

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УБОРКИ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ» ИВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЯГКИХ КОНТЕЙНЕРОВ

С.П. Карпачев[✉], В.И. Запруднов

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

Рассмотрен технологический процесс уборки «энергетической» ивы с использованием мягких контейнеров. На основе запатентованного автором устройства предложена концептуальная модель уборочной машины, которая состоит из трактора, навесного оборудования для срезания и измельчения на щепу ивы и прицепного устройства для установки, загрузки и сброски на землю контейнеров. Приведены два варианта технологии уборки «энергетической» ивы: 1) применяемая в настоящее время технология, когда уборочная машина работает совместно с транспортной машиной; 2) технология, предлагаемая в настоящей статье, когда уборочная машина работает независимо от транспортной машины с загрузкой щепы в мягкие контейнеры. Разработана математическая модель существующего технологического процесса уборки ивы и технология с использованием мягких контейнеров. Проведены имитационные эксперименты на математических моделях технологических процессов для расстояния от 1 до 5 км от плантации ивы до склада щепы и для разной максимально возможной производительности уборки ивы — от 5 до 15 т/ч. Выявлено, что предложенная технология уборки ивы с использованием контейнеров не зависит от расстояния от плантации до склада и позволяет достичь производительности, которая при равных условиях выше производительности существующей технологии в 2–3 раза. Установлено, что коэффициент загрузки уборочной машины по существующей технологии зависит от расстояния от плантации до склада щепы и изменяется от 0,268 до 0,823. Определены условия, при которых коэффициент загрузки уборочной машины по заявленной технологии равен 1. Рекомендовано использовать технологию уборки ивы с использованием контейнеров для небольших фермерских хозяйств как минимизирующую инвестиционные затраты на закупку техники.

Ключевые слова: быстрорастущая «энергетическая» ива (*salix*), мягкие контейнеры, топливная щепа, математическая модель, имитационное моделирование

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Запруднов В.И. Моделирование технологии уборки «энергетической» ивы с использованием мягких контейнеров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 6. С. 127–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-127-138

Рассмотрим особенности технологии уборки «энергетической» ивы *salix* (далее — ива) с переработкой ее на топливную щепу (далее — щепа).

Для лесо- и сельскохозяйственных предприятий альтернативой традиционным ископаемым видам энергоносителей становятся возобновляемые источники энергии, в частности быстрорастущая ива [1–19]. Интерес к иве как к альтернативному энергоносителю вызван высокими ценами на такие традиционные источники, как газ, бензин и т. п. В структуре себестоимости сельскохозяйственной продукции затраты на энергоресурсы достигают 30 % [19, 20].

Плантации ивы позволяют получать 5–7 урожаев древесины без значительного снижения продуктивности почвы. Себестоимость получаемой из ивы 1 ГДж тепловой энергии оценивается в 4–5 евро (400–500 руб.) [21]. Урожай биомассы первого года составляет 1...3 т/га, поэтому его

не убирают. Начиная со второго года урожай получают ежегодно. Сбор биомассы достигает 10...14 т/га. Уборку обычно проводят с наступлением морозов, когда влажность древесины снижается до 20...25 % [21].

Наибольшие плантации ивы имеются в Швеции (около 16 000 га) (рис. 1), Великобритании (около 13 000 га), Германии (около 1700 га) [21].

Уборка урожая ивы обычно осуществляется с помощью сельскохозяйственных машин [22–24]. Молодые деревья ивы срезают и измельчают на щепу, для чего используют сельскохозяйственные комбайны и тракторы с дополнительным навесным оборудованием. Например, в Белоруссии используют кормоуборочные силосные комбайны типа КСК-100А, «Полесье-3000», «Ягуар», «Марал» и др. [21]. Как дополнительная опция эти машины могут оснащаться собственным прицепом-бункером для щепы [24]. Для приема и транспортировки щепы к месту складирования совместно с уборочным комбайном обычно используют тракторы с прицепом (рис. 2).



Рис. 1. Плантация «энергетической» ивы (Швеция, фото С.П. Карпачева)
Fig. 1. Plantation of «energy» willow (Sweden, photo by S.P. Karpachev)



Рис. 2. Уборка «энергетической» ивы [36]
Fig. 2. «Energy» willow harvesting [36]

Применение обычных сельскохозяйственных комбайнов и тракторов с навесным оборудованием на уборке и транспортировке ивы позволяет снизить инвестиционные затраты, что особенно важно для небольших фермерских хозяйств. Однако применяемые технологии уборки ивы, когда комбайн работает совместно с транспортным трактором с прицепом или когда комбайн оснащен собственным прицепом-бункером, имеют недостатки. Один из главных недостатков таких технологий — простои уборочной машины, вызванные циклами транспортных операций.

Применение мягких контейнеров в технологиях уборки ивы могли бы снизить или даже исключить простои уборочных машин.

Мягкие контейнеры типа биг-бэг (далее — контейнеры) в настоящее время широко применяются в различных отраслях, в том числе в сельском и лесном хозяйствах для перевозки и хранения зерна, картофеля, комбикормов, топливных гранул, древесной щепы и т. п. [25–32]. Контейнеры изготавливают из тканого полипропилена. Грузоподъемность контейнеров — до 2,5 т, объем — до 3 м³ (рис. 3).



Рис. 3. Мягкий контейнер грузоподъемностью 700 кг со щепой (Щелковский учебно-опытный лесхоз, фото С.П. Карпачева)

Fig. 3. A 700 kg soft container with wood chips (Shchelkovsky Educational and Experimental Forestry, photo by S.P. Karpachev)

Цель работы

Цель работы — изучение возможности повышения эффективности технологии сбора и переработки на щепу ивы путем исключения простоев уборочной машины благодаря использованию контейнеров на основе применения запатентованного автором работы [9] устройства.

Исследуемые технологии уборки ивы. Концептуальная модель предлагаемой машины для уборки ивы состоит из энергетического модуля — трактора, навесного оборудования для срезания и измельчения на щепу ивы и прицепного устройства для установки, загрузки и сброски на землю контейнеров (рис. 4). Конструкция прицепного устройства запатентована автором (С.П. Карпачев и др.) [26, 27, 29]. Контейнеры размещаются на площадках устройства с возможностью их наклона, что позволяет сбрасывать упакованные контейнеры на землю самосбросом. Устройство позволяет свести к минимуму или даже исключить остановки уборочной машины на время цикла манипуляций с контейнерами. Устройство устанавливается после прицепного оборудования для срезания и измельчения ивы на щепу под щепопроводом.

