УДК 630 DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-78-83

Системный анализ в оценке технико-экономических показателей комплексов лесосечных машин

Е.В. Котенев[1a], В.А. Иванов[2b], М.В. Степанищева[2c], До Туан Ань[1d]

[1]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия
[2] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[a]kotenew@bk.ru,[b]ivanovva55@mail.ru,[c]marina01031977@inbox.ru, [d]anhmsi@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-1952-0933, [b]https://orcid.org/0000-0003-4833-7772,
[c]https://orcid.org/0000-0003-4867-3901
Статья поступила 8.02.2018, принята 24.05.2018

В статье рассмотрены вопросы оценки норм выработки и удельной энергоемкости заготовки древесины по сортиментной технологии с использованием 12-ти комплексов машин и механизмов. Результаты анализа расчетных данных показывают, что наилучшие показатели с точки зрения сменной нормы выработки — у комплекса на основе валочно-пакетирующей машины (на уровне 150–200 м^3 в смену), наихудшие — у комплекса на основе валочно-трелевочной машины (30–50 м^3 в смену, что сравнимо с заготовкой с использованием бензомоторных пил). Во всех рассмотренных случаях норма выработки выражается степенной зависимостью от среднего объема хлыста. Оценка энергоемкости заготовки показала, что продукция наиболее энергоемка при использовании комплекса на базе валочно-трелевочной машины (на уровне 120–200 МДж/м^3, наихудший показатель среди 12-ти рассмотренных комплексов), наименьшая энергоемкость отмечается при использовании комплекса на базе харвестера и форвардера (на уровне 50–70 МДж/м^3, наилучший показатель). Зависимости энергоемкости от среднего объема хлыста имеют степенной характер. По результатам расчетов установлено, что самая низкая оценка себестоимости заготовки получена для комплекса с использованием бензомоторных пил, самые высокие затраты — у комплекса на базе валочно-трелевочной машины. Во всех случаях себестоимость заготовки зависит от среднего объема хлыста, снижаясь по мере его роста(закономерность имеет степенной характер). Показано, что чем больший объем древесины заготавливается в год, тем меньше ее себестоимость. Тенденция сохраняется до, ориентировочно, 200 тыс. м^3 в год.

Ключевые слова: норма выработки; удельная энергоемкость; себестоимость заготовки; сортиментная технология.

System analysis in estimation of technical and economic indicators of logging complexes

E.V. Kotenev[1a], V.A. Ivanov[2b], M.V. Stepanishcheva[2c], Do Tuan Anh[1d]

[1]St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[2]Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]kotenew@bk.ru,[b]ivanovva55@mail.ru,[c]marina01031977@inbox.ru, [d]anhmsi@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-1952-0933, [b]https://orcid.org/0000-0003-4833-7772,
[c]https://orcid.org/0000-0003-4867-3901
Received 8.02.2018, accepted 24.05.2018

The article deals with the assessment of production rates and specific energy consumption of wood harvesting using the assortment technology using 12 complexes of machines and mechanisms. Basing on the results of calculated data analysis, the paper shows that the best indicators in terms of productivity rate appear for complex of machines based on a feller-buncher machine (at a level of 150-200 m^3 per shift), the worst ones - at a complex based on a felling-skidding machine (30-50 m^3 per shift, which is comparable to using chainsaws). In all the cases considered, the productivity rate is expressed by a power-law dependence on the average trunk volume. An estimate of the energy consumption shows that the output is the most energy-intensive when using the complex based on a felling-skidding machine (at the level of 120-200 MJ / m^3, the worst indicator among the 12 complexes examined), the lowest energy consumption is noted when using a harvester-forwarder complex (50-70 MJ / m^3, the best rate). Dependences of energy consumption on the average volume of the trunk are of a power nature. According to the results of the calculations, it was established that the lowest estimate of the cost of preparation was obtained for the complex using gasoline saws, the highest costs were found for the complex using a felling-skidding machine. In all the cases, the cost price of harvesting depends on the average trunk volume, decreasing as it grows (the regularity has a power-law character). It is shown that the greater the volume of wood harvested per year, the lower its cost. The trend persists to approximately 200 000 m^3 per year.

Keywords: production rate; specific energy consumption; prime cost of harvesting; assortment technology.

