

УДК 658.7

**Модель расчета обменного фонда восстанавливаемых агрегатов
авиационной техники**

*Гречина В.А., магистр,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Промышленная логистика»*

*Научный руководитель: Бром А.Е.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
д.т.н., профессор
bauman@bmstu.ru*

В предшествующие годы основное внимание в ходе радикальных социально-экономических реформ уделялось созданию базовых механизмов рыночной экономики на макроуровне. Однако в ходе трансформации рыночных отношений акцент постепенно сместился на микроуровень, и на первом плане находятся вопросы реформирования существующих производственных систем, включая создание новых, рыночно-ориентированных элементов. Рациональная реорганизация предприятий, экономия инвестиционных ресурсов на местах, создание условий для освоения технологических новаций, построение адаптационных механизмов – это ключевые моменты, которые помогут всей машиностроительной отрасли встроиться в современную мировую рыночную среду.

К концу XX века российскими учеными была выстроена система взглядов на промышленное предприятие как на целостную систему хозяйственного механизма, функционирующую в тесной зависимости с внешним информационным полем, определяющим условия и возможности деятельности, определяющая промышленное предприятие как производственно-сбытовую систему (ПСС).

При укрупненном рассмотрении деятельности промышленного предприятия его ПСС можно выделить из окружающей среды и представить в виде единой организационно-хозяйственной структуры, ограниченной многослойным потоковым контуром и представляющей собой совокупность производственного процесса, процессов поставки ресурсов различного рода, материалов и комплектующих изделий, потребления готовой продукции, транспортировки и хранения.

Послепродажное обслуживание продукта, с одной стороны должно учитывать интересы потребителя, с другой стороны, быть рентабельным для производителя. При этом производитель (поставщик) продукта сталкивается с целым рядом проблем:

- планирование производственной программы должно учитывать соответствие динамики производства динамике эксплуатации продукта, обеспечивая своевременное поступления запасных частей в службы технического обслуживания и ремонта (ТОиР);
- соотношение уровня сервиса послепродажного обслуживания продукции и уровня затрат на производство, поставку, складирование запасных частей должно быть оптимальным;
- загрузка оборудования и ритмичность, непрерывность производственного цикла;
- время реакции производства на изменение структуры входящего потока потребностей в запасных частях должно быть минимальным.

Решение этого комплекса проблем в конечном итоге определяет конкурентные преимущества продукта для потребителя.

Комплекс управленческих мероприятий, направленных на решение этих проблем, объединяется в системе интегрированной логистической поддержки (ИЛП) наукоемкой продукции на стадии эксплуатации.

Организация системы технического обслуживания и ремонта и стратегии эксплуатации.

Под ИЛП понимается методология обеспечения конкурентных преимуществ наукоемкой продукции, важнейшим из которых является поддержание техники в работоспособном состоянии, с целью сокращения простоев, ведущих в недополучении прибыли и штрафным санкциям. Таким образом, встает вопрос о выборе стратегий эксплуатации сложной техники и новых методов и подходов к управлению системой эксплуатации в целом, обеспечивающих эффективность интегрированной логистической поддержки ЖЦ (жизненный цикл) наукоемкой продукции.

Система эксплуатации обладает особенностями, присущими сложным техническим системам: наличием единой цели, управляемостью, взаимосвязью элементов, иерархической структурой. Система эксплуатации должна удовлетворять требованиям, возлагаемым на эту систему: обеспечение полной безопасности, высокой эффективности использования и экономичности процессов эксплуатации наукоемкой продукции.

Стратегии эксплуатации подразделяются на эксплуатацию по наработке эксплуатационного ресурса (по времени эксплуатации или по календарным срокам) и по состоянию (определяется отказом или предотказным состоянием). С одной стороны, экономически значительно выгоднее ремонтировать изделие, когда оно достигает предельного состояния, определяемого не по наработке или времени эксплуатации, а фактическим состоянием (отказом или предотказным состоянием). В этом случае межремонтный ресурс изделию не назначается, что позволяет полностью использовать запасы работоспособности или индивидуальные ресурсы каждого экземпляра изделия и ремонтировать его только тогда, когда оно достигнет установленного для него в эксплуатационной документации предельного состояния, определяемого отказом или предотказным состоянием. С другой стороны, возникает вопрос определения фактического состояния изделия – стоимость ошибок прогнозирования момента отказа могут ликвидировать экономическую выгодность этой стратегии эксплуатации. И в России, и за рубежом сейчас ведется активный поиск и разработка различных средств, позволяющих отслеживать фактическое состояние изделий в режиме реального времени, т.к. именно путем ухода от прогноза можно решить проблему продления эксплуатационного ресурса и долговечности сложной техники.

