

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ЛЕСА С ПОМОЩЬЮ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

С.П. Карпачев[✉], М.А. Быковский

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Мытищинский филиал, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

karpachevs@mail.ru

Представлена концептуальная модель лесной многооперационной машины для уборки захламленности, вызванной естественным отпадом деревьев. Рассмотрен технологический процесс санитарной очистки леса, минимизирующий ручной труд с помощью машины и лебедки, в том числе технология уборки отпада с переработкой его на дрова в лесу. Приведено два варианта работы многооперационной машиной совместно с лебедкой: последовательная, когда машина перерабатывает древесину отпада по мере поступления ее от лебедки и параллельная, когда лебедка и машина работают независимо друг от друга. Установлено, что производительность на уборке захламленности при параллельной работе машины и лебедки выше на 7...14 %, чем при их последовательной работе. Выявлено, что производительность многооперационной машины при параллельной работе машины и лебедки возрастает на 53...55 %. Определено, что загрузка машины, при совместной работе с лебедкой, составляет менее 50 % рабочего времени. Рекомендована совместная работа лебедки и машины при близких производительностях, в случае если производительность лебедки сильно отличается от производительности машины, то они должны работать раздельно.

Ключевые слова: естественный отпад в лесу, лесная многооперационная машина, лебедка, дрова, имитационное моделирование, математическая модель

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Быковский М.А. Моделирование технологии очистки леса с помощью многооперационной машины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 81–90.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-81-90

В настоящей статье рассматривается проблема уборки захламленности леса, вызванной естественным отпадом в лесу. Под естественным отпадом в лесу (далее — отпад) будем понимать отмершие деревья в результате естественного изреживания древостоя, вызванного старением, заболеванием и повреждением (рис. 1).

По санитарным нормам, согласно Федеральному закону от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», если объем отпада превышает 20 м³/га, проводятся лесопатологические обследования и назначаются санитарные мероприятия по уборке захламленности леса. Ежегодный объем отпада в лесу значителен. Только в Московской обл. объем таких деревьев составляет около 3 млн м³.

Часть отпада традиционно используется местным населением для производства дров (рис. 2). Однако, по экологическим причинам, величина изъятия отпада из леса не должна превосходить предельно допустимого значения. Так, в еловых древостоях предельное значение изъятия такой древесины составляет не более 40 % запаса древостоя.

Вследствие малых объемов отпада, технологии его сбора и переработки на основе исполь-



Рис. 1. Древесина отпада в лесу (Тверская обл., фото автора)
Fig. 1. Woody debris in the forest (Tver reg., photo by the author)

зования существующих лесозаготовительных и лесохозяйственных машин малоэффективны, поэтому широко используется ручной инструмент. Основным таким инструментом для разделки отпада в настоящее время являются бензопилы. Деревья отпада очищают от сучьев и веток, распиливают на бревна длиной 1–1,5 м. Бревна вручную укладывают в поленницы и оставляют для перегнивания в лесу.

Ветки и сучья отпада могут быть измельчены и разбросаны в лесу, как показано на рис. 3.



Рис. 2. Разделка и укладка распиленной ствольной части отпада в поленицы [27]

Fig. 2. Cutting and stacking of sawn stem part of debris in woodpiles [27]



Рис. 3. Измельчение и разбрасывание в лесу верхних частей отпада [28]

Fig. 3. Chopping and scattering in the forest the topwood of debris [28]



Рис. 4. Навесной древокольный процессор Naarva S23 [26]

Fig. 4. Naarva S23 mounted woodsplitting processor [26]

Недостатком технологии сбора и переработки отпада является то, что эти работы слабо механизированы и основаны на использовании ручного труда.

В настоящее время появились лесные машины, позволяющие механизировать переработку ствольной части отпада на дрова. В качестве базового оборудования, например, используются навесные древокольные процессоры, закрепленные на манипуляторе трактора, такие как процессор Naarva S23 (рис. 4) [26].

Следует отметить, что навесные древокольные процессоры предназначены для переработки на дрова только ствольной части отпада. Вершинная часть, сучья и ветки отпада сбрасываются на землю. Таким образом, применение известных древокольных процессоров позволяет перерабатывать только часть отпада и не решает проблему полной очистки леса от захламленности. Проблема заключается в том, что часть древесины отпада не пригодна для переработки на дрова. Это не только верхинки, сучья и ветки, но и ствольная часть отпада, поражения гнилью. Объем такой древесины может составлять значительную часть от общего объема отпада.

Цель работы

Цель работы — предложить концептуальную модель лесной многооперационной машины и на ее основе технологический процесс, который минимизирует ручной труд и позволяет проводить полную уборку захламленности леса от отпада с учетом санитарных и экологических требований.

Объекты и методика исследований

Концептуальная модель предлагаемой лесной многооперационной машины (далее — машины) для очистки леса от отпада представляет собой модернизированную лесную машину на основе универсального тракторного процессора, конструкция которого запатентована авторами статьи [7]. Машина работает совместно с трелевочной лебедкой.

Технологическая схема уборки захламленности леса от отпада с помощью машины и лебедки приведена на рис. 5.

