



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*228.7:62.7

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПОДБОРА СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЙ*Р.В. Воронов¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [D-7841-2014](#),**ORCID: [0000-0003-0104-6409](#)**О.Б. Марков¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: [0000-0002-2467-9607](#)**И.В. Григорьев², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](#),**ORCID: [0000-0002-5574-1725](#)**А.Б. Давтян³, аспирант; ORCID: [0000-0002-4175-7996](#)*

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: rvoronov@petsu.ru, markovob@yandex.ru

²Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru

³Братский государственный университет, ул. Макаренко, д. 40, г. Братск, Иркутская область, Россия, 665709; e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru

Лесные плантации успешно создаются и эксплуатируются во многих странах с середины прошлого века. Более 50 % всей заготавливаемой и перерабатываемой древесины в мире является продукцией целевого лесовыращивания, созданной на лесных плантациях. В Российской Федерации в результате многолетнего, экстенсивного лесопользования, несмотря на огромные лесные запасы и далеко не полное использование расчетной лесосеки, лесоперерабатывающие предприятия начинают ощущать нехватку сырья. Стоимость древесного сырья постоянно растет, что связано с повышением ставок платы за лес на корню, увеличением расходов на эксплуатацию и обслуживание лесных машин импортного производства, ростом курсов доллара и евро. Прежде всего начинающийся сырьевой голод лесоперерабатывающих предприятий и рост стоимости древесного сырья обусловлены постепенным исчерпанием доступных эксплуатационных спелых лесов. При этом среднее расстояние вывозки заготавливаемой в естественных лесах древесины постоянно растет, ежегодно увеличиваются затраты на создание и эксплуатацию лесовозных дорог, а длительный оборот рубки, особенно хвойных пород, усугубляет складывающуюся ситуацию. Одной из проблем, препятствующих в настоящее время эффективному созданию лесных плантаций, является отсутствие в нашей стране научно обоснованной системы машин, способной выполнять весь цикл работ, начиная с посадки (посева) древесных растений и заканчивая сбором древесного урожая и подготовкой территории под новую сукцессию. Очевидно, что данная система машин должна базироваться на модульном принципе построения, включать возможный минимум машин и механизмов, иметь высокий коэффициент технической готовности и низкие удельные эксплуатационные затраты. В статье приведена математическая модель, основанная на модульном принципе подбора системы машин для лесных плантаций.

Для цитирования: Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 125–134. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

Ключевые слова: лесные плантации, системы машин, модульный принцип построения систем машин.

Введение

В мире потребность в древесном сырье удваивается каждые 25 лет. С середины прошлого века все больше древесины выращивается с использованием плантационного лесоводства [12, 22–36].

В Лесном кодексе Российской Федерации (РФ) записано, что лесные плантации могут создаваться на землях лесного фонда и землях иных категорий [13]. Российское лесное законодательство не содействует появлению плантационного лесовыращивания на землях лесного фонда. Например, нельзя сокращать оборот рубки даже в случае целевого выращивание быстрорастущих форм и клонов лесных культур. Лесотехнические регламенты не позволяют высаживать на землях лесного фонда породы по выбору производителя [4].

В РФ существует большое количество земель сельскохозяйственного назначения, в разное время выведенных из хозяйственного оборота, зарастающих кустарниками и малоценными породами деревьев [1]. Причем эти земли зачастую имеют развитую сеть дорог и находятся близко к потребителям древесины. Лесные плантации являются наиболее перспективным путем повышения эффективности лесного комплекса РФ наряду с разработкой и внедрением новых технологий и оборудования для заготовки и переработки древесины. Однако практически полное отсутствие лесных плантаций в стране свидетельствует о том, что требуется решить ряд законодательных, технических и технологических вопросов для создания условий, стимулирующих их появление.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в России отсутствует научно обоснованная система машин для плантационного лесоводства.

Цель исследования – разработка математической модели модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций.