Введение

Лесосечные работы включают в себя несколько операций, таких как валка, трелевка, очистка деревьев от сучьев, раскряжевка, выполняемых различными машинами и механизмами [1–8]. Состав, место и способ выполнения операций зависят от принятого технологического процесса. Показатели работы отдельных машин и механизмов, а также их комплексов зависят от параметров предмета труда, природно-производственных условий, характеристик техники и квалификации персонала [1;6–8]. Очевидно, что лесозаготовительное предприятие является сложной системой, состоящей из множества элементов. Эффективность функционирования такой системы, оцениваемая радом показателей (производительность, экологичность, себестоимость заготовки древесины и др.) определяется множеством входных параметров [2–8]. Отмечено, что системный анализ является эффективным инструментом оценки деятельности лесозаготовительного предприятия. Выводы, получаемые с его использованием, помогают рационально организовать производственный процесс, спланировать развитие и повысить эффективность деятельности предприятия за счет обоснованного проектирования технологического процесса [2–8].С этим утверждением согласны и зарубежные исследователи [9–17]. К настоящему времени применение системного подхода в исследовании лесосечных работ является развивающейся областью знания, требуется дальнейшая проработка и совершенствование математических моделей, предназначенных для исследования технико-экономических показателей заготовки древесины.

Цель настоящей работы— проанализировать производительности комплексов машин и механизмов сортиментной заготовки древесины, выявить взаимосвязи между энергоемкостью и себестоимостью заготовки древесины различными системами машин и механизмов.

Материалы и методы исследования— справочная информация, методы аппроксимации численных данных, системный анализ.

Результаты исследования. Известно, что производительность комплекса машин или механизмов, выполняющих лесосечные работы, рассчитывается по формуле [7, 8]:

$$\frac{1}{П}=\frac{1}{П_1}+\frac{1}{П_2}+...\frac{1}{П_N}\ , \tag{1}$$

где $П$—производительность(нижний индекс относится к порядковому номеру машины или механизма, N— число машин или механизмов, работающих в комплексе и выполняющих отдельные операции лесосечных работ).

Выполнив алгебраические преобразования, получим формулы расчета производительности комплексов, объединяющих две, три или четыре машины или механизма:

$$П=\frac{П_1П_2}{П_1+П_2} \tag{2}$$

$$П=\frac{П_1П_2П_3}{П_1П_2+П_1П_3+П_2П_3} \tag{3}$$

$$П=\frac{П_1П_2П_3П_4}{П_1П_2П_3+П_1П_2П_4+П_1П_3П_4+П_2П_3П_4}\ . \tag{4}$$

Аналогично получаются и формулы для более сложных систем.

Производительности машин и механизмов по отдельным операциям рассчитываются с использованием специальных методик, показатели зависят от параметров предмета труда, природно-производственных условий, включая характеристики машин и механизмов. На настоящем этапе исследования будем ориентироваться на справочные величины —нормы выработки, дающие общее представление о производительности. Как правило, нормы выработки приводятся в литературе в форме таблиц, причем основным параметром, характеризующим предмет труда, является средний объем хлыста; для операции трелевки добавляют среднее расстояние трелевки [1]. Автоматизированный расчет удобнее вести с использованием аналитических выражений, а не табличных данных, в связи с чем была выполнена обработка справочной информации [1], результаты которой позволили получить приближенные зависимости сменных норм выработки по отдельным операциям от среднего объема хлыста V_X и среднего расстояния трелевки l. Формулы представлены линейными, степенными и логарифмическими функциями. Для валки бензомоторной пилой:

$$П=38{,}66\ln V_X+111{,}32\ , \tag{5}$$

для валки и обрезки сучьев бензомоторной пилой на лесосеке:

$$П=50V_X+7{,}25\ , \tag{6}$$

для валки, обрезки сучьев и раскряжевки бензомоторной пилой на лесосеке:

$$П=35V_X+5{,}07\ , \tag{7}$$

для раскряжевки бензомоторной пилой на верхнем складе:

$$П=71{,}39V_X{}^{0,42}\ , \tag{8}$$

для обрезки сучьев и раскряжевки бензомоторной пилой на верхнем складе:

$$П=57{,}11V_X{}^{0,42}\ , \tag{9}$$

для валки и формирования пачек деревьев валочно-пакетирующей машиной:

$$П=117{,}9\ln V_X+337{,}3\ , \tag{10}$$

для валки, обрезки сучьев и раскряжевки харвестером:

$$П=305{,}95V_X{}^{0,8}\ , \tag{11}$$

для валки и трелевки валочно-трелевочной машиной:

$$П=150V_X{}^{0,47}l^{-0,08}\ , \tag{12}$$

для трелевки чокерным трелевочным трактором:

$$П = 210 V_X^{0,31} l^{-0,18} \ , \qquad (13)$$

для трелевки бесчокерным трелевочным трактором:

$$П = 254,75 V_X^{0,43} l^{-0,17} \ , \qquad (14)$$

для трелевки пачек деревьев трактором с пачковым захватом:

$$П = 742,7 V_X^{0,26} l^{-0,26} \ , \qquad (15)$$

для трелевки форвардером:

$$П = 1174,3 l_X^{-0,425} \ , \qquad (16)$$

для обрезки сучьев и раскряжевки сучкорезно-раскряжевочной машиной (процессором):

$$П = 65,57 \ln V_X + 196,68 \ . \qquad (17)$$

Определив возможные сочетания машин, механизмов и операций и подставив выражения для норм выработки по формулам (5) – (17) в уравнения (2) – (4), получим зависимости для расчета норм выработки комплексов. Анализ расчетных данных показал, что формулы можно аппроксимировать степенными зависимостями без существенной потери точности.

Например, сменная норма выработки комплекса машин и механизмов «Валка бензомоторной пилой, трелевка чокерным трактором, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе» (далее — комплекс № 1) определяется степенной зависимостью:

$$П = 101,05 V_X^{0,45} l^{-0,05} \ . \qquad (18)$$

Далее перечислим состав операций и тип машин или механизмов, задействованных при их выполнении, сопроводив приближенными формулами для расчета сменной нормы выработки.

Валка бензомоторной пилой, трелевка бесчокерным трактором, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе (комплекс № 2):

$$П = 102,26 V_X^{0,48} l^{-0,04} \ . \qquad (19)$$

Валка и обрезка сучьев бензомоторной пилой, трелевка чокерным трактором, раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе (комплекс № 3):

$$П = 89,88 V_X^{0,53} l^{-0,05} \ . \qquad (20)$$

Валка и обрезка сучьев бензомоторной пилой, трелевка бесчокерным трактором, раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе (комплекс № 4):

$$П = 90,65 V_X^{0,57} l^{-0,04} \ . \qquad (21)$$

Валка, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой, трелевка сортиментов форвардером (комплекс № 5):

$$П = 106,81 V_X^{0,61} l^{-0,11} \ . \qquad (22)$$

Валка бензомоторной пилой, трелевка чокерным трактором, обрезка сучьев и раскряжевка процессором на верхнем складе (комплекс № 6):

$$П = 167,06 V_X^{0,48} l^{-0,08} \ . \qquad (23)$$

Валка бензомоторной пилой, трелевка бесчокерным трактором, обрезка сучьев и раскряжевка процессором на верхнем складе (комплекс № 7):

$$П = 172,26 V_X^{0,52} l^{-0,07} \ . \qquad (24)$$

Валка и формирование пакетов валочно-пакетирующей машиной, трелевка трактором с пачковым захватом, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе (комплекс № 8):

$$П = 149,78 V_X^{0,42} l^{-0,05} \ . \qquad (25)$$

Валка и формирование пакетов валочно-пакетирующей машиной, трелевка трактором с пачковым захватом, обрезка сучьев и раскряжевка процессором на верхнем складе (комплекс № 9):

$$П = 358,23 V_X^{0,47} l^{-0,10} \ . \qquad (26)$$

Валка и трелевка валочно-трелевочной машиной, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе (комплекс № 10):

$$П = 54,29 V_X^{0,45} l^{-0,05} \ . \qquad (27)$$

Валка и трелевка валочно-трелевочной машиной, обрезка сучьев и раскряжевка процессором на верхнем складе (комплекс № 11):

$$П = 79,70 V_X^{0,48} l^{-0,07} \ . \qquad (28)$$

Валка, обрезка сучьев и раскряжевка харвестером, трелевка сортиментов форвардером (комплекс № 12):

$$П = 762,62 V_X^{0,40} l^{-0,29} \ . \qquad (29)$$

Кроме того, при известных нормах расхода топлива на смену можем оценить удельную энергоемкость заготовки 1 м^3 древесины, для чего воспользуемся формулой [18–20]:

$$W = \frac{Q_1 + Q_2 + ... + Q_n}{П} \ , \qquad (30)$$

где Q_i—теплота сгорания топлива, израсходованного i-й машиной или механизмом за смену.

