

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СОРТИМЕНТОВ И ПАКЕТОВ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

С.П. Карпачев, В.И. Запруднов, М.А. Быковский

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
karpachevs@mail.ru

Предложена многооперационная лесная машина на базе тракторного процессора для раскряжевки деревьев и изготовления пакетов из древесных отходов. В статье приводятся результаты имитационного моделирования работы многооперационной машины. Рассматриваются две технологии работы машины. Первая технология предусматривает параллельную работу лебедки и машины. Вторая технология предполагает последовательную работу лебедки с машиной. Разработана математическая модель технологических процессов. План экспериментов по двум технологиям включал два варьируемых фактора: среднее расстояние трелевки и среднее число деревьев в трелеваемой пачке (табл. 1, 2). Некоторые результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 6–9. Как видно из графика на рис. 6, производительность выпуска пакетов из древесных отходов по технологии 1 падает с увеличением расстояния трелевки независимо от числа деревьев в трелеваемой пачке. Производительность резко повышается с увеличением числа деревьев в трелеваемой пачке с одного до двух на 40–50 %. Изменение длины средней очереди деревьев перед многооперационной машиной зависит от трелевки, которая представлена на рис. 7. Для одного и двух деревьев очередь деревьев увеличивается с уменьшением расстояния трелевки. При этом для пачки из одного дерева средняя длина очереди при среднем расстоянии трелевки 20 м чуть больше одного дерева, а для пачки из двух деревьев — 3000 деревьев, что может оказаться неприемлемо на практике. Из графика на рис. 8 видно, производительность выпуска пакетов из древесных отходов по технологии 2 также падает с увеличением расстояния трелевки независимо от числа деревьев в трелеваемой пачке, как и по технологии 1. Производительность повышается с увеличением числа деревьев в трелеваемой пачке с одного до двух примерно на 30 %, что меньше, чем по технологии 1. Графики производительности формирования пакетов по двум технологиям для трелеваемой пачки из одного бревна приведены на графике рис. 9. Сравнение этих графиков показывает, что производительность формирования пакетов по технологии 1 примерно на 20–60 % выше, чем по технологии 2.

Ключевые слова: многооперационная лесная машина, лесосечные отходы, пакеты из древесных отходов, имитационное моделирование

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Запруднов В.И., Быковский М.А. Моделирование работы многооперационной лесозаготовительной машины для производства сортиментов и пакетов из древесных отходов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 1. С. 62–69. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-62-69

Лесозаготовки предусматривают операции валки леса с последующей очисткой их от сучьев и раскряжевкой на сортименты [1]. На этих операциях сегодня применяют различные машины. Например, тракторные процессоры (рис. 1). Такие процессоры оснащаются компактным сучкорезно-раскряжевочным устройством, которое агрегируются с недорогими тракторами общего назначения. В зависимости от технологии и типа рубок процессор дополнительно может быть оснащен лебедкой, манипулятором с захватом и даже срезающим устройством [2–5].

Основное преимущество тракторных процессоров — это их относительно невысокая цена по сравнению с харвестером. Еще одно преимущество — это невысокие требования к квалификации оператора. Тракторные процессоры особенно эффективны на малообъемных заготовках леса, на различных видах рубок ухода и санитарных рубках [6–10].



Рис. 1. Тракторный процессор HYPRO 300 [21]
Fig. 1. Tractor processor HYPRO 300 [21]

К недостаткам тракторных процессоров, как и многих других лесозаготовительных машин, можно отнести то, что они не решают проблему утилизации лесосечных отходов. Технологически сброс веток, сучьев и вершинок тракторный процессор производит непосредственно перед сучкорезно-раскряжевочным устройством.

Иногда, после одного-двух обработанных деревьев, образуется куча отходов, которая затрудняет загрузку сучкорезно-раскряжевочного устройства. Если процессор не имеет манипулятора для уборки лесосечных отходов, тогда придется часто менять технологические стоянки. Для этого необходимо время, что снижает производительность процессора.

Цель работы

В настоящей статье предлагается рассмотреть работу лесной многооперационной машины, которая позволяет не только выполнять сучкорезно-раскряжевочные операции, но и осуществлять прием и пакетирование лесосечных отходов для нужд биоэнергетики [11–19].

