом этапе устанавливают структуру древостоя по толщине и распределение пород деревьев, характерных для будущей территории эксплуатации БТМ. Структура древостоя по толщине может быть выражена в виде распределения ступеней толщины или вариационного ряда распределения диаметров на высоте груди или в виде установленного закона распределения диаметров в древостое. Структура древостоя по толщине определяется либо для каждой породы, либо без разделения по породам – в случае, если структуры по разным породам идентичны. В данном исследовании для формирования структуры древостоя по толщине использовались данные Г.К. Виногорова [3]. Распределение пород деревьев получено на базе материалов Лесного плана Республики Карелия.

На втором этапе устанавливают параметры форм стволов деревьев путем аналитического описания либо при помощи функции сбега ствола, либо образующей ствола, а также параметры крон. Определению образующей ствола или функции сбега уделено внимание во многих работах [7, 8]. Наши исследования основываются на результатах работы В.К. Захарова [5]. На данном этапе также определяется высота ствола, которая рассчитывается либо на основе имеющихся функций образующих стволов, либо с применением таблиц объемов стволов для соответствующих пород и регионов.

На третьем этапе проводят машинный эксперимент, для чего авторами разработана имитационная модель, реализованная в компьютерной программе [11]. Входными параметрами являются: площадь поперечного сечения захвата ( $S$ , м<sup>2</sup>); вылет комлей деревьев в захвате ( $a$ , м). В ходе машинного эксперимента моделируется множество  $\omega$  и определяются значения  $M_i$ . В данном исследовании рассматриваются значения  $S$ , характерные для БТС, применяемых в Российской Федерации, м: 1,00; 1,10; 1,24; 1,34; 1,48; 1,58; 1,77; 1,95; 2,20. Величина  $a$  варьировалась от 0,5 до 1,5 м. Значения  $a$  приняты на основе результатов исследований, приведенных в работе [12].

На четвертом этапе осуществляют обработку результатов машинного эксперимента. Для этого строят вариационный ряд и интегральную функцию распределения.

На пятом этапе определяют значения  $Q_j^{\min}$  и  $Q_j^{\max}$ , при которых  $F(Q_j^{\min}) = 0,90$ , а  $F(Q_j^{\max}) = 0,99$ . Дополнительно определяют значение  $M_i$  при  $F(M_i) = 0,95$ .

На шестом этапе находят нагрузку на БТС от пачки деревьев путем расчета вертикальной составляющей нормальной силы ( $N_y$ , Н) при  $M_i = Q_j^{\min}$  и  $M_i = Q_j^{\max}$ :

$$N_y = \frac{(E[H_i] - h_c) \cos^2 \left( \arcsin \left( \frac{h + \Delta}{E[H_i] - a} \right) \right)}{E[H_i] - a} M_i g, \quad (1)$$

где  $E[H_i]$  – средняя длина деревьев в пачке, м;  $h_c$  – расстояние от края пачки до центра тяжести, м;  $h$  – расстояние от земли до захвата, м;  $\Delta$  – расстояние от захвата до центра пачки, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Выражение (1) получено на основе уравнения моментов. Поясняющая схема представлена на рис. 2.

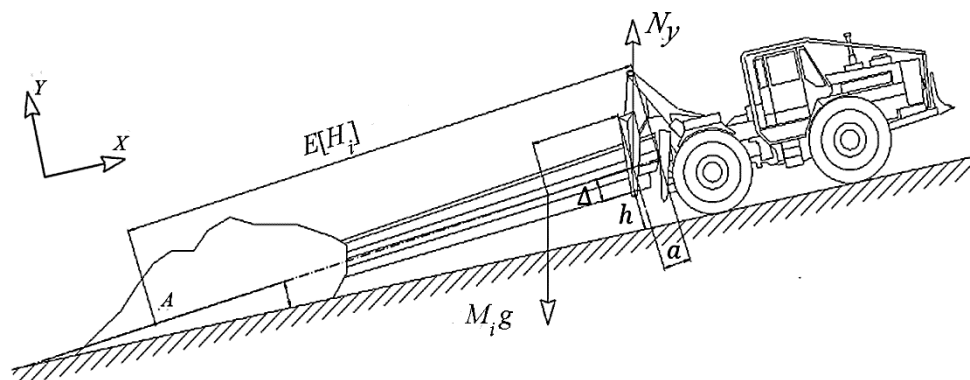


Рис. 2. Схема для расчета вертикальной составляющей нормальной силы ( $N_y$ )

Fig. 2. Scheme for calculating vertical component of the normal force  $N_y$

Расчет величины  $N_y$  осуществлялся при различных значениях  $h$ , м: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. На основе полученных значений  $N_y$  определялся диапазон значений грузоподъемности самоходного шасси БТС для условий Республики Карелия.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На основе обработки результатов машинного эксперимента было получено 45 вариационных рядов, характеризующих распределение массы трелюемой пачки деревьев для условий Республики Карелия.

На рис. 3 приведены вариационные кривые масс пачек деревьев при  $a = 0,5$  м для рассматриваемых значений  $S$ .