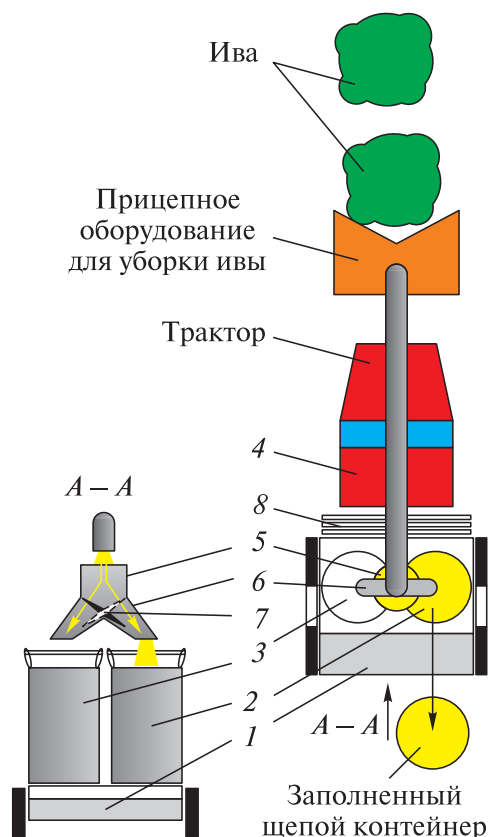


Рис. 4. Концептуальная модель уборочной машины с использованием контейнеров

Fig. 4. Conceptual model of a harvesting machine using containers

Устройство для установки, загрузки и сброски на землю контейнеров (см. рис. 4) состоит из прицепа 1, на котором одновременно могут размещаться два контейнера. Один контейнер 2 находится под загрузкой, а второй 3 порожний, ожидает загрузку. Дополнительные порожние контейнеры хранятся в кассете 8. Между щепопроводом 4 и горловиной загружаемого контейнера 2 размещается бункер-накопитель 5. Бункер-накопитель 5 через выходной патрубок 6 обеспечивает подачу щепы в контейнер 2. Патрубок 6 имеет два отверстия с возможностью их перекрытия задвижкой 7 для регулирования направления подачи щепы в загружаемый контейнер 2. Патрубок перекрывают на время перевода подачи щепы от контейнера 2 к порожнему контейнеру 3, когда контейнер 2 полностью заполнен щепой и его необходимо сбросить на землю. Бункер-накопитель 3 предназначен для компенсации времени на аварийные задержки и не является обязательным. В рассматриваемой нами технологии уборки ивы можно ограничиться только направляющим патрубком 6, установленным на конце щепопровода 4.

Устройство работает следующим образом (рис. 5, см. рис. 4).

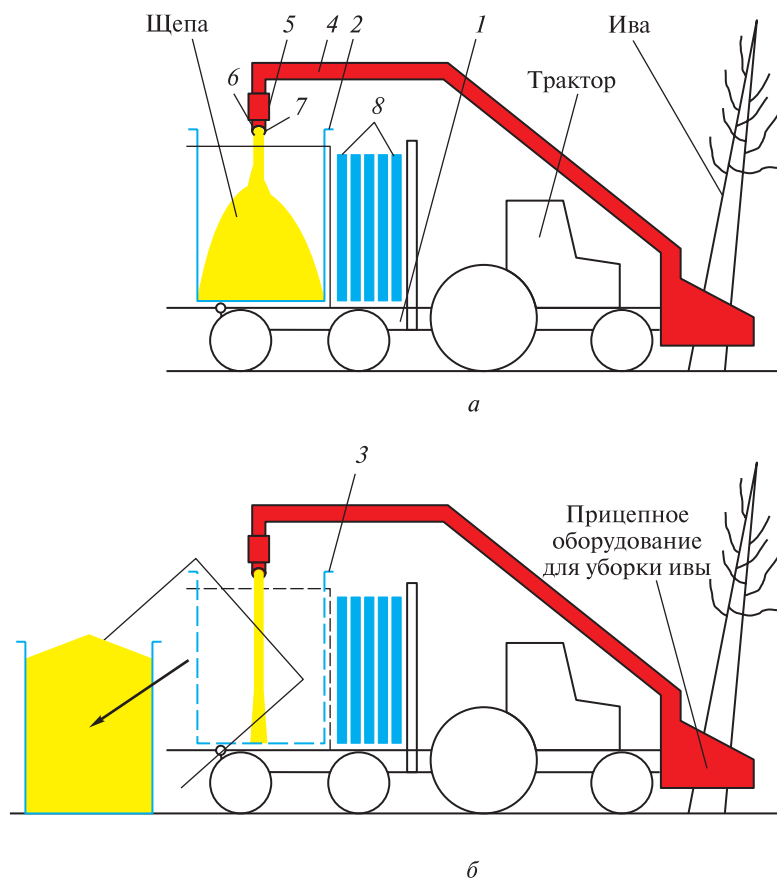


Рис. 5. Устройство и технология уборки ивы с использованием контейнеров: *а* — загрузка контейнера щепой; *б* — сброс заполненного контейнера на землю и начало загрузки порожнего контейнера

Fig. 5. Device and technology of willow harvesting with the use of containers: *a* — loading the container with wood chips; *b* — dumping the filled container on the ground and the beginning of loading the empty container

Перед началом работы уборочной машины на платформе прицепа *1* размещают два порожних контейнера *2* и *3*. С началом работы уборочная машина срезает и измельчает иву на щепу, которая по щепопроводу *4* подается в бункер-накопитель *5* и затем через патрубок *6* в контейнер *2*. После заполнения контейнера *2* щепой задвижка *7* перекрывает одно из отверстий патрубка *6* и открывает другое отверстие, перенаправляя щепу в порожний контейнер *3*. Заполненный контейнер *2* сбрасывают на землю и на его место устанавливают другой контейнер, который подается из кассеты контейнеров *8*. После этого цикл работы с контейнерами повторяется.

Таким образом, запатентованное устройство для установки, загрузки и сброски на землю контейнеров [27] позволяет уборочной машине работать без остановок.

Одно из важных преимуществ предлагаемой в настоящей статье технологии с использованием контейнеров в отличие от известной технологии, когда уборочная машина работает совместно с транспортным трактором, заключается в том, что

позволяет проводить все работы одним энергетическим модулем — трактором, что минимизирует инвестиционные затраты.

Проведем сравнительный анализ двух технологий уборки ивы.