Перед началом работ по уборки захламленности леса (см. рис. 5), лебедку 1 устанавливают на рабочей площадке I волока (это дорога, по которой передвигается машина и лебедка) рядом с машиной 5. Лебедкой 1 управляет оператор 2. Очистка леса от отпада проводится по рабочим лентам шириной a и длиной l . Длина рабочей ленты определяется пределами досягаемости грузового троса 4 лебедки 1.

Вальщик 3 чокерует подготовленный отпад 7 и трелюет его на рабочую площадку в пачки 8. Отпад

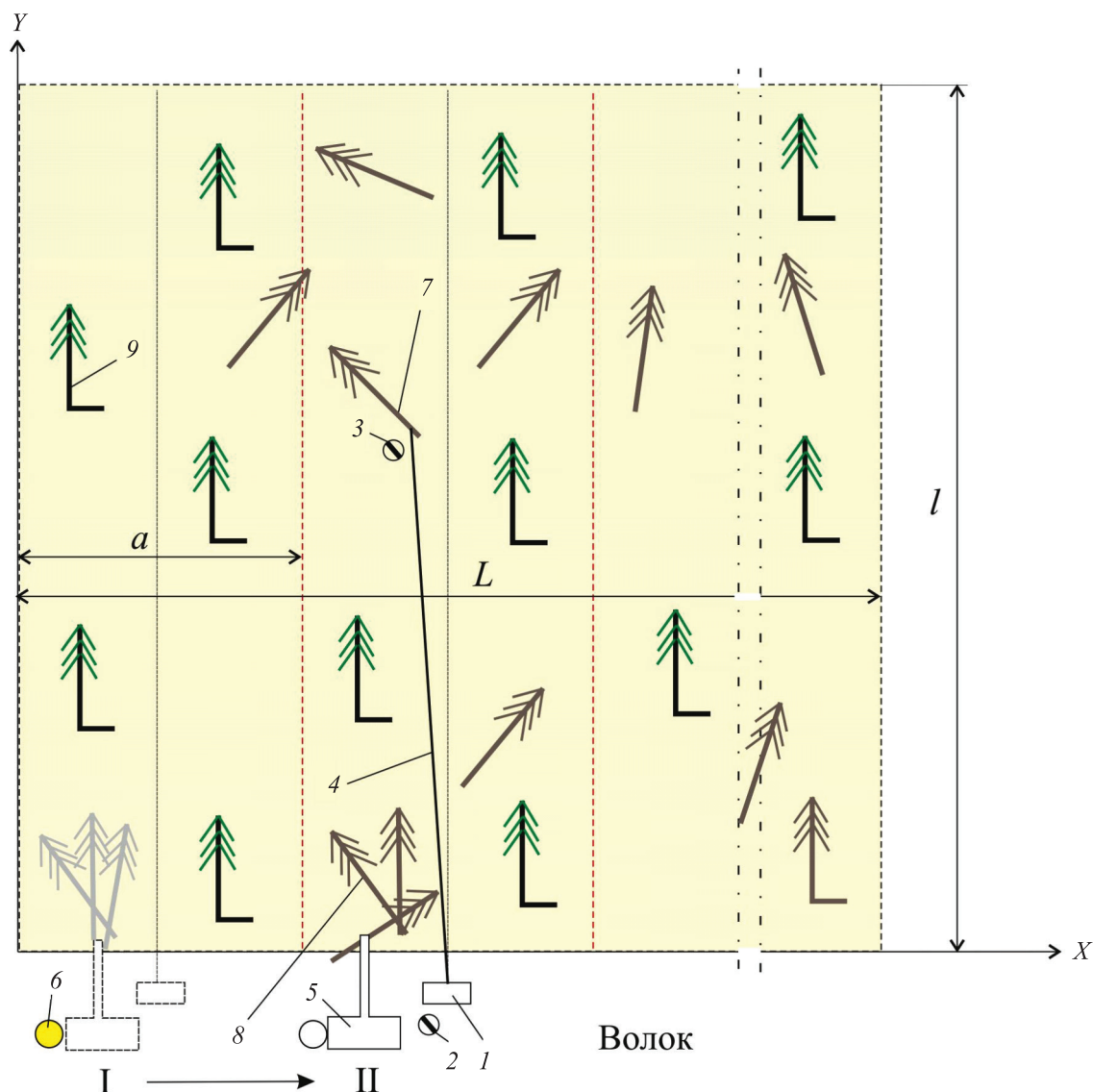


Рис. 5. Технологическая схема уборки захламленности леса от отпада с помощью машины и лебедки: 1 — лебедка; 2 — оператор лебедки; 3 — вальщик с бензопилой; 4 — грузовой трос лебедки; 5 — машина; 6 — съемная емкость с дровами; 7 — отпад; 8 — стрелеванная лебедкой пачка отпада; 9 — здоровое растущее дерево
Fig. 5. Technological scheme of debris removal from forest with the help of machine and winch: 1 — winch; 2 — winch operator; 3 — chainsaw operator; 4 — winch cargo cable; 5 — machine; 6 — removable fuelwood reservoir; 7 — debris; 8 — debris bundle, pulled by winch; 9 — healthy growing tree

из пачки 8 поштучно захватывает машина 5 и перерабатывает на дрова (стволовую часть отпада), и на щепу (вершинную часть и ветки отпада). Дрова сбрасывают в съемную емкость 6 и после ее заполнения оставляют на рабочей площадке волока. После переработки всего отпада с рабочей ленты, лебедка 1 и машина 5 перемещаются по волоку к следующей ленте от рабочей площадки I к рабочей площадке II.

