

УДК 629.369

ОЦЕНКА РЕЙСОВОЙ НАГРУЗКИ ЛЕСНОГО ТРАКТОРА КАК ВАЖНЕЙШЕГО ФАКТОРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ ЛЕСНЫХ МАШИН

¹Шегельман И.Р., ²Будник П.В., ³Баклагин В.Н.

¹Карельская региональная общественная организация «Инженерная академия»,

Петрозаводск, e-mail: shegelman@onego.ru;

²ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»,

Петрозаводск, e-mail: budnikpavel@yandex.ru;

³ФГБУН «Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН»,

Петрозаводск, e-mail: slava.baklagin@mail.ru

На этапе проектирования основных параметров трелевочных тракторов важной задачей является расчет рейсовой нагрузки, определяющей силы, действующие в процессе эксплуатации на машину со стороны трелеваемой пачки деревьев. В различных природно-производственных условиях рейсовая нагрузка варьируется. Таким образом, при проектировании трелевочных тракторов необходимо располагать данными о распределении массы пачек деревьев, на основе которых может быть выбрано расчетное значение рейсовой нагрузки. Целью данного исследования является определение законов распределения масс трелеваемых пачек деревьев. Для этого предлагается использовать методы статистического имитационного моделирования, на основе которых разработана имитационная модель, обеспечивающая генерацию таксационных характеристик совокупности деревьев, необходимой для полного заполнения захвата трелевочного трактора. Для регионов Европейского Севера России (ЕСР) получены выборки: масс пачек деревьев, которые могут быть размещены в захвате, и значений вертикальной составляющей нормальной силы, действующей на захват трелевочного трактора. Исследования показали, что массы пачек варьируются в значительных пределах. Минимальные значения масс пачек составляют 37–68% от максимальных значений. Для регионов ЕСР установлена взаимосвязь изменения величин массы пачки и вертикальной составляющей нормальной силы, действующей на захват трактора, от величины площади поперечного сечения захвата трактора. Такая взаимосвязь имеет линейный характер. Определены рекомендуемые значения грузоподъемности бесчokerных трелевочных тракторов для регионов ЕСР. Полученные результаты могут использоваться при проектировании лесных трелевочных тракторов для определения сил, действующих в процессе эксплуатации на машину со стороны трелеваемой пачки деревьев, кроме того, служить основой формирования парка лесных машин для регионов ЕСР.

Ключевые слова: проектирование трелевочных тракторов, рейсовая нагрузка, имитационное моделирование, статистическое моделирование, грузоподъемность

ESTIMATION OF THE TRUCK LOAD OF THE FOREST TRACTOR AS AN IMPORTANT FACTOR OF DESIGNING AND CREATING PROGRESSIVE FOREST MACHINES

¹Shegelman I.R., ²Budnik P.V., ³Baklagin V.N.

¹Karelian regional public organization «Engineering Academy»,

Petrozavodsk, e-mail: shegelman@onego.ru;

²Petrozavodsk State University (PetrSU), Petrozavodsk, e-mail: budnikpavel@yandex.ru;

³Institute of northern water problems Karelian research center of RAS,

Petrozavodsk, e-mail: slava.baklagin@mail.ru

At the design stage of the main parameters of skidding tractors, an important task is to calculate the truck load, which determines the forces acting on the machine from the side of a bundle of trees during operation. The truck load varies in various natural-production conditions. Thus, for designing skidders, it is necessary to have data on the mass distribution of bundle of trees, on the basis of which the calculated value of the truck load can be chosen. The purpose of this study is to determine the distribution laws of the masses of bundle of trees. For this purpose, it is proposed to use the methods of statistical simulation modeling, on the basis of which a simulation model has been developed that provides for the generation of the taxation characteristics of the population of trees necessary to completely fill the capture of the skidding tractor. For the regions of the European North of Russia (ENR), samples were obtained: masses of packs of trees that can be placed in the grip and the values of the vertical component of the normal force acting on the grip of the skidding tractors. Studies have shown that the mass of bundle of trees vary widely. The minimum values of the bundle of trees mass are 37–68% of the maximum values. For ENR regions, an interrelation has been established between changes in the values of the bundle of trees mass and the vertical component of the normal force acting on skidding tractor, on the size of skidding tractor grapple. This relationship is linear. The recommended values of the lift capacity of skidding tractor for ENR regions are determined. The results obtained can be used to determine the forces acting on the machine from the side of a bundle of trees during operation, when designing forest skidders. In addition, to serve as the basis for the formation of forest machines for ENR regions.