I. Распространенная технология уборки и транспортировки ивы двумя тракторами (далее технология I) (см. рис. 2), которая осуществляется посредством следующих машин и оборудования:

- трактора для уборки ивы;
- прицепного оборудования для срезания и измельчения ивы на щепу;
- трактора для транспортировки ивовой щепы;
- прицепа для приема и перевозки щепы с плантации на склад.

II. Предлагаемая новая технология уборки ивы одним трактором (далее технология II) (рис. 6), которая осуществляется следующими машинами и оборудованием:

- единым трактором для уборки ивы и транспортировки ивовой щепы;
- прицепным оборудованием для срезания и измельчения ивы на щепу;

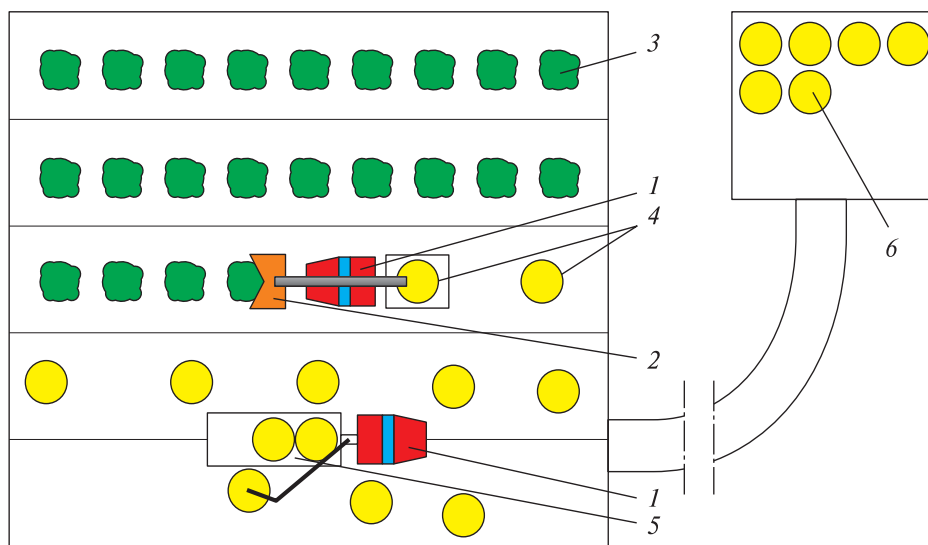


Рис. 6. Схема уборки ивы (технология II): 1 — трактор; 2 — навесное оборудование; 3 — ива; 4 — контейнеры; 5 — прицеп; 6 — склад щепы
Fig. 6. Scheme of willow harvesting (technology II): 1 — tractor; 2 — mounted equipment; 3 — willow; 4 — containers; 5 — trailer; 6 — wood chip storehouse

– устройством загрузки щепы в контейнеры;
 – прицепом для сбора и перевозки контейнеров со щепой с плантации на склад.

Применение технологии I требует работы двух тракторов (см. рис. 2), причем совместной. Как только прицеп заполняется щепой, транспортный трактор увозит его с плантации на склад. В это время трактор, занятый срезанием и измельчением ивы вынужден останавливать свою работу.

В технологии II (см. рис. 6) трактор 1 с навесным оборудованием 2 сначала работает на срезании и измельчении ивы 3 на щепу, которую загружает в контейнеры 4. После заполнения щепой контейнер сбрасывают на землю и оставляют на плантации. На место выгруженного контейнера устанавливают порожний, и цикл загрузки повторяется.

Контейнеры со щепой могут находиться на плантации весь период уборки урожая. После сбора ивы со всей плантации тот же трактор 1 меняет прицепное оборудование для срезания и измельчения ивы на щепу 2 на прицеп 5 для транспортировки контейнеров. Затем трактор 1 передвигается по плантации и собирает контейнеры со щепой в кузов прицепа. По заполнении кузова контейнерами трактор 1 доставляет их с плантации на склад щепы 6.

Материалы и методы

В настоящей статье эффективность технологии II по сравнению с технологией I оценивалась по часовой производительности и коэффициенту использования уборочных машин на уборке ивы — тракторов с прицепным оборудованием.

Исследования проводились методами имитационного моделирования на математических моделях [33–35].

Работа трактора на уборке ивы рассматривалась нами как работа уборочной машины непрерывного действия с остановками. Эти остановки (в случае технологии I) вызваны циклами передвижения транспортного трактора со щепой на склад и обратно, а в случае технологии II — циклами на манипуляции с контейнерами.

Производительность непрерывной работы трактора на уборке ивы зависит от продуктивности ивовой плантации и применяемого оборудования. В экспериментах эта величина была принята как независимая переменная, варьируемая в широком диапазоне.

Работа трактора на транспортировке ивовой щепы рассматривалась как работа циклической машины.

Среднее время цикла работы транспортного трактора определялось по формуле

$$T_{\tau} = \frac{l}{v_{гр}} + \frac{l}{v_{хх}} + t_p, \tag{1}$$

где T_{τ} — продолжительность цикла передвижениями трактора со щепой на склад и обратно, с;

l — среднее расстояние от плантации до склада, м;

$v_{гр}$ — скорость трактора с грузом, м/с;

$v_{хх}$ — скорость трактора без груза, м/с;

t_p — среднее время на разгрузку щепы и маневрирование трактора с прицепом, с.

Среднее время цикла манипуляций с контейнерами определялось по формуле

$$T_k = t_{уст} + t_{сбр}, \quad (2)$$

где T_k — продолжительность цикла манипуляций с контейнером, с;

$t_{уст}$ — среднее время на установку контейнера под загрузку, с;

$t_{сбр}$ — среднее время на сброску контейнера на землю, с.

Среднее время цикла манипуляций с контейнерами учитывалось только в случае, если его значение было больше среднего времени на загрузку контейнера щепой, т. е. по выполнению условия

$$T_k > T_{згр}, \quad (3)$$

где $T_{згр}$ — продолжительность цикла загрузки контейнера щепой, с.

В этом случае среднее время остановки работы уборочной машины определялось по формуле

$$T_{зд} = T_{згр} - T_k, \quad (4)$$

где $T_{зд}$ — среднее время задержки работы трактора на уборке ивы, с.

Продолжительность цикла загрузки контейнера щепой определялось по формуле

$$T_{згр} = \frac{3600 \cdot G_k}{\Pi_{II_max}}, \quad (5)$$

где G_k — грузоподъемность контейнера, т;

Π_{II_max} — максимально возможная часовая производительность трактора на уборке ивы, т/ч.