Операции трелевки отпада 7 лебедкой 1 могут быть технологически совмещены с работой машины 5, то есть выполняться совместно (последовательно). Лебедка 1 трелюет на рабочую площадку отпад 7 поштучно, который сразу

после доставки перерабатывается машиной 5. В этом случае лебедка 1 может размещаться на машине 5.

Эти операции могут выполняться независимо друг от друга, то есть трелевка отпада 7 лебедкой 1 может выполняться параллельно с операциями по переработке отпада машиной 5. Лебедка 1 доставляет на рабочую площадку отпад 7, который укладывают в пачку 8. Машина 5 приступает к переработке отпада из пачек 8 после окончания работы лебедки 1 на участке.

В статье приводятся результаты исследований работы машины с лебедкой по совместной и независимой схеме.

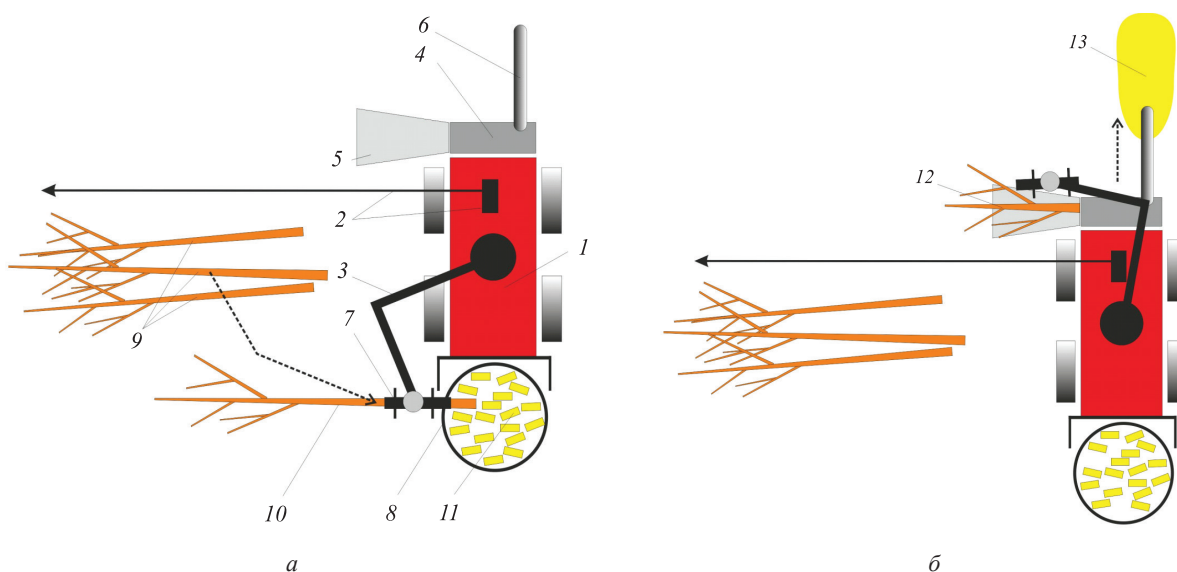


Рис. 6. Работа машины по переработке отпада на дрова и щепу: *a* — цикл производства дров; *б* — цикл производства щепы; 1 — базовый трактор; 2 — лебедка с тросом; 3 — манипулятор; 4 — рубительная машина; 5 — подающий стол; 6 — пневмопровод; 7 — навесной древокольный процессор; 8 — съемная емкость для дров; 9 — пачки отпада; 10 — одиночное дерево отпада; 11 — дрова; 12 — верхинная часть отпада; 13 — щепа

Fig. 6. Work of the machine on debris processing into firewood and chips: *a* — cycle of firewood production; *б* — cycle of wood chip production; 1 — basic tractor; 2 — winch with rope; 3 — manipulator; 4 — chipper; 5 — feeding table; 6 — pneumatic pipe; 7 — mounted wood processor; 8 — removable capacity for firewood; 9 — stacks of deadwood; 10 — single tree of deadwood; 11 — wood; 12 — topwood part of debris; 13 — chips

Работа машины по переработке отпада на дрова и на щепу представлена на рис. 6.

Порядок работы машины с отпадом был принят следующий (см. рис. 6, *a*, *б*).

Отпад 10 из пачки 9 с помощью манипулятора 3 поштучно захватывают навесным древокольным процессором 7. Затем ствольную часть отпада перерабатывают на дрова 11, которые сбрасывают в съемную емкость для дров 8.

Вершинную часть отпада с ветками и сучьями 12 манипулятор 3 переносит и сбрасывает на подающий стол 5. Транспортер подающего стола направляет верхинную часть отпада в окно рубительной машины 4. Измельченная древесина 13 с помощью пневмопровода 6 разбрасывается на землю, например, на волок перед трактором для укрепления грунта.