Материалы и методы

Для обозначенных целей нами предлагается дооснастить процессор пакетформирующим устройством (рис. 2). Это устройство включает приемный стол с прессующим приспособлением. Пакетформирующее устройство предназначено для приема срезанных веток, сучьев и вершинок, и формирования из них спрессованных пакетов. По предлагаемой технологии предварительно сваленные деревья трелюют лебедкой к многооперационной лесной машине и затем перерабатывают в сортименты, а отходы прессуют в пакеты (рис. 3). Эффективность работы предложенной машины решено было исследовать на математических моделях [2–4, 20]. Приводим описание математических моделей работы многооперационной лесной машины по двум технологиям и результаты имитационных экспериментов с ними.

В модели время циклов работы всех устройств будем считать случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону.

Трелевка деревьев

Часовая производительность лебедки на трелевке деревьев определялась по формуле

$$P_{\text{час}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{п}}}{T_{\text{ц.тр}}}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{п}}$ — объем трелеваемой пачки деревьев, м^3 ;
 $T_{\text{ц.тр}}$ — время цикла работы лебедки, с.

Время цикла, затрачиваемое на выполнение операций по трелевке деревьев лебедкой, определялась по формуле

$$T_{\text{ц.тр}} = t_{\text{ч}} + t_{\text{г}} + t_{\text{х}} + t_{\text{отц}}, \text{ с}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ч}}$ — время на чоковуювку одного дерева, с;
 $t_{\text{г}}$ — время в грузовом направлении трелевки, с;
 $t_{\text{х}}$ — время на перемещение оператора с тяговым канатом к месту чоковойвки, с;
 $t_{\text{отц}}$ — время на отцепку одного дерева, с.

Затраты времени в грузовом и порожнем направлениях трелевки определялись возможной длиной каната

$$t_{\text{г}} + t_{\text{х}} = \frac{l_{\text{тр}}}{v_{\text{г}}} + \frac{l_{\text{тр}}}{v_{\text{х}}}, \text{ с}, \quad (3)$$

где $v_{\text{г}}$, $v_{\text{х}}$ — скорость трелевки при движении каната соответственно в грузовом и порожнем направлениях, м/с;

$l_{\text{тр}}$ — среднее расстояние трелевки, м.

Среднее расстояние трелевки принято равным 20, 30 и 40 м (табл. 1).

Средний объем дерева зависит от его породы и возраста. В статье приняты следующие показатели дерева:

- объем хлыста — 0,70 м^3 ;
- объем кроны — 0,43 м^3 ;
- объем дерева — 1,13 м^3 .

Очистка деревьев от сучьев и раскряжевка на сортименты

Часовую производительность сучкорезно-раскряжевочного узла определяли по формуле

$$P_{\text{час}} = \frac{3600 \cdot q_{\text{х}}}{T_{\text{ц.ру}}}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (4)$$

где $q_{\text{х}}$ — средний объем хлыста, м^3 .

Т а б л и ц а 1
Расчетные средние значения времени циклов на трелевку в зависимости от среднего расстояния трелевки ($l_{\text{тр}}$) и числа деревьев в трелеваемой пачке ($n_{\text{дер}}$)

Calculated average values of cycle time for skidding depending on the average distance of skidding ($l_{\text{тр}}$) and the number of trees in a trebled pack ($n_{\text{дер}}$)

$l_{\text{тр}}$, м	$n_{\text{дер}}$	$v_{\text{х}}$, м/с	$v_{\text{г}}$, м/с	$t_{\text{ч}}$, с	$t_{\text{г}}$, с	$t_{\text{х}}$, с	$t_{\text{отц}}$, с	$T_{\text{ц.тр}}$, с
20	1	1,3	0,5	10	40	15	10	75
30	1	1,3	0,5	10	60	23	10	103
40	1	1,3	0,5	10	80	31	10	131
20	2	1,3	0,5	20	40	15	20	95
30	2	1,3	0,5	20	60	23	20	123
40	2	1,3	0,5	20	80	31	20	151

Т а б л и ц а 2
Расчетные значения времени цикла на работу сучкорезно-раскряжевочного устройства для числа сортиментов $n_{\text{сорт}} = 3$
 Calculated values of the cycle time for operation of the delimiting-bucking device for the number of assortments $n_{\text{сорт}} = 3$

$n_{\text{сорт}}$	$t_{\text{п}}$, с	$t_{\text{с-р}}$, с	$T_{\text{ц.пр}}$, с
3	30	15	45