Часовую производительность трактора на уборке ивы по технологии I (Π_I) в модели представляли, как массу загруженной в прицеп транспортного трактора щепы за 1 ч

$$\Pi_I = \sum_{i=1}^n q_{пр_i} \quad (6)$$

где $q_{пр_i}$ — масса щепы в i -м прицепе, т;

n — число загруженных щепой прицепов за 1 ч.

Число загруженных щепой прицепов в модели определялось с учетом цикла работы транспортного трактора по формуле (1).

Часовую производительность уборочной машины по технологии II (Π_{II}) можно представить как массу загруженной в контейнеры щепы за один 1 ч

$$\Pi_{II} = \sum_{i=1}^m q_{к_i}, \quad (7)$$

где $q_{к_i}$ — масса щепы в одном контейнере, т;

m — число загруженных щепой контейнеров за 1 ч.

Число загружаемой в контейнеры щепы в модели определялось с учетом времени манипуляций с контейнером по формуле (4), если выполнялось условие (3).

Время загрузки щепой i -го прицепа и i -го контейнера зависит от производительности уборочной машины при ее непрерывной работе, а также от грузоподъемности прицепа и контейнера.

Время циклов на манипуляции с контейнерами (технология II) и работы транспортного трактора (технология I) в модели определялось как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону со средними значениями, рассчитанными по формулам (1) и (4).

Загруженное количество щепы в каждый i -й прицеп и i -й контейнер в модели также определялось как случайное число, распределенное по нормальному закону со средним значением, равным номинальной грузоподъемности и стандартному отклонению в пределах допустимого перегруза.

Результаты и обсуждение

Исследования влияния на производительность машин на уборке ивы в зависимости от расстояния транспортировки щепы и от максимальной возможной производительности трактора на уборке ивы проводились для двух технологий в соответствии с матрицей планирования экспериментов (таблица).

Матрица планирования экспериментов

Experiment planning matrix

Номер эксперимента	Максимально возможная производительность трактора на уборке ивы, т/ч	Расстояние до склада, м
1	5	1000
2	10	1000
3	15	1000
4	5	3000
5	10	3000
6	15	3000
7	5	5000
8	10	5000
9	15	5000

Для получения статистически значимых результатов в экспериментах при моделировании технологии I было назначено 100 000 вывезенных с плантации прицепов, для технологии II — 1 000 000 загруженных контейнеров.

В моделях были приняты тракторный прицеп 2ПТС-4 грузоподъемностью 4 т и контейнер грузоподъемностью 0,5 т.

Результаты исследований были статистически обработаны и представлены в виде зависимостей (рис. 7–10).

Анализ графика, представленного на рис. 7, показывает, что только технология II в случае выполнения условия $T_k < T_{згр}$, достигает максимально возможной производительности трактора на уборке ивы, а в остальных случаях отстает от максимально возможной производительности.

Отметим, что производительность технологии II не зависит от расстояния доставки щепы — с плантации на склад. Так, например, при максимально возможной производительности 5 т/ч по технологии II для $T_{зд} = 30$ с достигается производительность 4,604 т/ч, а при 15 т/ч — 11,921 т/ч для любых расстояний от плантации до склада.

Технология I зависит от расстояния от плантации до склада. С ростом расстояния производительность снижается. Например, при максимально возможной производительности — 5 т/ч и расстоянии 1 км достигается производительность 4,112 т/ч, а при расстоянии 5 км — 2,617 т/ч. Это объясняется увеличением времени цикла транспортировки щепы на склад и, соответственно, увеличением времени простоя трактора на уборке ивы. Отметим, что достигаемая производительность растет с ростом максимально возможной производительности. Однако этот рост нелинейный. Наилучшим образом эти кривые описываются степенной зависимостью, на что указывают достаточно высокие значения коэффициентов детерминации R^2 .

Из рис. 7 видно, что при выполнении условия (3) достигнутая производительность технологии II уменьшается. Так, например, при производительности 5 т/ч, при $T_k < T_{згр}$, достигается производительность 4,986 т/ч, а при выполнении условия (3) и $T_{зд} = 30$ с — 4,112 т/ч. Для выявления влияния среднего времени остановки работы трактора по технологии II с учетом формулы (4) была выполнена дополнительная серия экспериментов (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что можно оценить влияние времени остановки уборочной машины по технологии II из-за манипуляций с контейнерами на достигаемую ею производительность. Эта зависимость получена для максимально возможной производительности уборочной машины — 15 т/ч. Для сравнения на рис. 8 показана прямая достигнутой производительности трактора на уборке ивы по технологии I при расстоянии транспортировки $l = 1$ км. С увеличением времени манипуляции с контейнерами производительность рубительной машины уменьшается. Из рис. 8 также следует, что если время цикла манипуляций с контейнерами превышает 76 с, то производительность по технологии II становится меньше, чем по технологии I. В этом случае преимущества контейнерной технологии нивелируются. Например, при $T_{зд} = 90$ с производительность

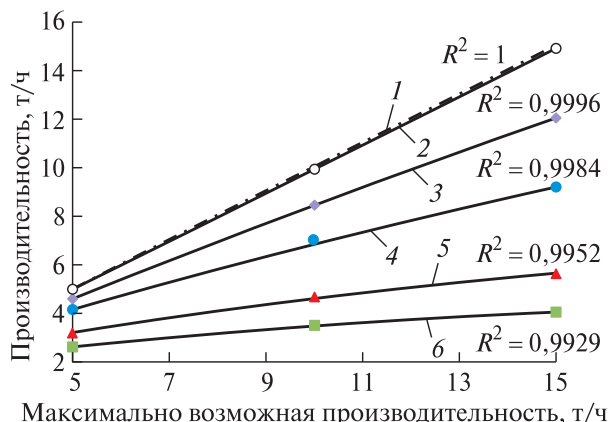


Рис. 7. Достигнутая производительность уборочных машин по сравниваемым технологиям: 1 — максимально возможная производительность; для технологии II: 2 — при условии $T_k < T_{згр}$; 3 — при условии $T_k > T_{згр}$ и $T_{зд} = 30$ с; для технологии I при расстоянии от плантации до склада: 4 — $l = 1$ км; 5 — $l = 3$ км; 6 — $l = 5$ км

Fig. 7. Achieved productivity of harvesting machines for the compared technologies: 1 — maximum possible productivity; for technology II: 2 — under condition $T_k < T_{згр}$; 3 — under condition $T_k > T_{згр}$ and $T_{зд} = 30$ s; for technology I at distance from plantation to warehouse: 4 — $l = 1$ km; 5 — $l = 3$ km; 6 — $l = 5$ km