В исследованиях работы машины с лебедкой нами применялись методы имитационного моделирования с использованием математических моделей [1–8].

В математических моделях каждому сгенерированному *i*-му отпаду задавались координаты X_i и Y_i его положения на участке. Поскольку участок разбит на рабочие ленты, то координата X_i определяла номер рабочей ленты, в которую попадает *i*-й отпад. В исследованиях, для получения статистически значимых результатов, число рабочих

лент при ее ширине $a = 10$ м было принято равным 1000. Координата Y_i важна для определения времени цикла трелевки. В модели координаты X_i и Y_i задавались как случайные величины, распределенные по равномерному закону на интервалах $X_i \in [0; 1000]$, $Y_i \in [0; l]$.

В исследованиях было принято, что операции валки и трелевки выполняет один рабочий с бензопилой. За один раз трелюется одно дерево отпада. Часовую производительность ($\Pi_{1_час}$) на валке, трелевке и укладке отпада в пачку можно представить, как сумму стрелеванных за час отпада в объеме получаемых из них дров

$$\forall \sum_{j=1}^n t_j \cdot \sum_{i=1}^{N_j} t_{ji} = T_{\text{час}} \Rightarrow \Pi_{1_час} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_j} q_{ji}, \quad (1)$$

где t_j — время цикла перебазирования лебедки на *j*-ю ленту, с;

t_{ji} — время цикла работы вальщика на обработке *i*-го отпада на *j*-й рабочей ленте, с;

$T_{\text{час}}$ — время часа в секундах, равное 3600 с;

n — число стоянок лебедки в течение одного часа;

N_j — число отпада на *j*-й ленте;

q_{ji} — объем дров, получаемых с *i*-го отпада на *j*-й ленте, м³.

Продолжительность цикла в расчете на *i*-й отпад на *j*-й ленте определялось по формуле

$$t_{ji} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)_{ji}, \quad (2)$$

где t_1 — время на подготовку отпада к трелевке, с;
 t_2 — время на грузовую трелевку отпада, с;
 t_3 — время на холостой ход троса лебедки, с;
 t_4 — время на укладку отпада в пачку, с.

Время на грузовую трелевку i -го отпада и время на холостой ход троса лебедки определяется координатой Y_{ji} положения отпада на участке, при этом индекс j указывает, что i -й отпад находится на j -й ленте.

$$(t_2 + t_3)_{ji} = 2 \frac{Y_{ji}}{v}, \quad (3)$$

где Y_{ji} — координата i -го отпада на j -й ленте, м;
 v — скорость грузового и холостого хода троса лебедки, м/с.

Часовую производительность машины на переработке отпада на дрова и на щепу ($\Pi_{2_час}$) можно представить, как сумму объемов полученных дров

$$\forall \sum_{j=1}^n t_j \cdot \sum_{i=1}^{N_j} t_{ji} = T_{час} \Rightarrow \Pi_{2_час} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_j} q_{ji}, \quad (4)$$

где t_j — время цикла переезда машины на j -ю ленту, с;

t_{ji} — время цикла работы машины на обработке i -го отпада на j -й ленте, с;

$T_{час}$ — время часа в секундах, равное 3600 с;

n — число стоянок машины в течение одного часа;

N_j — число отпада на j -й ленте;

q_{ji} — объем дров, получаемых с i -го отпада на j -й ленте, м³.

Продолжительность цикла работы машины в расчете на i -й отпад на j -й ленте определялось по формуле

$$t_{ji} = (t_1 + t_2 + t_3)_{ji}, \quad (5)$$

где t_1 — время на подвод манипулятора к штабелю, захват отпада, поворот манипулятора к контейнеру с дровами, с;

t_2 — время на переработку отпада на дрова, с;

t_3 — время на поворот манипулятора к рубительной машины и сброску вершинки на подающий стол рубительной машины, с.

Время на переработку стволовой части i -го отпада на дрова навесным древокольным процессором машины зависит от длины стволовой части отпада, пригодной для получения дров. В работе это время определялось как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону со средним значением

$$t_2 = \frac{l_{ств_i}}{l_{др}} \cdot (t_{21} + t_{22}), \quad (6)$$

где $l_{ств_i}$ — длина стволовой части i -го отпада, пригодная для переработки на дрова, м;

$l_{др}$ — длина дров;

t_{21} — среднее время на отрез от стволовой части отпада чурака, длина которого соответствует размерам дров, с;

t_{22} — среднее время на надвигание и раскол чурака на дрова, с.

Для каждого сгенерированного i -го отпада задавали диаметр d_i и высоту H_i дерева отпада, а также объем получаемых дров из стволовой части отпада q_i .

Высота i -го дерева отпада устанавливалась в зависимости от его диаметра d_i (в см) по формуле [10]

$$H_i = 1,462 \cdot d_i^{0,8667}, \text{ м} \quad (7)$$

Диаметр i -го отпада определялся как случайное число, распределенное по закону *beta*-распределения, которое было установлено в результате обработки экспериментальных данных. Пример экспериментального распределения деревьев по диаметрам приведен на рис. 7.