Keywords: designing of skidding tractor, truck load, simulation study, statistical modeling, lift capacity

В большинстве стран современный процесс лесозаготовок ведется с использованием на трелевке деревьев специализированных тракторов. Широкое распространение полу-

чили бесчokerные трактора с аrочным захватом, например Tigercat 625E, John Deere 648L, Cat 525D, и трактора, снабженные манипулятором и зажимным коником, например

TimberPro Tf840, John Deere 1711d. На этапе проектирования основных параметров трелевочных тракторов важной задачей является расчет рейсовой нагрузки, определяющей силы, действующие в процессе эксплуатации на машину со стороны трелеваемой пачки деревьев. Решение данной задачи позволяет определить грузоподъемность трелевочного трактора, а также ряд других параметров, например, необходимые сжимающие силы захвата, мощность двигателя. Здесь и далее под захватом будем понимать как арочный захват, так и зажимной коник. Под грузоподъемностью – максимальную допустимую вертикальную нагрузку на захват.

Силы, действующие на машину со стороны трелеваемой пачки деревьев, определяют в первую очередь массой пачки деревьев. Масса пачки зависит от площади поперечного сечения захвата и параметров трелеваемых деревьев. Захват трелевочного трактора в различных природно-производственных условиях может вместить пачку деревьев разной массы. Следовательно, существует задача определения расчетной массы пачки.

Для проектирования основных параметров трелевочных тракторов необходимо принимать такую массу пачки, которая с заданной вероятностью на практике будет меньше или равной принятому значению. Такое значение вероятности будем называть порогом вероятности. Выбор такого порога вероятности является отдельной задачей, требующей учета технических, технологических и экономических факторов. По нашему мнению, его значения будут находиться в диапазоне 90–99%. Для определения массы пачки с заданным порогом вероятности необходимо располагать законом распределения массы пачек деревьев, которые могут быть сформированы в захвате трелевочного трактора в заданных природно-производственных условиях. Таким образом, существует весьма сложная задача по определению массы пачки.

Целью данного исследования является определение законов распределения масс трелеваемых пачек деревьев методами статистического имитационного моделирования для расчета рейсовых нагрузок бесчокерных трелевочных тракторов.

Многие исследования посвящены изучению производительности различных моделей бесчокерных трелевочных тракто-

ров [1, 2]. В таких исследованиях число наблюдений колеблется от 30 до 300 [3]. Для определения закона распределения, пригодного для расчета величин массы пачек, по которым могут быть установлены параметры трелевочных тракторов, такого количества наблюдений недостаточно.

Задача по определению массы пачки может быть решена на основе компьютерного статистического имитационного моделирования. Попытки применения компьютерного моделирования в области исследований лесозаготовительных процессов и проектирования лесных машин начались с 1960-х гг., о чем свидетельствуют первые опубликованные работы, сделанные в данной области [4]. Большинство исследований направлены на прогнозирование производительности лесозаготовительных машин, затрат на лесозаготовках, а также оценку влияния различных факторов на изменение производительности и затрат на лесозаготовках [5–7]. Существует мало информации о применении имитационного моделирования для нахождения массы пачки деревьев с целью определения сил, действующих на трелевочный трактор со стороны пачки деревьев.