Объекты и методы исследования

Существуют различные виды классификации лесных плантаций по циклам созревания (оборотам рубки) [5, 12, 20]. Ориентировочно плантации можно разделить на коротко- (менее 20 лет), средне- (20–50 лет) и длиннопериодические (более 50 лет) [11]. Энергетические плантации, которые относятся к короткоцикловым, могут быть классифицированы на мини (возраст рубки 1–3 года), миди (4–9 лет), короткие (10–15 лет), средние (16–20 лет), длинные (20–25 лет) [2].

Отсутствие в стране научно обоснованной системы машин, способной выполнять весь цикл операций, начиная с подготовки участка и посадки и заканчивая сбором урожая и очисткой плантации под новую сукцессию, является большой проблемой при оценке эффективности процесса лесопользования при плантационном лесовыращивании [5].

Существуют различные пути выбора критериев эффективности для систем машин. Один из них – анализ энергозатрат [6, 8, 21]. Ю.А. Ширниным был предложен набор сменяемых за короткое время энергетических, технологических модулей и разработана методика анализа энергозатрат при проведении лесосечных работ с использованием адаптивно-модульных систем машин. Модульная система машин рассматривается и в работах Е.М. Онучина [19].

Другой путь – экономический, критерием эффективности эксплуатации лесной плантации в этом случае, как и любого коммерческого предприятия, является прибыль – разница между затратами на производство и суммарными доходами [14].

Требуется создать систему принятия решений, позволяющую подбирать агрегаты для эксплуатации плантации лесных древесных пород таким образом, чтобы при завершении цикла выращивания иметь максимальную прибыль. Задача заключается в подборе такой технологии, которая после продажи урожая позволит получить не только средства на покрытие эксплуатационных расходов при выращивании и подготовке площади под новые посадки, но и прибыль.

Кроме того, при создании лесной плантации необходимо принятие оптимальных решений по выбору целевой породы, оборота рубки, состава и количества вносимых удобрений, технологии подготовки семян или саженцев [9, 17, 19, 20].

Для решения поставленных задач предлагается применить методы математического моделирования и оптимизации, для обоснования технологий и выбора параметров работы машин на лесопромышленных предприятиях [3, 23, 26, 31–33].

Результаты исследования и их обсуждение

Технологический цикл эксплуатации лесной плантации можно разделить на следующие этапы (см. рисунок):

первый этап – подготовка почвы участка к посадке (посеву) древесных пород, в ряде случаев предварительная расчистка площадки от пней; используемое технологическое оборудование: корчеватели, мульчеры, плуги, бороны, покровосдиратели, рыхлители, почвенные фрезы и т. д.;

второй этап – посадка (посев) древесных культур в зависимости от выбранной для целевого лесовыращивания породы используемое оборудование: посадочные машины, сеялки, катки и т. д. [15];

третий этап – уход за посадками, заключающийся в создании оптимальных условий для роста целевых древесных пород; используемое оборудование: культиваторы, машины для дополнительного внесения удобрений, машины для борьбы с вредителями древесных пород (опрыскиватели, ручные кусторезы [2, 20] и т. д.);

четвертый этап – сбор выращенного урожая, или заготовка древесины, при достижении заданного оборота рубки; в зависимости от целевого назначения и размеров выращенной древесины используемое технологическое оборудование: при выращивании конструкционной или балансовой древесины – система машин для лесосечных работ (харвестер и форвардер или валочно-пакетирующая машина, скиддер и процессор); для небольших участков и запасов – бензиномоторные пилы и харвестер или бензиномоторные пилы, харвестер и процессор на верхнем складе; при выращивании энергетической древесины (тонкомерной) – валочно-рубительно-трелевочная машина, мульчерно-трелевочная машина).

Последним этапом в технологической цепочке является очистка плантации от остатков растительности, сбор порубочных остатков, корчевка или измельчение пней, корней, рекультивация земли для передачи под другие виды пользования или возвращение к первому этапу подготовки участка под новый цикл целевого выращивания лесонасаждений.