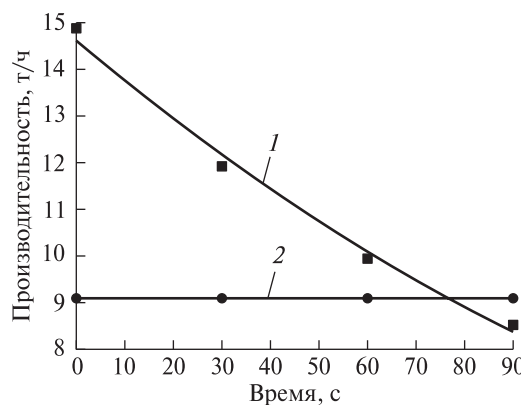


Рис. 8. Достигнутая производительность уборочных машин по разным технологиям (максимально возможная производительность 15 т/ч): 1 — для технологии II; 2 — для технологии I

Fig. 8. Achieved productivity of harvesters for different technologies (maximum possible productivity 15 t/h): 1 — for technology II; 2 — for technology I

уборочной машины по технологии II будет на 8,5 % ниже, чем по технологии I. В этом случае, по показателю производительности контейнерная технология II проигрывает технологии I.

На рис. 9 представлена зависимость коэффициента загрузки тракторов на уборке ивы от расстояния от плантации до склада щепы.

Анализ рис. 9 показал, что наибольшую загрузку машин обеспечивает технология II.

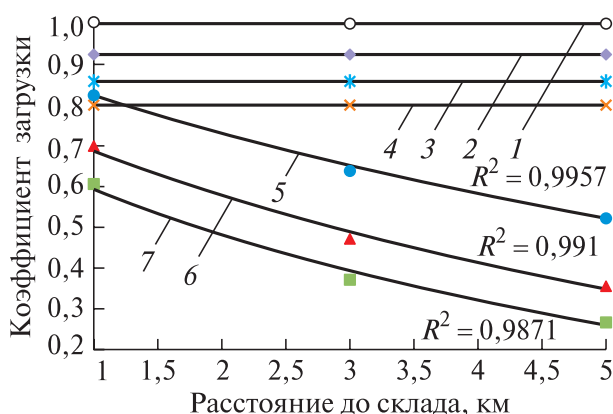


Рис. 9. Зависимость коэффициента загрузки тракторов на уборке ивы по разным технологиям от расстояния от плантации до склада: для технологии II: 1 — при условии $T_k < T_{згр}$; при условии $T_k > T_{згр}$ и $T_{зд} = 30$ с при максимальной производительности: 2 — 5 т/ч; 3 — 10 т/ч; 4 — 15 т/ч; для технологии I при расстоянии от плантации до склада: 5 — $l = 1$ км; 6 — $l = 3$ км; 7 — $l = 5$ км

Fig. 9. Dependence of the tractor load factor in willow harvesting by different technologies on the distance from the plantation to the warehouse: for technology II: 1 — under condition $T_k < T_{згр}$; under condition $T_k > T_{згр}$ and $T_{зд} = 30$ s maximum productivity: 2 — 5 t/h; 3 — 10 t/h; 4 — 15 t/h; for technology I at the distance from the plantation to the warehouse: 5 — $l = 1$ km; 6 — $l = 3$ km; 7 — $l = 5$ km

По этой технологии, коэффициент загрузки трактора не зависит от расстояния от плантации до склада. Если условие (3) не выполняется, то манипуляции с контейнерами не вызывают остановок уборочной машины и коэффициент загрузки машины равен 1 (см. рис. 9, кривая 1). Если условие (3) выполняется, то загрузка машины определяется продолжительностью остановок трактора на установку и сброску контейнеров (формула (4)) и зависит от максимально возможной производительности уборочной машины (см. рис. 9, кривые 2, 3 и 4). Так, например, при максимально возможной производительности 15 т/ч коэффициент загрузки машины равен 0,801, а при возможной производительности 5 т/ч — 0,923. Увеличение коэффициента загрузки с уменьшением максимально возможной производительности трактора объясняется тем, что чем больше возможная производительность, тем быстрее заполняется щепой контейнер и тем чаще приходится останавливаться на установку нового контейнера. Таким образом увеличивается общее время простоев.

Что касается технологии I, то здесь загрузка трактора зависит как от расстояния от плантации до склада, так и от его производительности на уборке ивы (см. рис. 9, кривые 5, 6 и 7). Так, например, при производительности трактора 5 т/ч и расстоянии от плантации до склада 1 км коэффициент

загрузки равен 0,823, а при производительности 15 т/ч и расстоянии 1 км — 0,607. При одной и той же производительности, например равной 10 т/ч, при расстоянии от плантации до склада 1 км коэффициент загрузки равен 0,699, а при расстоянии 5 км — 0,355. Заметим, что в технологии I изменение коэффициента загрузки от расстояния хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. Коэффициент детерминации R^2 больше 0,98.

Выводы

Исследования технологического процесса уборки ивы с использованием контейнеров на математических моделях в сравнении с существующей технологией позволили сделать следующие выводы:

1. Производительность существующей технологии зависит от расстояния транспортировки измельченной ивы от плантации до склада щепы.
2. Предложенная технология уборки ивы с использованием контейнеров не зависит от расстояния до склада и позволяет достичь максимально возможной производительности, которая при равных условиях выше производительности существующей технологии в 2–3 раза.
3. Загрузка уборочной машины по существующей технологии зависит от расстояния от плантации до склада щепы и по результатам опытов изменялась от 0,268 до 0,823.
4. Загрузка уборочной машины по предложенной технологии в случае, когда время загрузки контейнера щепой превышает время на его установку и сброску, достигает максимума и равна 1.
5. Применение на уборке ивы контейнеров позволяет минимизировать инвестиционные затраты, что делает эту технологию экономически привлекательной для небольших лесных и сельских хозяйств.

Список литературы

- [1] Kowalczyk Z., Kwaśniewski D. Life Cycle Assessment (LCA) in Energy Willow Cultivation on Plantations with Varied Surface Area // *Agricultural Engineering*, 2019, no. 23(4), pp. 11–19. DOI:10.1515/agriceng-2019-0032
- [2] Greiffenberg M., Gjerlufsen S. The role of Energy Willow in achieving the fossil fuel free goals of Denmark by 2050 // Master Thesis Cand SOC Organizational Innovation & Entrepreneurship Copenhagen Business School Supervisor: Valeria Giacomini, Department of Management Politics & Philosophy, 15th May 2017. STU Count: 221307, p. 118.
- [3] Willow Energy Solutions For Biomass Production Systems. URL: <https://www.willowenergy.org/> (дата обращения 11.12.2023).
- [4] Dimitriou I., Rutz D. Sustainable Short Rotation Coppice. A Handbook // 2015 by WIP Renewable Energies, Munich, Germany. URL: https://www.srcplus.eu/images/Handbook_en.pdf (дата обращения 11.12.2023).
- [5] Bioenergy. URL: <https://www.seai.ie/technologies/bioenergy/> (дата обращения 11.12.2023).

