



УДК 630\*2(075.8)+630\*8765

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ\***© *В.С. Петровский, д-р техн. наук, проф.**В.В. Малышев, канд. с.-х. наук, доц.*

Воронежская государственная лесотехническая академия, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: appvgta@bk.ru

В процессе формирования лесных насаждений основная роль принадлежит рубкам ухода за лесом, которые позволяют получить насаждения заданного качества, повысить продуктивность и устойчивость лесных насаждений. Предложена целевая функция повышения продуктивности сосновых древостоев, максимизирующая выход стволовой древесины с 1 га за год лесовыращивания со снижением возраста технической спелости насаждений. Оптимизация периодичности и интенсивности рубок ухода за лесом позволит на практике проводить своевременные рубки, не допуская перегущенности насаждений, и формировать древостои с оптимальной площадью питания каждого дерева. Управление рубками ухода должно осуществляться с выполнением принципа системности, когда каждое разреживание рассматривается в комплексной взаимосвязи с последующими рубками ухода, как неотъемлемой составляющей части всего инерционного распределенного по времени процесса. Получены математические модели хода роста древостоев с рубками ухода и контрольных древостоев без рубок и их реакций на уходы. Представлены параметры динамики хода роста нормальных одновозрастных неразрезаемых древостоев сосны обыкновенной без рубок, различных классов бонитета. Разработаны алгоритм и программа оптимизации возрастов и интенсивностей изреживаний. Проведены исследования показателей эффективности компьютерной поддержки управления режимами рубок ухода за лесом, получены численные оценки критериев оптимальности разреживаний для лесовыращивания сосновых древостоев. Определены оптимальная интенсивность и периодичность изреживаний, а также оптимальные площади питания отдельных деревьев, густоты древостоев в целом в зависимости от класса бонитета и возраста. Показана общепринятая закономерность при проведении рубок ухода: интенсивность изреживаний при проведении осветлений и прочисток является максимальной, далее, в возрасте прореживаний, происходит снижение этого показателя, максимально снижается интенсивность изреживаний к возрасту проведения проходных рубок, когда производится уход за приростом. Показана научно-практическая основа реализации многокритериального управления режимами рубок ухода за лесом.

*Ключевые слова:* закономерности хода роста древостоев, рубки ухода, математическое моделирование, режимы и критерии разреживаний, программное обеспечение, возраст технической спелости насаждений, эффективность оптимизации разреживаний, продуктивность древостоев, многокритериальное управление.

Изучение закономерностей, математическое описание динамики хода роста леса – фундаментальные основы теоретического осмысления рубок ухода и их практического воплощения. Недостаточная разработка основ математической теории лесовыращивания обусловлена сложностью изменений во времени и пространстве показателей древостоев под влиянием разреживаний. Некоторые авторы выдвигают критерии рубок ухода: сумма площадей сечений деревьев и запас, густота и сомкнутость древостоев, полнота в долях единицы и площади питания деревьев [3]. Но все эти варианты критериев управления рубками ухода за лесом не имеют целевых функций в виде математических уравнений с численными константами ограничений на искомые переменные разреживаний древостоев [5, 6]. Но к этим критериям следует добавить минимизацию повреждения деревьев, остающихся после рубок ухода [2, 5]. Поэтому давно стоит комплексная проблема практического обоснования оптимизации

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ, соглашение

№ 14.В37.21.0660 от 17.08.2012 г.

периодичности и интенсивности разреживаний при каждой вырубке излишних загущенных деревьев в древостоях разных бонитетов [3, 6].

В общих подходах к решению этой проблемы в России и в других странах имеются достаточно условные расплывчатые рекомендации по снижению густоты деревьев при каждом разреживании с вырубкой в допустимых пределах 15...35 % запаса стволовой древесины с уменьшением полноты до 0,8 [3].

Для научного и практического решения проблемы многокритериального управления лесовыращиванием хвойных древостоев необходимо по каждому бонитету заложить целый ряд пробных площадей и, начиная с 10 лет, в течение более 100 лет проводить измерения таксационных и других показателей хода роста древостоев с разными вариантами разреживаний по ранее составленному плану активных экспериментов. Через более чем 100 лет получить экспериментальную систему математических моделей целевых функций и численно решить проблемные задачи многокритериальной оптимизации режимов рубок ухода.

