

### 4.3. МЕТОДОЛОГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАМЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ ЕГО НАДЕЖНОСТИ НА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Соловьева М.Х., соискатель Российской академии государственной службы при Президенте РФ

В статье предлагается методика долгосрочного планирования замены оборудования предприятия. Методика базируется на новом методе решения многофакторной задачи замены оборудования. Результатом расчета является оптимальная стратегия замены оборудования для любого начального возраста с учетом его надежности на динамической модели, обеспечивающая при этом снижение эксплуатационных издержек и увеличения рентабельности оборудования по сравнению с вариантом эксплуатации без замены.

#### ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики выбор стратегии замены оборудования (станков, промышленных технологий) или обеспечения его работоспособности для промышленного предприятия обычно довольно сложен, и для получения приемлемых результатов иногда может оказаться недостаточно только солидного опыта, так как очевидно, что часто интуиция приводит к ошибочным заключениям. Математическое же, и в частности стохастическое, рассмотрение позволяет получить правильные и легко вычисляемые оценки.

Анализ теоретических и прикладных работ, связанных с экономикой промышленных предприятий, показал, что в основном, с одной стороны, рассматриваются экономико-математические модели и методы оптимизации функционирования предприятия<sup>1</sup>, а с другой стороны, – методы анализа производства и управления инвестиционными проектами в условиях рыночной конкуренции<sup>2</sup>.

В пионерской работе А. Кофмана изложены элементы теории износа и замены оборудования<sup>2</sup>. Для определения срока замены в качестве целевой функции выступали средние издержки как с учетом цены перепродажи и процента на капитал в конце срока эксплуатации, так и без этого учета. Недостатком данного подхода является то, что полученные решения не учитывают возможности многошаговой замены и перепродаж на каждом году эксплуатации. В связи с тем, что решение о замене принимается в начале каждого календарного года эксплуатации оборудования или технологии, то задача о замене действующего актива должна сводиться к многошаговой процедуре принятия решений о замене или продолжении эксплуатации. В этом случае очевидно, что данная задача относится к классу задач оптимизации дискретной управляемой динамической системы, поскольку ее потенциальные возможности адекватного отражения свойств реальных систем выше, чем статичных моделей и, кроме того, к ним применим принцип оптимальности Р. Беллмана<sup>3</sup>.

В настоящее время становится все более ясным положение о том, что эффективное решение проблем управления предприятием на стратегическом уровне – уровне долгосрочного планирования, в том числе и решение проблемы выбора и эксплуатации нового оборудования, связано с применением нескольких разнотипных моделей, каждая из которых отражает определенный аспект некоторой проблемы<sup>4, 5</sup>.

<sup>1</sup> Калихман И.Л., Войтенко М.А. Динамическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1979. – 126 с.

<sup>2</sup> Кофман А. Методы и модели исследования операций. – М.: МИР, 1966. – 524 с.

<sup>3</sup> Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 118 с.

<sup>4</sup> Соловьева М.Х. Многомодельный подход к решению проблемы эффективного управления процессом замены производствен-

Поскольку задача планирования оптимальной стратегии замены и эксплуатации нового оборудования по своей природе является многофакторной, то предлагаемая методика должна базироваться на решении промежуточных задач, связанных с расчетом денежных потоков, прогнозе рыночных условий (параметров) и расчете надежности оборудования, влияющая на поток будущих затрат и прибыли от использования оборудования.

Методика долгосрочного планирования замены оборудования предприятия сводится к двум этапам, а именно: этапу прогнозирования и расчета денежных потоков и этапу расчета оптимального срока замены на динамической модели, при этом последовательно должны быть решены следующие частные задачи и проблемы.

1. Расчет надежности и прогнозирование производственно-эксплуатационных расходов.
2. Расчет денежных доходов и прибыли.
3. Решение рекуррентного уравнения Р. Беллмана с учетом дисконтирования денежных потоков и расчет оптимальной стратегии замены оборудования

Схематично, в виде последовательности решаемых задач на соответствующих моделях, методика определения оптимальной стратегии замены и эксплуатации нового оборудования представлена на рис. 1.