Расчета обменного фонда восстанавливаемых агрегатов авиационной техники.

В систему обменного фонда входят следующие участники: эксплуатирующая организация, ремонтная организация, а так же возможно привлечение транспортной компании и координирующего звена.

Взаимодействие в системе происходит по схеме на рис. 1

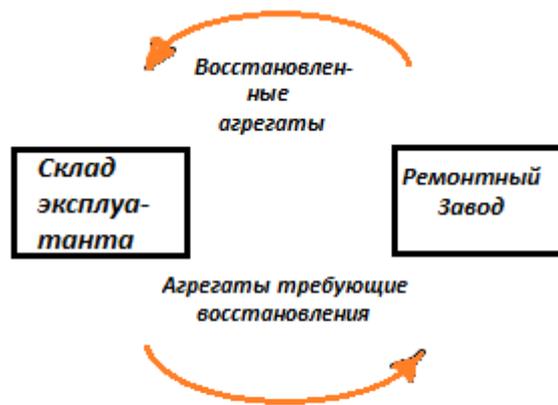


Рис. 1. Система обменного фонда

Диагностика состояния техники проводится с точностью до входящего в нее блока (узла, агрегата). С целью минимизации простоя неисправный блок немедленно заменяется на взятый из ЗИП (комплект запасных элементов, предназначенных для поддержания техники в работоспособном состоянии в течение расчетного срока её эксплуатации), а сам направляется в ремонтный орган. После прохождения необходимой процедуры восстановления (в общем случае восстановление может происходить как силами эксплуатирующей организации, так и специализированной организацией – ремонтным заводом, сервисным центром и т.п.) отремонтированный агрегат пополняет собою ЗИП.

Система рассматривается в следующем порядке:

1. Расчет вероятностных характеристик очереди на ремонт.
2. Расчет времени восстановления элемента с учетом очереди.
3. Расчет вероятностей наличия запаса.
4. Выбор оптимального запаса.

Алгоритм расчета представлен на рис. 2.

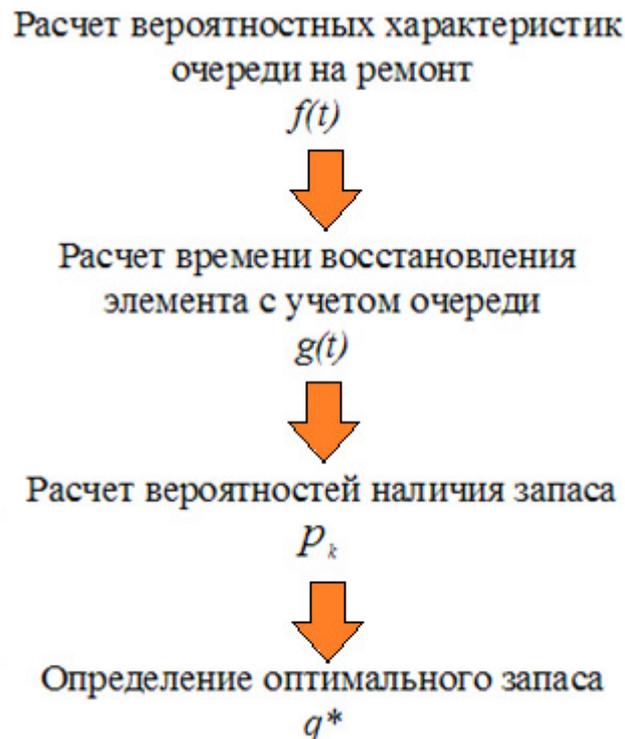


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального запаса восстанавливаемых ЗИП

Расчет вероятностных характеристик очереди на ремонт.

Модель строится для одного вида агрегатов и одного вида ремонта (т.е. распределение времени обслуживания постоянно для проводимых работ).