Необходимо объединить упомянутые критерии и разработать единую целевую функцию многокритериального управления режимами рубок ухода за лесом, которая при решении задач оптимизации (разреживания) обеспечивает каждому критерию расположение в своей зоне экстремума (max, min) [5].

Исходя из вышеизложенного, целевой функцией управления режимами рубок ухода за лесом является комплексная целевая функция получения наибольшего выхода качественной стволовой древесины с 1 га за 1 год лесовыращивания со снижением возраста технической спелости древостоев по заданному целевому диаметру деревьев [5]:

$$V = \frac{V_{T_c} + \sum_{p=1}^n \Delta \tilde{V}_p}{T_c} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $V$  – общий объем стволовой древесины в однородном выделе данной породы от сплошной рубки и всех рубок ухода с 1 га за 1 год лесовыращивания, м<sup>3</sup>/га-год;

$V_{T_c}$  – объем стволовой древесины от сплошной рубки в возрасте технической спелости, м<sup>3</sup>/га;

$p = 1, 2, \dots, n$ ;

$n$  – количество рубок ухода;

$\sum_{p=1}^n \Delta \tilde{V}_p$  – объем стволовой древесины от всех рубок ухода в течение 1 го-

да за весь период лесовыращивания  $T_c$ , м<sup>3</sup>/га;

$T_c$  – возраст технической спелости древостоя по заданному целевому диаметру деревьев на высоте груди, лет.

Для вычисления объемов стволов использовали их известную математическую модель [4]:

$$d = 2x = D_{0,5} \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{\ell}{H} \right) + a_2 \left( \frac{\ell}{H} \right)^2 + a_3 \left( \frac{\ell}{H} \right)^3 + a_4 \left( \frac{\ell}{H} \right)^4 \right],$$

где  $d$  – диаметр, см;

$D_{0,5}$  – срединный диаметр ствола, м;

$a_0, \dots, a_4$  – коэффициенты, имеющие свои значения для каждой породы;

$\ell$  – текущее значение длины от комлевого сечения;

$H$  – высота (длина) ствола, м.

По этой модели получена формула объема ствола:

$$V_{ств} = \frac{\pi}{4} D_{0,5}^2 H F,$$

где  $F$  – видовое число древесной породы, для сосны  $F = 1,004$ .

Чтобы не измерять  $D_{0,5}$ , необходимо выполнить переход к технологическому диаметру на высоте груди  $D_{1,3}$ :

$$D_{0,5} = \frac{D_{1,3}}{\left[ a_0 + a_1 \left( \frac{\ell}{H} \right) + a_2 \left( \frac{\ell}{H} \right)^2 + a_3 \left( \frac{\ell}{H} \right)^3 + a_4 \left( \frac{\ell}{H} \right)^4 \right]}$$

Первую рубку ухода необходимо проводить с учетом класса бонитета  $B$ , имеющегося запаса стволовой древесины  $V_1$ , количества деревьев на 1 га  $N_1$ , средней высоты  $H_1$  и среднего диаметра на высоте груди  $D_{1,3}$ . Эти параметры отображают историю хода роста насаждений до первой рубки ухода и поэтому не могут быть изменены. Однако существует некоторый набор входных параметров первой рубки ухода, которые можно изменять оптимально, чтобы начать эффективное управление многокритериальным процессом лесовыращивания.

Изменяемые входные параметры:

1. Технологический состав лесосечного оборудования  $ТСО_1$ , включающий в себя информацию о типах используемых лесосечных механизмов. Выбор этого параметра ограничен требованиями минимизации повреждений, остающихся после механизированной выборочной рубки деревьев.

2. Возраст начала проведения рубок ухода  $T_1$ . Значение этого параметра существенно влияет на эффективность всей системы рубок ухода, так как известно, что чем раньше начинать разреживание леса, тем больше будет отдача от этого лесоводственного мероприятия [3]. Но для древостоя в раннем возрасте трудно механизировать первую рубку ухода из-за мелких деревьев загущенного насаждения.

3. Выбираемый запас  $\Delta V_1$  характеризует объем стволовой древесины деревьев, удаляемых при первой рубке ухода.

4. Количество удаляемых с 1 га деревьев  $\Delta N_1$ .

