

Технологический анализ использования узкозахватных лесозаготовительных машин фронтального типа на сплошных и выборочных рубках леса

В.Я. Шапиро^{1a}, Л.М. Михайлова^{2b}, И.С. Должиков^{3c}, И.В. Григорьев^{2d}, Е.А. Тихонов^{4e}, А.Ю. Калита^{5f}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, Якутск, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, Петрозаводск, Россия

⁵ Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

^a shapiro54vlad@mail.ru, ^b lyutsiya.losotova@mail.ru, ^c idolzhikov222@mail.ru, ^d silver73@inbox.ru.ru,

^e tihonov@petrsu.ru, ^f Alexgrushina@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Статья поступила 06.10.2025, принята 18.11.2025

Под влиянием различных политических и экономических, а также социальных факторов, с течением времени во многих сферах производства меняются системы машин. В настоящее время в Российской Федерации, под влиянием санкций недружественных стран, постепенно меняются системы машин для лесосечных работ. На смену продукции машиностроительных компаний из недружественных стран приходят лесные и лесозаготовительные машины компаний, стремящихся заполнить эту нишу российского рынка. Это касается, например, валочно-трёлёвочно-процессорных машин австрийской семейной компании Konrad Forsttechnik GmbH. Южноафриканская компания Bell производит узкозахватные лесозаготовительные машины фронтального типа, которые в рамках сотрудничества стран БРИКС можно в ближайшее время ожидать на отечественном рынке лесной техники. Вместе с тем, отечественным лесозаготовительным предприятиям и многим специалистам специфика работы узкозахватных машин известна мало, поскольку их производство и эксплуатация в СССР осуществлялись около полу века назад, тем более, что эти отечественные машины были флангового типа, а не фронтального. Настоящая статья посвящена анализу эксплуатационной и экологической эффективности узкозахватных лесозаготовительных машин фронтального типа. Установлено, что при работе таких машин на влажных почвогрунтах целесообразно заполнять не более 50 % объёма накопителя захватно-резающего устройства, с тем, чтобы глубина колеи оставалась меньше 0,3 м, и работоспособность трёлёвочного волока (технологического коридора) сохранялась в удовлетворительном состоянии. На переувлажнённых почвогрунтах применение захватно-резающих устройств с накопителем большой ёмкости в сочетании с колёсной базой не рекомендуется. Материалы данной статьи получены путём анализа литературных источников и анализа производственного опыта в области проведения машинных рубок лесных насаждений и математического моделирования воздействия колёсного движителя узкозахватной лесозаготовительной машины фронтального типа на почвогрунт.

Ключевые слова: лесозаготовительные машины; узкозахватные лесозаготовительные машины; лесозаготовительные машины фронтального типа; деформация почвогрунта; колеобразование.

Technological analysis of the use of narrow-range front-type logging machines in continuous and selective logging

V.Ya. Shapiro^{1a}, L.M. Mikhailova^{2b}, I.S. Dolzhikov^{3c}, I.V. Grigoriev^{2d}, E.A. Tikhonov^{4e}, A.Yu. Kalita^{5f}

¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Ave., St. Petersburg, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Highway, Yakutsk, Russia

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

⁵ Pacific State University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

^a shapiro54vlad@mail.ru, ^b lyutsiya.losotova@mail.ru, ^c idolzhikov222@mail.ru, ^d silver73@inbox.ru.ru,

^e tihonov@petrsu.ru, ^f Alexgrushina@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Received 06.10.2025, accepted 18.11.2025

Under the influence of various political, economic, and social factors, machine systems change over time in many areas of production. Currently, in the Russian Federation, under the influence of sanctions from non-friendly countries, the systems of machines for logging operations are gradually changing. The products of machine-building companies from non-friendly countries are being replaced by timber and logging machines from companies seeking to fill this niche in the Russian market. This applies, for example, to the roller-skidding-processor machines of the Austrian family company Konrad Forsttechnik GmbH. The South African company Bell produces narrow-range front-type logging machines, which can be expected in the near future on the domestic market of forestry equipment within the framework of the Commonwealth of BRICS countries. At the same time, domestic logging enterprises and many specialists know little about the specifics of the work of narrow-range machines, since their production and operation in the USSR were carried out about half a century ago, especially since these domestic machines were of the flank type, not the frontal type. This article is devoted to the analysis of the operational and economic efficiency of narrow-range front-type logging machines. It has been established that when such machines are operating on wet soils, it is advisable to fill no more than 50 % of the storage volume of the gripping and shearing device, so that the track depth remains less than 0,3 m and the operability of the skidding portage (technological corridor) remains in satisfactory condition. On waterlogged soils, the use of gripping and shearing devices with a high-capacity storage device in combination with a wheelbase is not recommended. The materials of this article are obtained by analyzing literary sources and analyzing industrial experience in the field of machine logging of forest stands, and mathematical modeling of the impact of the wheel drive of a narrow-range front-type logging machine on soil.