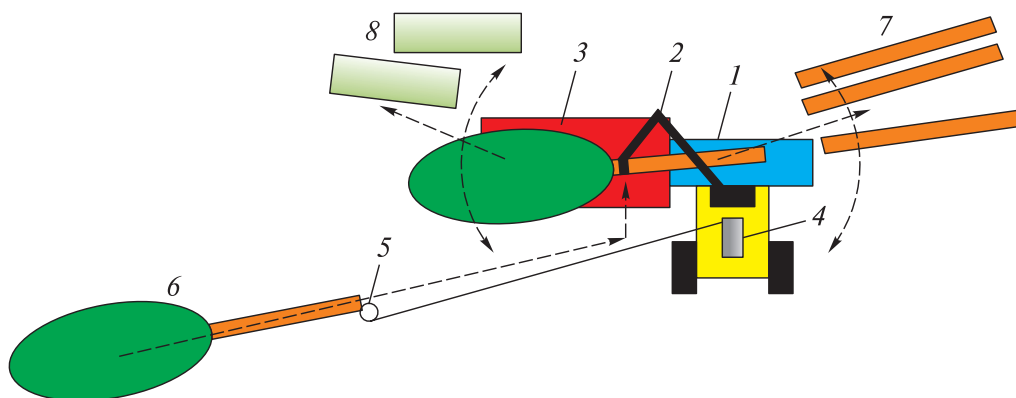


Рис. 2. Многооперационная лесная машина с устройством для пакетирования лесосечных отходов: 1 — сучкорезно-раскряжевное устройство; 2 — манипулятор; 3 — пакетформирующее устройство; 4 — лебедка; 5 — чокер; 6 — дерево; 7 — сортименты; 8 — пакетированные лесосечные отходы

Fig. 2. Multi-operational forest machine with a device for packing logging waste: 1 — delimiting-bucking device; 2 — manipulator; 3 — packet forming device; 4 — winch; 5 — choker; 6 — tree; 7 — assortments; 8 — packaged logging waste

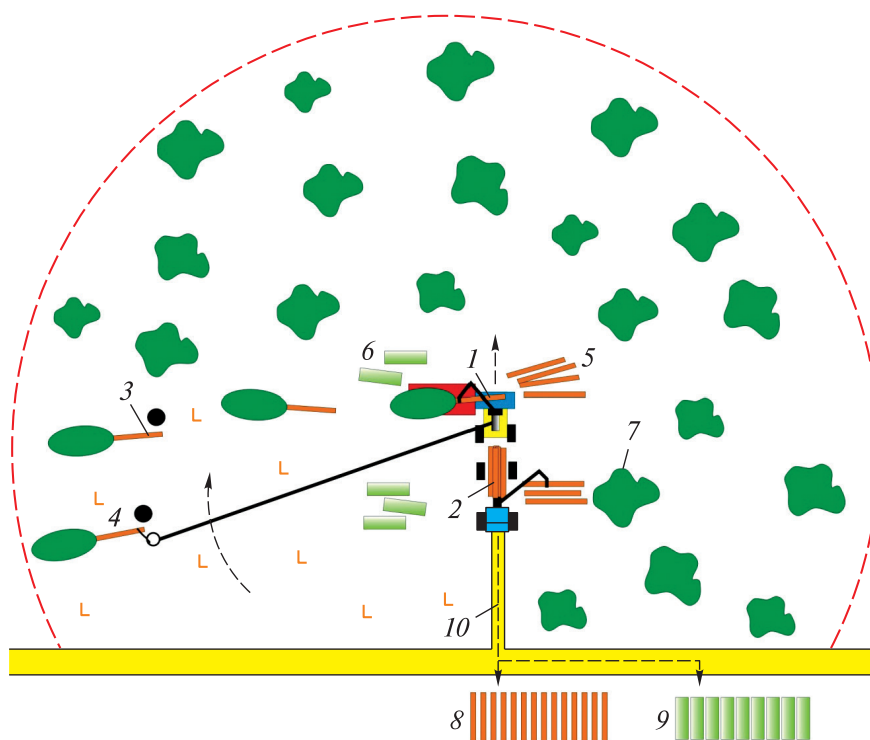


Рис. 3. Технологическая схема сортиментной заготовки леса и пакетирования лесосечных отходов многооперационной лесной машиной: 1 — многооперационная лесная машина; 2 — сортиментовоз; 3 — сваленное дерево; 4 — чокеровка дерева; 5 — пачка сортиментов; 6 — пакеты лесосечных отходов; 7 — растущее дерево; 8 — штабель сортиментов; 9 — штабель пакетов; 10 — волок; 11 — лесовозная дорога

Fig. 3. Technological scheme of assortment logging and packing of forest waste by a multioperational forest machine: 1 — a multioperational forest machine; 2 — timber log truck; 3 — felled tree; 4 — wood chopping; 5 — pack of assortments; 6 — packages of logging waste; 7 — growing tree; 8 — pile of assortments; 9 — stack of packages; 10 — fiber; 11 — forest road

Время цикла, затрачиваемое на выполнение операций по обрезке сучьев и раскряжевке дерева сучкорезно-раскряжевочным устройством, определяли по формуле

$$T_{ц.ру} = t_{п} + t_{с-р}, \text{ с}, \quad (5)$$

где $t_{п}$ — время на погрузку дерева в сучкорезно-раскряжевочное устройство, с;

$t_{с-р}$ — время на очистку ствола от сучьев и на раскряжевку, с.