Блок-схема цикла создания и эксплуатации лесной плантации

Flowchart for creation and operation of a forest plantation

На каждом этапе требуется выполнить определенный набор операций с помощью различных агрегатов, имеющих разные стоимость, производительность, энергоэффективность, техническую готовность [5, 7, 16, 20]. Под агрегатом будем понимать совокупность машин и оборудования, предназначенных для выполнения определенной операции. Например, машина для срезания пней агрегируется с трактором класса тяги 30 кН.

В зависимости от вида почвогрунта, засоренности и целевой породы для каждого этапа назначается состав технологических операций. Для выполнения каждой операции задается набор возможных агрегатов и оборудования.

Часть технологических операций носит сезонный характер (например, посадка), поэтому оборудование для производства этих операций простаивает длительное время. Другие операции, в соответствии с погодными условиями, могут быть востребованы большую часть года. Соответственно, может быть несколько вариантов подбора и использования машин и оборудования. Таким образом, отношения вида «технологическая операция – агрегат» имеют тип «много ко многим», т. е. одна операция может быть выполнена различными агрегатами и одна машина с установленным оборудованием может использоваться для разных операций. Например, на трактор можно устанавливать различные

виды навесного оборудования: плуги, корчеватели, машины для срезания пней, опрыскиватели, манипуляторы, мульчеры и т. д. [10, 18].

Для описания математической модели введем следующие обозначения:

n – число этапов технологического цикла эксплуатации лесной плантации;

N – множество номеров технологических операций;

N_t – множество номеров технологических операций этапа t , $N_t \subset N$, $t = 1, \dots, n$;

M – множество номеров всех возможных используемых агрегатов;

Q – множество номеров применяемых машин и оборудования (далее – оборудования);

R_{MN} – отношение, определяющее связи между технологическими операциями и выполняющими их агрегатами, $R_{MN} \subset M \times N$;

A – матрица отношения R_{MN} , состоящая из элементов a_{ij} , $i \in M, j \in N$, где $a_{ij} = 1$, если технологическая операция j может быть выполнена агрегатом i , и $a_{ij} = 0$, если не может;

R_{QM} – отношение, определяющее связи между видами оборудования и агрегатами, $R_{QM} \subset Q \times M$;

B – матрица отношения R_{QM} , состоящая из элементов b_{qi} , $q \in Q, i \in M$, где $b_{qi} = 1$, если агрегат i включает в себя оборудование q , и $b_{qi} = 0$, если не включает.

Экзогенные переменные (входные параметры модели):

S – площадь участка, га;

w_{ij} – производительность агрегата $i \in M$ при выполнении технологической операции $j \in N$, га/ч;

T_t – предельное время, отводимое на этап t , $t = 1, \dots, n$;

c_q – стоимость одной единицы оборудования $q \in Q$.

Эндогенные переменные (неизвестные модели):

x_q – число единиц оборудования типа i , используемого в технологическом цикле, $q \in Q$;

y_{ij} – логическая переменная, равная 1, если агрегат i используется для технологической операции $j \in N$, и равная 0, если не используется, $i \in M$;

z_{ij} – число агрегатов типа i , используемых для технологической операции $j \in N$, $i \in M$.

Представим постановку оптимизационной задачи.