Неизменяемые входные параметры:  $B$ ,  $V_p$ ,  $N_p$ ,  $H_p$ ,  $D_p$ . Для очередной рубки ухода они зависят от того, какие показатели режимов разреживаний были реализованы на предыдущих рубках.

Необходимо учитывать, что если время проведения первой рубки ухода  $T_1$  является просто входным изменяемым параметром, то для остальных рубок возраст их проведения и интенсивность разреживаний являются оптимальными входными параметрами. Связано это с тем, что возраст очередной рубки должен определяться временем восстановления запаса и сомкнутости ранее разреживаемого древостоя. Если же пренебречь этим принципом, то это приведет к одному из двух негативных явлений: слишком ранняя очередная рубка ухода невозможна после предыдущей рубки древостоя значительно снизит его продуктивность, увеличит отпад и может привести даже к распаду насаждения; запоздалая очередная рубка ухода приведет к полной или частичной потере того положительного лесоводственного потенциала, который был заложен предыдущими рубками ухода и ходом роста древостоя [6].

Процесс управления разреживанием должен осуществляться с выполнением принципа системности, когда каждое разреживание рассматривается в комплексной взаимосвязи с остальными операциями рубок как неотъемлемая составляющая всего весьма инерционного распределенного по времени процесса.

#### *Основы разработки математического обеспечения управления режимами рубок ухода*

Реакцию насаждений на рубки ухода при построении математических моделей динамики хода роста древостоев можно учесть. Сделать это возможно, анализируя восстановление полноты насаждений после разреживания. Прирост насаждения, пройденного правильными рубками ухода, исходя из природы снижения полноты, можно считать неизменным. При этом отпад заметно снижается и в идеальном случае практически равен нулю, что дает возможность через некоторое время насаждению восстановиться по запасу после каждой рубки до исходной полноты.

Имея в наличии зависимости [5]

$$Z_t^{\text{общ}} = Z_t^{\text{общ}}(T, H); \quad Z_t^{\text{раст}} = Z_t^{\text{раст}}(T, H), \quad (2)$$

можно построить динамические модели изменения запасов стволовой древесины как для контрольного, так и для разреживаемого древостоев, т. е. запас контрольного неразреживаемого древостоя в возрасте  $(T + 1)$

$$V_{T+1} = V_T + Z_t^{\text{раст}},$$

а запас разреживаемого древостоя в этом же возрасте

$$\tilde{V}_{T+1} = \tilde{V}_T + Z_t^{\text{общ}} - \tilde{V}_T \frac{K_0}{100}, \quad (3)$$

где  $Z_t^{\text{общ}}$  – общий текущий прирост стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;

$T$  – текущий возраст насаждения, лет;

$H$  – средняя высота деревьев в однородном выделе, м;

$Z_t^{\text{раст}}$  – текущий на очередной год прирост растущей части стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;

$V_T$  и  $\tilde{V}_T$  – соответственно запасы контрольного и разреживаемого насаждений, в возрасте  $T$ , м<sup>3</sup>/га;

$K_0$  – среднегодовой процент опада после проведения рубок ухода.

*Математические модели динамики изменения запасов стволовой древесины контрольного неразреживаемого одновозрастного нормального древостоя сосны*

Проведенные нами исследования и анализ таблиц хода роста нормальных сосновых древостоев Центрально-Черноземного региона ЦЧР [1] показали, что динамику изменения запаса стволовой древесины одновозрастных насаждений сосны  $V_T$  на 1 га можно с достаточно высокой точностью описать математическими моделями в виде обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка с правой частью:

$$M_1 M_2 \frac{d^2 V_T}{dT^2} + (M_1 + M_2) \frac{dV_T}{dT} + V_T = V_{III}, \quad (4)$$

где  $V_{III}$  – запас стволовой древесины в возрасте спелости и в начале перестойного возраста  $T_{СП}$  неразреживаемых древостоев, м<sup>3</sup>/га.

Сумма общего и частного решения этого дифференциального уравнения, характеризующая затяжной на ряд десятилетий инерционный второго порядка переходный процесс хода роста запаса стволовой древесины до возраста спелости, в установившемся режиме спелости и в начале перестойности древостоев, имеет следующий вид:

$$V_T(T) = V_{III} \left[ 1 - \frac{M_1}{M_1 - M_2} e^{-\frac{T}{M_1}} + \frac{M_2}{M_1 - M_2} e^{-\frac{T}{M_2}} \right], \quad (5)$$

где  $T$  – текущий возраст древостоя, лет;

$M_1$  – постоянная времени, как мера инерционности постепенного увеличения запаса древесины на 1 га в молодом возрасте древостоя, лет;

$M_2$  – постоянная времени, как мера инерционности постепенного замедления роста объема стволовой древесины в конце приспевающего, в спелом и в начале перестойного возраста, лет.