Материалы и методы исследования

Для определения законов распределения масс трелеваемых пачек деревьев бесчокерными трелевочными тракторами разработана статистическая имитационная модель набора пачки деревьев в захват трелевочного трактора. Основная суть имитационной модели – это генерация таксационных характеристик совокупности деревьев, необходимой для полного заполнения захвата трелевочного трактора. Данная модель реализована в виде программы (приложения Windows) с использованием синтаксиса языка C#. Программа позволяет получать выборки: масс возможных пачек деревьев, случайно формирующихся в захвате (M_i) и значений вертикальной составляющей нормальной силы, действующей на захват трелевочного трактора ($N_{2,i}^\uparrow$). На рис. 1 приведена блок-схема имитационной модели.

Расчет величины $N_{2,i}^\uparrow$ осуществляется согласно выражению, полученному из уравнения моментов сил относительно точки А (рис. 2)

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

где $E[H_i]$ – средняя длина деревьев в пачке, h_c – расстояние от края пачки до ее центра тяжести, g – ускорение свободного падения, Δ – расстояние от захвата до центра пачки деревьев.

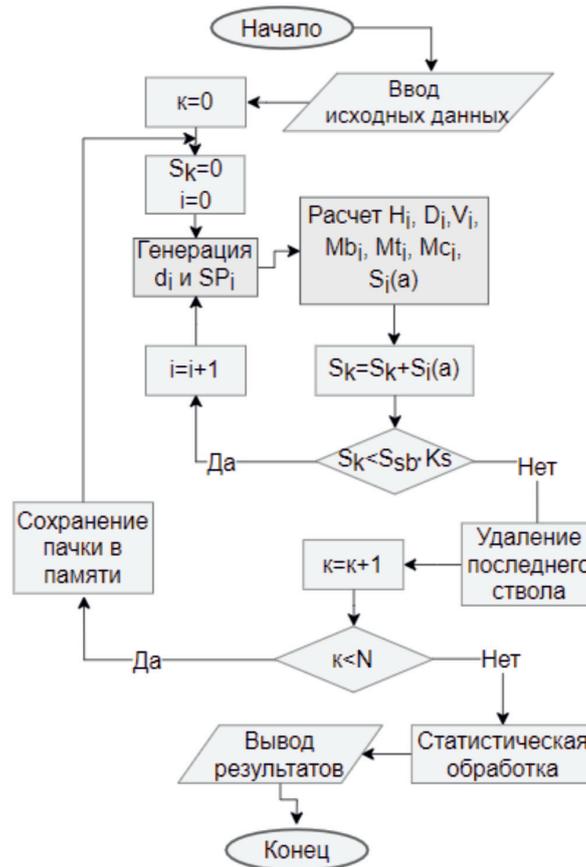


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели, где k – текущее число итераций, S_k – текущая сумма поперечных сечений стволов деревьев в месте их захвата, d_i – диаметр дерева на высоте груди i -го дерева, SP_i – порода i -го дерева, H_i – высота i -го дерева, D_i – множество значений диаметров ствола i -го дерева на относительных высотах через 0,1 высоты, V_i – объем ствола в коре i -го дерева, Mb_i – масса коры i -го дерева, Mt_i – масса ствола i -го дерева, Mc_i – масса кроны i -го дерева, $S_i(a)$ – площадь, занимаемая сечением ствола i -го дерева в месте его захвата, K_s – коэффициент использования площади захвата, N – число воспроизведений алгоритма

Приближенное значение величины h_c может быть найдено согласно известному соотношению $0,38 \cdot E[H_i]$.

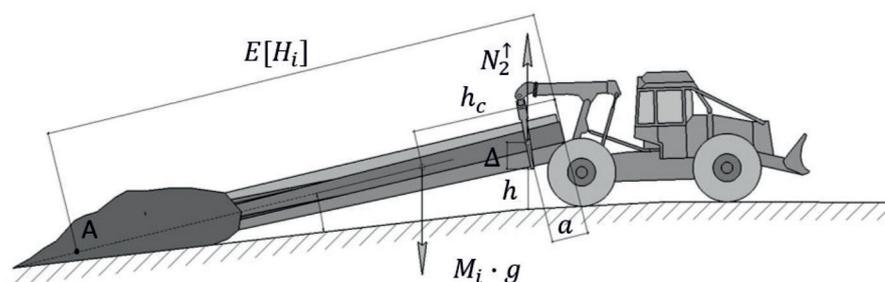
На основе данных выборок определялись значения M_{\max} и $N_{2,\max}^{\uparrow}$ с порогом вероятности 90%, 95% и 99%.