Целевая функция – минимум расходов на оборудование:

$$\sum_{q \in Q} c_q x_q \rightarrow \min.$$

Ограничения модели следующие:

объем работ на каждом этапе должен быть полностью выполнен:

$$\sum_{i \in M} w_{ij} z_{ij} T_t \geq S, j \in N_t, t = 1, \dots, n;$$

для каждой технологической операции должен применяться только один тип агрегата:

$$\sum_{i \in M} y_{ij} = 1, j \in N;$$

все технологические операции должны быть выполнены только на предназначенном для их исполнения агрегате:

$$0 \leq y_{ij} \leq a_{ij}, i \in M, j \in N;$$

количество используемых агрегатов – целое число:

$$y_{ij} - \text{целое, } i \in M, j \in N;$$

агрегаты комплектуются только при условии их применения:

$$0 \leq z_{ij} \leq D y_{ij}, i \in M, j \in N,$$

где D – достаточно большая константа (число, которое больше, чем любое возможное значение переменной z_{ij});

число единиц оборудования зависит от числа используемых агрегатов:

$$x_q \geq b_{qij} z_{ij}, q \in Q, i \in M, j \in N.$$

Например, имеется участок – земля сельскохозяйственного назначения, выведенная из оборота относительно недавно и заросшая малоценными породами древесины. Требуется подобрать систему машин для осуществления плантационного лесоводства на данном участке.

В зависимости от состояния участка выбирается технология подготовки плантации к посадке. Бывшие земли сельскохозяйственного назначения, как правило, не засорены камнями и не требуют планировки.

Технологические операции первого этапа подготовки плантации к посадке: удаление древесной поросли, пней и корней, подготовка почвы.

Удаление лесной поросли по выбранной технологии осуществляется мульчерами. Существуют мульчеры на собственном самоходном шасси и навесные. Для навесных мульчеров определяем связи между видами оборудования и агрегатами. Получаем множество агрегатов с различными производительностью и стоимостью, которые можно использовать для данной операции. Если количество вариантов мульчеров, тракторов и экскаваторов равно 20, то множество агрегатов для мульчирования больше 50.

Удаление пней и корней по выбранной технологии производится ротаваторами. Определяем связи между видами оборудования и агрегатами. Получаем множество агрегатов для данной операции.

Подготовка почвы по выбранной технологии осуществляется плугами. На рынке достаточно много машин, имеющих различные классы тяги, и плугов, что позволяет формировать множество агрегатов для выполнения данной операции.

По такому же принципу выбирается оборудование для других этапов создания и эксплуатации лесной плантации.

На основании выбранной технологии и выбранного оборудования формируются: A – матрица отношения R_{MN} ; B – матрица отношения R_{QM} .

При решении оптимизационной задачи стоимость оборудования является ключевым параметром, но производительность и ограничение по времени не позволяют выбирать дешевое (малопроизводительное) оборудование. Модульность в свою очередь дает возможность использовать машины на разных этапах эксплуатации лесной плантации.

Представленная математическая модель предполагает, что целевая порода для лесной плантации уже задана и, соответственно, известно количество выращиваемой на участке древесины. После решения поставленной оптимизационной задачи необходимо выполнить сравнение стоимости выращенной древесины и расходов на эксплуатацию плантации.

Таким образом, представленная в статье математическая модель, конечно, не полностью учитывает все факторы создания и эксплуатации лесных плантаций, но интересна в качестве примера модульного принципа подбора системы машин и может служить основой для его дальнейшего развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / под ред. Г.А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 64 с. [*Agroecological State and Prospects for Use of Lands Withdrawn from the Active Agriculture in Russia*. Ed. by G.A. Romanenko. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2008. 64 p.].

2. Вагвелди А., Фехер Ш., Хорват Б., Коман С., Ковач Г., Сабо Л., Цупи И., Григорьев И., Григорьева О., Данилов Д., Куницкая О., Криваш Е. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций: моногр. Ужгород: МПП «Гражда», 2016. 132 с. [Vagveldi A., Fehér Sh., Horvath B., Coman S., Kovács G., Sabó L., Copi I., Grigorev I., Grigoreva O., Danilov D., Kunitskaya O., Krivas E. *Cultivation and Exploitation of Forest Plantations: Monography*. Uzhgorod, MPP “Grazhda” Publ., 2016. 132 p.].