Поток отказов агрегатов примем стационарным пуассоновским. Параметры потока отказов выявлены в процессе ресурсных испытаний и заранее известны для всех агрегатов. Под событием понимается обнаруженный отказ.

λ – плотность потока (среднее число событий, приходящееся на единицу времени), 1/год.

Вероятность P_m того, что за время τ произойдет ровно m событий равна

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}. \quad (1.1)$$

Вероятность того, что участок окажется пустым, т.е. не произойдет ни одного события (безотказная работа), будет

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau} \quad (1.2)$$

Важной характеристикой потока является закон распределения длины промежутка между соседними событиями. Пусть T – промежуток времени между двумя произвольными событиями. Найдем функцию его распределения

$$F(t) = P(T < t).$$

Вероятность противоположного события $1 - F(t) = P(T \geq t)$.

Вероятность $P(T \geq t)$ находим по формуле (1.3) и получаем $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, $t > 0$.

Найдем плотность вероятности

$$f(t) = F'(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (1.4)$$

Закон распределения (1.4) – показательный. График плотности $f(t)$ представлен на рис. 3.

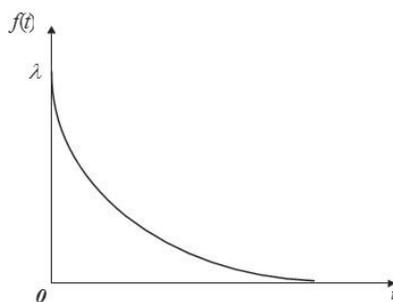


Рис. 3. Плотность вероятности $f(t)$

Расчет времени восстановления элемента с учетом очереди.

Кроме характеристик входного потока заявок (потока отказов т.е. агрегатов на восстановление), режим работы системы зависит от характеристик производительности ремонтного органа: числа каналов обслуживания n и быстродействия каждого канала.

Пусть $T_{об}$ – время обслуживания одной заявки, $G(t)$ – функция ее распределения, $g(t)$ – плотность распределения. Тогда

$$G(t) = P(T_{об} < t)$$

$$g(t) = G'(t)$$

В нашем случае особый интерес представляет случай, когда величина $T_{об}$ имеет показательное распределение, т.к. именно к такому типу часто можно отнести обслуживание по устранению неисправностей технических устройств, когда поиски неисправной детали или узла осуществляются рядом тестов и проверок.

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (t > 0), \quad (1.5)$$

где μ – величина, обратная среднему времени обслуживания одной заявки:

$$\mu = \frac{1}{m_{t_{об}}}, \quad m_{t_{об}} = M[T_{об}].$$

Расчет вероятностей наличия запаса.

Допущения о пуассоновском характере потока заявок (1.4) и о показательном распределении времени обслуживания (1.5) ценны тем, что позволяют применить в теории массового обслуживания аппарат Марковских случайных процессов.

Процесс, протекающий в системе, называется Марковским (или процессом без последствия), если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Определим возможные состояния в системе обменного фонда. Рассматриваемая система – это дискретная система с непрерывным временем и конечным множеством состояний. Обозначим x_k состояние, когда в ремонте находится одновременно k агрегатов.

q – общее количество запасных агрегатов в системе, шт.

m – количество эксплуатируемых изделий, шт. На каждом изделии установлен один рассматриваемый агрегат. При отказе агрегата и отсутствии на складе эксплуатанта замены фиксируется простоя и начисляется штраф.

Тогда состояния системы:

x_0 – нет агрегатов в ремонте, все они на складе или эксплуатируются,

x_1 – один агрегат в ремонте,

x_2 – два агрегата в ремонте,

....

x_q – q агрегатов в ремонте (на складе нет запасных агрегатов),

x_{q+1} – $q+1$ агрегат в ремонте, одно изделие простаивает,

....

x_m – m в ремонте, на складе нет запасных агрегатов, вся техника простаивает.

Обозначим переходы между этими состояниями (рис.4)

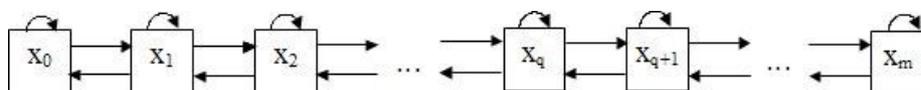


Рис. 4. Схема возможных переходов.