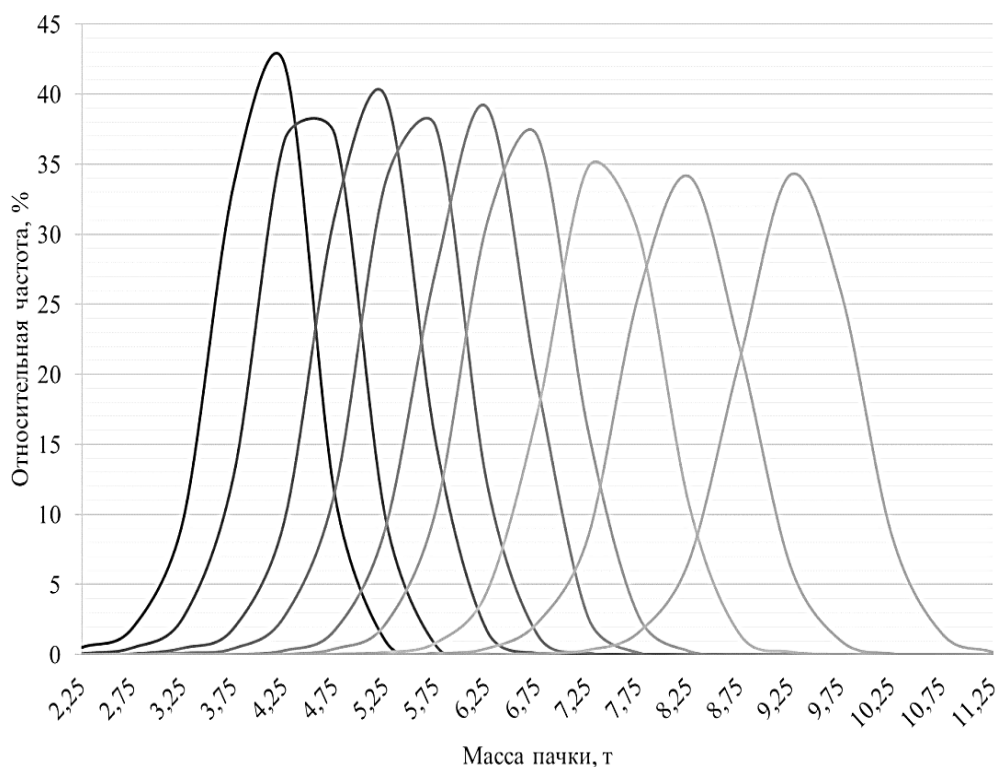


Рис. 3. Вариационные кривые масс пачек деревьев при различных значениях площади поперечного сечения захвата,  $m^2$ : 1,00; 1,10; 1,24; 1,34; 1,48; 1,58; 1,77; 1,95; 2,20 (вылет комлей деревьев в захвате  $a = 0,5$  м)

Fig. 3. Variation mass curves of tree bundles at various values of cross-sectional area of chain grapple,  $m^2$ : 1.00; 1.10; 1.24; 1.34; 1.48; 1.58; 1.77; 1.95; 2.20 (reach of tree butts in chain grapple  $a = 0.5$  m)

Масса пачки деревьев при одном и том же  $S$  колеблется в значительных пределах. С увеличением  $S$  вариационная кривая смещается в правую сторону по оси массы пачки и ее форма изменяется. Кривая незначительно растягивается и становится более пологой, а максимальное значение относительной частоты уменьшается. На практике это означает не только увеличение массы трелюемых пачек деревьев, но и возрастание размаха значений массы.

Кроме того, при увеличении размеров захвата разница между вероятностями появления различных значений массы пачек деревьев приближается к вероятности наиболее часто встречающегося значения (к моде).

В целом разница между максимальными и минимальными значениями смоделированных пачек деревьев находилась в диапазоне 3,7...5,6 т. При этом рост  $S$  и  $a$  в рассмотренных диапазонах их изменения приводил к увеличению разброса в интервале 0,2...2,0 т.

Увеличение массы трелюемой пачки деревьев с возрастанием  $S$  и  $a$  имело линейный характер. На рис. 4 представлена зависимость влияния  $S$  и  $a$  на среднее значение массы пачки ( $E[M_i]$ ).

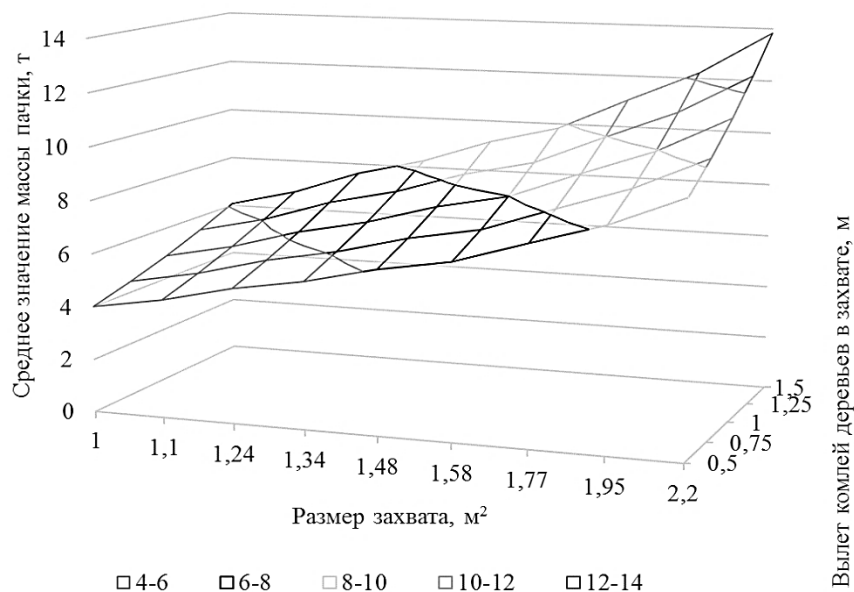


Рис. 4. Зависимость среднего значения массы пачки от площади поперечного сечения (размера) захвата и вылета комлей деревьев в захвате

