

ственные дубравы // Природа.— 1988.— № 3.— С. 14—16. [3]. Сукачев В. Н. Дендрология.— М.: Гослесбумиздат, 1938.— 267 с. [4]. Суслова В. Г. Тенденция развития среднерусских лесостепных дубрав // Вестн. МГУ. Сер. геогр.— 1988.— № 2.— С. 11—13. [5]. Фишер О. О возрасте и долговечности деревьев // Лесн. журн.— 1833.— Ч. 1, кн. 1.— С. 14. [6]. Чеведаев А. А. Дуб, его свойства и значение.— М.: Гослесбумиздат, 1963.— 233 с. [7]. Чистякова А. А. Мозаичные сукцессии широколиственных лесов европейской части СССР и их роль в самоподдержании сообществ // Биологич. науки.— 1991.— 8 (331).— С. 30—44. [8]. Чураков Б. П. Влияние рекреационных нагрузок на зараженность дуба черешчатого трутовыми грибами в Среднем Поволжье // Лесн. журн.— 1992.— № 2.— С. 20—23.— (Изв. высш. учеб. заведений). [9]. Шмейль Ю. Полный курс ботаники.— Спб., 1910.— 283 с. [10]. Сапидс А. Les chenes. Monographie du genre Quercus.— Paris, 1936—1938.— 358 p.

Поступила 14 августа 1992 г.

УДК 626.861.5

## МОДЕЛИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КАНАЛОВ ЛЕСОСУШИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Ю. А. ДОБРЫНИН

С.-Петербургский НИИЛХ

Эффективность функционирования лесосушительной системы и получение дополнительного прироста древостоя, ожидаемого от гидролесомелиорации, зависят от состояния каналов. Техническая эксплуатация лесосушительных систем, наряду с многочисленными видами работ [3, 5], предусматривает профилактическое обслуживание каналов, включающее уход за ними, капитальный, текущий, аварийный и профилактический ремонты. Капитальный ремонт проводится при заилении русла канала на  $1/2$ — $2/3$  первоначальной глубины, установленной проектом и реализованной при строительстве объекта осушения; текущий — на  $1/3$ ; профилактический и уход за каналом предусматривают очистку его донной части от заиления, когда толщина наносов не превышает 0,2 м, и периодическое удаление кустарника из русла канала и с его берм. Невыполнение мероприятий приводит к вторичному заболачиванию объекта и, как следствие, потерям дополнительного прироста древостоев. Установлено, что поддержание нормальной работы каналов особенно необходимо в первые 50...60 лет после осушения, поскольку этот период, в силу биологических свойств хвойных древостоев, соответствует наиболее интенсивному накоплению дополнительного прироста [4]. В дальнейшем требования к работе каналов могут быть снижены, так как возможное избыточное увлажнение объекта не отражается заметно на интенсивности прироста в силу высокой транспирации практически спелых деревьев.

Систему профилактических мероприятий можно предварительно оценить по анализу результатов моделирования процесса профилактического обслуживания каналов с использованием различной техники и особенностей лесорастительных (почвенно-грунтовых) условий, в которых заложен гидролесомелиоративный объект.

Основываясь на довольно продолжительных временных интервалах между технологическими операциями эксплуатационных работ, выдвигая гипотезу о независимости рассматриваемого состояния отдельного канала от прошлого и прямой зависимости от будущего состояния. Иными словами, рассмотрим только нынешнее состояние канала, подвергающегося профилактическому обслуживанию, и результат — отремонтированный (восстановленный до проектных размеров) канал. Принимаемая гипотеза соответствует основному свойству марковских процес-

сов [1], что позволяет моделировать профилактическое обслуживание лесомелиоративных каналов.

Представим работу канала, подвергающегося систематическому ремонту, как однородную марковскую цепь с двумя состояниями. Матрица переходов в такой цепи имеет вид

$$P^p = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{vmatrix}, \quad (1)$$