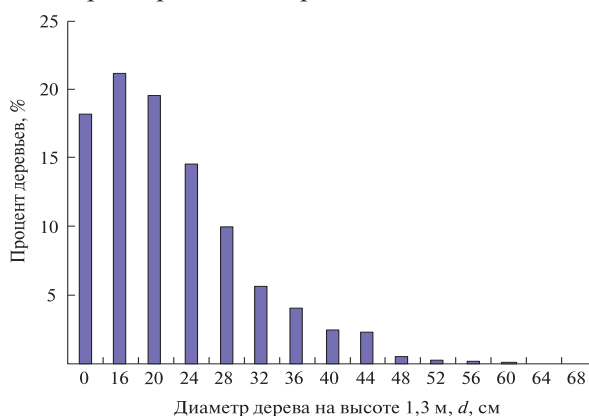


Рис. 7. Пример экспериментального распределения деревьев по диаметрам

Fig. 7. Example of an experimental distribution of trees by diameter

Объем дров, которые получали со стволовой части одного отпада, в исследованиях определяли в зависимости от объема стволовой части. В модели объем получаемых дров с i -го отпада q_i устанавливали по длине $l_{ств_i}$ и диаметру d_i стволовой части, пригодной для получения дров

$$q_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot l_{ств_i}, \quad (8)$$

Длина стволовой части отпада, пригодная для получения дров, зависит от многих факторов (поражение гнилью, временем нахождения на земле и т. д.). В исследованиях эта длина была оценена 50 % от высоты дерева отпада.

В модели время циклов работы лебедки и машины разыгрывались, как случайные числа, распределенные по экспоненциальному закону. Средние значения этих величин были рассчитаны по вышеприведенным формулам (2), (3), (5), (6) и частично определены путем хронометража.

В исследованиях технологический процесс моделировался с учетом природно-производственных факторов [9–11, 13–25].

Результаты и обсуждение

Проведено исследование влияния на выходные показатели совместной и независимой работы лебедки и машины на санитарных мероприятиях по уборке захламленности леса и переработке отпада на дрова и щепу.

Число отпада на j -й рабочей ленте зависит от запаса отпада на 1 га. В модели рассматривался участок размером $L \times l$, при этом длина участка l была принята равной длине грузового каната лебедки. Длина грузового каната лебедки варьировалась на трех уровнях $l = 50, 75, 100$ м. Ширина участка была определена из расчета достаточного числа отпада для накопления значимой статистики в экспериментах $L = 10\ 000$ м. Ширина одной рабочей ленты была принята равной $a = 10$ м (см. рис. 5). Запас отпада N на 1 га варьировал от 20 до 60 м³/га. Матрица планирования экспериментов приведена в таблице.

Матрица планирования экспериментов

Experiment-planning matrix

Номер эксперимента	Длина рабочей ленты, равная максимальной длине троса лебедки l , м	Запас отпада на участке N , м ³ /га
1	50	20
2	50	40
3	50	60
4	75	20
5	75	40
6	75	60
7	100	20
8	100	40
9	100	60

Результаты исследований были статистически обработаны и представлены в виде зависимостей, приведенных на графиках рис. 8–10.

Из рис. 8 видно, что производительность при совместной работе лебедки и машины с увеличением запаса отпада на участке растет при всех принятых значениях длины рабочей ленты. Эта зависимость хорошо описывается логарифмической кривой. Рост производительности при изменении запаса отпада с 20 до 60 м³/га относительно небольшой и составляет 10...15 %. Так, например, для длины рабочей ленты 50 м при запасе

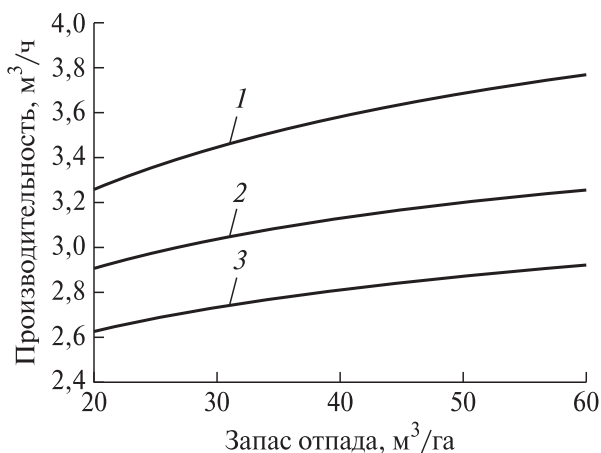


Рис. 8. Производительность лебедки и машины при их совместной работе в зависимости от запаса отпада (цифрами обозначена длина рабочей ленты): 1 — 50 м; 2 — 75 м; 3 — 100 м

Fig. 8. Performance of winch and machine when they work together as a function of the debris margin (the numbers indicate the length of the working belt): 1 — 50 m; 2 — 75 m; 3 — 100 m