Fig. 4. Dependence of the average value of tree bundle mass on the cross-sectional area (size) of chain grapple and reach of tree butts in chain grapple

В табл. 1 приведены минимальные ( $M_{\min}$ ), средние ( $E[M_i]$ ) и максимальные ( $M_{\max}$ ) значения масс пачек в зависимости от  $S$  и  $a$ , полученные в ходе машинного эксперимента.

Таблица 1

Минимальные, средние и максимальные значения масс (т) пачек деревьев

Характеристика вариационных кривых	$a$ , м	Масса, т, пачек при $S$ , м <sup>2</sup>								
		1	1,1	1,24	1,34	1,48	1,58	1,77	1,95	2,2
$M_{\min}$	0,50	1,6	2,3	2,8	3,2	3,9	4,0	4,9	5,7	6,8
$E[M_i]$		4,0	4,4	5,1	5,5	6,1	6,6	7,4	8,2	9,3
$M_{\max}$		5,6	6,1	6,8	7,3	8,5	8,9	9,7	10,2	11,4
$M_{\min}$	0,75	2,3	2,7	3,4	3,8	4,7	4,8	5,7	6,6	7,3
$E[M_i]$		4,4	4,9	5,6	6,1	6,7	7,2	8,1	9,0	10,2
$M_{\max}$		6,0	6,5	7,3	7,7	8,3	9,1	10,0	11,0	13,0
$M_{\min}$	1,00	2,5	3,1	3,6	4,4	5,1	5,5	6,7	7,5	8,5
$E[M_i]$		4,9	5,4	6,2	6,7	7,5	8,0	9,0	10,0	11,3
$M_{\max}$		6,3	7,1	7,6	8,4	9,1	9,6	10,7	11,7	13,3
$M_{\min}$	1,25	3,1	3,7	4,5	5,1	6,0	6,4	7,6	8,3	10,1
$E[M_i]$		5,5	6,0	6,9	7,5	8,3	8,9	10,0	11,0	12,5
$M_{\max}$		6,8	7,4	8,6	9,2	9,8	10,5	11,7	12,7	14,3
$M_{\min}$	1,50	3,6	4,3	5,3	5,7	6,8	7,2	8,6	9,7	11,3
$E[M_i]$		6,1	6,7	7,6	8,3	9,2	9,8	11,1	12,2	13,8
$M_{\max}$		7,5	8,0	9,1	9,6	10,5	11,4	12,6	14,1	15,4

В табл. 2 приведены значения масс пачек деревьев, имеющих наибольшую вероятность (моду). В большинстве случаев мода была больше среднего значения, т. е. среднее значение массы пачки деревьев было меньше нижней

границы интервала, указанного в табл. 2. Разница составляла до 1,5 т. Вероятность моды находилась в диапазоне 9...15 %. На практике это означает, что в большинстве случаев значение массы пачки будет отличаться как от среднего значения, так и от моды (с вероятностью 85...91 %).

Таблица 2

**Наиболее вероятные значения масс ( $(M \pm \Delta)$ , т) пачек деревьев**

Размер захвата, м <sup>2</sup>	$a = 0,50$ м		$a = 0,75$ м		$a = 1,00$ м		$a = 1,25$ м		$a = 1,50$ м	
	$M$	$\pm\Delta$	$M$	$\pm\Delta$	$M$	$\pm\Delta$	$M$	$\pm\Delta$	$M$	$\pm\Delta$
1,00	4,05	0,12	4,45	0,12	5,04	0,12	5,61	0,12	6,20	0,12
1,10	4,54	0,12	5,10	0,12	5,50	0,12	6,19	0,11	6,88	0,11
1,24	5,11	0,13	5,64	0,12	6,28	0,12	7,01	0,13	7,75	0,12
1,34	5,67	0,13	6,20	0,12	6,81	0,12	7,58	0,13	8,42	0,12
1,48	6,11	0,14	6,90	0,11	7,53	0,13	8,43	0,12	9,31	0,12
1,58	6,69	0,15	7,17	0,14	8,12	0,13	9,01	0,13	10,01	0,13
1,77	7,33	0,15	8,22	0,14	9,11	0,13	10,06	0,13	11,18	0,13
1,95	8,14	0,14	8,98	0,14	10,07	0,13	11,15	0,14	12,34	0,14
2,20	9,32	0,14	10,10	0,18	11,42	0,15	12,64	0,13	14,04	0,13

На основе анализа вариационных кривых были построены интегральные функции распределения  $F(M_i)$ . По данным функциям определены значения  $Q_j^{\min}$  при  $F(Q_j^{\min}) = 0,90$ ,  $Q_j^{\max}$  при  $F(Q_j^{\max}) = 0,99$  и  $Q_j^{0,95}$  при  $F(Q_j^{0,95}) = 0,95$ . Полученные результаты приведены в табл. 3. Разница между  $E[M_i]$  и  $Q_j^{\min}$  находилась в интервале 0,4...0,6 т в рассматриваемом диапазоне значений  $a$  и  $S$ , между  $E[M_i]$  и  $Q_j^{0,95}$  – в интервале 0,5...0,8 т, между  $E[M_i]$  и  $Q_j^{\max}$  – в интервале 0,8...1,3 т.