3. Воронов Р.В., Косицын Д.П., Шабает А.И., Воронова А.М., Щеголева Л.В. Математическая модель задачи планирования многопереходного производства в лесопромышленном комплексе // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. 2013. № 4(133). С. 101–104. [Voronov R.V., Kositsyn D.P., Shabaev A.I., Voronova A.M., Shchegoleva L.V. *Mathematical Model for Multistage Production Planning in Forest Industry Complex*. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University], 2013, no. 4(133), pp. 101–104].

4. Григорьев И. Runko Group наращивает темпы производства // Леспроинформ. 2018. № 8(138). С. 94–97. [Grigorev I. Runko Group Ramps up Production. *LesPromInform*, 2018, no. 8(138), pp. 94–97].

5. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5(31). С. 438–443. [Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Werner N.N. *The Machinery for the Creation and Operation of Forest Plantations*. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2017, vol. 5, iss. 5(31), pp. 438–443].

6. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 6(69). С. 72–77. [Grigoryev I.V., Grigoryeva O.I., Nikiforova A.I., Kunitskaya O.A. *Substantiation of the Technique for the Forest Management Ecological Efficiency Estimation*. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasSAU], 2012, no. 6(69), pp. 72–77].

7. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Куницкая О.А. Технология и машины лесосечных работ: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с. [Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Kunitskaya O.A. *Technology and Machines of Logging Operations: Educational Textbook*. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2013. 132 p.].

8. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2014. Т. 19, вып. 5. С. 1499–1502. [Grigoryev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigoryeva O.I., Kunitskaya O.A. *Determination of Energy Intensity of Forest Products within Methodology for Assessing Eco-Efficiency of Forest Management*. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, iss. 5, pp. 1499–1502].

9. Григорьева О.И. Влияние сильных разреживаний и удобрений на компоненты лесной экосистемы // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск: БГИТА, 2006. № 13. С. 157–160. [Grigoreva O.I. *The Influence of Strong Thinning out and Fertilizers on the Unites of the Forest Ecosystem*. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 13, pp. 157–160].

10. Григорьева О.И. Новая машина для проведения рубок ухода за лесом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2(13-2). С. 116–119. [Grigoreva O.I. *A New Machine for Carrying out the Thinning of the Forest*. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2015, vol. 3, no. 2-2(13-2), pp. 116–119]. DOI: [10.12737/11046](https://doi.org/10.12737/11046)