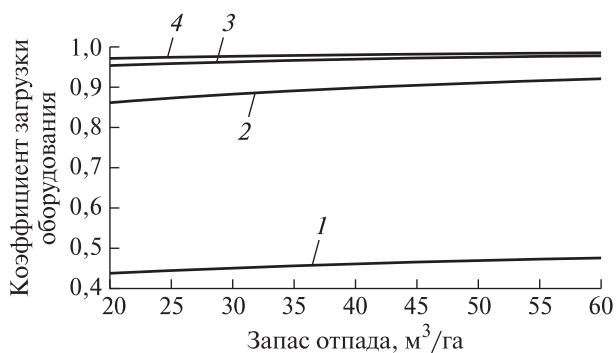


Рис. 9. Коэффициенты загрузки лебедки и машины при их совместной и независимой работе при длине рабочей ленты 100 м в зависимости от запаса отпада: 1 — машины при ее совместной работе; 2 — лебедки при ее совместной работе; 3 — машины при ее независимой работе; 4 — лебедки при ее независимой работе

Fig. 9. Load factors of winch and machines at their joint and independent work with the length of working belt 100 m depending on the fall-out margin: 1 — machine at its joint work; 2 — winch at its joint work; 3 — machine at its independent work; 4 — winch at its independent work

отпада 20 м³/га, производительность совместной работы лебедки и машины равна 2,6 м³/ч, при запасе 60 м³/га — 2,9 м³/ч. Рост равен 11,3 %. Причем, наибольший рост производительности наблюдается на начальном промежутке изменения запаса отпада. Так, при изменении запаса отпада с 20 м³/га до 40 м³/га, рост производительности будет равен почти 8 %, а с 40 до 60 м³/га — 3,5 %.

График на рис. 8 позволяет оценить влияние на производительность длины рабочей ленты. С увеличением длины ленты производительность при совместной работе лебедки и машины

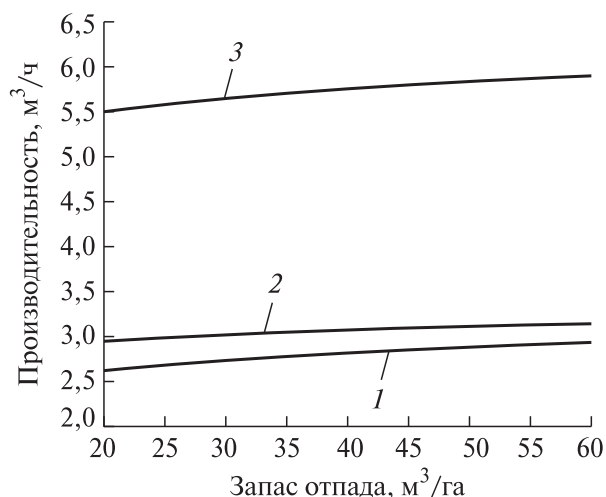


Рис. 10. Производительность лебедки и машины при их совместной и независимой работе при длине рабочей ленты 100 м в зависимости от запаса отпада: 1 — лебедки и машины при их совместной работе (производительность лебедки и машины в этом случае одинаковы); 2 — лебедки при ее независимой работе; 3 — машины при ее независимой работе

Fig. 10. Outputs of winch and machines at their joint and independent work with the length of working belt 100 m depending on the slope margin: 1 — winch and machine at their joint work (capacity of winch and machine in this case is the same); 2 — winch at its independent work; 3 — machine at its independent work

уменьшается. Так, например, при запасе 60 м³/га для длины ленты 50 м производительность составляет почти 3,8 м³/ч, для ленты длиной 100 м — 2,9 м³/ч. Производительность уменьшилась на 24 %.

На рис. 9 приведены коэффициенты загрузки лебедки и машины при их совместной и независимой работе для длины ленты в 100 м в зависимости от запаса отпада. Значения коэффициентов с увеличением длины ленты незначительно растут. Это объясняется относительным уменьшением простоев, связанных с перебазировкой лебедки и машины от одной рабочей стоянки к другой.

Анализ коэффициентов загрузки при совместной работе оборудования показывает, что машина работает менее 40...45 % времени, простой превышают 60 % времени, а лебедка работает 85...95 % времени. Простой машины при ее совместной работе с лебедкой вызваны меньшей производительностью лебедки.

В случае независимой работы оборудования, машина и лебедка работают более 96 % времени. При независимой работе лебедки и машины загрузка лебедки больше, чем машины при всех длинах рабочих лент.

Рост загрузки оборудования при независимой работе лебедки и машины приводит к повышению производительности по сравнению с совместной их работой. Пример изменения производитель-

ности лебедки и машины при их совместной и независимой работе в зависимости от запаса отпада при длине рабочей ленты 100 м приведен на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что производительность при совместной работе лебедки и машины изменяется одинаково с 2,5 до 2,8 м³/ч. При независимой работе оборудования, в тех же самых условиях, производительность лебедки изменяется с 2,9 до 3,0 м³/ч, а машины — с 5,5 до 6,0 м³/ч. Производительность лебедки при независимой от машины работе повышается по сравнению с производительностью при ее совместной работе с машиной примерно на 7...14 %, при этом производительность машины, когда она работает независимо от лебедки, повышается на 53...55 %.