Таблица 3

**Максимальные значения масс (т) трелюемых пачек деревьев, при которых интегральная функция распределения принимает значения 0,90; 0,95; 0,99**

$F(M_i)$	$a$ , м	Масса пачек, т, при $S$ , м <sup>2</sup>								
		1,00	1,10	1,24	1,34	1,48	1,58	1,77	1,95	2,20
$F(Q_j^{\min})$	0,50	4,5	5,0	5,6	6,1	6,7	7,2	8,1	8,9	10,0
$F(Q_j^{0,95})$		4,7	5,1	5,8	6,3	6,9	7,4	8,2	9,1	10,2
$F(Q_j^{\max})$		5,0	5,4	6,1	6,6	7,2	7,7	8,6	9,5	10,6
$F(Q_j^{\min})$	0,75	4,9	5,4	6,1	6,6	7,3	7,8	8,8	9,7	10,9
$F(Q_j^{0,95})$		5,1	5,6	6,3	6,8	7,5	8,0	8,9	9,9	11,1
$F(Q_j^{\max})$		5,3	5,9	6,6	7,1	7,8	8,3	9,3	10,2	11,5
$F(Q_j^{\min})$	1,00	5,4	5,9	6,7	7,3	8,0	8,6	9,6	10,6	11,9
$F(Q_j^{0,95})$		5,5	6,1	6,8	7,4	8,2	8,7	9,8	10,7	12,1
$F(Q_j^{\max})$		5,8	6,3	7,1	7,7	8,5	9,0	10,1	11,0	12,5
$F(Q_j^{\min})$	1,25	5,9	6,5	7,4	8,0	8,8	9,4	10,5	11,6	13,1
$F(Q_j^{0,95})$		6,0	6,6	7,5	8,1	8,9	9,5	10,7	11,7	13,3
$F(Q_j^{\max})$		6,2	6,9	7,7	8,3	9,2	9,8	10,9	12,0	13,6
$F(Q_j^{\min})$	1,50	6,5	7,2	8,1	8,7	9,7	10,3	11,6	12,7	14,4
$F(Q_j^{0,95})$		6,6	7,3	8,2	8,9	9,8	10,4	11,7	12,9	14,5
$F(Q_j^{\max})$		6,8	7,5	8,4	9,1	10,0	10,7	11,9	13,1	14,8



Для расчета  $Q_j^{\min}$  при  $F(Q_j^{\min}) = 0,90$ ;  $Q_j^{\max}$  при  $F(Q_j^{\max}) = 0,99$  и  $Q_j^{0,95}$  при  $F(Q_j^{0,95}) = 0,95$  получено следующее выражение:

$$M = m_1 a + m_2 S + m_3, \quad (2)$$

где  $M$  – масса пачки деревьев при  $F(Q_j^{\min}) = 0,90$ ;  $F(Q_j^{0,95}) = 0,95$ ;  $F(Q_j^{\max}) = 0,99$ , или  $[M_i]$ , т;  $m_1, m_2, m_3$  – коэффициенты, определяемые согласно табл. 4.

Таблица 4

#### Коэффициенты для расчета массы пачки деревьев

Условие, при котором определяется $M$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$R^2$
$E[M_i]$	3,138	5,380	-3,549	0,985
$F(Q_j^{\min})$	3,000	5,508	-0,47	0,986
$F(Q_j^{0,95})$	2,941	5,550	-2,907	0,986
$F(Q_j^{\max})$	2,838	5,629	-2,635	0,987

Выражение (2) может использоваться для приближенной оценки  $Q_j^{\min}$ ,  $Q_j^{0,95}$  и  $Q_j^{\max}$  в диапазонах  $S$  от 1,1 до 2,2 м<sup>2</sup> и  $a$  от 0,5 до 1,5 м. Отклонение значений, рассчитанных по выражению (2), от значений, полученных в ходе машинного эксперимента, находится в интервале 0,09...0,90 т.

При помощи выражения (1) определены значения  $N_y$  для  $Q_j^{\min}$ ,  $Q_j^{0,95}$  и  $Q_j^{\max}$ . Для приблизительной оценки  $N_y$  на основе анализа результатов машинного эксперимента получено выражение

$$N_y = m_1 a + m_2 h + m_3 S + m_4, \quad (3)$$

где  $N_y$  – вертикальная составляющая нормальной силы для  $Q_j^{\min}$ ,  $Q_j^{0,95}$ ,  $Q_j^{\max}$  и  $E[M_i]$ , кН;  $m_1, m_2, m_3, m_4$  – коэффициенты, определяемые согласно табл. 5.