11. Желдак В.И. Лесные плантации в системе лесоводства // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 3(35). С. 5–25. [Zheldak V.I. Forest Plantations in Forestry System. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2017, no. 3(35), pp. 5–25]. DOI: [10.15350/2306-2827.2017.3.5](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.3.5)
12. Коман С., Молнар Ш., Сабов В.В. Исследование свойств древесины тополя, ее роль и использование // Леса России в XXI веке: материалы третьей междунар. науч.-практ. интернет-конф. СПб.: СПбГЛТА. 2010. С. 11–16. [Koman S., Molnar Sh., Sabov V.V. The Study of Poplar Wood Properties, Its Role and Use. *Forests of Russia in the 21st Century: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2010, pp. 11–16].
13. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 03.08.2018). Доступ из справю-правовой системы «Консультант-Плюс» [Forest Code of the Russian Federation: Federal Law of December 04, 2006 No. 200-FZ]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
14. Макуев В.А. Научно-методологические основы формирования парка лесосечных машин предприятия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 384 с. [Makuyev V.A. *Scientific and Methodological Foundations for the Formation of the Logging Machines Park of an Enterprise: Dr. Eng. Sci. Diss.* Moscow, 2010. 317 p.].
15. Марков О.Б. Обоснование параметров рычажно-кулачкового механизма динамического лункообразователя для посадки лесных культур: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 163 с. [Markov O.B. *Substantiation of the Parameters of the Cam-and-Lever Arrangement of a Dynamic Dredger for Planting Forest Crops: Cand. Eng. Sci. Diss.* Petrozavodsk, 2006. 163 p.].
16. Марковский А.В., Родионов А.В. Рубки ухода в молодняках: как построить лесохозяйственное предприятие: практ. руководство ООО «Лесная территория». М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2018. 51 с. [Markovskiy A.V., Rodionov A.V. *Improvement Thinning in Young Stands: How to Build a Forestry Enterprise: A Practical Guidance*. Moscow, WWF Russia Publ., 2018. 51 p.].
17. Мартынов А.Н., Беляева Н.В., Григорьева О.И. Современные проблемы лесовыращивания. Химический и комплексный уход за лесом: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 79 с. [Martynov A.N., Belyayeva N.V., Grigoreva O.I. *Modern Issues of Forest Cultivation. Chemical and Integrated Care of Forest: Educational Textbook*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 79 p.].
18. Мохирев А.П., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Войнаш С.А. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах // Строительные и дорожные машины. 2018. № 6. С. 43–49. [Mokhirev A.P., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Vainas S.A. Improving the Design of Full Revolving Logging Machines on Excavating Bases. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and Road Building Machinery], 2018, no. 6, pp. 43–49].
19. Онучин Е.М. Перспективный комплекс лесных машин // Науч. журн. КубГАУ. 2013. № 91(07). С. 621–632. [Onuchin E.M. Forecast Center Forest Machine. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 91(07), pp. 621–632].
20. Титов Е.В. Плантационное лесоводство: учеб. пособие. Воронеж: ВГЛТА, 2012. 101 с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/4078?category_pk=945 (дата обращения: 20.12.2018). [Titov E.V. *Plantation Forestry: Educational Textbook*. Voronezh, VGLTA Publ., 2012. 101 p.].
21. Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю. Моделирование энергозатрат адаптивно-модульных систем машин при комбинированной трелевке древесины // Вестн. МГУЛ.–Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 166–175. [Shirnin Yu.A., Shirnin A.Yu. Simulation of Energy Consumption of Adaptive Modular Systems of Machines in Combined Skidding of Wood. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 3, pp. 166–175].

22. Bemann A., Knust C. *AGROWOOD. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Berlin, Weißensee, 2010. 340 S.
23. Borges J.G., Diaz-Balteiro L., McDill M.E., Rodriguez L.C.E. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2016. 543 p.
24. Borovics A. Energetikai célú nyárfatermesztés. *Erdészeti lapok cxlii*. 2007, Évf. 4, pp. 110–113.
25. Czupy I., Vágvölgyi A., Horváth B. The Biomass Production and Its Technical Background in Hungary. *Proceedings of 45th International Symposium on Forestry Mechanisation: "Forest Engineering: Concern, Knowledge and Accountability in Today's Environment"*, Dubrovnik, Croatia, October 8–12, 2012. Dubrovnik, Croatia, FORMEC, 2012, pp. 1–9. DOI: [10.13140/2.1.4711.5207](https://doi.org/10.13140/2.1.4711.5207)
26. Diaz-Balteiro L., Romero C., Rodriguez L.C. E., Nobre S.R., Borges J.G. Economics and Management of Industrial Forest Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 121–170. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_5)
27. Evans J., Turnbull J.W. *Plantation Forestry in the Tropics: The Role, Silviculture, and Use of Planted Forests for Industrial, Social, Environmental, and Agroforestry Purposes*. Oxford, Oxford University Press, 2004. 488 p.
28. Fiala M., Bacenetti J. Economic, Energetic and Environmental Impact in Short Rotation Coppice Harvesting Operations. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 42, pp. 107–113. DOI: [10.1016/j.biombioe.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.004)
29. Hansen E.A. Poplar Woody Biomass Yields: A Look to the Future. *Biomass and Bioenergy*, 1991, vol. 1, iss. 1, pp. 1–7. DOI: [10.1016/0961-9534\(91\)90046-F](https://doi.org/10.1016/0961-9534(91)90046-F)
30. Horváth Z., Marosvölgyi B., Idler C., Pecenká R., Lenz H. Storage Problems of Poplar Chips from Short Rotation Plantations with Special Emphasis on Fungal Development. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2012, vol. 8, iss. 1, pp. 123–132. DOI: [10.2478/v10303-012-0010-7](https://doi.org/10.2478/v10303-012-0010-7)
31. Karlsson J., Rönnqvist M., Bergström J. An Optimization Model for Annual Harvest Planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 8, pp. 1747–1754. DOI: [10.1139/x04-043](https://doi.org/10.1139/x04-043)
32. McDill M.E. An Overview of Forest Management Planning and Information Management. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 27–59. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_2)
33. Murach D., Murn Y., Hartmann H. Ertragsermittlung und Potenziale von Agrarholz. *Forst und Holz*, 2008, vol. 6, pp. 18–23.
34. Rodriguez L.C.E., Pasalodos-Tato M., Diaz-Balteiro L., McTague J.P. The Importance of Industrial Forest Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 3–26. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_1](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_1)
35. Sargent C., Bass S. *Plantation Politics: Forest Plantations in Development*. London, Routledge, 2013. 196 p. DOI: [10.4324/9781315066882](https://doi.org/10.4324/9781315066882)
36. Weiskittel A.R. Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 61–90. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_3)