Keywords: logging machines; narrow-range logging machines; frontal type logging machines; soil degradation; track formation.

Введение. Узкозахватные лесозаготовительные машины отличаются от широкозахватных отсутствием гидроманипулятора, в связи с чем они вынуждены подъезжать к каждому дереву при выполнении рубок лесных насаждений.

Первые отечественные лесозаготовительные машины – валочные (ВМ-4), и валочно-трелёвочные (ВМ-4А, ВМ-4Б, ВМ-55 (рис. 1, 2)) являлись узкозахватными фланговыми машинами. Их технологическое оборудование для валки деревьев размещалось по левому борту, поскольку оператор размещался также слева в кабине, и такое размещение технологического оборудования давало ему наилучший из возможных обзор [1].



Рис. 1. Узкозахватная фланговая гусеничная валочно-трелёвочная машина ВМ-4А



Рис. 2. Узкозахватная фланговая гусеничная валочная машина ВМ-55

Эти машины были оснащены не захватно-резающими устройствами (ЗСУ), а просто срезающими устройствами (консольными пильными цепными гарнитурами), и сталкивающими рычагами. Это приводило к частым сколам в комлевой части спиливаемых деревьев, т. е. к экономическим потерям [2].

В связи с особенностями конструкции и размещения технологического оборудования эти лесозаготовительные машины, в основном, разрабатывали лесосеки круговым перемещением вокруг вырубаемого древостоя (круговыми лентами), или лентами, перпендикулярными усу лесовозной дороги (рис. 3). Работать на выборочных рубках и с сохранением подроста они не могли. Зато очень существенно повышали производительность и безопасность труда по сравнению с механизированной валкой [3–5].

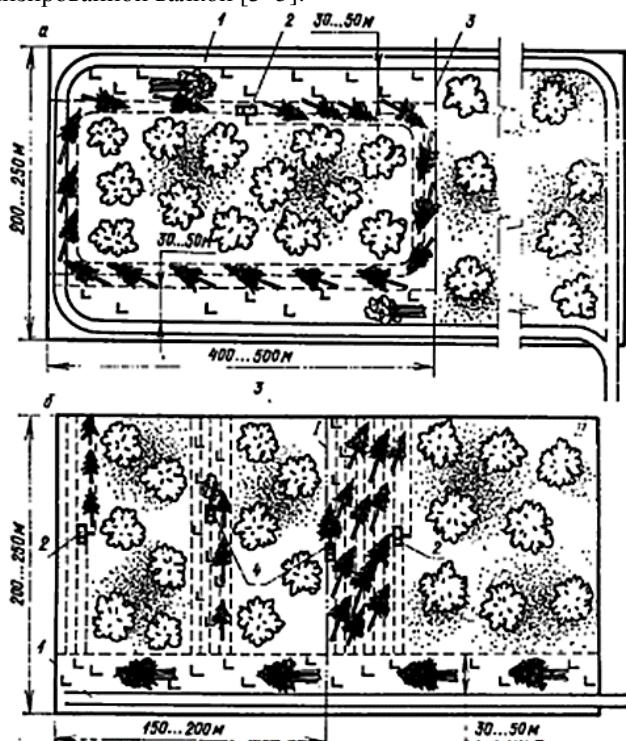


Рис. 3. Схемы разработки лесосек узкозахватной фланговой валочной машиной: а – круговыми лентами; б – лентами перпендикулярными усу лесовозной дороги; 1 – ус лесовозной дороги; 2 – узкозахватная фланговая валочная машина; 3 – граница лесосеки; 4 – трелёвочный трактор

Поваленные валочной машиной деревья собирались в пачки и трелевались в полупогруженном положении чокерными или бесчокерными трелёвочными тракторами.

При разработке лесосек узкозахватными фланговыми валочно-трелёвочными машинами (ВТМ) кольцевые схемы (рис. 3, а) обычно не использовались, предпочтение отдавалось разработке лесосек прямыми лентами, перпендикулярными или параллельными усу лесовозной дороги (рис. 4, 5) [6, 7].