Таблица 5

#### Коэффициенты для расчета вертикальной составляющей нормальной силы

Условие, при котором определяется $N_y$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$R^2$
$E[M_i]$	34,357	-0,317	34,357	-24,908	0,981
$Q_j^{\min}$	35,135	-0,315	35,135	-21,842	0,982
$Q_j^{0,95}$	35,406	-0,305	35,406	-21,011	0,983
$Q_j^{\max}$	35,898	-0,320	35,898	-19,312	0,983

Выражения (1) и (3) дают значение вертикальной составляющей нормальной силы при движении БТС на горизонтальном участке. На склонах нагрузка от пачки деревьев перераспределяется. При движении в гору  $N_y$  уменьшается, на спуске в рассмотренном диапазоне  $S$ ,  $a$  и  $h$  значение  $N_y$  увеличивается на 1...3 % по сравнению с рассчитываемым согласно выражению (1). Максимальное значение  $N_y$ , которое может быть достигнуто при движении БТС на спуске, определяется как

$$N_y^{\max} = \frac{E[H_i] - h_c}{E[H_i] - a} M_i g. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4),  $N_y$  возрастает с увеличением  $S$  и  $a$  и убывает с ростом  $h$ .

В табл. 6 на основе анализа полученных результатов для БТС, применяемых в условиях Республики Карелия, в рассмотренном диапазоне  $S$ ,  $a$  и  $h$ , приведены диапазоны рекомендованных значений грузоподъемности самоходного шасси в зависимости от  $S$ . Рекомендации сделаны с учетом 25 %-го запаса грузоподъемности и дополнительных 3 % на компенсацию перераспределения нагрузки при работе БТС на спуске.

Таблица 6

**Диапазон рекомендуемых значений грузоподъемности (т) самоходного шасси БТС для условий Республики Карелия**

Диапазон грузоподъемности	Размер захвата, м <sup>2</sup>								
	1,00	1,10	1,24	1,34	1,48	1,58	1,77	1,95	2,20
Минимальный	5,5	6,0	6,8	7,4	8,1	8,7	9,7	10,7	12,1
Максимальный	5,7	6,3	7,1	7,6	8,4	9,0	10,0	11,0	12,4

Запас в 25 % необходим в том числе и для учета динамических нагрузок, которые могут возникать в процессе эксплуатации, а также дополнительных нагрузок на элементы самоходного шасси, появляющихся по причине наличия неровностей на волоке. При определении диапазона рекомендованной грузоподъемности самоходного шасси для БТС рассматривались значения  $N_y$  при  $h = 0,5$  м и  $a = 1,5$  м.

Следует отметить, что  $h$  для трелевочных тракторов, оснащенных зажимным коником и манипулятором, является постоянной величиной. Для большинства моделей скиддеров  $h$  в процессе трелевки может регулироваться.

Оценка массы пачки деревьев обычно проводится в исследованиях, связанных с установлением тяговых характеристик трелевочных тракторов [18, 26, 27]. В работе [24] масса пачки деревьев определялась для расчета движущих сил и расхода топлива кабельного трелевочного трактора. Как и в нашем исследовании, там применялась специально разработанная компьютерная программа. Схемы расчета сил, лежащие в основе компьютерной программы, схожи со схемами, использованными нами. Однако в этой работе не учитывалась вероятностная природа характеристик стволов деревьев, составляющих пачку. В работе [19] вычислялась масса пачки деревьев для оценки эффективности работы трелевочных тракторов. В исследовании также применялась компьютерная программа, основывающаяся на схожих схемах расчета сил, и учитывалась вариация массы пачки деревьев. Однако не учитывалась зависимость вариации массы пачки деревьев от структуры древостоя по толщине. В работе [30] параметры пачки деревьев вычислялись для оценки производительности трелевочных тракторов, а также времени, затрачиваемого на отдельные операции, использовалось компьютерное имитационное моделирование, однако не оценивались грузоподъемность трелевочных тракторов, а также зависимость массы пачки деревьев от структуры древостоя по толщине.

Таким образом, наше исследование является развитием перечисленных выше работ.

Точность расчетов по предложенной нами методике зависит от нескольких факторов. Во-первых, от соответствия структуры древостоя по толщине реальным условиям эксплуатации и моделям форм стволов отдельных деревьев и их крон, используемым при машинном эксперименте. В наших расчетах применены средневзвешенная структура древостоя по толщине для Республики Карелия [3] и модели стволов, построенные по данным В. К. Захарова [5], которые вероятно отличаются от условий эксплуатации на отдельных вырубках. Поэтому погрешности и неопределенности в полученных нами результатах остаются.

Следует также указать на некоторые упрощения в расчетах и имитационной модели. При расчетах величина  $a$  принята константой. На практике вылет комлей деревьев в захвате имеет некоторый разброс. Мы компенсировали это путем включения в исследование диапазона значений  $a$  от 0,5 до 1,5 м. Диапазон принят на основании данных, приведенных в работе [12]. Кроме того, в нашей имитационной модели коэффициент полндревесности пачки деревьев принят как постоянная величина 0,5 в соответствии с работой [12]. В действительности коэффициент изменяется в зависимости от размеров деревьев, составляющих пачку. Это может также приводить к незначительным неточностям в расчетах.

Кроме того, при нахождении вертикальной составляющей нормальной силы положение центра тяжести определялось приблизительно – на основании работы [6] как  $0,38E[H_i]$ . Также при расчетах не учитывался изгиб конца пачки деревьев, что снижает точность результатов.

Дальнейшие направления развития исследований – повышение точности расчетов и применение разработанной методики к другим регионам и лесным машинам. Повышение точности может быть обеспечено путем построения более надежных моделей стволов деревьев и структур древостоев по толщине, учета изменений коэффициента полндревесности пачки деревьев, более точного определения центра тяжести пачки.