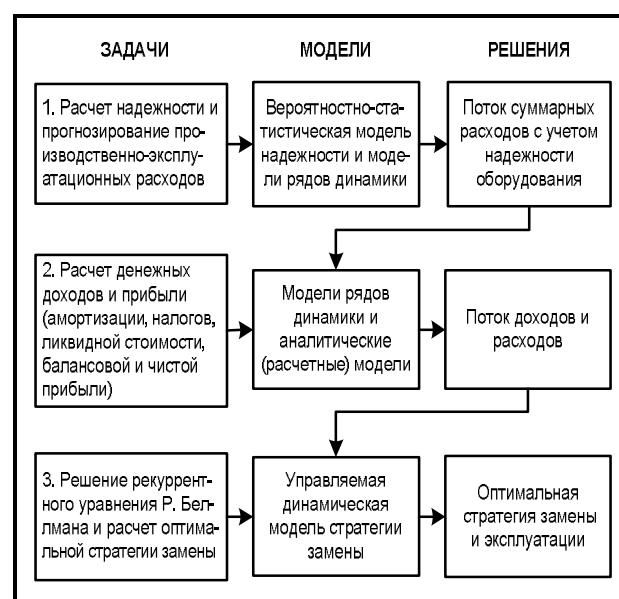


Рис. 1. Схема определения оптимальной стратегии замены оборудования

Из схемы видно, что предлагаемая методика заключается в последовательном использовании отдельных моделей для получения промежуточных результатов (решений), служащих в качестве исходных данных для решения очередной частной задачи.

Расчет денежных потоков выполняется после проведения исследования рынка и определения на рядах динамики основных тенденций поведения рыночной конъюнктуры. Для дисконтирования денежных потоков можно использовать скорректированную на общую инфляцию номинальную банковскую ставку процента на капитал  $\alpha$  (%). В этом случае, например, дисконтированная выручка будет определяться в соответствии с выражением:

$$b'_k = \frac{b_k}{(1 + \alpha)^k}, \tag{1}$$

где  $b_k$  – выручка на  $k$ -м году эксплуатации;

ного оборудования // Проблемы современной экономики: Евразийский международный научно-аналитический журнал. Санкт-Петербург: 2007. – №2 (22). С. 138-141.

<sup>5</sup> Соловьева М.Х. Проблемы эффективного управления производственными активами предприятия и подходы к их решению // Аспирант, соискатель, №4 (29) М.; Изд-во Спутник, 2005. С. 28-32.

$\alpha$  – ставка процента на капитал (коэффициент приведения, принятая норма доходности).

## 1. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

В качестве исходных данных для решения задачи расчета суммарных расходов на планируемый срок эксплуатации оборудования необходимо располагать:

- среднегодовым темпом прироста  $\beta_c$  суммарных расходов;
- интенсивностью отказов, например, интенсивностью  $\lambda_0$  отказов оборудования пропорциональной возрасту  $\tau$  оборудования  $\lambda(\tau) = \lambda_0 \tau$  и соответствующей функцией надежности оборудования  $p(\tau)$ ;
- составом и структурой расходов, связанных с установкой и производством товарной продукции, а именно:
  - стоимостью установки нового оборудования без учета ежегодного темпа прироста расходов  $c_1^y$  (возраст  $\tau = 0$  лет);
  - постоянными ежегодными расходами при эксплуатации нового оборудования, не зависящими от возраста  $\tau$  лет и без учета ежегодного темпа прироста расходов,  $c_1^0$ ;
  - переменными ежегодными расходами, связанными с производством продукции объема  $Q$  и без учета ежегодного темпа прироста расходов (считаем, что ежегодный объем выпуска продукции не меняется в течение периода эксплуатации)  $c_1^{np}(Q)$ ;
  - максимальными ежегодными эксплуатационными расходами, связанными с восстановлением работоспособности оборудования (без учета ежегодного темпа прироста расходов)  $c_1^z$ .

Последовательно выполняем ряд промежуточных расчетов, в результате которых определим суммарные расходы.

В начале рассчитаем значения функции надежности, зависящей от возраста  $\tau$  оборудования, и затем результаты расчета сводятся в таблицу.