Время на установку дерева в раскряжевочное устройство $t_{п}$ будет зависеть от скорости действия лебедки, квалификации оператора, расположения дерева и пр. Среднее время на установку дерева было определено путем хронометража процессора HYPRO 300. Также было определено время на очистку дерева от сучьев и на раскряжевку (табл. 2).

Пакетирование древесных отходов

Часовую производительность пакетирующего узла можно определить по формуле

$$П_{\text{час}} = \frac{3600 \cdot q_{\text{отх}}}{T_{\text{ц.пак}}}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (6)$$

где $q_{\text{отх}}$ — средний объем древесных отходов от одного дерева, м^3 .

Время цикла, затрачиваемое на выполнение операций по пакетированию древесных отходов, можно определить по формуле

$$T_{\text{ц.пак}} = t_{с} + t_{\text{пак}}, \text{ с}, \quad (7)$$

где $t_{с}$ — время на поступление сучьев в приемный стол, с;

$t_{\text{пак}}$ — время на пакетирование древесных отходов, с.

Результаты и обсуждение

Следует отметить, что очистка деревьев от сучьев и их поступление на приемный стол — это процессы, которые происходят одновременно.

Процесс пакетирования разумно совместить с операцией установки дерева в сучкорезно-раскряжевочное устройство. Заметим, что если время цикла пакетирования меньше времени цикла установки дерева, то цикл работы машины не будет зависеть от пакетирующего устройства. Если время цикла пакетирования больше времени цикла установки дерева, то цикл работы машины будет зависеть от работы как сучкорезно-раскряжевочного узла, так и от пакетирующего устройства. В данном случае было принято среднее время пакетирования, равное 20 с.

С использованием формул (1)–(7) была разработана имитационная модель технологического процесса и составлен план экспериментов.

Рассматриваются два варианта работы многооперационной машины совместно с лебедкой:

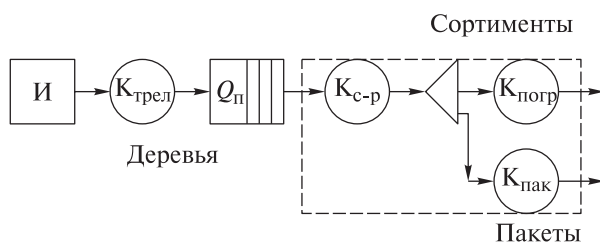


Рис. 4. Схема параллельной работы лебедки и многооперационной машины: И — источник заявок (деревьев); $K_{\text{трел}}$ — канал обслуживания заявки (дерева) на трелевке; $K_{\text{с-р}}$ — канал обслуживания заявки (дерева) на сучкорезно-раскряжевочном устройстве; $K_{\text{погр}}$ — канал обслуживания заявки (сортиментов) на погрузке; $K_{\text{пак}}$ — канал обслуживания заявки (лесосечные отходы) на пакетировании

Fig. 4. Scheme of parallel operation of the winch and multi-operation machine: И — the source of applications (trees); $K_{\text{трел}}$ — application service channel (tree) for skidding; $K_{\text{с-р}}$ — the service channel of the application (tree) on the delimiting-bucking device; $K_{\text{погр}}$ — channel service applications (assortments) for loading; $K_{\text{пак}}$ — application service channel (logging waste) on packaging

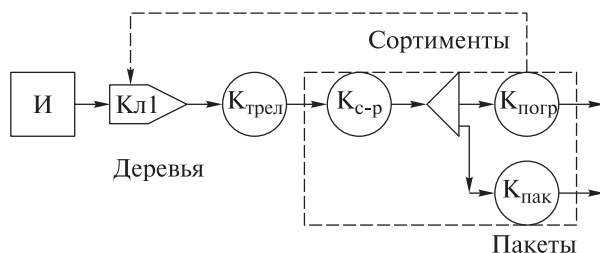


Рис. 5. Схема последовательной работы лебедки и многооперационной машины: Кл1 — клапан, который открывает доступ заявок (деревьев) на обслуживание, если прибор (тракторный процессор) свободен

Fig. 5. Scheme of the sequential operation of the winch and the multi-operation machine: Кл1 — valve that allows access of applications (trees) for maintenance if the device (tractor processor) is free

1-й вариант — параллельная (независимая) работа лебедки и машины (рис. 4);

2-й вариант — последовательная (зависимая) работа лебедки и машины (рис. 5).