Значительно устаревшие к настоящему времени узкозахватные лесозаготовительные машины флангового типа в настоящее время сменили широкозахватные лесозаготовительные машины – валочно-пакетирующие, харвестеры, валочно-трелёвочно-процессорные.

Но наличие гидроманипулятора, позволяющего лесозаготовительной машине спиливать несколько деревьев с одной технологической стоянки, существенно увеличивает как всё, так и стоимость машины. В том числе по этой причине, в современном лесозаготовительном производстве находят применение и узкозахватные машины фронтального типа, не имеющие гидроманипулятора, зато имеющие меньший вес и стоимость.

В современной технологической литературе в области рубок лесных насаждений (лесосечных работ) отсутствуют рекомендации по схемам разработки лесосек при использовании таких машин.

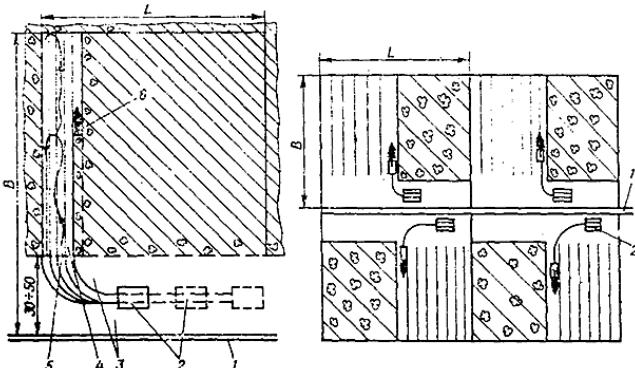


Рис. 4. Схемы разработки лесосеки узкозахватной фланговой ВТМ лентами, перпендикулярными усу лесовозной дороги:
1 – лесовозный ус; 2 – верхний склад; 3 – зона безопасности;
4 – лента; 5 – заездной волок; 6 – ВТМ

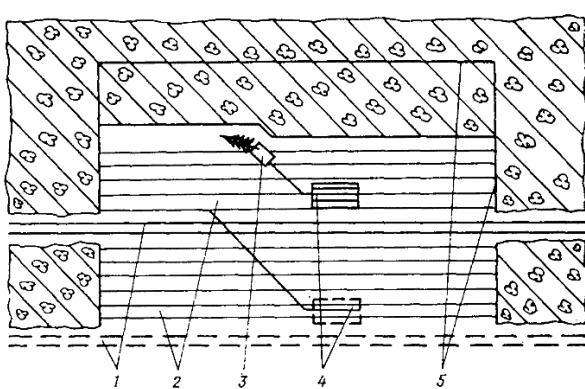


Рис. 5. Схема разработки узкозахватной фланговой ВТМ лесосеки лентами, параллельными усу лесовозной дороги:
1 – лесовозный ус; 2 – ленты; 3 – ВТМ; 4 – верхний склад; 5 – визир

Материалы и методы исследования. Материалы данной статьи получены путём анализа литературных источников и анализа производственного опыта в области проведения машинных рубок лесных насаждений.

Результаты исследования. Известные современные узкозахватные лесозаготовительные машины (Delta FFD-35, John Deere 843J (табл. 1), Caterpillar 563C, Barco 1080 C, Bell, и др.) являются фронтальными (рис. 6–9), могут иметь колёсную или гусеничную базу. В отличие от рассмотренных выше они оснащены ЗСУ, с режущим органом цепного или дискового типа. Ряд машин ЗСУ имеет функции накопителя, что существенно повышает их производительность, особенно при небольшом объёме хлыста (рис. 10).



Рис. 6. Колёсная узкозахватная фронтальная лесозаготовительная машина John Deere 843J

Безусловно, при прочих равных условиях, узкозахватные лесозаготовительные машины имеют меньшую производительность, по сравнению с широкозахватными. Это связано с необходимостью их частых перемещений, от дерева к следующему дереву, по аналогии с вальщиком леса.

Но благодаря специальной защите кабины, в отличие от механизированной валки деревьев, при проведении подготовительных работ нет необходимости уборки опасных деревьев по всей территории лесосеки. Производительность узкозахватной лесозаготовительной машины хотя и меньше, чем у широкозахватной, но больше, чем у вальщика леса, при прочих равных условиях [8].