Суммарные планируемые расходы с учетом ежегодного темпа прироста, включающей стохастическую составляющую надежности оборудования (3.5.3) и зависящие от возраста и срока (шага) эксплуатации, вычислим в соответствии с формулой  $c_{zk}(\tau)$ :

$$c_{zk}(p(\tau), Q) = \begin{cases} [c_1^y + c_1^0 + c_1^{np}(Q) + c_1^z(p(1))](1 + \beta_c)^k, & \tau = 1; \\ [c_1^0 + c_1^{np}(Q) + c_1^z(p(\tau))](1 + \beta_c)^k, & \tau \geq 2. \end{cases} \quad (2)$$

где

$c_1^y$  – стоимость установки нового оборудования на 1-м году (шаге) эксплуатации (возраст  $\tau = 0$  лет);

$c_1^0$  – постоянные расходы при эксплуатации нового оборудования, не зависящие от возраста  $\tau$  лет в течение 1-го года эксплуатации;

$c_1^{np}(Q)$  – переменные расходы, связанные с производством продукции объема  $Q$  на 1-м году эксплуатации (считаем, что ежегодный объем выпуска продукции не меняется в течении 6 лет);

$c_1^z(p(\tau)) = c_1^z[1 - p(\tau)]$  – переменные расходы, связанные с эксплуатацией оборудования без учета ежегодного темпа прироста расходов.

## 2. РАСЧЕТ ДЕНЕЖНЫХ ДОХОДОВ И ПРИБЫЛИ

Пусть дано в качестве исходных данных:

1. Гарантированный срок эксплуатации (амортизации)  $N_A$ .
2. Прогнозируемый среднегодовой темп прироста цены  $\beta_s$  на закупаемое новое оборудование.
3. На выпускаемую производственную продукцию для компенсации инфляции среднегодовой темп прироста цены устанавливается в  $\beta_B$  %.
4. Выберем схему амортизационных начислений на новое оборудование и ставку налога на прибыль  $v_\pi$  %.

Исходя из среднегодового темпа прироста цены  $\beta_s$  на закупаемое новое оборудование стоимость нового оборудования на начало  $k$ -го года (шага) эксплуатации составит:

$$s_k = s_1(1 + \beta_s)^{k-1}. \quad (3)$$

где  $s_1$  – стоимость нового оборудования, приходящаяся на первый год (шага) эксплуатации.

Исходя из среднегодового темпа прироста цены  $\beta_B$  на выпускаемую производственную продукцию для компенсации инфляции, рассчитаем ежегодный доход  $b_k(\tau)$  на  $k$ -м году в соответствии с формулой:

$$b_k(\tau) = b_1(\tau)(1 + \beta_B)^k, \quad (4)$$

где  $b_1(\tau)$  – доход от произведенной продукции (выручка от реализации) на оборудовании возраста  $\tau$  лет в конце 1-го года (шага) эксплуатации.

Годовая амортизация оборудования зависит от возраста  $\tau$ , например, в соответствии со способом уменьшаемого остатка формула имеет вид:

$$a(\tau) = s_0 g(1 - g)^{\tau-1}$$

и зависит от  $k$ -го года эксплуатации, причем план начисления можно представить в табличном виде (матрицы), где

$g = 1/N$  – годовая норма амортизации;

$k \leq \tau + t$ ,  $k, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;

$N$  – планируемый срок эксплуатации.

Расчет ликвидной стоимости оборудования производится с учетом темпа прироста цены оборудования и начисленной амортизации для каждой переменной возраста  $\tau$  и  $k$  года (шага) эксплуатации. Результаты расчета представляются в виде таблицы.

Балансовая прибыль на конец года вычисляется по формуле

$$\pi_{bk}(x_{k-1}) = b_k(x_{k-1}) - c_k(x_{k-1}), \quad (5)$$

где

$b_k(x_{k-1})$  – стоимость продукции в конце  $k$ -го года;

$c_k(x_{k-1})$  – затраты на оборудовании возраста  $x_{k-1}$ .