Эти параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры динамики хода роста нормальных одновозрастных неразреживаемых сосновых древостоев в ЦЧР**

Бонитет	$T_{СП}$ , лет	$V_{III}$ , м <sup>3</sup> /га	$M_1$ , лет	$M_2$ , лет
Ia	140	895	28,8	29,3
I	140	716	30,1	28,6
II	140	570	29,9	29,9
III	140	442	30,9	30,4
IV	130	326	29,4	29,1

*Математические модели динамики изменения запасов стволовой древесины разреживаемого древостоя сосны*

Если рубка ухода проведена аккуратно и не вызвала значительных повреждений остающихся после рубки деревьев, прирост остается прежним, отпад уменьшается и полнота постепенно восстанавливается.

Исходя из вышеизложенного, запас разреживаемого древостоя ( $\tilde{V}_T$ , м<sup>3</sup>/га) в возрасте  $T$  представляется возможным определять по уравнению

$$\tilde{V}_T = \tilde{V}_{T_0} + \sum_{t=T_0}^{T_1} Z_t^{\text{раст}} + \sum_{t=T_0}^{T_C} (Z_t^{\text{общ}} - \tilde{V}_t K_0) - \sum_{p=1}^n \Delta \tilde{V}_p, \quad (6)$$

где  $\tilde{V}_{T_0}$  – запас древостоя до проведения выборочных рубок ухода в некотором начальном периоде  $T_0$ , м<sup>3</sup>/га;

$T_1$  – возраст проведения первой рубки, лет;

$T_C$  – возраст технической спелости древостоя, лет, который зависит от величины целевого диаметра деревьев;

$\tilde{V}_t$  – текущее значение запаса разреживаемого древостоя на момент  $p$ -й рубки ухода, м<sup>3</sup>/га;

$K_0 = 0,1 \dots 0,2$  %;

$n$  – количество рубок ухода, проведенных за период от  $T_0$  до  $T_C$ ;

$\Delta \tilde{V}_p$  – часть запаса, удаляемая при  $p$ -й рубке ухода и равная объему промежуточного пользования, м<sup>3</sup>/га.

На основании рекомендаций лесоводов представляется обоснованным, в зависимости от возраста лесонасаждения, устанавливать допустимый диапазон процента манипулирования уменьшением запаса  $P_p$  в следующих пределах [3, 6]:

$$15 \% \leq P_p \leq 35 \% . \quad (7)$$

Тогда объем промежуточного пользования древесиной от разреживаний по  $p$ -й рубке ухода  $\Delta \tilde{V}_p$  следует вычислять по формуле

$$\Delta \tilde{V}_p = \tilde{V}_t \frac{P_p}{100}. \quad (8)$$

#### *Основы разработки программного обеспечения управления разреживаниями*

Использовался численный метод имитационного алгоритма равномерного перебора вариантов возраста и интенсивности разреживаний с оценкой эффективности каждого варианта по модели (6) с учетом ограничений (7). Это дало возможность разработать специальное программное обеспечение управления лесовыращиванием, которое решает задачи оптимизации режимов рубок ухода за лесом.

После проведения исследований эффективности оптимизации режимов рубок ухода получены численные оценки критериев оптимальности разреживаний для лесовыращивания сосновых древостоев Ia, I, II бонитетов ЦЧР с целевым диаметром технической спелости 36 см. При этом главным критерием оптимальности была наибольшая возможная продуктивность древостоев с 1 га за 1 год. Максимизация этого критерия дала возможность найти действительно оптимальные интенсивности и возраст изреживаний, а также оптимальные площади питания отдельных деревьев и оптимальные площади сечения древостоев на высоте груди, густоты древостоев в зависимости от бонитета и возраста (табл. 2).