- [6] Boyd J., Christersson L., Dinkelbach L. Energy from Willow // SAC, West Mains Road, Edinburgh EH9 3JG, UK, The Scottish Agricultural College, December 2000, p. 32.
- [7] Mitchell C.P., Stevens E.A., Watters M.P. Short-rotation forestry — operations, productivity and costs based on experience gained in the UK // *Forest Ecol. Manag.*, 1999, no. 121, pp. 123–136.
- [8] Kopp R.L., Abrahamson L.P., White E.H., Volk T.A., Nowak C.A., Fillhart R.C. Willow biomass production during ten successive annual harvests // *Biomass Bioenerg.*, 2001, no. 20, pp. 1–7.
- [9] Wickham J., Rice B., Finnan J., McConnon R. A review of past and current research on short rotation coppice in Ireland and abroad // COFORD, Dublin, 2010, p. 36.
- [10] Aylott M.J., Casella E., Tubby I., Street N.R., Smith P., Taylor G. Yield and Spatial Supply of Bioenergy Poplar and Willow Short Rotation Coppice in the UK // *New Phytologist*, 2008, p. 178.
- [11] Kofman P.D. Harvesting short rotation coppice willow // *Harvesting / Transport*, 2012, no. 29.
- [12] Abrahamson L.P., Robison D.J., Volk T.A., White E.H., Neuhauser E.F., Benjamin W.H., Peterson J.M. Sustainability and Environmental Issues Associated with Willow Bioenergy Development in New York (U.S.A) // *Biomass and Bioenergy*, 1998, v. 15, no. 1, pp. 17–22.
- [13] Nordh N.-E. Long Term Changes in Stand Structure and Biomass Production in Short Rotation Willow Coppice. Doctoral Diss., Dept. of Crop Production Ecology, SLU. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2005, v. 2005, 120 p.
- [14] Nordh N.-E., Verwijst T. Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice – a comparison between destructive and non-destructive methods // *Biomass and Bioenergy*, 2004, no. 27, pp. 1–8.
- [15] Talagai N., Borz S. A., Ignea G. Performance of brush cutters in felling operations of willow short rotation coppice // *BioRes.*, 2017, no. 12(2), pp. 3560–3569.
- [16] Borz S.A., Talagai N., Cheța M., Gavilanes Montoya A.V., Castillo Vizuete D. Automating Data Collection in Motor-manual Time and Motion Studies Implemented in a Willow Short Rotation Coppice // *BioResources*, 2018, no. 13(2), pp. 3236–3249.
- [17] Antonelli C. Technological knowledge as an essential facility // *J. of Evolutionary Economics*, 2007, no. 17(4), pp. 451–471. <http://doi.org/10.1007/s00191-007-0058-4>
- [18] Energy willow *Salix viminalis* – biomass where you want it. April 26, 2016. URL: <https://balkangreenenergynews.com/energy-willow-salix-viminalis-biomass-where-you-want-it/> (дата обращения 11.12.2023).
- [19] Растимешин С.А., Долгов И.Ю., Тихомиров Д.А., Фильков М.Н. Основные направления развития систем теплоэнергоснабжения сельскохозяйственного производства. // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 8-й Междунар. науч.-техн. конф. (16–17 мая 2012 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5 ч. Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2012. 384 с.
- [20] Морозов Н.М. Социально-экономическое значение энергосбережения в сельском хозяйстве // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 8-й Междунар. науч.-техн. конф. (16–17 мая 2012 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5 ч. Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2012. 384 с.
- [21] Купцов Н.С., Попов Е.Г. Энергоплатации. Справочное пособие по использованию энергетических растений. Минск: Конфидо, 2015, 128 с.
- [22] Albertsson J. Weed problems and their control in salix for biomass. Introductory Paper at the Faculty of Landscape Planning // *Horticulture and Agricultural Science*, 2012, v. 5, p. 31.
- [23] Родькин О.И. Экономические аспекты производства возобновляемой энергии из древесины быстрорастущей // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*, 2013. № 2. URL: <http://www.economics.ihbt.ifmo.ru> (дата обращения 11.12.2023).
- [24] Pecenka R., Ehlert D., Lenz H. Efficient harvest lines for Short Rotation Coppices (SRC) in Agriculture and Agroforestry // *Agronomy Research*, 2014, no. 12(1), pp. 151–160.
- [25] Karpachev S.P., Koverkina E.V., Shmyrev V.I. Several socio-economic aspects of the production of fuel chips from salix: the case of Russia // *Ecological Agriculture and Sustainable Development*. Publishers: Research Development Center-FBEE, Belgrade, Serbia and Proceedings Filodiritto, Bologna, Italy, 2019, no. 1, pp. 237–242.
- [26] Karpachev S.P. Simulation of salix harvesting and processing technology using soft containers // E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020, 2020, p. 01047. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101047>
- [27] Карпачев С.П., Щербаков Е.Н., Шмырев Д.В., Карпачева И.П., Евстратова К.А. Устройство для производства щепы на лесосеке / Патент № 140310 от 07.04.2014 г.
- [28] Карпачев С.П., Щербаков Е.Н., Шмырев Д.В. Заготовка щепы на лесосеке с использованием мягких контейнеров // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. № 3–4 (8–9). С. 217–222.
- [29] Федоренчик А.С., Ледницкий А.В., Корзун И.И. Организация производства топливной щепы на предприятиях лесного комплекса // *Лесное и охотничье хозяйство*, 2006. № 1. С. 28–31.
- [30] Матвейко А.П., Глинская Е.И. Производительность самоходных и передвижных рубительных машин на заготовке щепы в условиях лесосек // *Труды Белорусского государственного технологического университета, Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*, 2008. № 2. С. 119–121.
- [31] Карпачев С.П., Щербаков Е.Н., Шмырев Д.В., Шмырев В.И., Камусин А.А., Редькин А.К. Моделирование технологических процессов освоения биоресурсов леса с использованием мягких контейнеров на лесосеке // *Техника и оборудование для села*, 2017. № 2 (236). С. 45–48.
- [32] Карпачев С.П., Запруднов В.И. Моделирование технологических процессов освоения лесосечных отходов для биоэнергетики с использованием мягких контейнеров // Развитие идей Г.Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопроизводству: Матер. Междунар. науч.-техн. юбилейной конф., 20–21 апреля 2017 г. / под ред. С.М. Матвеева. Воронеж: Изд-во ВГЛУ, 2017. С. 262–265.
- [33] Karpachev S.P., Diev R.I. Modeling of technology for cleaning up forest debris of wood natural mortality using the multioperation machine // *BIO Web Conf. Volume 48, 2022. The 2nd Int. Conf. «Sport and Healthy Lifestyle Culture in the XXI Century» (SPORT LIFE XXI)*. Article 04004 Number 10. Section General Environmental Issues. DOI <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224804004>
- [34] Боев В.Д. Имитационное моделирование систем. М.: Юрайт, 2023. 253 с.
- [35] GPSS World reference manual. Fourth Edition 2001. Copyright Minuteman Software. Holly Springs, NC, U.S.A. 2001.
- [36] Энергетическое лесное хозяйство. URL: <https://www.hisour.com/ru/energy-forestry-41155/amp/> (дата обращения 11.12.2023).