Подставив поочередно выражения (18) – (29) в формулу (30), приняв нормы расхода топлива по [1] и аппроксимировав результаты расчета, получим для комплекса № 1:

$$W = 42,59 V_X^{-0,45} l^{0,05} \ , \qquad (31)$$

для комплекса № 2:

$$W = 48,34 V_X^{-0,48} l^{0,04} \ , \qquad (32)$$

для комплекса № 3:

$$W = 47,87 V_X^{-0,53} l^{0,05} \ , \qquad (33)$$

для комплекса № 4:

$$W = 54,53 V_X^{-0,57} l^{0,04} \ , \qquad (34)$$

для комплекса № 5:

$$W = 26{,}52 V_X^{-0{,}61} l^{0{,}11}, \qquad (35)$$

для комплекса № 6:

$$W = 44{,}52 V_X^{-0{,}48} l^{0{,}08}, \qquad (36)$$

для комплекса № 7:

$$W = 46{,}89 V_X^{-0{,}52} l^{0{,}07}, \qquad (37)$$

для комплекса № 8:

$$W = 56{,}58 V_X^{-0{,}42} l^{0{,}05}, \qquad (38)$$

для комплекса № 9:

$$W = 32{,}41 V_X^{-0{,}47} l^{0{,}10}, \qquad (39)$$

для комплекса № 10:

$$W = 82{,}41 V_X^{-0{,}45} l^{0{,}05}, \qquad (40)$$

для комплекса № 11:

$$W = 95{,}47 V_X^{-0{,}48} l^{0{,}07}, \qquad (41)$$

для комплекса № 12:

$$W = 8{,}65 V_X^{-0{,}40} l^{0{,}29}. \qquad (42)$$

На рис. 1 и 2 представлены графики, иллюстрирующие нормы выработки в смену и удельные энергоемкости заготовки древесины с использованием комплексов машин №1 (валка бензомоторной пилой, трелевка чокерным трактором, обрезка сучьев и раскряжевка бензомоторной пилой на верхнем складе), № 9 (валка при помощи валочно-пакетирующей машины, трелевка трактором с пачковым захватом, обрезка сучьев и раскряжевка процессором), № 11 (валка и трелевка при помощи валочно-трелевочной машины, обрезка сучьев и раскряжевка процессором на верхнем складе), № 12 (валка и обрезка сучьев харвестером, трелевка сортиментов форвардером). Расчеты выполнены при среднем расстоянии трелевки 300 м.

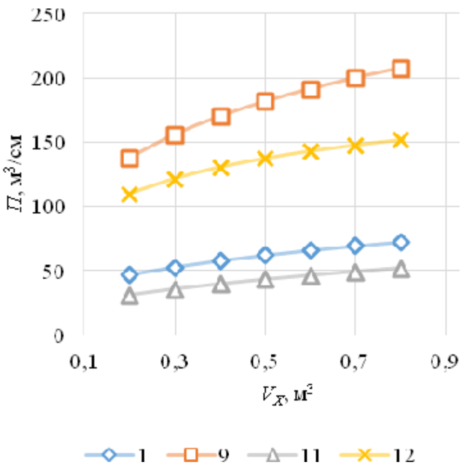

Рис. 1. Оценка сменной нормы выработки комплексов машин № 1, 9, 11, 12

Анализ данных показывает, что наилучшие показатели с точки зрения сменной нормы выработки — у комплекса машин № 9 на основе валочно-пакетирующей машины, на уровне 150–200 м³ в смену, наихудшие — у комплекса № 11 на основе валочно-трелевочной машины — 30–50 м³ в смену, что сравнимо с комплексом № 1, где заготовка осуществляется с использованием бензомоторных пил. Значения сменных норм выработки для комплексов № 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 находятся между значениями для комплексов № 1 и 11. Отметим, что во всех рассмотренных случаях норма выработки выражается степенной зависимостью от среднего объема хлыста.