Рис. 1. Реализация процесса функционирования канала по схеме работа — ремонт

и ее можно рассматривать как временной процесс следующим образом (рис. 1). В момент времени  $t_0 = 0$  канал как элемент осушительной системы начинает функционировать сразу после окончания строительства объекта гидрлесомелиорации и ввода его в эксплуатацию (или после реконструкции). Его рабочее состояние на рисунке обозначено  $E_1$ . Через период времени  $T$  канал переходит в состояние отказа и последующего ремонта  $E_2$ , и поскольку время ремонта пренебрежимо мало по сравнению с периодом осуществления профилактического мероприятия, оно на схеме не учтено (мгновенное восстановление). Подразумевается, что переходы  $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_1$  и т. д. происходят скачкообразно, что несколько идеализирует реальную картину процесса, но не противоречит ей. Предполагается, что при выполнении профилактического мероприятия восстанавливаются первоначальные (проектные) параметры канала, т. е. он полностью обновляется. Период профилактического мероприятия  $T$  имеет случайный характер, что находит отражение в функции времени безотказной работы  $\tau_i$  [2], которая, в свою очередь, имеет различные значения  $T$  для капитального, текущего и профилактического ремонтов:

$$p\{\tau_i < T_i\} = F(T_i), \quad i = \text{к, т, п.} \quad (2)$$

Здесь переходы в рассматриваемые состояния в моменты  $t_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) процесса не зависят от предыстории, т. е. соблюдается свойство, на котором основано использование математического аппарата марковских и полумарковских процессов.

Очевидно, что состояния могут сменяться детерминированно, по стационарной (жесткой) стратегии  $\sigma$  с отлицием по периоду  $T_i$ , назначаемому для обеспечения задаваемого показателя вероятности безотказной работы  $p(t)$  или среднему времени длительности безотказной работы  $\tau_i$ :

$$\sigma = (T_i, E_2), \quad (3)$$

где  $T_i = T_k, T_t, T_p$  — назначаемые периоды регулярного выполнения капитального, текущего и профилактического ремонта соответственно.

Управляющие воздействия (УВ) по стационарной стратегии  $\sigma$  переводят процесс из состояния  $E_1$  в  $E_2$  и обратно в  $E_1$  ( $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_1$ ). При дальнейшей эволюции функционирования канала (рис. 1), независимо от каких-либо обстоятельств, всегда выбирают соответствующее постоянное УВ  $\sigma$  на весь назначенный срок службы канала.

Вероятностная модель такого процесса с учетом наличия поглощающих состояний примет вид

$$p^p = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad R^p = \begin{vmatrix} 0 & G_1(t) \\ G_2(t) & 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

или

$$Q^p = | Q_{ij}^p(t) |; \quad Q_{ij}^p(t) = p_{ij}^p R_{ij}^p(t), \quad (5)$$

где

- $p^p$  — матрица переходов в процессе работа — ремонт;
- $R^p$  — матрица доходов и затрат (штрафов);
- $Q^p$  — матрица полумарковского процесса функционирования канала;
- $G_1(t)$  — функция дохода от работы лесоосушительного канала, выражающаяся в получении дополнительного прироста древостоя на объекте гидролесомелиорации, р./га;
- $G_2(t)$  — функция затрат на профилактическое мероприятие, проводимое на канале, р./км (р./га);
- $Q_{ij}^p, p_{ij}^p, R_{ij}^p$  — элементы соответствующих матриц.

Как видно из выражения (5), модель функционирования канала-осушителя по принятым жестким стратегиям полностью зависит от функций доходов и затрат, которые, в свою очередь, определяются тем или иным управляющим воздействием (УВ).

Для УВ по реализации капитального ремонта (КР) зависимость доходов и затрат на протяжении назначенного ресурса канала имеет вид

$$R_{12}^{КР}(t) = \sum_k M\{q_k\} M\{c_k^y\} t_k - \sum_m M\{q_m\} M\{c_m^y\} t_m - M\{c_{кр}^y\} \bar{z}_{кр}(t); \quad (6)$$

для УВ по реализации текущего ремонта (ТР)

$$R_{12}^{ТР}(t) = \sum_k M\{q_k\} M\{c_k^y\} t_k - M\{c_{тр}^y\} \bar{z}_{тр}(t); \quad (7)$$

для УВ по реализации профилактического ремонта (ПР)

$$R_{12}^{ПР}(t) = \sum_k M\{q_k\} M\{c_k^y\} t_k - M\{c_{пр}^y\} \bar{z}_{пр}(t), \quad (8)$$