#### *Выводы*

1. В условиях Республики Карелия масса пачки деревьев при трелевке колеблется в значительных пределах. Разница между максимальными и минимальными значениями массы пачек составляет 3,7...5,6 т.

2. Увеличение размеров захвата и вылета комлей деревьев в захвате приводит к росту разброса массы пачек в диапазоне 0,2...2,0 т.

3. Вероятность моды массы пачки составляет 9...15 %, т. е. на практике масса трелеваемой пачки деревьев будет отличаться от наиболее вероятной массы пачки с вероятностью 85...91 %.

4. Увеличение среднего значения массы пачки деревьев с возрастанием размера захвата бесчokerной трелевочной системы носит линейный характер.

5. В рассмотренном диапазоне площадей поперечного сечения захвата 1,0...2,2 м<sup>2</sup> рекомендованные значения грузоподъемности находятся в интервале 5,5...12,4 т.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Н.Е. Институциональные изменения в национальном лесном комплексе: оценка пространственных эффектов // Регионалистика. 2018. Т. 5, № 2. С. 21–32. DOI: 10.14530/reg.2018.2.21

2. *Беленький Ю.И., Букалов Д.А.* Особенности представления эффективного критерия формирования технологического процесса лесозаготовительного производства // Изв. СПбЛТА. 2008. № 185. С. 81–85.

3. *Виногоров Г.К.* К методике обоснования расчетных деревьев при решении лесозаготовительных задач // Тр. ЦНИИМЭ. 1972. № 122. С. 52–67.

4. *Григорьева В.В., Соколинская Ю.М.* Ключевые направления обеспечения устойчивого развития предпринимательства в лесном секторе экономики // Вестн. ВГУИТ. 2018. Т. 80, № 2. С. 442–448. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-442-448

5. *Захаров В.К.* Форма древесных стволов и методы ее исследования // Сб. науч. тр. / Белорус. лесотехн. ин-т им. С.М. Кирова. Минск: Гос. изд-во БССР, Ред. науч.-техн. лит., 1957. Вып. 10. С. 77–91.

6. *Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н.* Технология и машины лесосечных работ: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 392 с.

7. *Лебков В.Ф.* Аппроксимация образующей ствола и идентификация его формы функцией распределения // Лесн. журн. 2002. № 5. С. 16–23. (Изв. высш. учеб. заведений).

8. *Петровский В.С., Малышев В.В., Мурзинов Ю.В.* Моделирование параметров древесных стволов в насаждении // Лесотехн. журн. 2012. № 4. С. 18–22.

9. *Скурихин В.И., Корпачев В.П.* Обоснование выбора технологии и машинных комплексов на лесосечных работах // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 1. С. 203–209.

10. *Сухих А.Н., Иванов В.А., Сыромаха С.М.* Обоснование технологических параметров универсальной лесозаготовительной машины в условиях лесозаготовительного производства Иркутской области // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 7. С. 133–140.

11. *Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н.* Оценка рейсовой нагрузки лесного трактора как важнейшего фактора проектирования и создания прогрессивных лесных машин // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11. С. 78–83. DOI: 10.17513/snt.37241

12. *Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н.* Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профи-Информ, 2005. 344 с.

13. *Шуфан Я.* Повышение эффективности деятельности лесопромышленных предприятий на территории Российской Федерации // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1(37). С. 130–135. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-130-135

14. *Behjou F.K., Majnounian B., Namiranian M., Dvořák J.* Time Study and Skidding Capacity of the Wheeled Skidder Timberjack 450C in Caspian Forests // Journal of Forest Science. 2008. Vol. 54, no. 4. Pp. 183–188. DOI: 10.17221/5/2008-JFS

15. *Borz S.A.* A Review of the Romanian and International Practices in Skidding Operations // The XIV World Forestry Congress “Forests and People: Investing in a Sustainable Future”, September 7–11, 2015, Durban, the Republic of South Africa. Durban, 2015. Pp. 1–11.

16. *Cantú R.P., LeBel L., Gautam Sh.* A Context Specific Machine Replacement Model: A Case Study of Forest Harvesting Equipment // International Journal of Forest Engineering. 2017. Vol. 28, iss. 3. Pp. 124–133. DOI: 10.1080/14942119.2017.1357416

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

18. *Gray J.P., Vantsevich V.V., Paldan J.* Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility // Journal of Terramechanics. 2016. Vol. 65. Pp. 14–37. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.01.002

19. *Iff R.H., Koger J.L., Burt E.C., Culver E.W.* C-A-R-T-S: Capacity Analysis of Rubber-Tired Skidders // Transactions of the ASAE. 1984. Vol. 27, iss. 3. Pp. 660–664. DOI: 10.13031/2013.32847

20. *Ismoilov A., Sellgren U., Andersson K., Löfgren B.* A Comparison of Novel Chassis Suspended Machines for Sustainable Forestry // Journal of Terramechanics. 2015. Vol. 58. Pp. 59–68. DOI: 10.1016/j.jterra.2015.01.002