План экспериментов по двум технологиям включал два варьируемых фактора: среднее расстояние трелевки и среднее число деревьев в трелеваемой пачке (см. табл. 1, 2).

Некоторые результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 6–9.

Выводы

Производительность формирования пакетов из древесных отходов по технологии 1 падает с увеличением расстояния трелевки независимо от числа деревьев в трелеваемой пачке, что ожидаемо (рис. 6). Отметим, что производительность резко повышается с увеличением числа деревьев в трелеваемой пачке с одного до двух на 40–50 %.

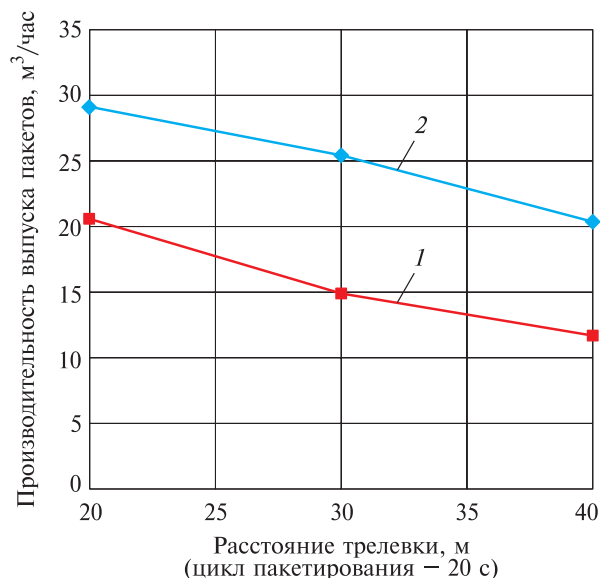


Рис. 6. Зависимость производительности выпуска пакетов из древесных отходов раскряжки по технологии 1 от расстояния трелевки для одного (1) и двух (2) деревьев в трелемой пачке

Fig. 6. The dependence of the productivity of the release of packages from wood waste of bucking according to technology 1 on the distance of logging for one (1) and two (2) trees in a trunked bundle

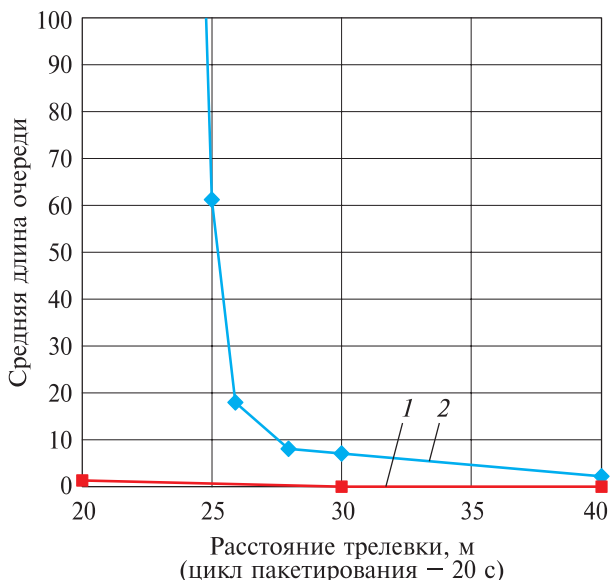


Рис. 7. Зависимость средней длины очереди деревьев к многооперационной машине по технологии 1 от расстояния трелевки для одного (1) и двух (2) деревьев в трелемой пачке

Fig. 7. The dependence of the average length of the queue of trees to a multioperational machine using technology 1 on the distance of skidding for one (1) and two (2) trees in a trunked pack