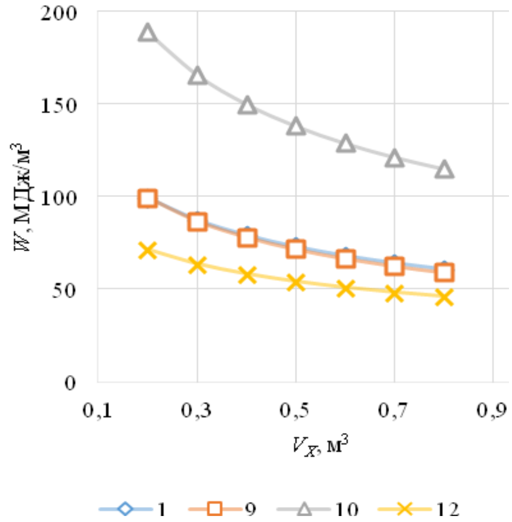

Рис. 2. Оценка удельной энергоемкости заготовки древесины с использованием комплексов машин № 1, 9, 11, 12

Оценка энергоемкости заготовки показала, что продукция наиболее энергоемка при использовании комплекса № 11 — на уровне 120–200 МДж/м³ (наихудший показатель среди 12-ти рассмотренных комплексов), наименьшая энергоемкость отмечается при использовании комплекса № 12 на базе харвестера и форвардера — на уровне 50–70 МДж/м³ (наилучший показатель). Зависимости энергоемкости от среднего объема хлыста имеют степенной характер.

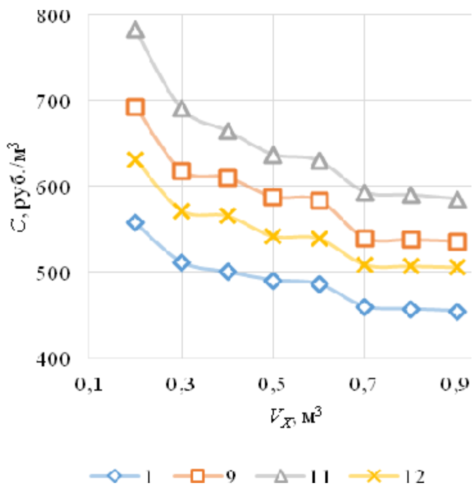

Рис. 3. Оценка себестоимости заготовки древесины с использованием комплексов машин № 1, 9, 11, 12

На базе методики [1; 7; 8] выполнен расчет ориентировочной себестоимости заготовки древесины с использованием различных комплексов машин и механизмов. Для расчета составлена автоматизированная форма в среде MS-Excel. Показатели являются ориентировочными, поскольку переменные затраты на закупку горюче-смазочных материалов, оплату труда, текущий ремонт и обслуживание техники, плата за древесину на корню сильно зависят от конъюнктуры рынка, нашей же целью являлось выявить характер зависимостей и сравнить показатели работы комплексов между собой качественно.

По результатам расчетов отметим, что самая низкая оценка себестоимости заготовки получена для комплекса № 1 (заготовка с использованием бензомоторных пил) — на уровне 450–550 р. за 1 м^3, самые высокие затраты — у комплекса № 11, на уровне 600–800 р. Во всех случаях себестоимость заготовки зависит от среднего объема хлыста, снижаясь по мере его роста (закономерность имеет степенной характер).

Графики на рис. 4 дают общее представление о влиянии годового объема заготовки на себестоимость при использовании различных комплексов машин и механизмов.

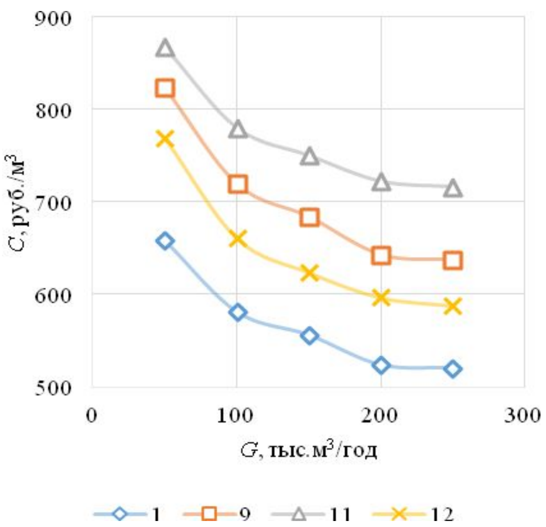

Рис. 4. Влияние годового объема на себестоимость заготовки древесины с использованием комплексов машин № 1, 9, 11, 12

Расчетные данные показывают, что чем больший объем древесины заготавливается в год, тем меньше ее себестоимость. Тенденция сохраняется до, ориентировочно, 200 тыс. м^3 в год. Это связано с тем, что затраты на организацию лесосечных работ складываются из постоянных и переменных составляющих. При увеличении объема продукции роль постоянных затрат снижается, что снижает и себестоимость заготовки древесины.