21. Kelly M.C., Germain R.H., Bick S. Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA // *Journal of Forestry*. 2017. Vol. 115, iss. 6. Pp. 503–512. DOI: 10.5849/JOF.2016-031R1
22. Kluender R., Lortz D., McCoy W., Stokes B., Klepac J. Removal Intensity and Tree Size Effects on Harvesting Cost and Profitability // *Forest Products Journal*. 1998. Vol. 48, iss. 1. Pp. 54–59.
23. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 38, iss. 1. Pp. 55–63.
24. Phillips R.A. Skidder Load Capacity and Fuel Consumption HP-41C Program. Res. Pap. NE-537. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northwestern Experiment Station; 1983. 7 p.
25. Spinelli R., Magagnotti N. Wood Extraction with Farm Tractor and Sulky: Estimating Productivity, Cost and Energy Consumption // *Small-scale Forestry*. 2012. Vol. 11, iss. 1. Pp. 73–85. DOI: 10.1007/s11842-011-9169-8
26. Stoilov S., Kostadinov G.D. Effect of Weight Distribution on the Slip Efficiency of a Four-Wheel-Drive Skidder // *Biosystems Engineering*. 2009. Vol. 104, iss. 4. Pp. 486–492. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.08.011
27. Vechinski C.R., Johnson C.E., Raper R.L. Evaluation of an Empirical Traction Equation for Forestry Tires // *Journal of Terramechanics*. 1998. Vol. 35, iss. 1. Pp. 55–67. DOI: 10.1016/S0022-4898(98)00012-3
28. Vusić D., Šušnjar M., Marchi E., Spina R., Zečić Ž., Picchio R. Skidding Operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands – Work Productivity, Energy Inputs and Emissions // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61, part A. Pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.052
29. Wang J., Greene W.D. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines // *Journal of Forest Engineering*. 2013. Vol. 10, no. 1. Pp. 81–99. DOI: 10.1080/08435243.1999.10702727
30. Wang J., LeDoux Ch.B. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production through Computer Simulation // *Forest Science*. 2003. Vol. 49, iss. 1. Pp. 64–76. DOI: 10.1093/forestscience/49.1.64

Поступила 15.03.19

UDC 634.0.375.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82

### Features of Calculated Truck Load Estimation at Antecedent Design Stage of Chokerless Skidding System Based on Computer Experiment

*I.R. Shegelman*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [P-9793-2019](#), ORCID: [0000-0001-5133-4586](#)

*P.V. Budnik*, Candidate of Engineering, Head of the Department of Intellectual Property and Invention Protection; ResearcherID: [E-1782-2015](#), ORCID: [0000-0002-8701-4442](#)  
Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; e-mail: shegelman@onego.ru, budnikpavel@yandex.ru

Efficiency improving of the forest sector cannot be achieved without development of the forest machines design methods. Analysis of the studies devoted to this issue shows that insufficient attention was paid to it. The research objectives were to analyze the influence of the probabilistic nature of tree parameters on the load from moving tree bundle acting on a chokerless skidding system, and to determine the range of values of the necessary load-carrying capacity of the system's chassis based on the analysis results. The research was based on computer experiment consist of tree bundle generating necessary for the full filling of the skidding system chain grapple. The parameters of generated trees were determined by the taxation conditions of the Karelian Republic forest stands. Forty five variation series characterizing the mass distribution of a skidding tree bundle were obtained based on the computer experiment results processing. The variation curve shifted to the right side along the mass axis of a tree bundle, and its shape changed with the increase of chain grapple size. The curve was stretched slightly and became more flat; the maximum value of the relative

frequency of tree bundle mass decreased. Tree bundle mass fluctuated significantly at the same size of chain grapple. The difference between the maximum and minimum mass values of tree bundles was in the range of 3.7–5.6 tons. It increased with the increase of chain grapple size. The analytical dependence of tree bundle mass necessary for determination the load-carrying capacity of the chokerless skidding system chassis on the chain grapple size was found. The recommended values of the chassis load-carrying capacity in the considered range of chain grapple sizes (1–2.2 m<sup>2</sup>) are in the range of 5.5–12.4 tons. The obtained results can be used at antecedent design stage of forest machines, as well as at technical and economic assessment of chokerless skidding systems operating in the Republic of Karelia.

**For citation:** Shegelman I.R., Budnik P.V. Features of Calculated Truck Load Estimation at Antecedent Design Stage of Chokerless Skidding System Based on Computer Experiment. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 82–96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82

**Funding:** the research was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation no. MK-5321.2018.8.

**Keywords:** chokerless skidding, machine design, lift capacity, mass of tree bundle, computer experiment, distribution function, probability.