где

- $M\{q_k\}$  — математическое ожидание дополнительного прироста осушаемого древостоя, м<sup>3</sup>/(га · год);
- $M\{c_k^y\}$  — математическое ожидание удельной стоимости 1 м<sup>3</sup> дополнительного прироста древостоя, р./га;
- $M\{q_m\}$  — математическое ожидание потерь дополнительного прироста, м<sup>3</sup>/(га · год);
- $M\{c_m^y\}$  — математическое ожидание удельной стоимости потерь дополнительного прироста, м<sup>3</sup>/(га · год);
- $M\{c_{кр}^y\}, M\{c_{тр}^y\}, M\{c_{пр}^y\}$  — математическое ожидание удельной стоимости КР, ТР, ПР соответственно, р./га;
- $\bar{z}_{кр}(t), \bar{z}_{тр}(t), \bar{z}_{пр}(t)$  — интегральные функции восстановления при КР, ТР и ПР;
- $t_k, t_m$  — интервалы времени, по которым определяются математические ожидания дополнительного прироста древостоя от осушения и его потерь соответственно, лет ( $k = 10, 20, 30, 40, 50; m = 20, 40$ ).

Кроме того, введем вспомогательную стационарную стратегию профилактического обслуживания  $\sigma = (T_y, E_3)$  по назначаемому периоду выполнения технологических операций ухода за каналом, которая находит отражение при определении затрат на профилактические мероприятия.

Технологический процесс удаления кустарника из зоны русла канала, т. е. профилактический уход (ПУ), описывается моделью режима работа — уход, аналогичной модели ремонта,

$$p^y = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad R^y = \begin{vmatrix} 0 & G(t) \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (9)$$

или

$$Q^y = |Q_{ij}^y(t)|; \quad Q_{ij}^y(t) = p_{ij}^y R_{ij}^y(t). \quad (10)$$

Здесь в матрице  $R^y$  доходы, как таковые, отсутствуют, а есть лишь затраты на проведение механизированных профилактических уходов  $G(t)$ :

$$R_{12}^y(t) = G(t) = M\{c_y^y\} \bar{z}_y(t), \quad (11)$$

где  $M\{c_y^y\}$  — математическое ожидание удельной стоимости профилактического мероприятия по уходу за осушителем, р./га;

$\bar{z}_y(t)$  — интегральная функция восстановления канала при уходе.

В моделях полумарковских процессов (5) и (10) отражаются данные о производительности лесорастительных условий, потерях прироста при запаздывании с капитальными ремонтами, виде применяемых машин, что учитывается удельной стоимостью ремонта 1 км канала или его длины, приходящейся на 1 га объекта осушения. Анализируя эти модели, можно выбрать наиболее целесообразную для конкретных лесорастительных условий стратегию проведения профилактических работ и применить соответствующие УВ, исходя из экономического критерия эффективности мероприятий.

Например, для гидроселеселиоративного объекта, относящегося к II группе эффективности осушения и заложенного в сосновом древостое II класса возраста, в сфагновом типе лесорастительных условий (переходное болото, мощность торфа до 0,5 м) [3], и применяющейся многофункциональной лесомелиоративной машины КЛН-1,2 функции (6) — (8), (11) примут следующие значения, р./га:

$$\begin{aligned} R_{12}^{xp}(t) &= 384,2 - 79,7 - 15 = 285,5; \\ R_{12}^{rp}(t) &= 384,2 - 24 = 360,2; \\ R_{12}^{np}(t) &= 384,2 - 13 = 371,2; \\ R_{12}^y(t) &= 7,65. \end{aligned} \quad (12)$$

В таблице приведены удельные затраты на выполнение профилактических мероприятий в течение назначенного срока службы лесосушительной системы 50 лет (для машины непрерывного действия типа КЛН-1,2 (в ценах 1990 г.).

Анализ результатов (12) показывает, что длительный временной интервал между капитальными ремонтами (20 лет) приводит к существенному снижению доходов за счет падения дополнительного прироста, вызванного вторичным заболачиванием, и указывает на малую эффек-

Мероприятие	Математическое ожидание стоимости работ, р.		Значение функции восстановления	Плановые затраты, р.	
	на 1 км	на 1 га		на 1 км	на 1 га
Капитальный ремонт	125,5	7,5	2	251	15
Текущий ремонт	66,5	4,0	6	399	24
Профилактический ремонт	13,3	0,8	16	213	13
Удаление кустарника	14,1	0,85	9	127	7,65

тивность стационарной стратегии УВ по реализации КР. Более практично применять УВ по проведению ПР и при необходимости (в случае обязательного восстановления откосов канала) дополнять их УВ по ТР. Сказанное справедливо для технической эксплуатации незапущенных объектов осушения. Для объектов, не подвергавшихся технической эксплуатации в течение длительного времени, профилактические мероприятия следует начинать именно с КР, а перед его проведением, весьма вероятно, потребуются и предварительное удаление кустарника.