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович✉ — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 25.12.2023.

Одобрено после рецензирования 26.01.2024.

Принята к публикации 18.10.2024.

MODELLING OF «ENERGY» WILLOW HARVESTING TECHNOLOGY USING SOFT CONTAINERS

S.P. Karpachev✉, **V.I. Zaprudnov**

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

karpachevs@mail.ru

The technological process of harvesting «energy» willow using soft containers is considered. On the basis of the device patented by the author the conceptual model of the harvesting machine is offered, which consists of a tractor, mounted equipment for cutting and chopping willow and a trailed device for installation, loading and dumping of containers on the ground. Two variants of «energy» willow harvesting technology are presented: 1) the currently used technology, when the harvesting machine works together with the transport machine; 2) the technology proposed in this paper, when the harvesting machine works independently of the transport machine with chip loading into soft containers. A mathematical model of the existing technological process of willow harvesting and the technology using soft containers has been developed. Simulation experiments on mathematical models of technological processes for the distance from 1 to 5 km from willow plantation to wood chips warehouse and for different maximum possible productivity of willow harvesting — from 5 to 15 t/h have been carried out. It is revealed that the proposed technology of willow harvesting with the use of containers does not depend on the distance from the plantation to the warehouse and allows to achieve productivity, which under equal conditions is 2–3 times higher than the productivity of the existing technology. It is established that the load factor of the harvester according to the existing technology depends on the distance from the plantation to the wood chip warehouse and varies from 0,268 to 0,823. The conditions under which the load factor of the harvester according to the declared technology is equal to 1 have been determined. It is recommended to use the technology of willow harvesting with the use of containers for small farms as minimising investment costs for the purchase of machinery.

Keywords: fast-growing «energy» willow (salex), soft containers, chip fuel, mathematical model, simulation modeling

Suggested citation: Karpachev S.P., Zaprudnov V.I. *Modelirovaniye tekhnologii uborki «energeticheskoy» ivy s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov* [Modelling of «energy» willow harvesting technology using soft containers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 6, pp. 127–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-127-138

References

- [1] Kowalczyk Z., Kwaśniewski D. Life Cycle Assessment (LCA) in Energy Willow Cultivation on Plantations with Varied Surface Area. *Agricultural Engineering*, 2019, no. 23(4), pp. 11–19, DOI:10.1515/agriceng-2019-0032
- [2] Greiffenberg M., Gjerlufsen S. The role of Energy Willow in achieving the fossil fuel free goals of Denmark by 2050. Master Thesis Cand SOC Organizational Innovation & Entrepreneurship Copenhagen Business School Supervisor: Valeria Giacomini, Department of Management Politics & Philosophy, 15th May 2017. STU Count: 221307, p. 118.
- [3] Willow Energy Solutions For Biomass Production Systems. Available at: <https://www.willowenergy.org/> (accessed 11.12.2023).
- [4] Dimitriou I., Rutz D. Sustainable Short Rotation Coppice. A Handbook. 2015 by WIP Renewable Energies, Munich, Germany. Available at: https://www.srplus.eu/images/Handbook_en.pdf (accessed 11.12.2023).
- [5] Bioenergy. Available at: <https://www.seai.ie/technologies/bioenergy/> (accessed 11.12.2023).
- [6] Boyd J., Christersson L., Dinkelbach L. Energy from Willow. SAC, West Mains Road, Edinburgh EH9 3JG, UK, The Scottish Agricultural College, December 2000, p. 32.
- [7] Mitchell C.P., Stevens E.A., Watters M.P. Short-rotation forestry — operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecol. Manag.*, 1999, no. 121, pp. 123–136.

- [8] Kopp R.L., Abrahamson L.P., White E.H., Volk T.A., Nowak C.A., Fillhart R.C. Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass Bioenergy*, 2001, no. 20, pp. 1–7.
- [9] Wickham J., Rice B., Finnian J., McConnon R. A review of past and current research on short rotation coppice in Ireland and abroad. COFORD, Dublin, 2010, p. 36.
- [10] Aylott M.J., Casella E., Tubby I., Street N.R., Smith P., Taylor G. Yield and Spatial Supply of Bioenergy Poplar and Willow Short Rotation Coppice in the UK. *New Phytologist*, 2008, p. 178.
- [11] Kofman P.D. Harvesting short rotation coppice willow. *Harvesting / Transport*, 2012, no. 29.
- [12] Abrahamson L.P., Robison D.J., Volk T.A., White E.H., Neuhauser E.F., Benjamin W.H., Peterson J.M. Sustainability and Environmental Issues Associated with Willow Bioenergy Development in New York (U.S.A). *Biomass and Bioenergy*, 1998, v. 15, no. 1, pp. 17–22.
- [13] Nordh N.-E. Long Term Changes in Stand Structure and Biomass Production in Short Rotation Willow Coppice. Doctoral Diss., Dept. of Crop Production Ecology, SLU. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, 2005, v. 2005, 120 p.
- [14] Nordh N.-E., Verwijst T. Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice — a comparison between destructive and non-destructive methods. *Biomass and Bioenergy*, 2004, no. 27, pp. 1–8.
- [15] Talagai N., Borz S. A., Ignea G. Performance of brush cutters in felling operations of willow short rotation coppice. *BioRes.*, 2017, no. 12(2), pp. 3560–3569.
- [16] Borz S.A., Talagai N., Cheța M., Gavilanes Montoya A.V., Castillo Vizuete D. Automating Data Collection in Motor-manual Time and Motion Studies Implemented in a Willow Short Rotation Coppice. *BioResources*, 2018, no. 13(2), pp. 3236–3249.
- [17] Antonelli C. Technological knowledge as an essential facility. *J. of Evolutionary Economics*, 2007, no. 17(4), pp. 451–471. <http://doi.org/10.1007/s00191-007-0058-4>
- [18] Energy willow *Salix viminalis* — biomass where you want it. April 26, 2016. Available at: <https://balkangreenenergynews.com/energy-willow-salix-viminalis-biomass-where-you-want-it/> (accessed 11.12.2023).
- [19] Rastimeshin S.A., Dolgov I.Yu. Tikhomirov D.A., Filkov M.N. *Osnovnyye napravleniya razvitiya sistem teploenergostonazheniya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Main directions of development of heat and power supply systems for agricultural production]. Energy supply and energy saving in agriculture. Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference (May 16–17, 2012, Moscow, State Scientific Institution VIESH). In 5 parts. Part 1. Problems of energy supply and energy saving. Moscow: GNU VIESH, 2012, 384 p.
- [20] Morozov N.M. *Sotsial'no-ekonomicheskoye znachenie energosberezheniya v sel'skom khozyaystve* [Socio-economic importance of energy saving in agriculture]. Energy supply and energy saving in agriculture. Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference (May 16–17, 2012, Moscow, State Scientific Institution VIESH). In 5 parts. Part 1. Problems of energy supply and energy saving. Moscow: GNU VIESH, 2012, 384 p.
- [21] Kuptsov N.S., Popov E.G. *Energoplantatsii. Spravochnoye posobiye po ispol'zovaniyu energeticheskikh rasteniy* [Energy plantations. A reference guide to the use of energy plants]. Minsk: Confido, 2015, 128 p.
- [22] Albertsson J. Weed problems and their control in salix for biomass. Introductory Paper at the Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science, 2012, v. 5, p. 31.
- [23] Rodkin O.I. *Ekonomicheskiye aspekty proizvodstva vozobnovlyayemoy energii iz drevesiny bystrorastushchey* [Economic aspects of the production of renewable energy from fast-growing wood]. Scientific journal of NRU ITMO. Series Economics and Environmental Management, 2013, no. 2. Available at: <http://www.economics.ihbt.ifmo.ru> (accessed 11.12.2023).
- [24] Pecenka R., Ehlert D., Lenz H. Efficient harvest lines for Short Rotation Coppices (SRC) in Agriculture and Agroforestry. *Agronomy Research*, 2014, no. 12(1), pp. 151–160.
- [25] Karpachev S.P., Koverkina E.V., Shmyrev V.I. Several socio-economic aspects of the production of fuel chips from salix: the case of Russia. *Ecological Agriculture and Sustainable Development*. Publishers: Research Development Center-FBEE, Belgrade, Serbia and Proceedings Filodiritto, Bologna, Italy, 2019, no. 1, pp. 237–242.
- [26] Karpachev S.P. Simulation of salix harvesting and processing technology using soft containers. E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020, 2020, p. 01047. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101047>
- [27] Karpachev S.P., Shcherbakov E.N., Shmyrev D.V., Karpacheva I.P., Evstratova K.A. *Ustroystvo dlya proizvodstva shchepy na lesoseke* [Device to produce chips in the cutting area]. The patent for useful model, no 140310, 07.04.2014.
- [28] Karpachev S.P., Shcherbakov E.N., Shmyrev D.V. *Zagotovka shchepy na lesoseke s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov* [Harvesting wood chips at a logging site using soft containers]. Current directions of scientific research XXI: theory and practice. Collection of scientific papers based on the materials of the international correspondence scientific and practical conference. Ecological and resource-saving technologies and systems in forestry and agriculture. June 03-05, 2014, Voronezh. pp. 217–222.
- [29] Fedorenchik A.S., Lednitskiy A.V., Korzun I.I. *Organizatsiya proizvodstva toplivnoy shchepy na predpriyatiyakh lesnogo kompleksa* [Organization of fuel chip production at forestry enterprises]. *Lesnoe i okhotnich'e khozyaystvo* [Forestry and hunting industry], 2006, no. 1, pp. 28–31.
- [30] Matveyko A.P., Glinskaya E.I. *Proizvoditel'nost' samokhodnykh i peredvizhnykh rubitel'nykh mashin na zagotovke shchepy v usloviyakh lesosek* [Productivity of self-propelled and mobile chipping machines for chipping in logging conditions]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, Seriya 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Transactions of the Belarusian State Technological University, Series 2. Forestry and woodworking industry], 2008, no. 2, pp. 119–121.
- [31] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V., Kamusin A.A., Redkin A.K. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov osvoineniya bioresursov lesa s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov na lesoseke* [Simulation of technological processes of forest bioresources development using soft containers in the cutting area]. *Equipment and equipment for the village*, 2017, no. 2 (236), pp. 45–48

- [32] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov osvoyeniya lesosechnykh otkhodov dlya bioenergetiki s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov* [Modeling of technological processes for the development of logging waste for bioenergy using soft containers]. Development of ideas by G.F. Morozov in the transition to sustainable forest management: materials of the international scientific and technical anniversary conference on April 20-21, 2017. Ed. S.M. Matveev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, VSLTU. Voronezh, 2017, pp. 262–265.
- [33] Karpachev S.P., Diev R.I. Modeling of technology for cleaning up forest debris of wood natural mortality using the multioperation machine. *BIO Web Conf.* Volume 48, 2022. The 2nd International Conference «Sport and Healthy Lifestyle Culture in the XXI Century» (SPORT LIFE XXI). Article 04004 Number 10. Section General Environmental Issues. DOI <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224804004>
- [34] Boev V. D. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Simulation modeling of systems: a textbook for universities]. Moscow: Yurayt, 2023, 253 p.
- [35] GPSS World reference manual. Fourth Edition 2001. Copyright Minuteman Software. Holly Springs, NC, U.S.A. 2001.
- [36] *Energeticheskoe lesnoe khozyaystvo* [Energy forestry]. Available at: <https://www.hisour.com/ru/energy-forestry-41155/amp/> (accessed 11.12.2023).

Authors' information

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

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

Received 25.12.2023.

Approved after review 26.01.2024.

Accepted for publication 18.10.2024.

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