Таблица 1. Технические характеристики колёсной узкозахватной фронтальной лесозаготовительной машины John Deere 843J

Показатель	Значение
Длина, м	7,37
Ширина, м	3,0
Высота до верха кабины, м	3,23
Колёсная база, м	2,79
Дорожный просвет, м	0,5
Мощность двигателя, кВт	167,8
Масса (без навесного оборудования), т	12,7
Максимальная скорость, км/ч	20,2
Размер шин	28L-26
Давление на почвогрунт, кПа	77,3

Благодаря оснащению машин ЗСУ современные узкозахватные лесозаготовительные машины могут не только валить деревья, но и перемещать их по лесосеке

на небольшие расстояния в вертикальном, или в полу-подвешенном положении. То есть эти машины могут работать в режиме валка-пакетирование. Это позволяет использовать с ними в паре самый высокопроизводительный тип трелёвочных тракторов – тракторы с пачковым захватом, которые часто на практике называют скиддераами (рис. 11).

С точки зрения эффективности использования скиддера, очень важным моментом является возможность создания лесозаготовительной машиной, работающей в режиме валка-пакетирование, пакетов деревьев, соответствующих возможной грузоподъёмности скиддера в конкретных условиях, по руководящему уклону местности и несущей способности почвогрунта.

Для сбора полновесного, соответствующего грузоподъёмности скиддера пакета лесозаготовительной машиной, работающей в режиме валка-пакетирование, придётся освоить некоторую площадь лесосеки, величина которой будет зависеть, при сплошной рубке лесных насаждений, от запаса леса на га и требуемого объёма пакета. При выборочной рубке к перечню влияющих факторов добавится также интенсивность рубки. Допустим, оптимальная грузоподъёмность скиддера в условиях конкретной лесосеки 8 м^3 , запас леса на га составляет 200 м^3 . Тогда для сбора полновесного пакета при сплошной рубке лесных насаждений лесозаготовительной машиной, работающей в режиме валка-пакетирование, придётся освоить 400 м^2 площади лесосеки. А при выборочной рубке с интенсивностью 50 %, при прочих равных условиях, придется освоить уже 800 м^2 площади лесосеки.

Если средний объём хлыста составляет, допустим, $0,35 \text{ м}^3$, то лесозаготовительной машиной, работающей в режиме валка-пакетирование, не имеющей накопителя в ЗСУ, придётся сделать около 23 рейсов к месту формирования пакета. Если у лесозаготовительной машины, работающей в режиме валка-пакетирование, есть накопитель в ЗСУ, допустим с возможностью накопления до 4 м^3 спиленных деревьев, то при прочих равных условиях машине потребуется сделать только 2 рейса к месту формирования пакета. То есть путь, проходимый узкозахватной лесозаготовительной машиной, работающей в режиме валка-пакетирование, при наличии накопителя существенно сокращается, что, соответственно, существенно повышает производительность, особенно при небольшом объёме хлыста.

Отсутствие у этих машин гидроманипулятора и связанная с этим необходимость подъезжать к каждому дереву, приводит, как и у старых машин, к невозможности сохранения равномерно распределённого подроста. Но благодаря их относительно небольшим габаритам и хорошей маневренности, они могут успешно использоваться на выборочных рубках высокой и очень высокой интенсивности. Для более точных рекомендаций по их использованию на выборочных рубках необходимы натурные производственные испытания, с измерением количества повреждённых деревьев, из оставляемых на доращивание, и степени их повреждения при проведении рубок различной интенсивности.

В паре с вальщиками леса, при механизированной валке деревьев на пасеках, современные узкозахватные лесозаготовительные машины могут использоваться

и при проведении выборочных рубок слабой, умеренной и умеренно высокой интенсивности, при прорубке пасечных и магистральных трелёвочных волоков.

Как и для любых лесных машин, для узкозахватных лесозаготовительных наилучшими условиями эксплуатации являются равнинные условия, сухие почвогрунты с хорошей несущей способностью (I и II категорий), или неглубокий снежный покров зимой. Это особенно важно для машин, представленных на фото рис. 6 и 7, поскольку вынос ЗСУ с деревьями за пределы габаритов машины даёт существенный опрокидывающий момент M_o , перегружающий колёса переднего моста. Следствием этого является то, что существенную дополнительную нагрузку испытывает опорная поверхность.