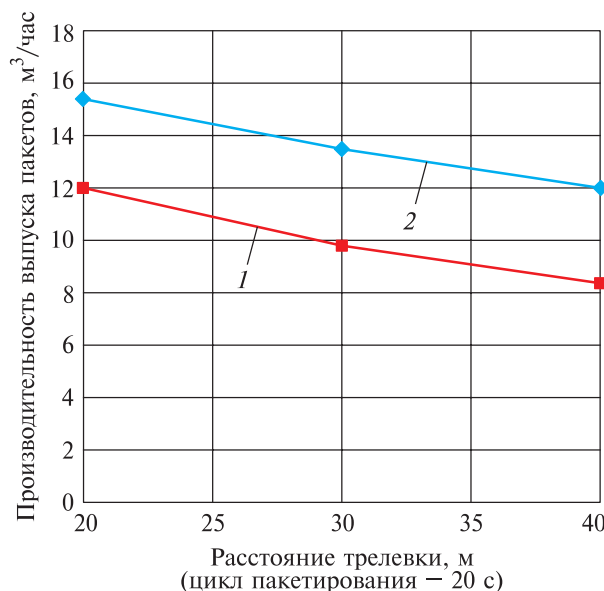


Рис. 8. Зависимость производительности выпуска пакетов из древесных отходов раскряжки по технологии 2 от расстояния трелевки для одного (1) и двух (2) деревьев в трелемой пачке

Fig. 8. The dependence of the performance of the release of packages from wood waste of bucking according to technology 2 on the distance of skidding for one (1) and two (2) trees in a trunked bundle

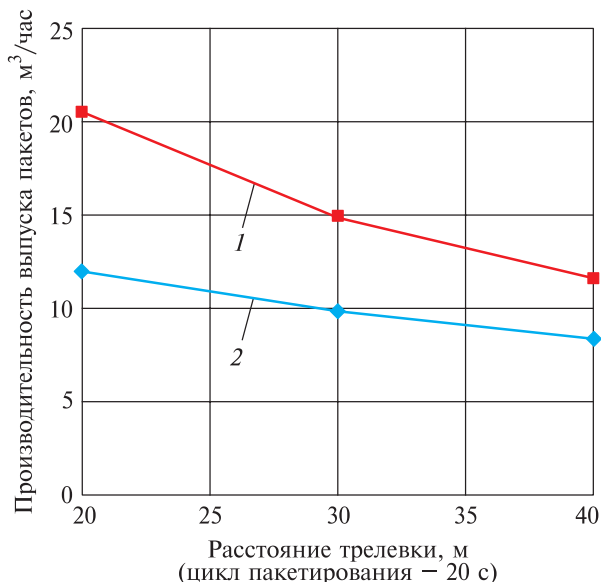


Рис. 9. Зависимость производительности выпуска пакетов из древесных отходов раскряжки по технологии 1 и технологии 2 от расстояния трелевки для одного дерева в трелемой пачке

Fig. 9. The dependence of the performance of the release of packages from wood waste of bucking according to technology 1 and technology 2 on the distance of skidding for one tree in a trunked packet

Изменение длины средней очереди деревьев перед многооперационной машиной зависит от протяженности трелевки (рис. 7). Для одного и двух деревьев очередь деревьев увеличивается с уменьшением длины трелевки. При этом для пачки из одного дерева средняя длина очереди при среднем расстоянии трелевки 20 м чуть больше одного дерева, а для пачки из двух деревьев — 3000 деревьев, что может оказаться неприемлемо на практике.

Производительность формирования пакетов из древесных отходов по технологии 2 также падает с увеличением расстояния трелевки независимо от числа деревьев в трелюемой пачке, как и по технологии 1 (рис. 8). Отметим, что производительность повышается с увеличением числа деревьев в трелюемой пачке с одного до двух примерно на 30 %, что меньше, чем по технологии 1.

Сравнение графиков производительности формирования пакетов по двум технологиям для трелюемой пачки из одного бревна (рис. 9) показывает, что производительность формирования пакетов по технологии 1 примерно на 20–60 % выше, чем по технологии 2.