Так как налог берется с операционной прибыли  $\pi_{ок}$ ,

то вначале вычисляется операционная прибыль, зависящая от возраста оборудования  $\tau$  и года  $t$  – начала (шага) бухгалтерских амортизационных начислений в соответствии с выбранным планом (схемой) расчета до полной амортизации оборудования:

$$\pi_{ок}(\tau, t) = \pi_{bk}(\tau) - a_t(\tau), \quad (6)$$

где

$k \leq \tau + t$ ,  $k, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;

$N$  – планируемый срок эксплуатации.

Необходимо иметь в виду, что год начала амортизационных начислений в соответствии с выбранной схемой

расчета совпадает с  $k$ -м шагом при управлении  $u_k = 0$  (заменить актив), т.е.  $t = k : u_k = 0$ .

При ставке  $v_\pi$  налог на прибыль составит величину  $\eta_k(x_{k-1}, t) = v_\pi \pi_{ок}(x_{k-1}, t)$ , (7)

откуда чистая прибыль (денежный поток после налогообложения) в конце года (шага) при сохранении оборудования определяется как разность между балансовой прибылью и налогом на операционную прибыль

$$\pi_{c_k}(x_k(x_{k-1})) = \pi_{bk}(x_{k-1}) - \eta_k(x_{k-1}, t), \quad (8)$$

где  $k \leq \tau + t$ ,  $k, t \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;

$x_k, x_{k-1}$  – возраст оборудования на  $k$ -м,  $(k-1)$ -м шаге.

Результаты расчета балансовой прибыли  $\pi_{bk}(x_{k-1})$  (3.5.8), операционной прибыли  $\pi_{ок}(x_{k-1}, t)$  (5), налога  $\eta_k$  на операционную прибыль  $\eta_k$  (7) и чистой прибыли  $\pi_{c_k}(x_{k-1}(x_k))$  (8) представляются в табличном виде.

### 3. РАЗРАБОТКА УРАВНЕНИЯ Р. БЕЛЛМАНА В ПРЯМОМ ВРЕМЕНИ

Расчет оптимальной стратегии замены нового оборудования выполним в соответствии с уравнениями Р. Беллмана в прямом времени, учитывающими дисконтирование денежного потока по банковской ставке процента на капитал  $\alpha$  %. В этом случае дисконтный множитель (коэффициент дисконтирования денежных потоков) принимает значение  $\gamma = (1 + \alpha)^{-1}$ .

В коэффициенте дисконтирования денежных потоков обычно учитывается уровень общей инфляции. Функцию Беллмана необходимо вычислять с учетом дисконтирующего множителя  $\gamma$  для каждого значения  $x_k$  из множества состояний  $X_k$ , которое с учетом начального состояния возраста оборудования  $x_0 = 0$  представим в виде:

$$X_k = \{1, 2, \dots, k / k = 1, 2, \dots, n\}. \quad (9)$$

На каждом шаге расчет основного рекуррентного уравнения Беллмана в прямом времени ведется по формуле:

$$B_k(x_k) = \begin{cases} \gamma^k \pi_{c_k}(x_{k-1}(x_k)) + B_{k-1}(x_k - 1), \\ x_k \in X_k \setminus \{1\} \text{ при сохранении;} \\ \max_{x_{k-1} \in X_{k-1}} \{ \gamma^k \pi_{z_k}(x_{k-1}(1_k)) + \\ + B_{k-1}(x_{k-1}), x_k = 1 \text{ при замене,} \end{cases} \quad (10)$$

где  $\pi_{c_k}(x_{k-1}(x_k)) = \pi_{bk}(x_{k-1}) - v_\pi \pi_{ок}(x_{k-1}, t)$  – чистая прибыль при сохранении оборудования,  $x_{k-1} = x_k - 1$ ;

$\pi_{bk}(x_{k-1}) = b_k(x_{k-1}) - c_k(x_{k-1})$  – балансовая прибыль при сохранении оборудования,  $x_{k-1} = x_k - 1$ ;

$\pi_{ок}(x_{k-1}, t) = \pi_{bk}(x_{k-1}) - a_t(x_{k-1})$  – операционная прибыль при сохранении оборудования,  $x_{k-1} = x_k - 1$ ,  $k \leq x_{k-1} + t$ ;

$\pi_{z_k}(x_{k-1}(1_k)) = l_k(x_{k-1}) - p_k + \pi_{bk}(0) - v_\pi \pi_{ок}(0, k)$ , чистая прибыль при замене оборудования,  $x_{k-1} = x_k - 1$ .