Входными данными для модели являются: площадь поперечного сечения захвата (S_{cb}), расстояние от комля дерева до захвата (a), расстояние от земли до захвата при трелевке (h), распределение деревьев в древостое по ступеням толщины, разряд высоты древостоя (K_h), породный состав древостоя. Под разрядом высот понимается классификационный параметр, устанавливающий связь между диаметром на высоте груди дерева и его высотой в древостое.

Для проведения экспериментов приняты следующие значения исходных данных:

$a = 0,8$ м; $h = 0,5$ м. Для регионов ЕСР были приняты следующие значения K_h : Мурманская область – 3; Республика Карелия – 2; Архангельская область – 2; Республика Коми – 2; Вологодская область – 1. Величина K_s выбрана из диапазона 0,5–0,6 [8].

Имитационное моделирование проводилось на примере регионов Европейского Севера России (ЕСР). ЕСР включает в себя: Мурманскую область, Республику Карелия, Архангельскую область, Вологодскую область, Республику Коми, Ненецкий автономный округ. В рамках одного компьютерного эксперимента для заданных значений S_{cb} и каждого региона ЕСР алгоритм программы воспроизводился не менее 10000 раз. Ненецкий автономный округ не исследовался ввиду незначительной интенсивности ведения лесозаготовительных работ и малых запасов древесины.

Рис. 2. Расчетная схема для N_2^{\uparrow}

Результаты исследования и их обсуждение

В результате вычислительного эксперимента были получены по 9 статистических распределений масс пачек для каждого региона ЕСР. Анализ показал, что массы пачки деревьев при одном и том же значении S_{cb} колеблются в широком диапазоне. Минимальные значения масс пачек составляли 37–68% от максимального значения. Общей закономерностью для всех регионов ЕСР является возрастание разницы между максимальным и минимальным значением массы пачки при увеличении величины S_{cb} . Возможно, это обусловлено увеличением количества деревьев в пачке, размеры которых варьируются в широком диапазоне.

Во всех вычислительных экспериментах с увеличением величины S_{cb} линейно возрастают средние выборочные массы пачек деревьев. Средние выборочные значения масс пачек для Мурманской области имеют наименьшие значения в сравнении с другими регионами ЕСР. Это обусловлено распределением ступеней толщины и разрядом высот, характеризующих более бедные таксационные показатели древостоев Мурманской области.

Средние выборочные значения масс пачек для Республики Карелия во всех экспериментах имеют наибольшее значение. Этот результат интересен тем, что Республика Карелия характеризуется более бедными средними таксационными показателями древостоев в сравнении с Вологодской областью и близкими со средними таксационными показателями Архангельской области и Республики Коми. Причиной этому является широкое варьирование таксационных показателей древостоев в Республике Карелия. Такое варьирование отражено в распределении ступеней толщины. Вероятность появления крупных ступеней толщины больше в сравнении с другими регионами ЕСР.

Средние таксационные показатели древостоев в Вологодской области больше средних таксационных показателей других регионов ЕСР. В модели это учитывается наибольшим разрядом высот. Поэтому неожиданным результатом стали средние выборочные значения масс пачек, полученные для Вологодской области, которые были даже меньше средних выборочных Архангельской области и Республики Коми. Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, характером распределения ступеней толщины. Начальные ступени толщины в Вологодской области имеют большую вероятность появления в сравнении с распределениями других регионов ЕСР. Во-вторых – распределением пород деревьев. В Вологодской области преобладает береза. Для данной породы характерна меньшая высота при больших ступенях толщины в сравнении с хвойными породами (елью и сосной), которые преобладают в других регионах ЕСР.

На основе статистических распределений определены значения M_{\max} и $N_{2,\max}^{\uparrow}$, которые не будут превышены с вероятностью 90%, 95%, 99%. На рис. 3 для регионов ЕСР приведены зависимости масс пачек деревьев от величины S_{cb} при $a = 0,8$ м и пороге вероятности 95%.