С учетом выполнения регулярных периодических эксплуатационных работ на лесоосушительных системах построим модель профилактического обслуживания по неоднородной стратегии, предусматривающей проведение ТР, ПР и ПУ. В этом случае управляемый полумарковский процесс с поглощающими состояниями адекватно отображается матрицей переходов

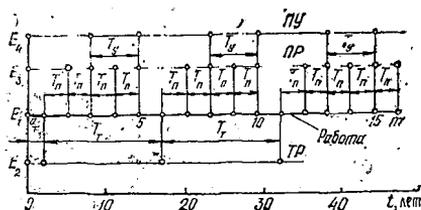
$$P_{[3]} = \begin{pmatrix} 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Установим закономерности переходов  $E_1 \rightarrow E_2$  и  $E_1 \rightarrow E_3$ .

Управляющие воздействия могут быть спрогнозированы с самого начала функционирования объекта на основе накопленного опыта и имеющихся характеристик лесорастительных условий. Так, исходя из наблюдений за работой каналов регулирующей сети в первые годы их функционирования, необходимо через 2 года (рис. 2, период  $T_1$ ) после ввода лесоосушительной системы в эксплуатацию [3] проводить текущий послеосадочный ремонт осушителей, а затем назначать профилактические ремонты и уходы (ПР и ПУ), связанные с систематической очисткой донной части канала. Через 15-16 лет после проведения послеосадочного текущего ремонта следует назначать ремонт деформирующихся со временем откосов каналов в нижней их половине, что обеспечивается также ТР.

Систематическое проведение ТР позволяет поддерживать уровень надежности канала  $p(t) \geq 0,6$ , т. е. на границе нормы [2], ниже которой начинается вторичное заболачивание.

Рис. 2. Реализация процесса профилактического обслуживания канала-осушителя по неоднородной стратегии (16)



Закономерность переходов  $E_1 \rightarrow E_2$  в изложенном виде имеет скачкообразный детерминированный характер и отображается следующим распределением:

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_1; \\ 1, & t \geq T_1; \\ 0, & t < T_1 + T_T; \\ 1, & t \geq T_1 + T_T; \\ 0, & t < T_1 + 2T_T; \\ 1, & t \geq T_1 + 2T_T. \end{cases} \quad (14)$$

Для осушительного канала, в соответствии со свойствами рассматриваемых лесорастительных условий, определен период профилактического ремонта  $T_n = 3$  года, что позволяет поддерживать надежность функционирования канала на достаточно высоком уровне  $p(t) \geq 0,8$ . В рассматриваемом нами случае за 3 года в русле канала накапливаются донные наносы толщиной не более 0,17 м, которые могут быть удалены сменным рабочим органом гидролесомелиоративной машины КЛН-1,2 или ОСК-3 за один проход. Если же назначить  $T_n > 3$  лет, то весьма вероятно восстановление канала тем же рабочим органом за два прохода, что вызывает увеличение вдвое затрат на ПР. Однако в некоторых лесорастительных условиях среднегодовые характеристики заиления канала менее интенсивны, что позволяет назначать  $T_n > 3$  лет. Такой случай мы пока опускаем.

По выполнении послеосадочного ремонта, в результате которого достигнуто полное восстановление, начинается отсчет периода последующего профилактического ремонта  $T_n$  (рис. 2). Когда время безотказной работы [2] будет больше или равно  $T_n$ , начинается ПР (переход  $E_1 \rightarrow E_3$ ).

Для удобства формализации процесса на стадии прогнозирования фактических состояний введем нумерацию шагов, имеющих конечное значение  $m = 0, 1, 2, \dots, 16$  (рис. 2).

Очевидно, что переход  $E_1 \rightarrow E_3$  совершается постоянно через  $T_n$ , начиная со второго шага ( $m = 2$ , причем первый шаг равен отрезку времени  $T_1 = 2$  года) по пятый ( $m = 5$ ), с седьмого ( $m = 7$ ) по десятый ( $m = 10$ ) и с двенадцатого ( $m = 12$ ) по шестнадцатый ( $m = 16$ ) включительно, поэтому

$$F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t_m < T_n, \quad m = 2 \dots 5, 7 \dots 10, 12 \dots 16; \\ 1, & t_m \geq T_n. \end{cases} \quad (15)$$

Закономерность переходов  $E_1 \rightarrow E_4$  требует особых пояснений. Поскольку между наличием кустарника в русле канала и дополнительным приростом осушаемого древостоя нет прямой связи, то технологическую операцию по профилактическому уходу (ПУ) не выделяем в отдельное состояние, а присоединяем к ПР с периодом один раз в 6 лет (рис. 2). Если периодичность ПР отличается от принятой нами в сторону увеличения, то ПУ необходимо проводить один раз в 4...6 лет.