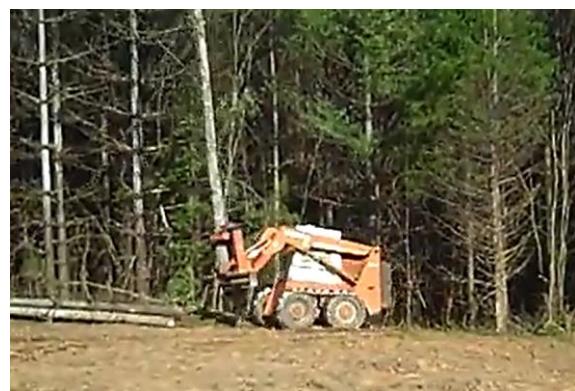


Рис. 7. Колёсная узкозахватная фронтальная лесозаготовительная машина Vargo 1080 C

Причём при использовании накопителя ЗСУ (рис. 10) с каждым новым спиленным деревом величина этого опрокидывающего момента возрастает, и передняя колёсная пара машины усиливает негативное воздействие на почвогрунт и корневые системы оставляемых на доращивание деревьев в случае проведения выборочной рубки лесных насаждений.



Рис. 8. Колёсная (трицикл) узкозахватная фронтальная лесозаготовительная машина Bell

При работе колёсного скиддера наблюдается, в принципе, аналогичная картина, только пачка, вывешенная за кормой трактора в грейферном захвате (рис. 11) перегружает задний мост. Если узкозахватная лесозаготовительная машина с ЗСУ с накопителем перемещает деревья к месту укладки пакета для скиддера в полностью погруженном положении, то на грейферный захват скиддера, трелюющего пачку деревьев за комли в полуподвешенном положении, приходится от 65 до 70 % её веса [9–11].



Рис. 9. Гусеничная узкозахватная фронтальная лесозаготовительная машина Bell

Получается, что с точки зрения эксплуатационной эффективности системы машин, включающей узкозахватную лесозаготовительную машину фронтального типа с ЗСУ с накопителем и скиддер, чем больше используются возможности их грузоподъёмности, тем лучше. Но с точки зрения экологической эффективности, каждый кубометр спиленных деревьев в ЗСУ фронтальной лесозаготовительной машины добавляет нагрузку на её передний мост, и в дальнейшем добавляет нагрузку на задний мост скиддера.



Рис. 10. Колёсная узкозахватная фронтальная лесозаготовительная машина John Deere 843J с ЗСУ с накопителем

С учётом того, что колёсные скиддеры имеют самые большие эксплуатационные скорости как в холостом, так и в грузовом направлениях (17–25 км/ч), по сравнению с другими типами трелёвочных тракторов [12], и на больших скоростях преодолевают различные неровности пути (пни, камни и т. д.), то, очевидно, что помимо статической нагрузки их движителя на почвогрунт, будет добавлять и существенная динамическая составляющая.



Рис. 11. Трелёвочная система на базе колёсного скиддера

На влажных, и тем более, переувлажнённых почвогрунтах с низкой несущей способностью, указанная

нагрузка и обусловленное ею давление на краевую часть массива почвогрунта приводит к его переуплотнению и образованию глубокой колеи.

Рассмотрим в качестве примера процесс взаимодействия с грунтом колёсной валочно-пакетирующей узкозахватной фронтальной лесозаготовительной машины типа John Deer 843J с собственным весом $Q_m = 12,7$ т.

Собственный вес ЗСУ принимается равным $Q_s = 1$ т, вес пачки деревьев – от 0 до 4,25 т, т. е. суммарный вес ЗСУ с пачкой Q_n изменяется от 1 до 5,25 т, при этом максимальный вес лесной машины с полностью загруженным устройством составляет $Q = 17,95$ т.

Расстояние выноса продольной вертикальной оси ЗСУ от колёсной базы принимается, равным $L_3 = 1,8$ м, колёсная база машины – $L_b = 2,794$ м.

Тогда удерживающий момент M_y , опрокидывающий момент M_o и коэффициент устойчивости K_y системы «лесная машина-ЗСУ» равны:

$$M_y = Q_m \cdot L_b / 2; \quad M_o = Q_n \cdot L_3; \quad K_y = M_y / M_o, \quad (1)$$

причём будем считать систему устойчивой при выполнении условия $K_y > 2$.

На рис. 12 показано влияние веса ЗСУ на величину критерия устойчивости K_y , которое с высоким коэффициентом детерминации (более 0,95) описывается экспоненциальной затухающей зависимостью.