Заключение

Еще раз отметим, что расчеты носят приближенный характер, однако дают наглядное представление о взаимосвязях проанализированных показателей. Можем заключить, что системный анализ позволяет эффективно исследовать технологические процессы лесосечных работ и является перспективным методом поиска направлений совершенствования и повышения эффективности деятельности лесозаготовительных предприятий.

На наш взгляд, в дальнейшем следует развивать математические модели для расчета производительности комплексов машин и механизмов, что позволит детально анализировать показатели технологических процессов лесосечных работ в зависимости от природно-производственных условий, динамики переменных факторов. Также считаем перспективной разработку баз данных по машинам и механизмам лесосечных работ. В сумме результаты позволят формировать гибкие системы поддержки принятия решений, позволяющие на практике подбирать и обосновывать наиболее выгодные варианты организации лесосечных работ.

Литература

1. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Кунцкая О.А. Технология и машины лесосечных работ. СПб.: ЛТУ, 2013. 132 с.

2. Базаров С.М., Патякин В.И., Соловьев А.Н., Иванов В.А., Степанищева М.В. Системный подход к анализу работы комплексов механизмов и машин лесозаготовительного производства // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 1 (17). С. 92-94.

3. Базаров С.М., Соловьев А.Н. Системный анализ технологической скорости процесса производства хлыстов комплексом лесных машин и механизмов // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2014. № 3. С. 189-194.

4. Базаров С.М., Иванов В.А., Соловьев А.Н., Степанищева М.В. Системный подход к анализу эффективности производства хлыстов на лесосеке комплексом машин и механизмов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 163-168.

5. Базаров С.М., Соловьев А.Н. Анализ критериев эффективности систем механизмов и машин лесозаготовительного производства // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2014. № 206. С. 100-106.

6. Базаров С.М., Соловьев А.Н. Анализ технологической скорости производства круглого леса системой механизмов и машин // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2014. № 208. С. 103-110.

7. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Соловьев А.Н. Основы системного анализа технико-экономической эффективности процессов лесопромышленного производства // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. № 216. С. 112-122.

8. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Соловьев А.Н. Основы системного анализа технико-экономической эффективности многоступенчатых процессов // Научное обозрение. 2009. № 8. С. 90-97.

9. Badilla-Veliz F., Watson J.-P., Weintraub A., Wets R.J.-B., Woodruff D.L. Stochastic optimization models in forest planning: A progressive hedging solution approach. Annals of Operations Research, 2014. doi: 10.1007/s10479-014-1608-4.

10. Martell D.L., Gunn E.A., Weintraub A. Forest management challenges for operational researchers // European Journal of Operational Research. 1998. № 104 (1). P. 1–17.

11. Steiguer J.E., Liberti L., Schuler A., Hansen B. Multi-criteria decision models for forestry and natural resources management: An annotated bibliography // USDA Forest Service GTR-NE-307, Northeastern Experiment Station, Newton Square, PA. 2003.

12. Gordon S.N., Johnson K.N., Reynolds K.M., Crist P., Brown N. Decision support systems for forest biodiversity evaluation of current systems and future needs // Final Report-Project A-10, National Commission on Science and Sustainable Forestry. 2004.

13. Martell D. L. Fifty years of OR in forestry preface to the special forestry issue of INFOR. INFOR: Informational systems and Operational Research. 2007. № 45 (1). P. 5–7.

14. Martell D.L. Forest fire management: Current practices and new challenges for operational researchers // Handbook of operations research in natural resources // International series in operations research and management science. New York: Springer. 2007.Vol. 99. P. 489–509.

15. Martell D.L. The development and implementation of forest fire management decision support systems in Ontario, CA: Personal reflections on past practices and emerging challenges // Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences. 2009. № 3 (1). P. 18–26.

16. Weintraub A., Romero C. Operations research models and the management of agricultural and forestry resources // Interfaces. 2006. № 36 (5). P. 446–457.

17. Weintraub A., Bare B.B. New issues in forest land management from an operations research perspective // Interfaces. 1996. № 26(5). 9–25.

18. 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. Тамб. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014 b. Т. 19, № 5. С. 1499-1502.