MATHEMATICAL MODEL OF THE MODULAR APPROACH FOR SELECTION OF A SYSTEM OF MACHINES FOR CREATION AND OPERATION OF FOREST PLANTATIONS

R.V. Voronov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [D-7841-2014](https://orcid.org/0000-0003-0104-6409),
ORCID: [0000-0003-0104-6409](https://orcid.org/0000-0003-0104-6409)

O.B. Markov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-2467-9607](https://orcid.org/0000-0002-2467-9607)

I.V. Grigorev², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),
ORCID: [0000-0002-5574-1725](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725)

A.B. Davtyan³, Postgraduate Student; ORCID: [0000-0002-4175-7996](https://orcid.org/0000-0002-4175-7996)

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: rvoronov@petrsu.ru, markovob@yandex.ru

²Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3, 3 km, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru

³Bratsk State University, ul. Makarenko, 40, Bratsk, Irkutsk region, 665709, Russian Federation; e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru

Forest plantations have been successfully established and operated in many countries since the middle of the past century. More than 50 % of all harvested and processed wood in the world are the products of targeted forest cultivation grown on forest plantations. At the same time, in the Russian Federation, lumber enterprises are running out of raw materials as a result of long-term ongoing extensive forest management in spite of huge forest reserves and hardly full use of the annual cut. The cost of wood raw materials is constantly rising, which is due to an increase in rates for standing timber, expenses for operation and maintenance of forest machines of foreign production, and stronger dollar and euro. First of all, the beginning pressure for raw materials of lumber enterprises and rise in the cost of wood raw materials are driven by the gradual exhaustion of available operational mature forests. Herewith, the average distance of removal of wood harvested in natural forests is constantly increasing; the costs for creation and operation of logging roads has increased year on year; and a long cutting period, especially of coniferous wood, worsens the unfolding situation. One of the problems that currently prevents the effective development of forest plantations is the lack of a scientifically grounded system of machines in our country, capable of performing the entire operation cycle from planting (sowing) of woody plants to wood harvesting and preparing the territory for a new succession. It is evident that this system of machines should be based on the modular approach for its construction, include a probable minimum of machines and mechanisms, have a high coefficient of mechanical availability and low operating costs per unit. The article presents a mathematical model based on the modular approach for constructing systems of machines for forest plantations.

For citation: Voronov R.V., Markov O.B., Grigorev I.V., Davtyan A.B. Mathematical Model of the Modular Approach for Selection of a System of Machines for Creation and Operation of Forest Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 125–134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

Keywords: forest plantations, systems of machines, modular approach for construction of systems of machines.

Поступила 21.01.19 / Received on January 21, 2019