Закругленная стрелка, направленная из состояния x_k в него же, означает, что система может перейти в соседнее состояние, а может остаться в прежнем.

Очевидно, что сразу после включения системы в работу, протекающий в ней процесс не будет стационарным: в системе массового обслуживания (как и в любой динамической системе) возникает «переходный», нестационарный процесс. Однако, спустя некоторое время, этот переходный процесс затухнет, и система перейдет в стационарный режим, «установившийся» режим, вероятностные характеристики которого не будут зависеть от времени.

Пусть p_k – стационарная вероятность нахождения системы в состоянии x_k при $0 \leq k \leq n$, где n – количество каналов обслуживания.

Для p_k выполняется условие:

$$\sum_{k=0}^n p_k = 1. \quad (1.6)$$

Для системы с отказами получим следующее:

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu} p_0. \quad (1.7)$$

И обобщая (1.7) при $0 \leq k \leq n$:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} p_0 \quad (1.8)$$

Через (1.5) и (1.6) выразим p_0 и p_k :

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!}}, \quad (1.9)$$

где

$a = \frac{\lambda}{\mu}$ – приведенная плотность потока заявок, т.е. среднее число заявок,

приходящееся на время обслуживания одной заявки.

С учетом (1.8) и (1.9) получим окончательно:

$$p_k = \frac{a^k / k!}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!}}, \quad (0 \leq k \leq n) \quad (1.10)$$

Вероятность отказа в этом случае будет равно вероятности того, что пришедшая заявка найдет все каналы занятыми. Найдем по формуле (1.10) при $k=n$:

$$P_{отк} = p_n = \frac{a^n / n!}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!}}. \quad (1.11)$$

В системе с ожиданием заявка, заставшая все каналы занятыми, становится в очередь и ждет, пока не освободится какой-нибудь канал. Рассмотрим случай чистой системы с ожиданием, где заявки не удаляются из очереди и рано или поздно будут обслужены. Такой случай более трудоемкий по расчетам, но наиболее близок к реальной системе обменного фонда.

Стационарный режим в такой системе имеет место только при $a < n$, т.е. когда среднее число заявок, приходящееся на время обслуживания одной заявки не выходит за возможности n -канальной системы. Если же $a \geq n$, число заявок в очереди будет с течением времени неограниченно возрастать. Таких ситуаций в практике следует избегать, поэтому будет вести расчеты для установившегося режима.

Расчет вероятностей состояния системы ведется по формулам:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}} \quad (1.12)$$

Для $0 \leq k \leq n$, когда очереди не образуется и все пришедшие заявки обслуживаются:

$$p_k = \frac{\frac{a^k}{k!}}{\sum_{k=1}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}} \quad (1.13)$$

Для $k = n + s$ ($s \geq 0$), где s – число заявок, находящихся в очереди на обслуживание.

$$p_{n+s} = \frac{\frac{a^{n+s}}{n!n^s}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}} \quad (1.14)$$

Максимальная очередь в рассматриваемом случае будет иметь место в состоянии X_m и равна $S_{\max} = m - n$. Очередь будет иметь место в состояниях X_k при $n < k \leq m$.

Среднее число заявок, находящихся в очереди, определяется из формулы (1.15):

$$m_s = \frac{\frac{a^{n+1}}{n \cdot n! \left(1 - \frac{a}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}} \quad (1.15)$$

Расчет числа заявок в очереди необходим организации хранения и учета агрегатов, находящихся в ожидании обслуживания.

Выбор оптимального запаса.

Выбор оптимального запаса осуществляется по критерию оптимальности с соответствующими ограничениями.

В качестве целевой функции выберем годовых затрат на содержание обменного фонда объемом ЗИП q единиц. Прием упрощение, что эти затраты $L(q)$ составлены двумя основными элементами: плата за хранение $L_{\text{хран}}(q)$ и штрафы $L_{\text{штраф}}(q)$ за отсутствие на складе агрегата на замену (формула (1.16)).

$$L(q) = L_{\text{штраф}}(q) + L_{\text{хран}}(q) \quad (1.16)$$

На рисунке 5 показано какие затраты возникают в различных состояниях системы.