Список литературы

- [1] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование раскряжевки хлыстов сучкорезно-раскряжевой установкой и штабелевой сортировки погрузчиками разного типа // *Транспорт: наука, техника, управление*, 2016. № 3. С. 58–61.
- [2] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование доставки круглых лесоматериалов потребителям автопоездами // *Экологические системы и приборы*, 2016. № 2. С. 18–22.
- [3] Карпачев С.П., Лозовецкий В.В., Щербаков Е.Н. Моделирование логистических систем лесных материаловопотоков // *Транспорт: наука, техника, управление*, 2011. № 8. С. 16–20.
- [4] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование разгрузки пачек хлыстов и укладки их в плот сплотно-транспортно-штабелевыми агрегатами // *Транспорт: наука, техника, управление*, 2016. № 1. С. 57–59.
- [5] Шелгунов Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная пром-сть, 1982. 520 с.
- [6] Routa J., Asikainen A., Björheden R., Laitila J., Röser D. Forest energy procurement — state of the art in Finland and Sweden // *WIREs Energy and Environment*, 2013, no. 2 (6), pp. 602–613.
- [7] Анисимов П.Н., Онучин Е.М. Оценка и способы повышения энергетической эффективности производства топливной щепы // *Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность»*, Томск, ТПУ, 2–4 декабря 2015 г. Томск: Скан, 2015. Т. 1. С. 252–255.
- [8] Кундас С.П., Позняк С.С., Родькин О.И., Санников В.В., Ленгфельдер Э. Использование древесной биомассы в энергетических целях: научный обзор. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2008. 85 с.
- [9] Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к Приказу Рослесхоза от 29.12.2007. № 523. 32 с.
- [10] Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.
- [11] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Scherbakov E.N. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, v. 38, no. 1, pp. 33–45
- [12] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [13] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [14] Eliasson, L., von Hofsten, H., Johannesson, T., Spinelli, R., Thierfelder, T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [15] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [16] Matevž Mihelič, Raffaele Spinelli, Anton Poje Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [17] Мохирев А.П., Керющенко А.А. Методика формирования технологической цепочки заготовки деловой и энергетической древесины // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2017. Т. 21. № 5. С. 17–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-17-22
- [18] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [19] Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Dima-ratos A.M., Founti M.A. Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive // *Int. J. Green Energy Fuel*, 2011, v. 90, pp. 3439–3446.
- [20] Карпачев С.П. Логистика. Моделирование технологических процессов береговых складов. М.: МГУЛ, 2005. 132 с.
- [21] Тракторный процессор HYPRO 300. URL: <https://i.ytimg.com/vi/9GrUKFSBRzw/maxresdefault.jpg> (дата обращения 01.06.2018).

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

Быковский Максим Анатольевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), bykovskiy@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 09.09.2018.

Принята к публикации 15.11.2018.

SIMULATION OF MULTIOPERATIONAL FORESTRY MACHINE FOR THE PRODUCTION OF LUMBERS AND BUNDLES OF WOOD WASTE

S.P. Karpachev, V.I. Zaprudnov, M.A. Bykovskiy

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

karpachevs@mail.ru

A multioperational forestry machine on the basis of the tractor processor for bucking trees and making bundles from waste wood is proposed. The article presents the results of simulation of multioperational machines. We consider two technologies work. The first technology provides for parallel operation of the winch and the machine. The second technique involves the sequential operation of the winch with the machine. The mathematical model of technological processes was developed. Design of experiments for both versions included two variable factors: the average distance of skidding and the average number of trees in the pack of trees (table. 1). Some experimental results are presented in graphs in Fig. 6–9. As can be seen from the graph in Fig. 6, the capacity of bundles from waste wood in technology 1 decreases with increasing skidding distances regardless of the number of trees in the pack of trees. The performance increases sharply with the increase in the number of trees in the pack of trees with 1 to 2 by 40–50 %. Change of length average queue trees in front of multifunction machine depends on the skidding, which is shown in Fig. 7. For 1 and 2 trees, the queue of trees increases with a decrease in the length skidding. For the pack of trees of 1 tree average queue length with an average skidding distance of 20 m to slightly more than for 1 tree, and for pack of trees of 2 trees — 3,000 trees, which may be unacceptable in practice. From the graph in Fig. 8, the performance of the bundles from waste wood bucking under option 2 technologies also decreases with increasing skidding distances regardless of the number of trees in pack of trees, as technology 1. The capacity improves with increasing number of trees in the pack of trees with 1 to 2, about 30%, less than in technique 1. The charts the formation of bundles by two technologies for the pack of trees of 1 logs are shown on the graph Fig. 9. A comparison of these graphs shows that the capacity of the technology 1 approximately 20–60 % higher in comparison with the technology 2 depending on skidding distances.