#### REFERENCES

1. Antonova N.E. Institutional Changes in the National Forest Complex: The Evaluation of Spatial Effects. *Regionalistica* [Regionalistics], 2018, vol. 5, no 2. pp. 21–32. DOI: 10.14530/reg.2018.2.21
2. Belenkiy Yu.I., Bukalov D.A. Representation Features of an Effective Criterion for Logging Production Technological Process Formation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2008, iss. 185, pp. 81–85.
3. Vinogorov G.K. To the Procedure of Substantiation of Calculated Trees in Solving the Forest Management Issues. *Trudy TsNIIME*, 1972, no. 122, pp. 52–67.
4. Grigoryeva V.V., Sokolinskaya Y.M. Key directions of sustainable development of entrepreneurship in the forest sector of economics. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2018, vol. 80, no 2, pp. 442–448. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-442-448
5. Zakharov V.K. Shape of Tree Trunks and Methods of Its Research. *Collection of Academic Papers of the Belarusian Forestry Institute named after S.M. Kirov*, 1957, iss. 10, pp. 77–91.
6. Kochegarov V.G., Bit Yu.A., Men'shikov V.N. *Technology and Machines of Logging Operations: Textbook for Universities*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 392 p.
7. Lebkov V.F. Approximation of Stem Generatrix and its Form Identification by Cumulative Distribution Curve. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2002, no. 5, pp. 16–23.
8. Petrovskiy V.S., Malyshev V.V., Murzinov Yu.V. Parameters Simulation of Tree Trunks in a Stand. *Lesotekhnicheskij Zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 4, pp. 18–22.
9. Skurikhin V.I., Korpachev V.P. Choice Substantiation of Technology and Machine Systems for Logging Operations. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasSAU], 2007, no. 1, pp. 203–209.
10. Sukhikh A.N., Ivanov V.A., Syromakha S.M. Substantiation of Technological Parameters of the Universal Logging Machine in Logging Production of Irkutsk Region. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasSAU], 2010, no. 7, pp. 133–140.
11. Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Estimation of the Truck Load of the Forest Tractor as an Important Factor of Designing and Creating Progressive Forest Machines. *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii* [Modern High Technologies], 2018, no. 11, part 1, pp. 78–83. DOI: 10.17513/snt.37241
12. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Equipment of Modern Logging*. Saint Petersburg, Profi-Inform Publ., 2005. 344 p.

13. Shufang Y. Increase in efficiency of activity of the timber industry enterprises in the territory of the Russian Federation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 1(37), pp. 130–135. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-130-135
14. Behjou F.K, Majnounian B., Namiranian M., Dvořák J. Time Study and Skidding Capacity of the Wheeled Skidder Timberjack 450C in Caspian Forests. *Journal of Forest Science*, 2008, vol. 54, no. 4, pp. 183–188. DOI: 10.17221/5/2008-JFS
15. Borz S.A. A Review of the Romanian and International Practices in Skidding Operations. *The XIV World Forestry Congress “Forests and People: Investing in a Sustainable Future”, September 7 – 11, 2015, Durban, the Republic of South Africa*. Durban, 2015, pp. 1–11.
16. Cantú R.P., LeBel L., Gautam Sh. A Context Specific Machine Replacement Model: A Case Study of Forest Harvesting Equipment. *International Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 28, iss. 3, pp. 124–133. DOI: 10.1080/14942119.2017.1357416
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
18. Gray J.P., Vantsevich V.V., Paldan J. Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility. *Journal of Terramechanics*, 2016, vol. 65, pp. 14–37. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.01.002
19. Iff R.H., Koger J.L., Burt E.C., Culver E.W. C-A-R-T-S: Capacity Analysis of Rubber-Tired Skidders. *Transactions of the ASAE*, 1984, vol. 27, iss. 3, pp. 660–664. DOI: 10.13031/2013.32847
20. Ismoilov A., Sellgren U., Andersson K., Löfgren B. A Comparison of Novel Chassis Suspended Machines for Sustainable Forestry. *Journal of Terramechanics*, 2015, vol. 58, pp. 59–68. DOI: 10.1016/j.jterra.2015.01.002
21. Kelly M.C., Germain R.H., Bick S. Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA. *Journal of Forestry*, 2017, vol. 115, iss. 6, pp. 503–512. DOI: 10.5849/JOF.2016-031R1
22. Kluender R., Lortz D., McCoy W., Stokes B., Klepac J. Removal Intensity and Tree Size Effects on Harvesting Cost and Profitability. *Forest Products Journal*, 1998, vol. 48, iss. 1, pp. 54–59.
23. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 38, iss. 1, pp. 55–63.
24. Phillips R.A. *Skidder Load Capacity and Fuel Consumption HP-41C Program*. Res. Pap. NE-537; Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northwestern Experiment Station; 1983. 7 p.
25. Spinelli R., Magagnotti N. Wood Extraction with Farm Tractor and Sulky: Estimating Productivity, Cost and Energy Consumption. *Small-scale Forestry*, 2012, vol. 11, iss. 1, pp. 73–85. DOI: 10.1007/s11842-011-9169-8
26. Stoilov S., Kostadinov G.D. Effect of Weight Distribution on the Slip Efficiency of a Four-Wheel-Drive Skidder. *Biosystems Engineering*, 2009, vol. 104, iss. 4, pp. 486–492. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.08.011
27. Vechinski C.R., Johnson C.E., Raper R.L. Evaluation of an Empirical Traction Equation for Forestry Tires. *Journal of Terramechanics*, 1998, vol. 35, iss. 1, pp. 55–67. DOI: 10.1016/S0022-4898(98)00012-3
28. Vusić D., Šušnjar M., Marchi E., Spina R., Zečić Ž., Picchio R. Skidding Operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands – Work Productivity, Energy Inputs and Emissions. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 61, part A, pp. 216–223. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.052
29. Wang J., Greene W.D. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines. *Journal of Forest Engineering*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 81–99. DOI: 10.1080/08435243.1999.10702727
30. Wang J., LeDoux Ch.B. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production through Computer Simulation. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 1, pp. 64–76. DOI: 10.1093/forestscience/49.1.64

Received on March 15, 2019