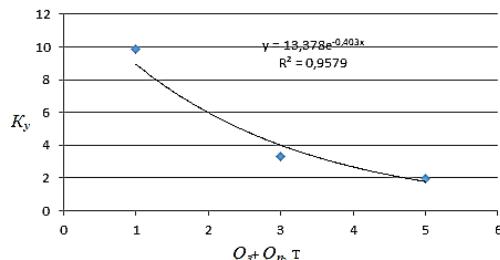


Рис. 12. Влияние веса загруженного ЗСУ на показатели устойчивости

Как следует из анализа данных рис. 12, при полной загрузке ЗСУ устойчивость системы близка к состоянию нарушения, что создает угрозу опрокидывания лесной машины.

По мере загрузки ЗСУ опрокидывающий момент передаёт на переднюю ось лесной машины дополнительную нагрузку (давление), пропорциональную величине K_o , равной:

$$K_o = 1 + M_o / M_y = 1 + 1 / K_y. \quad (2)$$

При полной загрузке, как это видно на рис. 12, величина $K_o \rightarrow 1,5$, что означает соответствующее увеличение вертикального давления q на почвогрунт в пределах контактной площадки (опорной поверхности) лесозаготовительной машины.

Это обстоятельство требует корректировки прогноза глубины h_k образованной колеи при взаимодействии с почвогрунтом узкозахватной лесозаготовительной машины фронтального типа, оснащённой выносным ЗСУ.

Основываясь на результатах математического моделирования процессов контактного взаимодействия движителя с почвогрунтом различной влажности W

в работах [13–19] установлено соотношение для прогноза глубины колеи h_k :

$$h_k = a(\frac{\gamma q}{\tau})^{1/n}, \quad (3)$$

где a – радиус контактной площадки, определяемый в соответствии с результатами исследований [20]; γ – коэффициент бокового распора, равный $\gamma = v/(1-v)$, v – коэффициент Пуассона; τ – предел прочности грунта на сдвиг, определяемый в соответствии с паспортом прочности величиной его сцепления C и углом внутреннего трения ϕ ; показатель степени $n = 1 - \gamma / 2$.

Поскольку горизонтальное давление $q_e = \gamma q$ при превышении величины τ является критерием разрушения краевой части массива почвогрунта, введение коэффициента $K_p = q_e/\tau$ и условия $K_p > 1$ выступают индикативными параметрами процессов разрушения почвогрунта и формирования в нём глубины колеи.

Соотношения (2) и (3) позволяют оценить степень увеличения K_h глубины колеи h_k за счёт загрузки ЗСУ пачкой деревьев по сравнению с показателем h_m глубины колеи от взаимодействия с почвогрунтом собственно с лесозаготовительной машиной без выносного устройства с ЗСУ:

$$K_h = (1 + 1/K_p)^{1/n}. \quad (4)$$

На рис. 13 показано влияние веса ЗСУ на величину K_h , которое с коэффициентом детерминации, превышающим 0,95 описывается логарифмической зависимостью.

При отсутствии пачки в ЗСУ только за счёт собственного веса устройства, равного 1 т, формируется опрокидывающий момент, при котором глубина колеи возрастает на 10% по сравнению с лесозаготовительной машиной без выносного устройства.

При полной загрузке ЗСУ увеличение глубины колеи достигает уже 50 %, что при проведении лесосечных работ на слабых переувлажнённых почвогрунтах может привести к значительным отрицательным последствиям.

Данные табл. 1 позволяют сделать некоторые выводы.

Во-первых, на переувлажнённых почвогрунтах по мере приближения влажности к своему пределу текучести $W_T = 40–45$ % в процессе воздействия лесозаготовительной машиной даже без её оснащения ЗСУ глубина колеи приближается к 0,4 м, что характеризует низкую работоспособность трёлёвочного волока (технологического коридора).

Во-вторых, только на почвогрунтах с невысокой влажностью, не превышающих величину предела пластичности $W_n = 25–28$ %, критерий разрушения K_p меньше единицы. При этом горизонтальное давление практически вдвое меньше величины предела прочности почвогрунта на разрыв, и это состояние характеризуется высокой работоспособностью волока (технологического коридора), что позволяет успешно использовать выносные ЗСУ.

Отмеченные выводы иллюстрируются рис. 14, где отложен вес пачки Q_n , т и глубина колеи h_k , м для увлажнённого и влажного почвогрунтов.