Keywords: multioperational forestry machine, forest residues, bundles, simulation modeling

Suggested citation: Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A. *Modelirovanie raboty mnogooperatsionnoy lesozagotovitel'noy mashiny dlya proizvodstva sortimentov i paketov iz drevesnykh otkhodov* [Simulation of multioperational forestry machine for the production of lumbers and bundles of wood waste]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 62–69. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-62-69

References

- [1] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie raskryazhevki khlystov suchkorezno-raskryazhevochnoy ustanovkoy i shtabelevkoy sortimentov pogruchikami raznogo tipa* [Simulation of bucking Khlysty with a delimiting-bucking installation and piling assortments with loaders of different types] *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], 2016, no. 3, pp. 58–61.
- [2] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie dostavki kruglykh lesomaterialov potrebitelyam avtopoezdami* [Modeling the delivery of round timber to consumers by road trains] *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2016, no. 2, pp. 18–22.
- [3] Karpachev S.P., Lozovetskiy V.V., Shcherbakov E.N. *Modelirovanie logisticheskikh sistem lesnykh materialopotokov* [Modeling of logistic systems of forest material flows]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], 2011, no. 8, pp. 16–20.
- [4] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie razgruzki pachek khlystov i ukladki ikh v plot splotochno-transportno-shtabelevochnymi agregatami* [Simulation of unloading packs of whips and placing them in a raft of rattan-transport-piling units]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], 2016, no. 1, pp. 57–59.
- [5] Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogo khozyaystva* [Machines and equipment for logging, timber floating and forestry]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry], 1982, 520 p.
- [6] Routa, J., Asikainen, A., Björheden, R., Laitila, J., Röser, D. Forest energy procurement in Finland and Sweden // *WIREs Energy and Environment*, 2013, no. 2 (6), pp. 602–613.
- [7] Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Otsenka i sposoby povysheniya energeticheskoy effektivnosti proizvodstva toplivnoy shchepy* [Evaluation and ways to improve the energy efficiency of the production of fuel chips] *Materialy XXI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'»*, Tomsk, TPU, 2–4 dekabrya 2015 g. [Proceedings of the XXI All-Russian Scientific-Technical Conference «Energy: Efficiency, Reliability, Safety», Tomsk, TPU, December 2–4, 2015]. Tomsk: Scan, 2015, v. 1, pp. 252–255.
- [8] Kundas S.P., Poznyak S.S., Rod'kin O.I., Sanikovich V.V., Lengfel'der E. *Ispol'zovanie drevesnoy biomassy v energeticheskikh tselyakh: nauchnyy obzor* [Use of woody biomass for energy purposes: a scientific review]. Minsk: MSEU named after A. Sakharov, 2008, 85 p.
- [9] *Rukovodstvo po provedeniyu sanitarno-ozdorovitel'nykh meropriyatiy. Prilozhenie 2 k Prikazu Rosleskhoza ot 29.12.2007 № 523* [Guide to sanitary and recreational activities. Appendix 2 to the Order of the Federal Forestry Agency of 29.12.2007 No. 523]. 32 p.
- [10] Borovikov V.P. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere. Dlya professionalov* [STATISTICA: the art of analyzing data on a computer. For professionals]. St. Petersburg: Peter, 2001, 656 p.

- [11] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Scherbakov E.N. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line-Intersect Method. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, v. 38, no. 1, pp. 33–45
- [12] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21 (6), pp. 433–444.
- [13] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [14] Eliasson, L., von Hofsten, H., Johannesson, T., Spinelli, R., Thierfelder, T. of *Forest Engineering*, 2015, v. 36 (1), pp. 11–17.
- [15] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering and the Eastern Alps: *The Croatian Journal of Forest Engineering*, 2007, v. 28 (1), pp. 1–9.
- [16] Matevž Mihelič, Raffaele Spinelli, Pope Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, v. 39 (2), pp. 223–232.
- [17] Mokhirev A.P., Keryushchenko A.A. *Metodika formirovaniya tekhnologicheskoy tsepochki zagotovki delovoy i energeticheskoy drevesiny* [Methods of forming the technological chain of harvesting business and energy wood]. *Forest Messenger / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 5, pp. 17–22. DOI: 10.18698 / 2542-1468-2017-5-17-22
- [18] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [19] Rakopoulos C. D., Rakopoulos D. C., Giakoumis E. G., Dima-ratos A. M., Founti M. A. For example, sunflower, cottonseed, corn and olive. *Int. J. Green Energy Fuel*, 2011, v. 90, pp. 3439–3446.
- [20] Karpachev S.P. *Logistika. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov beregovykh skladov* [Logistics. Modeling of technological processes of onshore warehouses]. Moscow: MGUL, 2005, 132 p.
- [21] *Traktornyy protsessor HYPRO 300* [HYPRO 300 tractor processor]. URL: <https://i.ytimg.com/vi/9GrUKFSBRzw/maxresdefault.jpg> (accessed 01.06.2018).

Authors' information

Karpachev Sergey Petrovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

Bykovskiy Maksim Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor of BMSTU (Mytishchi branch), bykovskiy@mgul.ac.ru

Received 09.09.2018.

Accepted for publication 15.11.2018.