На рис. 2, в качестве примера, представлены оптимальные стратегии замены оборудования с начальным возрастом 2 года для задачи, решенной в прямом времени на интервале времени эксплуатации 6 лет. Оптимальные стратегии замены представлены в виде сети на отрезке от 0 до 6 лет с округлением значений функций Беллмана до целых чисел с учетом продажи при достижении возраста 4 года и конца интервала управления  $k = 6$  лет.

Например, оптимальная стратегия на интервале планирования 6 лет

$$u^* = \{u_1^*, u_2^*, u_3^*, u_4^*, u_5^*, u_6^*\} = \{3, C, 3, C, 3, C\},$$

означает, что на первом, третьем и пятом году эксплуатации необходимо сделать замену оборудования, начальный возраст которого 2 года, причем чистая дисконтированная прибыль нарастающим итогом составит 229 млн. руб.

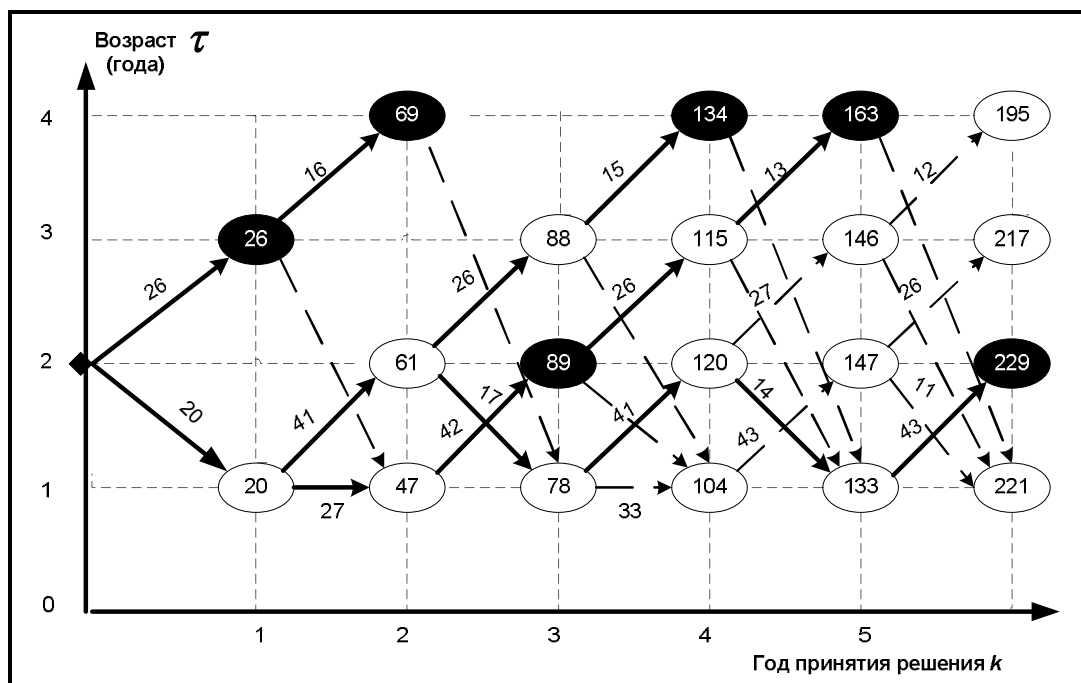


Рис. 2. Пример оптимальной стратегии замены оборудования с начальным возрастом 2 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ РЕЦЕНЗИЯ

Практические расчеты долгосрочного плана замены оборудования в соответствии с представленной методикой показали<sup>6</sup>, что при оптимальной замене производственного оборудования, ориентированной на минимизацию эксплуатационных расходов, можно обеспечить снижение издержек на 7,3% по сравнению с вариантом эксплуатации без замены в течение 6 лет, а при оптимальном управлении процессом замены, ориентированном на максимизацию доходов, можно обеспечить увеличение чистой дисконтированной прибыли, например, при ставке в 10% не менее чем на 35% (больше) по сравнению с традиционным вариантом эксплуатации оборудования в течение заданного периода эксплуатации (не менее 6 лет).