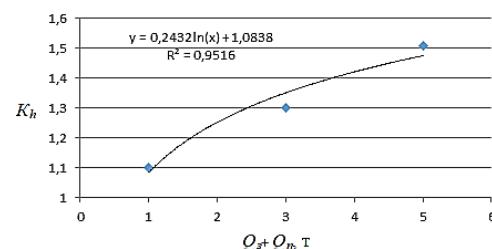


Рис. 13. Увеличение глубины колеи по мере заполнения ЗСУ пачкой спиленных деревьев

В табл. 1 представлены исходные данные и результаты расчётов для суглинка при различном состоянии его влажности.

Таблица 1. Исходные данные и показатели расчётов глубины колеи без применения выносного ЗСУ

W , %	Состояние почвогрунта	C , кПа	ϕ , °	E , МПа	v	K_p	a , м	h_m , м
24	увлажнённый	15,1	21	1,0	0,24	0,58	0,18	0,08
33	влажный	11,3	18	0,7	0,33	1,18	0,20	0,21
38	переувлажнённый	6,5	13	0,4	0,38	1,38	0,23	0,37

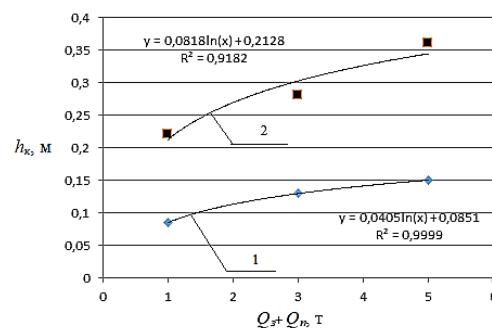


Рис. 14. Влияние веса пачки спиленных деревьев в ЗСУ узкозахватной лесозаготовительной машины фронтального типа на глубину колеи: 1 – увлажнённый почвогрунт; 2 – влажный почвогрунт

На увлажнённых почвогрунтах, как следует из рис. 14, даже полная загрузка ЗСУ приводит к определённому увеличению глубины, которая, однако, не превосходит 0,15 м.

Выводы. При работе на влажных почвогрунтах целесообразно заполнять не более 50 % объёма ЗСУ с тем, чтобы глубина колеи оставалась меньше 0,3 м и работоспособность трёлёвочного волока (технологического коридора) сохранялась в удовлетворительном состоянии.

На переувлажнённых почвогрунтах применение выносных устройств в сочетании с колёсными лесозаготовительными машинами не рекомендуется.

Таким образом, разработанная модель позволяет на стадии проектирования трёлёвки прогнозировать последствия взаимодействия узкозахватной лесозаготовительной машины фронтального типа, оснащённой ЗСУ, с краевой частью массива почвогрунта с учётом состояния его влажности и несущей способности.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счёт гранта Российской научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Литература

1. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. М. : Профи-Информ, 2005. – 344 с.
2. Шегельман В.И. Скрыпник О.Н., Лукашевич В.М. Мало затратные и ресурсосберегающие технологии на лесозаготовках : учеб. пособие. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2012. – 200 с.
3. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Разработка устройств дополнительной защиты оператора лесной машины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. – С. 8–24.
4. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 60–69.
5. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 51–56.
6. Шегельман И.Р. Исследование направлений модернизации технологий и техники лесозаготовок // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2 (20). С. 714–719.
7. Шегельман И.Р., Кузнецова А.В., Скрыпник В.И., Баклагин В.Н. Методика оптимизации транспортно-технологического освоения лесосырьевой базы с минимизацией затрат на заготовку и вывозку древесины // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–2 (23). С. 35.
8. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецова А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 4 (109). С. 66–75
9. Швецов А.С., Кривошеев А.А., Куницкая О.А., Баранов А.Н. Анализ путей повышения производительности валочно-трелёвочно-процессорных машин // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения. Сборник мат-лов по итогам XXX Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2024. С. 72–77.
10. Куницкая О.А., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Григорьева О.И., Макуев В.А., Ревяко С.И. Технологический анализ вариантов использования валочно-трелёвочно-процессорных машин // Resources and Technology. 2024. Т. 21. № 2. С. 51–82.
11. Куницкая О.А., Петров А.В., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Дмитриев А.С., Михайлова Л.М. Анализ влияния природно-производственных условий на производительность тракторной трелёвки // Вестник АГАТУ. 2023. № 4 (12). С. 102–149.
12. Помигуева А.И., Куницкая О.А., Швецов А.С., Должиков И.С., Курочкин П.А. Обоснование целесообразности использования бесчокерных трелевочных тракторов на лесосечных работах // Вестник АГАТУ. 2024. № 3 (15). С. 44–102.
13. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пуччин А.Н. Особенности учёта состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелёвочной системой // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 1(33). С. 116–128.
14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелёвочной системы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101–117.
15. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 6 (384). С. 121–134.
16. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87–91.
17. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5–4 (16–4). С. 320–323.
18. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Расчет тягово-цепных свойств колесных лесных машин с использованием WES-метода // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 196–202.
19. Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е. Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Мат-лы Междунар. науч.-практ. форума. 2013. С. 134–138.
20. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2010. – 544 с.