19. Песков В.Б., Божбов В.Е., Котенев Е.В. Оценка экологичности комплексов машин и механизмов сортиментной заготовки древесины по энергоемкости продукции // Роль науки в развитии социума: теоретические и практические аспекты: сб. науч. ст. по итогам междунар. науч.-практической конф. 2018. С. 217-220.

20. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014 a. P. 407-414.

References

1. Grigor'ev I.V., Tihonov I.I., Kunckaya O.A. Technology and machinery of logging operations. SPb.: LTU, 2013. 132 p.

2. Bazarov S.M., Patyakin V.I., Solov'ev A.N., Ivanov V.A., Stepanishcheva M.V. Systems approach to the operational analysis of logging mechanisms and machinery // Systems Methods Technologies. 2013. № 1 (17). P. 92-94.

3. Bazarov S.M., Solov'ev A.N. System analysis of the process technological speed of whip production by forest machine and mechanism complex // The Bulletin of KrasGAU. 2014. № 3. P. 189-194.

4. Bazarov S.M., Ivanov V.A., Solov'ev A.N., Stepanishcheva M.V. Systemic approach to effectiveness analysis of long-tailed timber production with teams of machines and mechanisms in the cuttingarea // Systems Methods Technologies. 2014. № 2 (22). P. 163-168.

5. Bazarov S.M., Solov'ev A.N. Analysis of criteria of efficiency of systems of mechanisms and cars of logging production // Izvestia SPbLTA. 2014. № 206. P. 100-106.

6. Bazarov S.M., Solov'ev A.N. Analysis of the technological production speed roundwood system of mechanisms and machines // Izvestia SPbLTA. 2014. № 208. P. 103-110.

7. Bazarov S.M., Belen'kij YU.I., Solov'ev A.N. Fundamentals of analysis technical and economic efficiency process timber production // Izvestia SPbLTA. 2016. № 216. P. 112-122.

8. Bazarov S.M., Belen'kij YU.I., Solov'ev A.N. Fundamentals of analysis technical and economic efficiency multi-stage processes // Science Review. 2009. № 8. P. 90-97.

9. Badilla-Veliz F., Watson J.-P., Weintraub A., Wets R.J.-B., Woodruff D.L. Stochastic optimization models in forest planning: A progressive hedging solution approach. Annals of Operations Research, 2014. doi: 10.1007/s10479-014-1608-4.

10. Martell D.L., Gunn E.A., Weintraub A. Forest management challenges for operational researchers // European Journal of Operational Research. 1998. № 104 (1). P. 1-17.

11. Steiguer J.E., Liberti L., Schuler A., Hansen B. Multicriteria decision models for forestry and natural resources management: An annotated bibliography // USDA Forest Service GTR-NE-307, Northeastern Experiment Station, Newton Square, PA. 2003.

12. Gordon S.N., Johnson K.N., Reynolds K.M., Crist P., Brown N. Decision support systems for forest biodiversity evaluation of current systems and future needs // Final Report-Project A-10, National Commission on Science and Sustainable Forestry. 2004.

13. Martell D. L. Fifty years of OR in forestry preface to the special forestry issue of INFOR. INFOR: Informational systems and Operational Research. 2007. № 45 (1). P. 5-7.

14. Martell D.L. Forest fire management: Current practices and new challenges for operational researchers // Handbook of operations research in natural resources // International series in operations research and management science. New York: Springer. 2007. Vol. 99. P. 489-509.

15. Martell D.L. The development and implementation of forest fire management decision support systems in Ontario, CA: Personal reflections on past practices and emerging challenges // Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences. 2009. № 3 (1). P. 18-26.

16. Weintraub A., Romero C. Operations research models and the management of agricultural and forestry resources // Interfaces. 2006. № 36 (5). P. 446-457.

17. Weintraub A., Bare B.B. New issues in forest land management from an operations research perspective // Interfaces. 1996. № 26 (5). 9-25.

18. Grigor'ev I.V., Hitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunickaya O.A. Determination of energy intensity of forest products within methodology for assessing eco-efficiency of forest management// Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2014 b. T. 19, № 5. P. 1499-1502.

19. Peskov V.B., Bozhbov V.E., Kotenev E.V. Assessment of environmental friendliness of machines and mechanisms of assorted wood harvesting according to the energy intensity of products // Rol' nauki v razvitii sociuma: teoreticheskie i prakticheskie aspekty: sb. nauch. st. po itogam mezhdunar. nauch.-prakticheskoj konf. 2018. P. 217-220.

20. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014 a. P. 407-414.