Выводы

Для уборки захламленности леса предложена концептуальная модель машины с трелевочной лебедкой и на их основе технологический процесс, который минимизирует ручной труд и позволяет полностью проводить санитарную очистку леса от отпада с учетом экологических требований. Исследования совместной и независимой работы лебедки и машины на уборке захламленности леса позволили сделать следующие выводы:

1. Производительность и загрузка лебедки, и машины при их совместной работе изменяется следующим образом:

- с увеличением запаса отпада производительность растет при всех принятых значениях длины рабочей ленты участка. Рост производительности относительно небольшой и составляет 10...15 % при изменении запаса с 20 до 60 м³/га.

- с увеличением длины рабочей ленты (длина грузового троса лебедки) производительность уменьшается. Уменьшение составляет 20...24 %.

- загрузка машины равна 40...45 %. Простой машины превышают 60 % времени.

- загрузка лебедки равна 85...95 %.

2. Производительность и загрузка лебедки, и машины при их независимой работе изменяется следующим образом:

- производительность лебедки при независимой работе выше, чем при совместной работе на 7...14 %.

- производительность машины при независимой работе повышается на 53...55 % по сравнению с совместной работой с лебедкой.

- загрузка машины и лебедки превышает 96 % и с ростом запаса отпада на участке приближается к 100 %.

3. Исследования совместной и независимой работы лебедки и машины на уборке захламленности леса позволили сделать следующие рекомендации:

– если производительность лебедки близка к производительности машины, то можно рекомендовать совместную работу лебедки и машины. Лебедка в этом случае может быть размещена на машине и управляться оператором машины.

– если производительность лебедки сильно отличается от производительности машины, то лебедка и машина должны работать независимо. Лебедка в этом случае является отдельным механизмом с собственным приводом и управляется отдельным рабочим.

Список литературы

- [1] Шелгунов Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная промышленность, 1982. 520 с.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Ширнин Ю.А. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- [4] 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 J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Виногоров Г.К. Лесосечные работы. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
- [7] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Universal tractor processor for working in forests of different ages // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, v. 574 (1), no. at. 012037. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012037
- [8] Салминен Э.О., Гуров С.В., Большаков Б.М. Размещение волоков на заболоченных участках // *Лесная промышленность*, 1988. № 3. С. 32–33.
- [9] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1977. 248 с.
- [10] 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.
- [11] Рыжков А.Е., Проказин Н.Е. Система добровольной лесной сертификации PEFC-FCR, оценка лесопользования, лесопользования и цепочки поставок лесопроductии на соответствие международным требованиям. М.: PEFCFCR, 2016. 254 с.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевочной // *ИЗВУЗ Лесной журнал*, 2004. No 4. С. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? // *Biomass Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (дата обращения 01.02.2022).
- [16] Сюнев В.С. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоенсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 126 с.
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 01–02 декабря 2015 г., Вологда. Вологда: Изд-во ВГТУ, 2016. С. 32–37.
- [18] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптированные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 174 с.
- [19] Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2003. 120 с.
- [20] Макаренко А.В. Оптимизация размещения сети трелевочных волоков на лесосеке // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 апреля 2017 г., Минск. Минск: Изд-во БГТУ, 2017. С. 233–237.
- [21] Галактионов О.Н. Технологический процесс лесозаготовок и ресурсы лесосечных отходов. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 95 с.
- [22] Кузнецов В.И. Представляем фирму «Лестехком» — новое качество лесозаготовительной техники // *Лесная промышленность*, 2006, № 1. С. 12–14.
- [23] Пискунов М.А. Распределение проходов форвардера и построение оптимальных схем расположения трелевочных волоков на лесосеке // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование*, 2017. № 2 (34). С. 37–48.
- [24] Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2006. 236 с.
- [25] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // *Лесотехнический журнал*, 2016. № 2. С. 69–75. DOI: 10.12737/19956
- [26] Naarva S23. URL: <https://www.pentinpaja.fi/en/naarva-tuote/naarva-s23/> (дата обращения 01.02.2022).
- [27] Правительство Московской области. URL: <https://mosreg.ru/upload/iblock/2cf/04.jpg/> (дата обращения 01.02.2022).
- [28] РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева. URL: https://www.timacad.ru/uploads/images/20200206/1580985058_8N5B4144.jpg/ (дата обращения 01.02.2022).

Сведения об авторах

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

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

Поступила в редакцию 10.11.2022.

Одобрено после рецензирования 18.01.2023.

Принята к публикации 21.03.2023.

MODELLING FOREST CLEARING TECHNOLOGY WITH MULTI-OPERATOR MACHINE

S.P. Karpachev [✉], **M.A. Bykovskiy**

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

karpachevs@mail.ru

A conceptual model of a forest multi-operator machine for clearing debris caused by tree mortality is presented. A technological process of sanitary forest clearing that minimizes manual labour with the help of a machine and a winch is considered, including the technology of litter removal with its processing into firewood in the forest. Two variants of multi-operating machine's work with a winch are given: sequential, when the machine processes the wood from the fell as it is received from the winch, and parallel, when the winch and machine work independently of each other. It is established that the productivity at debris removal at parallel operation of the machine and winch is higher by 7...14 % than at their consecutive operation. It is revealed that the productivity of a multi-operator machine when the machine and a winch work in parallel increases by 53...55 %. It is determined that the load of the machine, when working together with a winch, is less than 50 % of working time. It is recommended that the winch and the machine work together at close capacities, if the winch capacity is very different from the machine capacity, then they should work separately.