Таблица 2

#### **Оптимальные режимы рубок ухода в сосновых лесонасаждениях I бонитета в ЦЧР (целевой диаметр технической спелости 36 см)**

Рубка	Возраст, лет	Интенсивность изреживания	Диаметр на высоте груди, см	Количество деревьев на 1 га, шт.	Вырубаемый запас, м <sup>3</sup> /га	Площадь питания деревьев, м <sup>2</sup>
Осветление	10,0	0,338	3,5	7737	11,4	1,29
Прочистка	20,0	0,312	8,3	4276	32,9	2,34

Прореживание	36,5	0,268	16,2	2005	65,4	5,00
Проложная	58,0	0,212	26,2	1082	85,0	9,24
Сплошная	$T_C = 81,0$	1,000	36,2	632	524,0	15,82
<i>Всего</i>	–	–	–	–	718,0	–
Контрольный (неразреживаемый ) древостой	81,0	–	30,5	610	546,0	16,30
	$T_C = 103,0$	–	36,2	453	635,0	22,00

Снижение возраста технической спелости древостоев при рубках ухода за лесом составило  $103 - 81 = 22$  года, или 21 %.

Повышение продуктивности древостоев:  $718 - 635 = 83$  м<sup>3</sup>/га, или 11,5 %.

Продуктивность:

$$\text{при рубках ухода: } \frac{V}{T_C} = \frac{718}{81,0} = 8,86 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{год});$$

$$\text{в контроле: } \frac{V}{T_C} = \frac{635}{103} = 6,16 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{год});$$

$$\text{разница: } 8,86 - 6,16 = 2,7 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{год}).$$

В результате проведенных исследований установлены следующие закономерности:

1. Максимизация выхода стволовой древесины с 1 га за 1 год лесовыращивания обеспечивает снижение возраста технической спелости древостоев по заданному целевому диаметру деревьев, оптимальную увеличивающуюся возрастную площадь питания деревьев, оптимизацию увеличивающейся по возрасту площади сечения деревьев древостоя на высоте груди.

2. Оптимизация режимов (возраст и интенсивность разреживаний) рубок ухода за лесом может быть решена на ЭВМ для обеспечения возрастной оптимизации других критериев рубок ухода. В этом и состоит научно-практическая основа реализации многокритериального управления режимами четырех рубок ухода за лесом.

3. Установлено, что самая высокая интенсивность разреживаний относится к осветлению, но этот уровень снижается для прочистки, еще меньше для прореживаний, самый низкий уровень интенсивности разреживаний относится к проходным рубкам, что соответствует данным ряда исследований [3, 6].

4. Определено влияние бонитета на возраст достижения технической спелости сосновых древостоев ЦЧР. Для целевого диаметра 36 см возраст технической спелости насаждения Ia бонитета – 73 года, I бонитета – 81 год, II бонитета – 98 лет.

5. При возрасте технической спелости количество живых деревьев в контрольных древостоях меньше, чем в разреживаемых, что объясняется большим количеством оставшихся засохших деревьев, которые занимают много пространства в постоянно загущенных насаждениях.

6. Многокритериальная оптимизация управления режимами рубок ухода сосны Ia, I, II бонитетов в ЦЧР для заданного диаметра 36 см дает возможность на 16...29 % снизить возраст технической спелости древостоев, повысить их продуктивность на 2...3 м<sup>3</sup>/га·год).

Полученные результаты исследований могут использоваться при управлении разреживанием лесных культур сосны и в сосняках естественного происхождения ЦЧР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозовой А.Д. Лесная вспомогательная книжка: лесотаксационный справочник работнику лесного хозяйства ЦЧР России. 3-е изд. Воронеж: М-во образования РФ, администрация Воронежской обл., Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2004. 390 с.

2. Мальшев В.В., Петровский В.С., Попов В.К. Математическое моделирование и оптимизация выращивания лесных культур сосны. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2004. 211 с.

3. Мелехов И.С. Лесоводство: учеб. для вузов. М.: Агропромиздат, 1989. 302 с.

4. *Петровский В.С.* Автоматическая оптимизация раскря древесных стволов. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 183 с.

5. *Петровский В.С., Малышев В.В., Мурзинов Ю.В.* Автоматизированное проектирование режимов и выбора машин для проведения рубок ухода за лесом. М.: ФЛИНТА. Наука, 2012. 216 с.

6. *Сеннов С.Н.* Уход за лесом (экологические основы). М.: Лесн. пром-сть, 1984. 128 с.

Поступила 18.02.14