### Литература

1. Калихман И.Л., Войтенко М.А. Динамическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1979. – 126 с.
2. Кофман А. Методы и модели исследования операций. – М.: МИР, 1966. – 524 с.
3. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
4. Соловьева М.Х. Многомодельный подход к решению проблемы эффективного управления процессом замены производственного оборудования // Проблемы современной экономики: Евразийский международный научно-аналитический журнал. Санкт-Петербург: 2007. – №2 (22). С. 138-141.
5. Соловьева М.Х. Проблемы эффективного управления производственными активами предприятия и подходы к их решению // Аспирант, соискатель, №4 (29) М.; Спутник, 2005. С. 28-32.
6. Корнеев В.П., Соловьева М.Х. Оптимизационные методы обеспечения экономической деятельности предприятия на основе оптимальных сроков замены производственных активов: монография. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 212 с.

*Соловьева Марьям Хамзеевна*

В статье предлагается методология решения актуальной задачи – поиска оптимальной стратегии замены эксплуатируемого оборудования предприятия с любым начальным возрастом, включая и новое оборудование. Предлагаемая методика базируется на динамической модели управления процессом замены оборудования. Результатом расчета является оптимальная стратегия замены оборудования с учетом его надежности в прямом времени, обеспечивающая при этом снижение эксплуатационных издержек по сравнению с вариантом эксплуатации без замены.

Поскольку задача планирования оптимальной стратегии замены и эксплуатации нового оборудования по своей природе является многофакторной, то автором предлагается разбить решение задачи на ряд промежуточных задач, связанных с расчетом денежных потоков, прогнозом рыночных условий (параметров) и расчетом надежности оборудования, влияющей на поток будущих затрат.

Методика долгосрочного планирования замены нового оборудования предприятия сводится к двум этапам, а именно: этапу прогнозирования и расчета денежных потоков и этапу расчета оптимального срока замены на динамической модели, при этом предварительно должны быть решены следующие частные задачи и проблемы: расчет надежности и прогнозирование производственно-эксплуатационных расходов; расчет денежных доходов и прибыли; решение рекуррентного уравнения Р. Беллмана с учетом дисконтирования денежных потоков и расчет оптимальной стратегии замены оборудования

При поиске оптимальных сроков замены в качестве целевой функция автором предложены задачи: кумулятивная прибыль за период эксплуатации и суммарные издержки, связанные с эксплуатацией оборудования и учитывающие надежность оборудования.

Недостатком статьи является то, что приведенные экономические результаты базируются не на прикладных статистических данных конкретного предприятия, а на модельных исходных данных.

Однако этот недостаток не снижает интереса к рассмотренной методологии, статья представляет несомненный интерес для специалистов в области системных исследований и управления предприятием и может быть рекомендована к опубликованию в научном журнале «Аудит и финансовый анализ».

*Данчул А.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий в управлении Российской академии государственной службы при Президенте Российской Федерации*

### 4.3. METHODOLOGY OF LONG-TERM PLANNING OF PLANT EQUIPMENT REPLACEMENT IN CONSIDERATION OF ITS RELIABILITY ON DYNAMIC MODEL

M.K. Solovyova, Aspirant, the Russian Academy of State Service attached to the President of RF, General Director of Close Stock Company «Mari-Audit»

The article demonstrates method of long-term planning of plant equipment replacement. The method is based on the new method of solution of multiple-factor problem of equipment replacement. The predicted result is optimal strategy of equipment replacement for any initial age in consideration of its reliability on dynamic model. The strategy allows decreasing operating costs and decreasing equipment profitability in comparison with the option of equipment operation without replacement.

<sup>6</sup> Корнеев В.П., Соловьева М.Х. Оптимизационные методы обеспечения экономической деятельности предприятия на основе оптимальных сроков замены производственных активов: монография. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 212 с.