Keywords: dead and fallen trees fall away, forest multi-operation machine, winch, firewood, simulation modeling, mathematical model

Suggested citation: Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. *Modelirovanie tekhnologii ochistki lesa s pomoshch'yu mnogoperatsionnoy mashiny* [Modelling forest clearing technology with multi-operator machine]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 81–90. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-81-90

References

- [1] Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogokhozyaystva* [Machines and equipment of logging, timber rafting and forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 520 p.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Shirnin Yu.A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennykh proizvodstv. Ch. 1. Lesosechnye raboty* [Technology and equipment of forest industry. Part 1. Logging work]. Moscow: MGUL, 2004, 445 p.
- [4] 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 J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Vinogorov G.K. *Lesosechnye raboty* [Logging work]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1981, 272 p.
- [7] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Universal tractor processor for working in forests of different ages. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, v. 574 (1), no. at. 012037. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012037
- [8] Salminen E.O., Gurov S.V., Bol'shakov B.M. *Razmeshchenie volokov na zabolochennykh uchastkakh* [Placement of portages on wetlands]. *Lesnaya promyshlennost' [Forestry]*, 1988, no. 3, pp. 32–33.
- [9] Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlya lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [10] 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.
- [11] Ryzhkov A.E., Prokazin N.E. *Sistema dobrovol'noy lesnoy sertifikatsii PEFCFCR, otsenka lesoupravleniya, lesopol'zovaniya i tsepochki postavok lesoproduktsii na sootvetstvie mezhdunarodnym trebovaniyam* [PEFCFCR voluntary forest certification system/assessment of forest management, forest use and supply chain of forest products for compliance with international requirements]. Moscow: PEFC-FCR, 1916, 254p.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.

- [13] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Koordinatno-ob'emnaya metodika trassirovaniya pri osvoenii lesosek trelevkoy* [Coordinate volumetric tracing technique in the development of skidding sites]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2004, no. 4, pp. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? *Biomass Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (accessed 01.02.2022).
- [16] Syunev V.S. *Sravnienie tekhnologiy lesosechnykh rabot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh Respubliki Kareliya* [Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2008, 126 p.
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [The efficiency of technological operations during selective logging] Aktual'nye problem razvitiya lesnogo kompleksa. Materialy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 01–02 dekabrya 2015 g. Vologodskiy gosudarstvennyy universitet [Actual problems of the development of the forest complex. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference, December 01–02, 2015. Vologda State University]. Vologda: VSTU, 2016, pp. 32–37.
- [18] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh severo-zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Mediating technologies for the development of cutting areas in the northwestern region of the Russian Federation]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 174 p.
- [19] Gerts E.F. *Otsenka tekhnologii lesopol'zovaniya na lesosechnykh rabotakh* [Evaluation of forest technology in logging work]. Ekaterinburg: USFU, 2003, 120 p.
- [20] Makarenko A.V. *Optimizatsiya razmeshcheniya seti trelevochnykh volokov na lesoseke* [Optimizing the placement of a network of skidding trails in the cutting area. Logging production: problems and solutions]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya*. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Minsk, BGTU, 26–28 aprelya 2017 g. [Materials of the international scientific and technical conference, Minsk, BSTU, April 26–28, 2017]. Minsk: BSTU, 2017, pp. 233–237.
- [21] Galaktionov O.N. *Tekhnologicheskii protsess lesozagotovki i resursy lesosechnykh otkhodov* [Technological process of logging and resources of logging waste]. Petrozavodsk: PetrSU, 2007, 95 p.
- [22] Kuznetsov V.I. *Predstavlyam firmu «Lestekhhom» — novoe kachestvo lesozagotovitel'noy tekhniki* [We represent Lestekhhom, a new quality of logging equipment] *Lesnaya promyshlennost'* [Forest Industry], 2006, no. 1, pp. 12–14.
- [23] Piskunov M.A. *Raspredelenie prokhodov forvardera i postroyeniye optimal'nykh skhem raspolozheniya trelevochnykh volokov na lesoseke* [Distribution of forwarder passes and the construction of optimal layouts of skidding tracks in the cutting area]. *Vestnik Volga State University of Technology. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Forest. Ecology. Nature use], 2017, no. 2 (34), pp. 37–48.
- [24] Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled tractors by justifying the modes of their movement and technological equipment]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2006, 236 p.
- [25] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [The technology of the harvester's work in selective felling]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2016, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.12737/19956
- [26] Naarva S23. Available at: <https://www.pentinpaja.fi/en/naarva-tuote/naarva-s23/> (accessed 01.02.2022).
- [27] Government of the Moscow Region. Available at: <https://mosreg.ru/upload/iblock/2cf/04.jpg/> (accessed 01.02.2022).
- [28] Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Available at: https://www.timacad.ru/uploads/images/20200206/1580985058_8N5B4144.jpg/ (accessed 01.02.2022).

Authors' information

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

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

Received 10.11.2022.

Approved after review 18.01.2023.

Accepted for publication 21.03.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest