

УДК 630.323.13

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЛЕСООЧИСТКИ ЛОЖ ВОДОХРАНИЛИЩ И КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

С.Н. Орловский, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-6780-2019](#),

ORCID: [0000-0001-8904-834X](#)

Красноярский государственный аграрный университет, просп. Мира, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

Проблема очистки лож водохранилищ при строительстве каскадов гидроэлектростанций актуальна. В существующей практике свodka леса осуществляется в виде сплошных рубок главного пользования, выполняемых за 15–20 лет до затопления территории. При этом не учитывается, что еще до затопления происходит вторичное зарастание ложа водохранилища тонкомерными листовыми породами с диаметрами стволов до 15 см, средний объем хлыста которых в 3–5 раз меньше, чем у предшествующих лесозаготовительных рубок. В связи с этим на данном виде работ применение существующей лесозаготовительной техники малоэффективно. Необходимы машины и технологии, обеспечивающие выполнение поставленной задачи. Цель исследования – разработка технологии очистки ложа водохранилища (на примере Богучанской гидроэлектростанции на р. Ангара) от вторичного зарастания после проведения сплошных рубок, а также конструкции и компоновки оборудования к валочно-пакетирующей машине ЛП-19В для срезания деревьев, технологии его применения. Программа исследований предусматривает: анализ усилий резания древесины с учетом сил инерции; расчеты производительности агрегата срезания древостоев и их транспортировки к месту погрузки; выбор размеров пасек, их числа и расстояний трелевки или вывозки; изучение режимов использования техники на срезании пней, лесосводке и вывозке. Предложена конструкция рабочего органа к ЛП-19В, включающая дисковую фрезу и откладчик пачек, что позволяет повысить ее производительность в лесосеках в 3–4 раза при объеме хлыста около 0,14 м³. Разработана технология погрузки и доставки леса на баржи, переработки неделовой древесины. Предлагаемая технология повторной очистки ложа водохранилища гидроэлектростанций позволяет полностью механизировать технологический процесс лесозаготовки, снизить затраты труда и повысить ее качество, уменьшить негативные процессы, связанные с затоплением древесных насаждений при заполнении водохранилищ гидроэлектростанций.

Для цитирования: Орловский С.Н. Обоснование технологии механизированной лесозаготовки лож водохранилищ и компоновки оборудования для ее выполнения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 128–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

Ключевые слова: водохранилище, свodka леса, технология лесозаготовки водохранилища, механизация, срезание древостоев, компоновка, конструкция.

Введение

В Красноярском крае с 50-х гг. XX в. планировалось строительство каскада гидроэлектростанций на р. Ангара. Были построены Иркутская, Братская и Усть-Илимская ГЭС, начато строительство Богучанской ГЭС. Для исключения нарушений, возникающих при затоплении древесной растительности в процессе заполнения водохранилищ гидроэлектростанций, необходимо очищать их ложе от древесной растительности.

Для Богучанской ГЭС была выбрана схема сводки леса посредством проведения сплошных рубок по всей затопляемой площади. Однако после завершения рубок произошло вторичное зарастание ложа водохранилища. На территориях, намеченных к проведению повторной лесоочистки, сосредоточены насаждения тонкомерных лиственных пород (береза, осина) с диаметрами стволов до 15 см. Для древостоев III бонитета средний объем хлыста составляет $0,14 \text{ м}^3$, запас леса – $176 \text{ м}^3/\text{га}$ при числе стволов 1257 шт./га [2, 6–8].

В данном случае наиболее эффективно получение готовой продукции (стволов в виде сортиментов и топливной чурки или щепы) непосредственно на месте проведения повторной лесоочистки. Доставка готовой продукции потребителям должна осуществляться водным путем.

Основные технологические операции при проведении повторной лесоочистки ложа водохранилища Богучанской ГЭС: доставка машин и механизмов к месту проведения работ; валка стоящих деревьев; сбор и доставка древесины к месту раскряжевки; раскряжевка стволов на сортименты; рубка вершин и сучьев на топливную чурку; доставка сортиментов и топливной чурки или щепы.

Дорожная сеть на осваиваемой территории практически отсутствует. Существуют технологии лесосводки с валкой леса, погрузкой его на баржи и доставкой водным путем в пункт назначения, при которых дорожная сеть не требуется. На подлежащей освоению территории прокладываются только волоки, освоение производится продвижением техники по территории одновременно с подъемом уровня воды [8, 16, 17].

Направления исследования – изучение технологических схем для наиболее эффективной разработки лесосеки вблизи береговой черты затопляемого водохранилища, подбор необходимых для этого технических средств и расчет их производительности; подбор оборудования, позволяющего использовать исключаящую ручной труд лесозаготовительную технику, созданную для работы в крупномерных насаждениях, в древостоях III класса бонитета с диаметрами стволов до 15 см и средним объемом хлыста $0,14 \text{ м}^3$ при числе стволов около 1200 шт./га; разработка методики расчета затрат мощности на срезание древесины дисковой фрезой в режиме непрерывного движения рабочего органа по ширине пасаки.

Актуальность данной работы заключается в снижении затрат энергии на выполнение лесосечных работ, трудоемкости технологического процесса и повышении производительности труда, а также исключении экологических нарушений при затоплении водохранилища. Новизна работы состоит в применении принципиально нового способа лесоочистки.

Объекты и методы исследования

Поиск материалов по теме исследования включал сбор данных об осваиваемой территории, о предполагаемых технологиях сводки леса, его транспортировке, первичной переработке, погрузке и доставке потребителям, о конструкции лесозаготовительных и других агрегатов, способах погрузки, вывозки леса, а также о технологиях лесозаготовок в маломерных лесонасаждениях. Рассматривались конструкции машин и агрегатов для высокопроизводительной лесоочистки от мелкого леса, используемые в других отраслях народного хозяйства, в частности в торфяной промышленности [1, 4, 8, 9, 15, 18–22].

Перед нами стояла задача – разработать эффективную высокопроизводительную технологию лесоочистки и средства механизации для ее выполнения, исключая ручной труд и обеспечивающие решение задачи с минимальными затратами энергии, времени и материальных средств.

Ручной способ лесоочистки, включающий валку древесины и обрезку сучьев бензопилами, трелевку установленной на барже лебедкой и использование стационарной рубильной машины для измельчения древесины на технологическую и топливную щепу, не рассматривался ввиду его низкой производительности и высокой трудоемкости. При этом доставка щепы на баржах навалом может привести к ее потерям при уносе ветром над акваторией водохранилища [7, 8].

При механизированном способе лесоочистки срезание древесной растительности производится валочно-пакетирующей машиной ЛП-19В [1, 21]. Сбор срезанной древесной растительности осуществляется погрузочно-транспортной машиной (форвардер) МЛПТ-354. Собранная древесина транспортируется к сучкорезной машине ЛП-30Б, устанавливаемой на барже. После обрезки сучьев древесина подается в мобильную рубильную машину ТТ 100 ТИ «Альстром», расположенную рядом с сучкорезной машиной. Полученная щепка из рубильной машины подается на баржу.

Достоинство данной технологической схемы – применение комплекта оборудования, апробированного на лесозаготовках в России. К ее недостаткам можно отнести несоответствие производительности базовой машины ЛП-19В ($200...250 \text{ м}^3/\text{см}$ в лесонасаждениях с объемом хлыста $0,40...0,80 \text{ м}^3$) ее производительности в насаждениях с объемом хлыста $0,14 \text{ м}^3$ [4, 21, 22]. При снижении объема хлыста время цикла повала деревьев и формирования пачек изменяется незначительно. Учитывая, что в рубках главного пользования средний объем хлыста в процессе работы валочно-пакетирующей машины составляет $0,60 \text{ м}^3$, а объем хлыста в проектом варианте – $0,14 \text{ м}^3$, сменная выработка машины увеличится в 4,3 раза, производительность – до $60 \text{ м}^3/\text{см}$.

Вывозка хлыстов с применением МЛПТ-354, которая осуществляет сбор срезанной древесины и ее доставку к сучкорезной машине, без подготовки волоков будет существенно затруднена из-за наличия пней.

По результатам расчетов предложены технологии разработки пазов и погрузки и доставки леса на баржи, переработки древесных отходов. В отличие от серийно выпускаемых машин ЛП-19В предлагаемая нами машина имеет штангу с установленным на ней дискофрезерным валочным устройством, а также захватное приспособление для формирования пакета срезанного леса – откладчик пачек [1, 4]. Срезание древостоев осуществляется дисковой фрезой при повороте надстройки машины, срезанные деревья собираются в пакет захватами и сбрасываются параллельно проходу машины. После поворота надстройка возвращается в первоначальное положение, и машина проезжает вперед на расстояние диаметра фрезы. Далее описанный цикл повторяется до конца пазы.

После срезки деревьев и укладки их в пачки по трассам движения форвардеров производится срезка пней, что позволяет осуществлять вывозку хлыстов с большими скоростями движения. Срезка пней выполняется машиной для удаления пней МУП-4, навешиваемой на трактор «Онежец» ТДТ-100, который также используется для вывозки хлыстов [1, 9, 18, 22]. Срезанные деревья грузятся манипулятором на грузовую платформу форвардера «Оне-

жец» ТБ-1 МА-16 и транспортируются к временному нижнему складу, где форвардер разгружается грейфером плавучего крана, стволы раскряжевываются, полученные сортименты грузятся на первую баржу, а вершины и тонкомер подаются в измельчающее устройство, которое режет их на чурочки и распределяет по второй барже. По мере загрузки барж буксир транспортирует их к месту разгрузки, а плавучий кран перебазирован на новую позицию.

Предлагаемая технология повторной очистки ложа водохранилища Богучанской ГЭС позволяет полностью механизировать технологический процесс лесосводки; снизить затраты труда и повысить качество очистки; уменьшить негативные явления, связанные с затоплением древесных насаждений при заполнении водохранилища.

Прототипом для разработки оборудования, обеспечивающего высокопроизводительную работу ЛП-19В в маломерных насаждениях, послужили применяемые в торфяной промышленности машина ЭТУ-0,75 и ее модификация МТП-43 [4] (рис. 1).



Рис. 1. Машина торфяной промышленности МТП-43

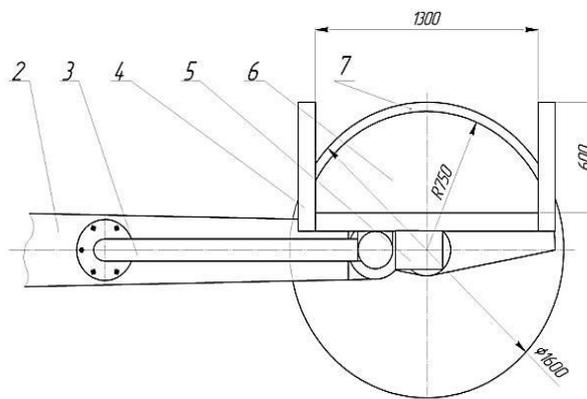
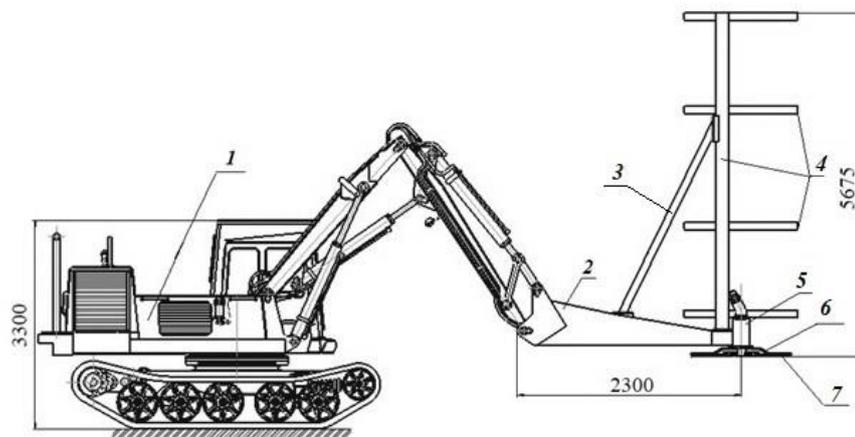
Fig. 1. Peat industry machine MTP-43

ЭТУ-0,75 представляет собой самоходную машину на гусеничном ходу. Включает: рабочий орган – дисковую фрезу диаметром 1500 мм и толщиной 20 мм с защитным диском, на который опирается срезанный ствол; откладчик пачек для удержания срезанного леса в вертикальном положении; механическую трансмиссию привода фрезы [4]. Лес диаметром до 25 см срезается на высоте 0,25 м от поверхности грунта в пределах угла поворота надстройки 180°. Откладчик поддерживает срезанные деревья в вертикальном положении в зоне рабочего хода фрезы при укладке их в пачки, параллельные рабочему ходу машины, при остановке надстройки. После очередного среза ЭТУ-0,75 продвигается вперед на 1,5 м, а описанный цикл повторяется. За один проход ЭТУ-0,75 прокладывает полосу шириной 18 м.

На основе ЭТУ-0,75 была разработана машина МТП-43, имеющая дизель-электрический привод фрезы от электродвигателя мощностью 30 кВт. Ширина освобождаемой от леса полосы – 25 м, производительность – 1,2 га за смену [4].

Разработанный нами агрегат предназначен для срезки маломерного леса в зоне затопления водохранилищ гидроэлектростанций. Оборудование включает смонтированный на рукояти ЛП-19В (вместо захвата и пильного устройства) удлинитель в виде коробчатой фермы с расположенным на ее конце гидравлическим двигателем, соединенным с фрезерным диском, над которым расположен защитный диск. Для сбора пачек над фрезой имеется откладчик пачек, выполненный из труб коробчатого сечения (рис. 2).

a



б

Рис. 2. Проектный агрегат для срезки маломерного леса на базе ЛП-19В: *a* – вид на агрегат сбоку; *б* – рабочий орган агрегата, вид сверху; 1 – базовая машина ЛП-19В; 2 – удлинитель рукояти; 3 – раскос; 4 – откладчик пачек; 5 – гидравлический двигатель 210.32; 6 – защитный диск; 7 – фреза

Fig. 2. Design unit for cutting small forests on the basis of feller-buncher LP-19V: *a* – side view of the unit; *б* – working body of the unit, top view; 1 – base machine LP-19V; 2 – handle extension; 3 – brace; 4 – packer; 5 – hydraulic engine 210.32; 6 – shielding wheel; 7 – cutter

Техническая характеристика ЛП-19В, модернизированного для сводки маломерного леса: диаметр фрезы – 1600 мм; скорость резания – 55...42 м/с;

число резцов дисковой фрезы – 64 шт.; частота вращения фрезерного диска – $11,0...8,5 \text{ с}^{-1}$; путь резания, равный длине дуги 180° , – 37,68 м; эксплуатационная производительность – 279 м^3 за смену; радиус поворота по внешней кромке фрезы – 12 м; время поворота агрегата при срезе – 19,8 с; скорость подачи – 1,9 м/с; общая продолжительность цикла – 65 с; объем собираемой пачки – $1,0 \text{ м}^3$.

Фреза и ее резец представлены на рис. 3.

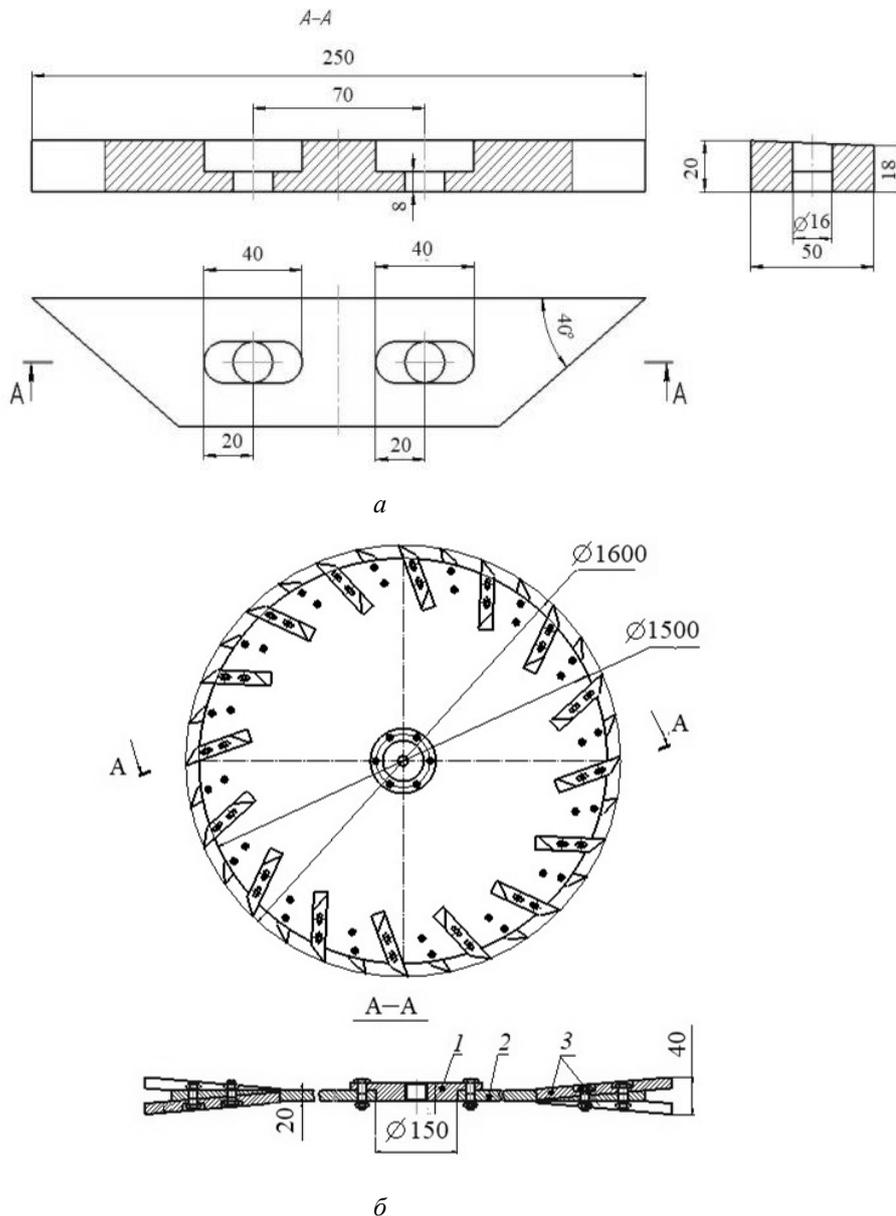


Рис. 3. Чертеж резца (а, вид сверху) и фрезы (б):

1 – ступица; 2 – диск; 3 – резцы

Fig. 3. Drawing of an incisor (a, top view) and a cutter (б):

1 – hub; 2 – disks; 3 – incisors

Оборудование работает следующим образом. Фреза в процессе вращения и поворота надстройки ЛП-19В (см. рис 2, (1)) срезает лес и формирует пачку на защитном диске. От падения срезанные деревья удерживаются за-

хватами откладчика пачек. После поворота на 180° надстройка останавливается, пачка по инерции сбрасывается на полосу, параллельную ходу машины, которая движется вперед на 1,5 м. Включается поворот надстройки, и цикл повторяется. Привод фрезы гидравлический, выбор требуемой частоты ее вращения достигается подбором рабочего объема гидравлического двигателя.

Результаты исследования и их обсуждение

Производительность проектируемого оборудования для лесосводки к ЛП-19В рассчитывали, используя данные таксации 1257 деревьев на 1 га. Тогда количество стволов на 1 рез составляет 7,1 шт., объем леса, срезаемого за 1 цикл (объем пачки), – 0,994 м³.

Общая продолжительность цикла (T_{Σ} , с) согласно технической характеристике модернизированного ЛП-19В с проектным оборудованием для срезки леса является суммой элементов цикла [10, 14, 15]:

$$T_{\Sigma} = t_{дв} + t_{ср} + t_{ост.п} + t_{пов} + t_{ост}, \quad (1)$$

где $t_{дв}$ – время передвижения агрегата на величину диаметра фрезы, с; $t_{ср}$ – время, затраченное на срез деревьев при повороте надстройки, с; $t_{ост.п}$ – время остановки поворота и сброса пачки хлыстов, с; $t_{пов}$ – время обратного или попутного холостого поворота надстройки, с; $t_{ост}$ – время остановки надстройки и подготовки к следующему циклу, с.

Расчет выполняется на основании технической характеристики проектируемого оборудования и древостоев на очищаемой площади леса. Подставим рассчитанные значения в (1) и получим

$$T_{\Sigma} = 15,0 + 19,8 + 5,0 + 19,8 + 5,0 = 64,6 \text{ с.}$$

Эксплуатационная производительность за смену (Π_3 , м³/ч) ЛП-19В с диско-фрезерным рабочим органом:

$$\Pi_3 = \Pi_T - K_{ИРВ} - K_T - T_{см}, \quad (2)$$

где Π_T – производительность за один цикл ЛП-19В с фрезой, $\Pi_T = 64,6 \text{ с/м}^3$; $K_{ИРВ}$ – коэффициент использования рабочего времени, $K_{ИРВ} = 0,7$; K_T – коэффициент технологичности, $K_T = 0,9$; $T_{см}$ – продолжительность смены, $T_{см} = 8 \text{ ч}$.

Таким образом, за смену

$$\Pi_3 = \frac{0,994 \cdot 3600}{64,6} \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 8 = 279,18 \text{ м}^3,$$

где 0,994 – объем пачки, м³; 64,6 – время цикла, с; 3600 – число секунд в 1 ч.

Производительность оборудования МУП-14 для срезания пней к ТЛП-100 при подготовке усов для вывозки пачек сваленного леса к погрузочной площадке определяется количеством пней, подлежащих срезу, на 1 км трассы вывозки пачек леса на пути движения форвардера (K , шт./км трассы) [11]:

$$K = \frac{BLN}{10000}, \quad (3)$$

где B – ширина уса, $B = 2,6 \text{ м}$; L – длина уса, $L = 1000 \text{ м}$; N – количество пней, $N = 1257 \text{ шт./га}$.

Получаем $K = 327 \text{ шт./км}$.

При расчетной производительности машины 80 шт. пней/ч [10] ее рабочая скорость (V_r , км/ч) находится как отношение расчетной производительности по срезу пней (шт./ч) к количеству пней на 1 км расчищаемого уса (шт./км) и составит 0,25 км/ч.

Эксплуатационная производительность МУП-4 (V_s , км/ч) с учетом коэффициента использования рабочего времени смены ($K_{ирв} = 0,8$) и коэффициента технологичности ($K_t = 0,9$) составит 0,18 км/ч, или 0,05 м/с [10, 13].

Расчет оптимальной площади леса, вырубаемого с одного расположения временного нижнего склада, и размеров пазек производится на основании схемы разработки пазеки и вывозки леса (рис. 4).

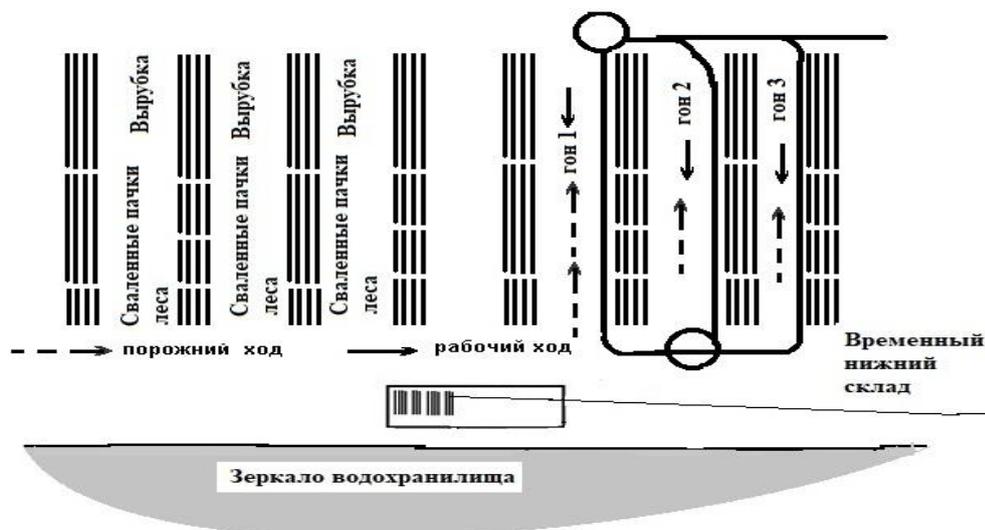


Рис. 4. Схема срезания пней и вывозки пачек леса из пазеки гусеничным форвардером «Онежец» ТБ-1 МА-16

Fig. 4. Scheme of stump cutting and removal of wood bundles from forest swath by crawler forwarder "Onezhets" TB-1 MA-16

Продолжительность одного цикла $T_{ц}$, начиная со сбора вoза и вывозки форвардером, определяется по показателям его технической характеристики:

$$T_{ц} = \frac{L_r}{V_{хх}} + t_{пов} + (t_{п} n n_{цп}) + t_{пд} + \frac{L_r - l_{сб}}{V_{гх}} + t_{пов} + t_{выгр}, \quad (4)$$

где L_r – длина гона, м; $V_{хх}$ – скорость холостого хода порожнего форвардера, м/с; $t_{пов}$ – время, затрачиваемое на поворот форвардера, с; $t_{п}$ – время погрузки одной пачки леса гидроманипулятором форвардера, с; n – число пачек леса, размещаемое на форвардере, шт.; $n_{цп}$ – время укладки прокладок после погрузки пяти пачек, с; $t_{пд}$ – время подготовки к движению (убрать манипулятор, включить передачу), с; $l_{сб}$ – расстояние сбора вoза форвардером, м; $V_{гх}$ – скорость хода загруженного форвардера, м/с; $t_{выгр}$ – время разгрузки форвардера плавучим краном, с.

Принимаем следующие варианты расчетов.

Первый вариант – длина пазеки 120 м исходя из предпосылок: шаг укладки пачек 1,5 м; количество пачек объемом 1 м³, загружаемое на форвар-

дер, – 10 шт. Отсюда длина пути погрузки – 5 м. На гоне 120 м получаем 8 рейсов на пасеку.

Второй вариант – длина пасеки 240 м, при этом число рейсов на пасеку – 16.

При конструктивно заданном расстоянии по ширине между проходами ЛП-19В с фрезерным рабочим органом 24 м конечной целью расчетов является определение размера лесосеки до перебазирования места погрузки по берегу водохранилища.

Подставляя численные значения в выражение (4), получим продолжительность одного цикла для каждого гона вдоль одной пасеки по вариантам длин пасек. Сумма времени движения форвардера для сбора пачек поваленного леса с одной пасеки длиной 120 м $T_{\Sigma\text{цф}} = 1,484 \text{ ч} \approx 1,5 \text{ ч}$.

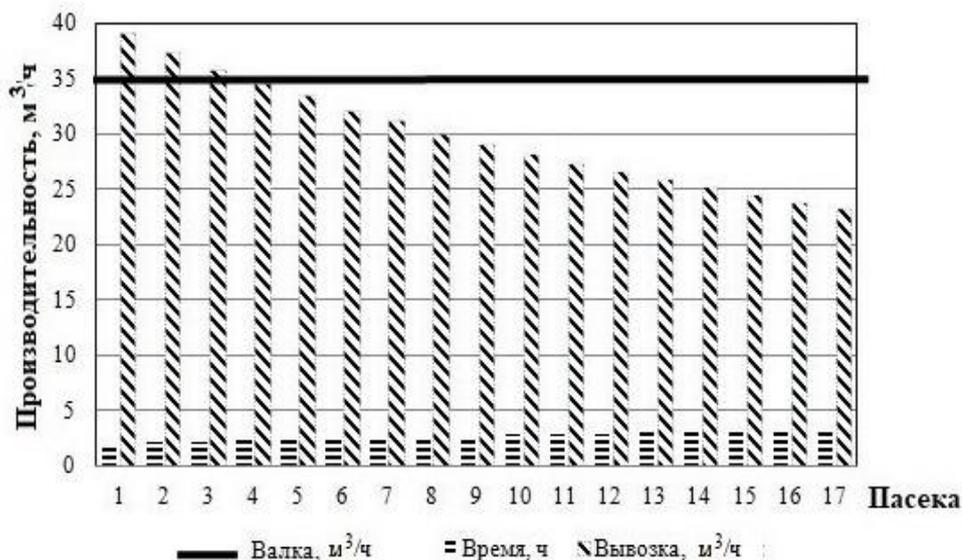
Время движения форвардера по ширине вырубki ($T_{\text{цш}}$, ч) и полное время очистки лесосеки $T_{\Sigma\text{п}}$ определяются как сумма времени сбора пачек на одной пасеке и времени, затрачиваемого на переезды от пасеки к пасеке на расстоянии, кратное 24 м:

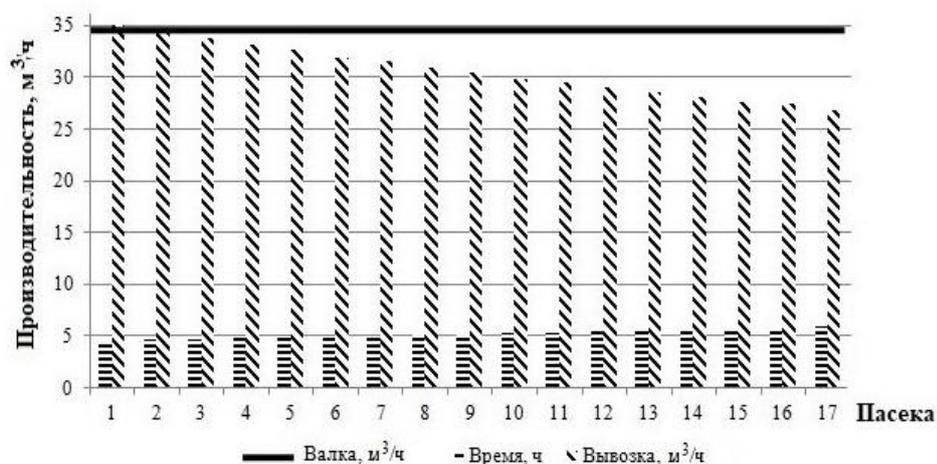
$$T_{\text{цш}} = T_{\Sigma\text{цф}} + \left(\frac{l_{\text{хх}}}{V_{\text{хх}}} + \frac{l_{\text{гх}}}{V_{\text{г}}} \right) \kappa, \quad (5)$$

где $l_{\text{хх}}$ – расстояние холостого пробега между пасеками, м; $l_{\text{гх}}$ – расстояние пробега с грузом между пасеками, м; κ – число форвардеров, работающих на вывозке леса с одной пасеки, шт.

Графически результаты работы по вывозке леса форвардером с пасек длиной 120 и 240 м при их ширине 24 м показаны в виде диаграмм на рис. 5.

Из диаграмм, приведенных на рис. 5, следует, что производительность по валке не обеспечена вывозкой после очистки третьей пасеки при ее длине 120 м и уже после очистки первой пасеки при длине 240 м.





б

Рис. 5. Зависимость производительности форвардера от числа обрабатываемых пазек при их длине 120 (а) и 240 м (б)

Fig. 5. Dependence of the forwarder productivity on the number of processed forest swaths at their lengths of 120 (a) and 240 m (b)

Расчет времени на срезание пней трактором, оснащенным оборудованием машины МУП-4 для срезания пней, производим с учетом протяженности волоков согласно схеме (см. рис. 4). Суммарная длина волоков (L_B , км) складывается из длин пути вывоза вдоль пазек $l_{вп}$, пути вывоза поперек пазек $l_{пп}$ и пути поворотов $l_{пов}$:

$$L_B = l_{вп} + l_{пп} + l_{пов} + l'_{пов}, \quad (6)$$

где $l_{пов}$ – длина пути при повороте на 180° , $l_{пов} = \pi R_{пов}$; $R_{пов}$ – радиус поворота, м; $l'_{пов}$ – длина пути при повороте на 90° , $l'_{пов} = \pi R_{пов}$.

Определяем суммарную длину рабочих ходов (L_Σ , м) на подготовку волоков по двум вариантам лесозаготовок (с длиной пазек 120 и 240 м) для всех пазек:

$$L_\Sigma = L_e + L_{рх.посл} (N-1) + L_{хх} (N-1) + L_{возвр}, \quad (7)$$

где L_e – путь до места срезания пней, м; $L_{рх.посл}$ – длина пути последнего рабочего хода, м; N – число пазек, шт.; $L_{хх}$ – длина пути на холостом ходу без срезания пней, м; $L_{возвр}$ – длина пути возвращения на базу, м.

Затраты времени (T_Σ , ч) на расчистку волоков от пней:

$$T_\Sigma = \frac{\left(\frac{L_{рх}}{V_{рх}} + \frac{L_{хх}}{V_{хх}} \right)}{3600}. \quad (8)$$

Время работы второго форвардера на вывозке леса $T_{выб}$ по вариантам определится как разность общего времени цикла и времени работы трактора ЛХТ-100 из-под второго форвардера на срезке пней с учетом затрат времени на переоборудование (отсоединение и обратное подключение полуприцепа,

а также монтаж-демонтаж машины МУП-4), принимаемых по инструкциям на форвардер «Онежец» ТБ1-МА-16 и МУП-4, – 4,25 ч.

Из полученных данных имеем объем вывозки вторым форвардером: по первому варианту – 552 м³; по второму – 1485 м³.

Полученные значения покрывают дефицит вывозки и позволяют создавать резерв на время перебазирования плавучего крана и барж на новую стоянку.

Графически результаты работы по вывозке леса одним форвардером с подключением второго форвардера после его высвобождения от работ по прокладке лесовозных усов машиной МУП-4 для пасек длиной 120 и 240 м (при их ширине 24 м) показаны в виде диаграмм на рис. 6.

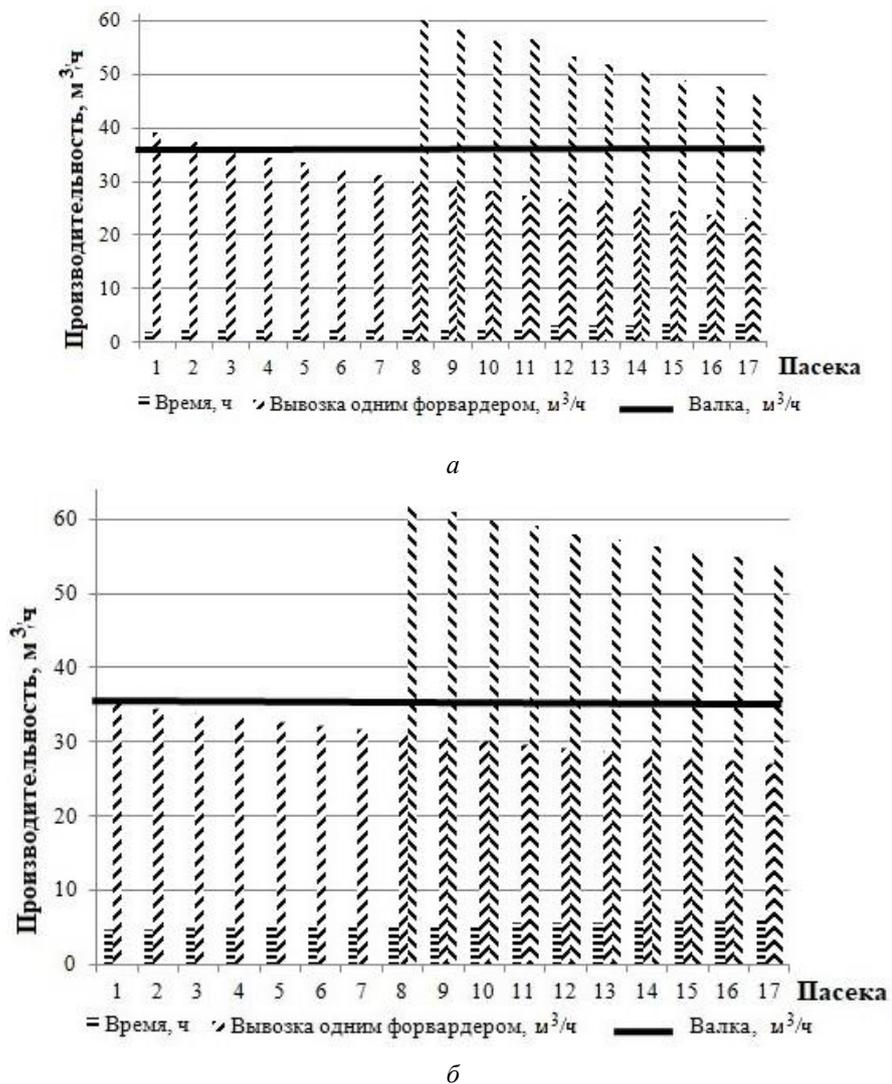


Рис. 6. Зависимость производительности двух форвардеров от числа обрабатываемых пасек при длине пасек 120 (а) и 240 м (б)

Fig. 6. Dependence of the productivity of two forwarders on the number of processed forest swathes at their lengths of 120 (a) and 240 m (b)

Из приведенных диаграмм можно сделать вывод, что оптимальная длина пасаки составляет 240 м. При этом перебазирование места погрузки производится после выработки 34 пасаек в обе стороны от места погрузки на расстояние 800...1000 м один раз за 11–12 дней, что обеспечивает постоянный характер работ. Превышение производительности вывозки леса по сравнению с его валкой проектным оборудованием обеспечивает резерв времени на проведение ремонтов и технического обслуживания техники без ущерба для выполнения работ.

Учет влияния кинетической энергии при расчетах дисковых фрез на срезании растущих деревьев. Определение предельных диаметров древесных стволов, срезаемых дисковой фрезой, и расчет усилий на резцах производим с учетом кинетической энергии, развиваемой фрезой [9, 12, 13].

Примем, что при прорезании древесных включений источником энергии является двигатель агрегата и запасенная кинетическая энергия вращающихся частей трансмиссии и фрезы. Энергия расходуется на резание и сообщение кинетической энергии фрезеруемой древесине. При скорости подачи $V_n = 1,9$ м/с время перерезания (T , с) ствола дерева диаметром $d = 0,15...0,20$ м составит 0,08 с.

В соответствии с этим запишем уравнение баланса энергии при перерезании ствола дерева диаметром $d = 0,15...0,20$ м:

$$A_{\text{дв}} + A_{\text{фр.кин}} = A_{\text{рез}} + A_{\text{др.кин}}, \quad (9)$$

где $A_{\text{дв}}$ – энергия, подводимая двигателем за время резания, Дж; $A_{\text{фр.кин}}$ – энергия, передающаяся от фрезы за счет уменьшения ее угловой скорости, Дж; $A_{\text{рез}}$ – энергия, необходимая для резания, Дж; $A_{\text{др.кин}}$ – кинетическая энергия, сообщаемая древесной стружке, Дж.

Расчеты показывают, что можно пренебречь $A_{\text{дв}}$ и $A_{\text{др.кин}}$, поскольку они частично компенсируют друг друга. Тогда

$$A_{\text{фр.кин}} = 0,5 C_{\text{фр}} (\omega^2 - \omega_1^2) J; \quad (10)$$

$$A_{\text{рез}} = \rho_{\text{др}} \frac{\pi d^2}{4} b, \quad (11)$$

где $C_{\text{фр}}$ – коэффициент, учитывающий моменты инерции остальных вращающихся масс оборудования (ступицы, гидродвигателя, соединительной муфты), $C_{\text{фр}} = 1,1$; ω – номинальная угловая скорость фрезы, $\omega = 69$ рад/с; ω_1 – минимально допускаемая угловая скорость вращения фрезы, $\omega_1 = 52$ рад/с; J – момент инерции вращающихся масс фрезы и деталей трансмиссии ее привода, кг·м²; $\rho_{\text{др}}$ – удельное сопротивление резанию осины, $\rho_{\text{др}} = 1,25 \cdot 10^6$ Н/м³; b – ширина пропила, $b = 0,04$ м.

Для получения искомого диаметра (d , м), прорезаемого за счет сил инерции дерева, используем выражение [12]:

$$d = \sqrt{\frac{2C_{\text{фр}} (\omega^2 - \omega_1^2) J_{\text{ф}}}{\rho_{\text{др}} b}}, \quad (12)$$

где $J_{\text{ф}}$ – момент инерции вращающихся масс фрезы, кг·м², слагаемый из момента инерции резцов $J_{\text{р}}$ и диска $J_{\text{д}}$:

$$J_{\phi} = J_p + J_d = \frac{B_p S_p L_p \gamma n_p}{1000} R_p^2 + \frac{(\pi R_{\phi d}^2 S_{\phi d} \gamma) R_{\phi d}^2}{1000 \cdot 2}, \quad (13)$$

B_p, S_p, L_p – ширина, толщина и длина резца соответственно, м; γ – удельный вес стали, кг/м³; n_p – число резцов на фрезерном диске, шт.; R_p – радиус окружности центра тяжести резцов, м; $R_{\phi d}$ – радиус фрезерного диска, м; $S_{\phi d}$ – толщина фрезерного диска, м.

Подставляя численные значения в формулу (13), получим $J_{\phi} = 132 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $d = 0,62 \text{ м}$.

Для 7 стволов по длине дуги поворота общее сечение прорезаемого дерева равно $0,124 \text{ м}^2$, в то же время площадь среза дерева диаметром $d = 0,62 \text{ м}$ составляет $0,30 \text{ м}^2$, т. е. коэффициент запаса по резанию равен 2,4, что подтверждает возможность выполнения среза за счет сил инерции.

При $V_n = 1,9 \text{ м/с}$ время срезания 7 стволов составит 0,55 с. Мощность (N , кВт), развиваемая фрезой за счет кинетической энергии [5, 11]:

$$N = \frac{\pi r_{\text{др}} V_n b d}{408}. \quad (14)$$

Кинетическая энергия для теоретически возможного диаметра прорезаемого дерева 0,62 м составит 453,00 кВт. Фактическое значение мощности для реального прорезаемого дерева диаметром до 0,30 м на участке лесосводки по таксационным показателям – 168,45 кВт.

Максимальное сопротивление подаче ($P_{\text{рез}}, \text{Н}$) фрезы возникает при достижении концами ножей центра пропиливаемого дерева диаметром 0,62 м:

$$P_{\text{рез}} = 2\rho \frac{V}{\omega_{\text{ср}}} \frac{b d}{D}, \quad (15)$$

где V – скорость резания, м/с; $\omega_{\text{ср}}$ – среднеарифметическое значение угловой скорости вращения фрезы, рад; D – диаметр фрезы по концам резцов, м.

Для толщины срезаемой стружки 5,4...7,0 мм при максимальной и минимальной частоте вращения фрезерного диска $P_{\text{рез}} = 12,2 \text{ кН}$. Данное усилие следует учитывать при конструировании крепления резцов и оборудования к ружьяти ЛП-19В.

Привод фрезы необходимо производить с частотой вращения 11 с^{-1} . Принимая вариант гидравлического редуцирования частоты вращения гидродвигателя привода фрезы, выбираем гидромотор 210.32. Полный КПД гидро-системы составит 0,81, объемный КПД – 0,93.

Расчет устойчивости агрегата в продольном и поперечном направлениях. Устойчивость агрегата в вертикальной плоскости определяют по коэффициенту запаса устойчивости (K_y) [3, 11]:

$$K_y = \frac{M_{\text{уст}}}{M_{\text{опр}}} \geq 1,4 - 1,5, \quad (16)$$

где $M_{\text{уст}}$ и $M_{\text{опр}}$ – соответственно суммарные моменты устойчивости и опрокидывания машины относительно А-А (внешний край опорных катков наиболее нагруженной гусеницы) и Б-Б (вертикальная плоскость по оси заднего опорного катка агрегата).

Для расположения рабочего органа сбоку агрегата моменты устойчивости и опрокидывания вычисляются по [11, 12, 14]:

$$M_{уст}^{A-A} = G_a \left(\frac{b_6 + b_r}{2} - a + x_r \right); \quad (17)$$

$$M_{опр}^{A-A} = G_c \left(x_{po} - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right) + G_p \left(x_p - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right) + G_{po} \left(x_{np} - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right), \quad (18)$$

где G_a – масса агрегата без оборудования, стрелы и рукояти, Н; b_6 – ширина колеи, м; b_r – ширина гусеницы, м; a – расстояние от края гусеницы до линии опорных катков, м; x_r – координата центра тяжести базовой машины при ее положении с поворотом надстройки на 90° , м; G_c – масса стрелы, Н; G_p – масса рукояти, Н; G_{po} – масса рабочего оборудования, Н; x_{po} , x_p , x_{np} – координаты центров массы рабочего органа, рукояти и навески откладчика, м.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в поперечной плоскости составят 513 700 и 216 323 Н·м соответственно, коэффициент запаса устойчивости – 2,37.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в продольной плоскости при расположении рабочего оборудования перед агрегатом находим, используя следующие выражения [11, 14]:

$$M_{уст}^{B-B} = G_a \cdot \left(\frac{l_6}{2} + y_a \right); \quad (19)$$

$$M_{опр}^{B-B} = G_c \left(y_c - \frac{l_6}{2} \right) + G_p \left(y_p - \frac{l_6}{2} \right) + G_{po} \left(y_{po} - \frac{l_6}{2} \right), \quad (20)$$

где l_6 – длина базы агрегата, м; y_a , y_c , y_p и y_{po} – расстояние от середины опорной поверхности гусениц до центра тяжести соответственно агрегата, стрелы, рукояти и рабочего органа (фрезы с приводом и откладчиком пачек), м.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в продольной плоскости составят 539 385 и 218 446 Н·м, коэффициент запаса устойчивости – 2,47. Ввиду незначительной (2 км/ч) скорости движения, а также высоких значений запаса устойчивости в статике расчет динамической устойчивости агрегата не требуется.

Напряженность труда оператора. Зависит от частоты его воздействия на рычаги управления. На проектном агрегате она снизилась в 10 раз (на 89,6 %). Кроме того, на базовой машине при спиливании и укладке дерева в пачку необходимо все воздействия на рычаги управления выполнять с высокой точностью, следя за положением рабочего органа. За смену оператор базового ЛП-19В производит 12 000 операций управления, а на проектном агрегате – всего 1 240. На проектном агрегате оператор, включив в начале пачки фрезу, просто продвигает агрегат вперед и периодически включает поворот надстройки, что делает его труд менее утомительным [19, 23].

Базовый агрегат работает при резко переменном режиме нагрузки, так как в каждом цикле повала дерева нагрузка изменяется от холостого хода до максимального. Проектный агрегат работает в более стабильном нагрузочном

режиме – фреза вращается постоянно, надстройка поворачивается тоже почти без остановок.

Расход топлива на 1 м³ срезанного леса по базовому варианту составляет 2,5 дм³; по проектному – 0,7 дм³.

Выводы

1. Разработана технология очистки ложа затопляемого водохранилища от леса, базирующаяся на использовании мобильных машин, позволяющих производить эту работу качественно. Основным механизмом для проведения лесочистки является дополнительное оборудование к валочно-пакетирующей машине ЛПП-19В, которое обеспечивает высокопроизводительную работу в маломерных насаждениях при объеме хлыста до 0,15 м³.

2. Предложена организация технологического процесса, позволяющая повысить производительность труда, снизить капитальные вложения на проведение лесочистки, а также обеспечить качественную очистку ложа водохранилища.

3. Приведена методика расчета затрат энергии дисковых фрез при срезании растущих деревьев, что позволяет получить конструктивные и геометрические параметры фрез, а также режимы резания еще в процессе проектирования.

4. Доказано, что повышение эффективности использования агрегата для срезания маломерных лесонасаждений возможно за счет оптимизации его энергетических и динамических параметров, выбора рациональной технологии процесса лесочистки.

5. Обоснован выбор базовой машины, конструкции рабочего органа, режимов его работы и технологии проведения работ.

6. Установлено, что предложенные организация технологического процесса и конструкция оборудования позволяют повысить производительность труда, снизить капитальные вложения на проведение лесочистки и обеспечивают наиболее качественную очистку ложа водохранилища по сравнению с базирующейся на серийно выпускаемом ЛПП-19В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александров В.А. Механизация лесосечных работ в России. СПб.: Профи, 2009. 256 с. [Aleksandrov V.A. *Mechanization of Logging Operations in Russia*. Saint Petersburg, Profi Publ., 2009. 256 p.]

2. Богучанская ГЭС на реке Ангаре. Технический проект: в 3 т. Т. III. Водохранилище и охрана окружающей среды. Кн. 1. Водохранилище. М.: Гидропроект, 1976. 219 с. [Boguchany Hydro Power Plant on the Angara River. *Technical Project*. In 3 vol. Vol. 3. Reservoir and Environmental Protection. Book 1. Reservoir. Moscow, Gidroyekt Publ., 1976. 219 p.]

3. Верхов Ю.И. Проектирование погрузочно-транспортных машин с учетом их колебаний. Красноярск: КГТА, 1986. 175 с. [Verkhov Yu.I. *Design of Forwarders with Allowances Made for Their Vibrations*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1986. 175 p.]

4. Григорьян В.Г. Торфяные машины и их эксплуатация. М.: Высш. шк., 1982. 232 с. [Grigoryan V.G. *Peat Machines and Their Operation*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 232 p.]

5. Карнаухов А.И. Лесопожарные агрегаты с торцовой фрезой. Концепция энергосбережения: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2011. 220 с. [Karnaukhov A.I. *Forest Fire Units with a Face Cutter. Energy Saving Concept*: Monograph. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2011. 220 p.].

6. Корпачев В.П., Малинин Л.И., Чебых М.М. Методика прогнозирования поступления древесной массы при затоплении и эксплуатации водохранилищ ГЭС Ангаро-Енисейского региона // Использование и восстановление ресурсов Ангаро-Енисейского региона: сб. науч. тр. всесоюз. науч.-практ. конф. Т. II. Красноярск, Лесосибирск, 1991. С. 107–113. [Korpachev V.P., Malinin L.I., Chebykh M.M. Prediction Technique of Wood Pulp Income during Flooding and Operation of Reservoirs of HPP of the Angara-Yenisei Region. *Use and Restoration of Resources of the Angara-Yenisei Region: Collection of Academic Papers of the All-Union Scientific and Practical Conference. Vol. 2*. Krasnoyarsk, Lesosibirsk Publ., 1991, pp. 107–113].

7. Корпачев В.П., Сладикова С.М., Пережилин А.И. Оценка запасов древесной массы в водохранилище Богучанской ГЭС в процессе его подготовки и эксплуатации. Красноярск: СибГТУ, 2007. 94 с. [Korpachev V.P., Sladikova S.M., Perezhilin A.I. *Assessment of Wood Pulp Reserves in the Boguchanskaya HPP Reservoir in the Process of Its Preparation and Operation*. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2007. 94 p.].

8. Логинов Т.И., Лещ-Борисовский А.И., Фогель Д.Н. Лесосводка и лесочистка водохранилищ гидротехнических сооружений. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 136 с. [Loginov T.I., Leshch-Borisovskiy A.I., Fogel' D.N. *Logging and Forest Cleaning of Reservoirs of Hydraulic Engineering Structures*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 136 p.].

9. Онейко Ф.А. Торфяные машины. Минск: Вышэйш. шк., 1968. 408 с. [Oreyko F.A. *Peat Machines*. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1968. 408 p.].

10. Орловский С.Н. Проектирование машин и оборудования для садово-паркового и ландшафтного строительства. Красноярск: СибГТУ, 2004. 108 с. [Orlovsky S.N. *Design of Machinery and Equipment for Garden and Landscape Construction*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2004. 108 p.].

11. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машино-тракторных агрегатов: моногр. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с. [Orlovsky S.N. *Determination of Energy and Dynamic Parameters of Tractors, Cutting Modes of Active Working Bodies of Machine-Tractor Units*: Monograph. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2011. 376 p.].

12. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 70–76. [Orlovsky S.N., Karnaukhov A.I. Theoretical Background of Rotary Tools Parameters and Operating Modes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 70–76]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/4d2/dggj1.pdf>

13. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Обоснование технологии применения и компоновки агрегата для понижения пней // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 123–131. [Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I. Application and Configuration Technology of the Stump Lowering Device. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 123–131]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.3.123](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.123); URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/111/2_orlovskiy.pdf

14. Полетайкин В.Ф. Динамика переходных режимов работы лесных погрузчиков // Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: КГТА, 1993. С. 32–51. [Poletaykin V.F. Dynamics of Transient Modes of Operation of Forest Loaders. *Intercollegiate Collection of Academic Papers*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1993, pp. 32–51].

15. Полетайкин В.Ф., Авдеева Е.В. Погрузочные машины. Красноярск: СибГТУ, 2001. 200 с. [Poletaykin V.F., Avdeyeva E.V. *Loading Machines*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2001. 200 p.].

16. Разработка мероприятий по лесосводке и лесоочистке в зоне водохранилища Богучанского гидроузла на реке Ангаре: отчет о НИР. Красноярск: Сиб. междунар. ин-т леса, 2006. 19 с. [*Development of Measures for Logging and Forest Cleaning in the Area of the Reservoir of the Boguchany Hydrosite on the Angara River: Research Report*. Krasnoyarsk, Noncommercial Research Institution "Siberian International Institute of Forest", 2006. 19 p.].
17. Разработка прогноза засорения и загрязнения водохранилища Богучанской ГЭС древесной массой и органическими веществами, комплекса предложений по очистке водохранилища от древесной массы: отчет о НИР / Красноярск: СибГТУ, 2006. 90 с. [*Development of the Forecast of Clogging and Pollution of the Boguchany HPP Reservoir with Wood Pulp and Organic Substances; a Set of Proposals for Cleaning the Reservoir from Wood Pulp: Research Report*. Krasnoyarsk, SibSTU, 2006. 90 p.].
18. Bell J.L. Changes in Logging Injury Rates Associated with Use of Feller-Bunchers in West Virginia. *Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*. Seattle, WA, 2001, pp. 28–36.
19. Jones P.C., Hawkes J.H. *Stump Grinders*. Austin, TX, UT Press, 2014. 156 p.
20. Leon B.H., Benjamin J.G. *A Survey of Business Attributes, Harvest Capacity and Equipment Infrastructure of Logging Businesses in the Northern Forest*. Orono, ME, University of Maine, 2012. 29 p.
21. Spinelli R., Cuchet E., Roux P. A New Feller-Buncher for Harvesting Energy Wood: Results from a European Test Programme. *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 31, iss. 4, pp. 205–210. DOI: [10.1016/j.biombioe.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.08.002)
22. Spinelli R., Hartsough B.R., Owende P.M.O., Ward S.M. Productivity and Cost of Mechanized Whole-Tree Harvesting of Fast-Growing Eucalypt Stands. *International Journal of Forest Engineering*, 2002, vol. 13, iss. 2, pp. 49–60. DOI: [10.1080/14942119.2002.10702462](https://doi.org/10.1080/14942119.2002.10702462)
23. Teggin R., Kavadiatti S., Hebbal S. Design and Fabrication of Machine Performing Multiple Wood Working Operations. *Proceeding of NCRIET-2015 & Indian Journal of Scientific Research*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 162–167.

SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGY OF MECHANIZED CLEAR-CUTTING OF RESERVOIR BEDS AND EQUIPMENT ARRANGEMENT FOR ITS IMPLEMENTATION

S.N. Orlovsky, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6780-2019](https://orcid.org/0000-0001-8904-834X),
ORCID: [0000-0001-8904-834X](https://orcid.org/0000-0001-8904-834X)

Krasnoyarsk State Agrarian University, prosp. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

The issue of cleaning reservoir beds during the construction of cascades of hydroelectric power plants is relevant. In current practice, forest clearance is carried out in the form of clear-cutting 15–20 years before the flooding of the area. Herewith, the fact that even before flooding, the reservoir bed is secondly overgrown with fine-sized deciduous species with trunk diameter of up to 15 cm, average volume per tree of which is 3–5 times less than that of previous stands, is ignored. In view of this, it turned out that the use of existing harvesting and logging equipment is ineffective in this type of works. It is necessary to develop machines and technologies that ensure the fulfillment of the assigned task. The research purpose is to develop a technology for cleaning the reservoir bed (on the example of the Boguchany Hydro Power Plant (HPP) on the Angara river) from secondary overgrowing after clear-cutting; as well as the design and arrangement of equipment for the feller-buncher LP-19V for trees cutting, and the technology of its application. The research agenda

includes an analysis of wood cutting forces with regard to inertial forces; calculations of the productivity of the unit for cutting stands and their transportation to the place of loading; sizing of forest swathes, their number and skidding or haulage distances; study of use modes of equipment for cutting stumps, forest clearance and hauling. A design of the working body for the feller-buncher LP-19V is proposed, including a disk cutter and a packer, which allows to increase its productivity in cutting areas by 3–4 times with a whip volume of about 0.14 m³. A technology for loading and delivering timber to barges, and processing unmerchantable wood has been developed. The proposed technology for recleaning the reservoir bed of a hydro power plant allows to fully mechanize the technological process of forest clearance, reduce labour costs and improve the cleaning quality, reduce the negative effects associated with flooding of tree stands while filling HHP reservoirs.

For citation: Orlovsky S.N. Substantiation of the Technology of Mechanized Clear-Cutting of Reservoir Beds and Equipment Arrangement for Its Implementation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 128–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

Keywords: reservoir, forest clearance, technology, mechanization, cutting of stands, arrangement, design.

Поступила 13.01.19 / Received on January 13, 2019