Во всех экспериментах зависимость имела линейный характер. Для расчета величин M_{\max} и $N_{2,\max}^{\uparrow}$ с порогом вероятности 90%, 95%, 99% может использоваться следующее выражение:

$$M = A \cdot S_{cb} + B, \quad (2)$$

где M – массы пачки деревьев с порогом вероятности 90%, 95%, 99%, т, или вертикальная составляющая нормальной силы, действующая на пачковый захват с порогом вероятности 90%, 95%, 99%, кН, A и B коэффициенты, принимаемые согласно таблице.

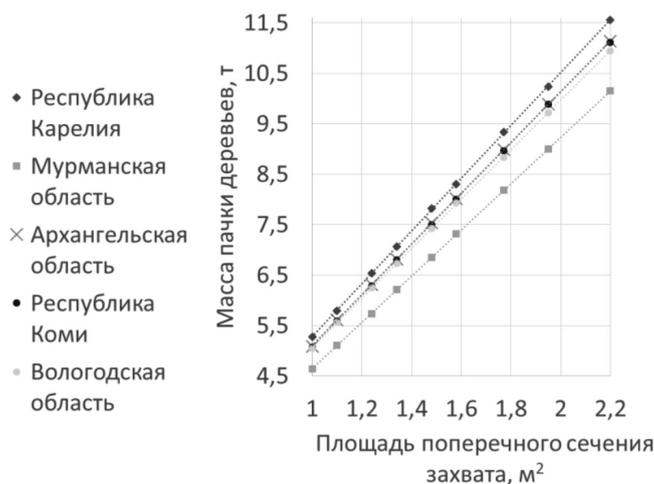


Рис. 3. Зависимости массы пачки деревьев от площади поперечного сечения захвата для регионов ЕСР

Коэффициенты для расчета массы пачки деревьев и вертикальной составляющей нормальной силы

Области, республики		$N_{2,\max}^{\uparrow}$			M_{\max}		
		90%	95%	99%	90%	95%	99%
Мурманская область	A	28,988	29,208	29,445	4,5549	4,589	4,6289
	B	-0,0316	0,385	1,5078	-0,0141	0,057	0,2376
Республика Карелия	A	32,858	33,123	33,618	5,1993	5,24	5,3204
	B	-0,2782	0,261	1,3893	-0,0525	0,04	0,2248
Архангельская область	A	31,682	31,884	32,178	5,0037	5,0392	5,0949
	B	-0,1379	0,393	1,5211	-0,023	0,0602	0,2325
Республика Коми	A	31,631	31,825	32,292	5,0052	5,0387	5,1103
	B	-0,2259	0,3233	1,2444	-0,0409	0,0456	0,2033
Вологодская область	A	30,692	31,229	32,374	4,847	4,8999	4,9992
	B	0,3775	0,7961	1,5387	0,0692	0,1689	0,3693

Полученные результаты позволили нам рассчитать значения грузоподъемности трелевочного трактора при полном заполнении захвата. Анализ показал, что трелевочные трактора имеют запас по грузоподъемности. Трактора с пачковыми захватами имеют запас грузоподъемности в пределах 1–2 т, что составляет 20–30% от их грузоподъемности. Трактора, снабженные манипулятором и зажимным коником, имеют запас (за исключением отдельных тракторов тяжелого класса) 3–4 т, что составляет 40–45% от их грузоподъемности.

При использовании трелевочных тракторов, снабженных манипулятором и зажимным коником, оператор может погрузить в коник больше деревьев, чем позволяет его площадь поперечного сечения. При таком приеме рычаги зажимного

коника смыкаются не полностью. При этом создается необходимое усилие для удерживания пачки деревьев на трелевочном тракторе. Обычно такой подход практикуется в зимнее время, когда почва промерзает и покрывается снегом, обеспечивая высокую несущую способность и низкое сопротивление от трения пачки деревьев о поверхность земли. Данный прием может позволить увеличить площадь поперечного сечения коника в 2 раза по сравнению со значением, указанным в технических характеристиках. При использовании трелевочных тракторов с пачковым захватом такой прием невозможен.