References

1. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. Technical equipment of modern logging. M. : Profi-Inform, 2005. 344 p.
2. Shegelman V.I. Skrypnik O.N., Lukashevich V.M. Low-cost and resource-saving technologies in logging: textbook. stiped. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2012. 200 p.
3. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Development of additional protection devices for the operator of a forest machine // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2023. No. 1. pp. 8–24.
4. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Review of design solutions for protective devices of cabins of forest machinery // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022. No. 1. pp. 60–69.
5. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Safety requirements of standards when working on forest machinery // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. No. 1. pp. 51_56.
6. Shegelman I.R. Research of the directions of modernization of technologies and techniques of logging // Engineering Bulletin of the Don. 2012. No. 2 (20). pp. 714–719.
7. Shegelman I.R., Kuznetsov A.V., Skrypnik V.I., Baklagin V.N. Methodology for optimizing the transport and technological development of the timber resource base while minimizing the costs of harvesting and exporting wood // Engineering Bulletin of the Don. 2012. No. 4–2 (23). p. 35.
8. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V. Analysis of performance indicators and assessment of efficiency of logging machines in various natural and industrial conditions // Scientific Notes of Petrozavodsk State University. 2010. No. 4 (109). pp. 66–75
9. Shvetsov A.S., Krivosheev A.A., Kunitskaya O.A., Baranov A.N. Analysis of ways to increase productivity of felling_skidding_processing machines // Forestry and chemical complexes _ problems and solutions. Collection of materials on the results of the XXX All_Russian Scientific and Practical Conference. Krasnoyarsk, 2024. pp. 72–77.
10. Kunitskaya O.A., Krivosheev A.A., Shvetsov A.S., Grigor'eva O.I., Makuyev V.A., Revyako S.I. Technological analysis of options for using roller_skidding processor machines // Resources and Technology. 2024. Vol. 21. No. 2. pp. 51–82.

11. Kunitskaya O.A., Petrov A.V., Krivosheev A.A., Shvetsov A.S., Dmitriev A.S., Mikhailova L.M. Analysis of the influence of natural and industrial conditions on the productivity of tractor skidding // AGATHU's Messenger. 2023. No. 4 (12). pp. 102_149.
12. Pomigueva A.I., Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S., Dolzhikov I.S., Kurochkin P.A. Justification of the feasibility of using chokeless skidding tractors in logging operations // Bulletin of AGATU. 2024. No. 3 (15). pp. 44–102.
13. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorev M.F., Puchnin A.N. Peculiarities of accounting for the state of the frozen soil mass during cyclic interaction with the skidding system // Forestry Engineering Journal. 2019. Vol. 9. No. 1(33). pp. 116–112.
14. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding system // Izvestiya higher educational institutions. Forest magazine. 2020. No. 2 (374). pp.101–117.
15. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2021.No. 6 (384). pp. 121–134.
16. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymsky A.A., Grigoreva O.I. Determination of precipitation during movement of a logging machine on a two_layer base // Scientific Notes of the Petrozavodsk State University. 2014. No. 2 (139). pp. 87–91.
17. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling the effects of forest machinery propellers on the soils of logging areas // Current trends in scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 5–4 (16–4). pp. 320–323.
18. Khitrov E.G., Khakhina A.M., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Nikiforova A.I. Calculation of traction properties of wheeled forestry machines using the WES method // Forestry engineering magazine. 2016. Vol. 6. No. 3 (23). pp. 196–202.
19. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Environmental safety assessment of forest machinery // Natural resources and ecology of the Far Eastern region. Materials of the International Scientific and Practical Forum. 2013. pp. 134–138.
20. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Ed. 2. E.M., Book house «LIBROCOM». 2010. 544 p.