После определения сроков проведения рассматриваемых технологических операций (профилактических мероприятий) можно сформулировать все потребные УВ на каждом шаге в виде реализации неоднородной по времени (номеру шага) стратегии, удовлетворяющей эксплуатационным требованиям.

Выражая рассматриваемые периоды профилактических работ через шаг  $\Delta$ :  $T_1 = \Delta - 1$ ;  $T_T = 5\Delta$ ;  $T_n = \Delta$ ;  $T_y = 2\Delta$ , получаем

$$\begin{aligned} \sigma = & \{ \Delta - 1, E_2; [\Delta(1 + K) - 1, E_3, K = 2; 4, E_4]; \\ & 6\Delta - 1, E_2; [\Delta(6 + K) - 1, E_3, K = 2; 4, E_4]; \\ & 11\Delta - 1, E_2; [\Delta(11 + K) - 1, E_3, K = 2; 4, E_4] \}, \quad (16) \\ & K = 1 \dots 4, \end{aligned}$$

где  $\Delta$  — фиксируемый отрезок времени, численно равный устанавливаемому шагу процесса, лет,  $\Delta = 3$  года;

$K$  — целое положительное число.

Исходя из (16), устанавливаем зависимость по определению доходов от нормально функционирующего канала осушителя и затрат на его профилактическое обслуживание:

$$\begin{aligned} R_n(t) = & \sum_k M\{q_k\} M\{c_k^y\} t_k - M\{c_{\text{тр}}^y\} \bar{z}_{\text{тр}}(t) - \\ & - M\{c_{\text{пр}}^y\} \bar{z}_{\text{пр}}(t) - M\{c_y^y\} \bar{z}_y(t), \quad (17) \\ & k = 10, 20, 30, 40, 50. \end{aligned}$$

Для рассматриваемых конкретных данных

$$R_n(t) = 384,2 - 4 \cdot 3 - 0,8 \cdot 13 - 0,85 \cdot 6 = 366,7 \text{ р./га.} \quad (18)$$

Сравнение итоговых значений функций доходов — затрат по стационарной (12) и нестационарной (16) стратегии показывает преимущество последней как обеспечивающей приемлемый уровень надежности работы канала и позволяющей исключить вторичное заболачивание и, как следствие, потерю дополнительного прироста и снижение доходов, характерные для стационарной стратегии проведения КР. Затраты на профилактическое обслуживание с применением машин непрерывного действия типа КЛН-1,2 по нестационарной стратегии составляют менее 8 % ожидаемых доходов от дополнительного прироста (расчеты проведены по Прейскуранту 07—01 «Таксы на древесину основных лесных пород, отпускаемую на корню»), что указывает на рентабельность эксплуатационных работ, которым до настоящего времени не уделяется (в силу разных причин) должного внимания.

Рассмотренные модели и стратегии профилактического обслуживания канала-осушителя могут быть распространены на весь объект осушения, который, как правило, закладывается в сравнительно однородных лесорастительных условиях. В каждом конкретном случае стратегия может быть выбрана в зависимости от УВ и оптимизирована по минимуму затрат при обязательном ограничении по уровню надежности [2] функционирования канала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Герцбах И. Б. Модели профилактики (теоретические основы планирования профилактических работ).— М.: Сов. радио, 1969.— 216 с. [2]. Добрынин Ю. А. Организация использования машин для ремонта и содержания осушительных каналов на основе теории надежности систем // Гидролесомелиоративный мониторинг и эксплуатация лесосушительных систем: Сб. науч. тр. / ЛенНИИЛХ.— Л., 1991.— С. 108—118. [3]. Константинов В. К. Эксплуатация и совершенствование осушительных систем в лесном хозяйстве: Методич. рекомендации.— Л.: ЛенНИИЛХ, 1982.— 41 с. [4]. Сабо Е. Д. Важнейшие задачи гидролесомелиорации // Лесн. хоз-во.— 1986.— № 2.— С. 36—40. [5]. Сабо Е. Д., Иванов Ю. Н., Шатило Д. А. Справочник гидролесомелиоратора / Под. ред. Е. Д. Сабо.— М.: Лесн. пром-сть, 1981.— 200 с.