Наши расчеты показывают, что если учитывать возможность трелевки пачки деревьев при не полностью сомкнутых рычагах зажимного коника, то запас грузо-

подъемности составит менее 1 т, порядка 1–10 %. Такой низкий запас грузоподъемности скажется на надёжности техники.

Результаты исследований могут найти применение для решения различных научно-практических задач. Выражение (2) может быть использовано на antecedentных стадиях проектирования лесных машин для определения грузоподъемности трелевочных тракторов, параметров захвата, обоснования мощности двигателя. При этом для тракторов, снабженных манипулятором и зажимным коником, величину S_{cb} следует увеличивать путем умножения на коэффициент равный 1,1–2,2. Это позволит учитывать увеличение нагрузки от пачки деревьев сформированной при не полностью сомкнутых рычагах зажимного коника. Полученные средние выборочные значения масс пачек могут быть использованы для технико-экономических расчетов, в частности прогнозирования производительности. Выражение (2) может использоваться при формировании парка трелевочных тракторов путем выбора лесозаготовителем конкретных моделей машин с необходимой грузоподъемностью. Это особенно актуально, когда производитель предлагает на базовую машину устанавливать захваты, имеющие различные размеры.

Заключение

В работе нами предложен научный подход к определению рейсовой нагрузки трелевочных тракторов при их проектировании, основывающийся на компьютерном статистическом имитационном моделировании масс пачек деревьев. На основе предложенного подхода проведены исследования грузоподъемности для различных регионов ЕСР. Исследования показали, что массы пачек варьируются в значительных пределах. Минимальные значения масс пачек составляют 37–68 % от максимальных значений. Для регионов ЕСР установлена взаимосвязь изменения величин массы пачки и вертикальной составляющей нормаль-

ной силы, действующей на захват трактора, которые не будут превышены с вероятностью 90, 95, 99 % от величины площади поперечного сечения захвата трактора. Такая взаимосвязь имеет линейный характер. На основе исследований определены рекомендуемые значения грузоподъемности бесчokerных трелевочных тракторов, служащие основой для формирования парка лесных машин. Кроме того, установлено, что трелевочные трактора, снабженные манипулятором и зажимным коником, имеют недостаточный запас грузоподъемности. Данная работа направлена на расширение знаний в области проектирования лесных машин и не претендует на исчерпывающий характер.

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

Список литературы

1. Vusic D., Susnjar M., Marchi E., Spina R., Zecic Z., Picchio R. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands. Work productivity, energy inputs and emissions. Ecological Engineering. 2013. vol. 61. P. 216–223.
2. Kulak D., Stanczykiewicz A., Szewczyk S. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. Croatian Journal of Forest Engineering. 2017. vol. 38. no 1. P. 55–63.
3. Banks J., Aviles E., McLaughlin J., Yuan R.C. The simulator: New member of the simulation family. Interfaces. 1991. vol. 21. no 2. P. 76–86.
4. Newnham R.M. Simulation models in forest management and harvesting. The Forestry Chronicle. 1968. Vol. 44. no 1. P. 7–13.
5. Behjou F.K, Majnounian B., Namiranian M., Dvorak J. Time study and skidding capacity of wheeled skidder Timberjack 450C in Caspian forests. Journal of Forest Science. 2008. vol. 54. no 4. P. 183–188.
6. Ackerman S.A., Seifert S., Ackerman P.A., Seifert T. Mechanised pine thinning harvesting simulation: productivity and cost improvements as a result of changes in planting geometry. Croatian Journal of Forest Engineering. 2016. vol. 27. no 1. P. 1–15.
7. Contreras V.A., Chung W. A modeling approach to estimating skidding costs of individual trees for thinning operations. Western Journal of Applied Forestry. 2011. vol. 26. no 3. P. 133–146.
8. Шегельман И.П., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Машины и технология заготовки сортиментов на лесосеке. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 107 с.