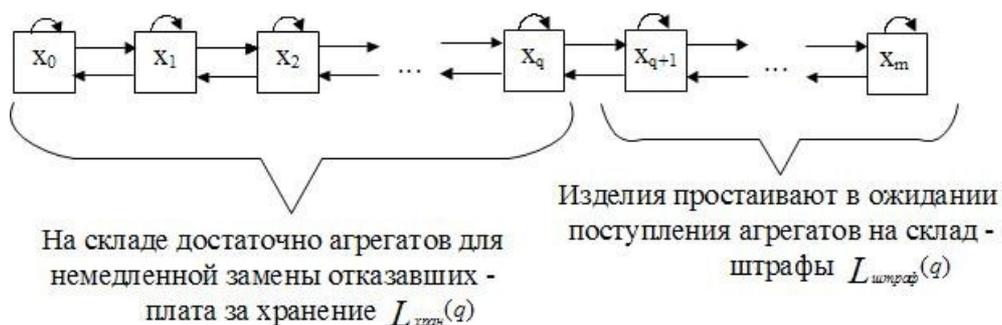


Рис. 5. Состояния системы обменного фонда

Штраф за отсутствие запчастей на складе начисляется в состояниях x_k при $q+1 \leq k \leq m$.

Рассчитаем его так на основании математического ожидания количества агрегатов в ремонте для дискретного случая:

$$L_{\text{штраф}}(q) = d \sum_{k=q+1}^m (k-q) p_k, \quad (1.17)$$

где d – цена штрафа за отсутствие агрегата на складе и соответствующий простой, д.е.·шт./год

Плата за хранение запчастей на складе начисляется в состояниях x_k при $0 \leq k \leq q$. Плата за хранение может рассчитываться как по среднему числу хранимых на складе агрегатов $L_{\text{хран}_1}(q)$, так и по общему числу запасных агрегатов в системе $L_{\text{хран}_2}(q)$.

$$L_{\text{хран}_1}(q) = h \sum_{k=0}^q (q-k) p_k, \quad (1.18)$$

$$L_{\text{хран}_2}(q) = hq, \quad (1.19)$$

где h – цена хранения, д.е.·шт/год

При первом варианте (1.18) расчета игнорируются затраты, возникающие при хранении агрегатов вне склада эксплуатанта. Во втором варианте (1.19) плата начисляется по максимальному комплекту ЗИП, а не по числу исправных элементов. Примем второй вариант расчета (1.19), как наиболее часто применяемый в задачах данного типа.

Поставим формулы (1.17) и (1.19) в (1.16):

$$L(q) = L_{\text{штраф}}(q) + L_{\text{хран}}(q) = d \sum_{k=q+1}^m (k-q) p_k + hq \quad (1.20)$$

$$L(q) \rightarrow \min$$

Искомым является значение q^* минимизирующее функцию $L(q)$. С учетом дискретности q , q^* находим по условию:

$$\begin{cases} L(q^*+1) - L(q^*) \geq 0, \\ L(q^*-1) - L(q^*) \geq 0. \end{cases} \quad (1.21)$$

Подставим (1.20) в (1.21) и получим неравенства:

$$\begin{cases} h - d \sum_{k=q^*+1}^m p_k \geq 0, \\ d \sum_{k=q^*}^m p_k - h \geq 0. \end{cases} \quad (1.22)$$

Подстановкой конкретного распределения $\{p_k\}$ вычисляется q^* .

Расширение модели.

Учет дополнительных задержек.

При заметной удаленности ремонтного органа следует учитывать дополнительное снижение объема ЗИПа за время T доставки агрегата в ремонт и обратно. При простейшем потоке заявок это распределение для фиксированного T подчинено закону Пуассона:

$$a_j = \frac{(\lambda T)^j}{j!} e^{-\lambda T}, \quad j=0,1.. \quad (1.23)$$

где a_j – вероятность появления j событий (заявок) за время T .

Для случайного времени с плотность распределения $\nu(t)$:

$$a_j = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t} \nu(t) dt, \quad j=0,1.. \quad (1.24)$$

Результирующее снижение ЗИПа получается сверткой распределений числа агрегатов, находящихся в транспортировке и непосредственно в ремонте.

Учет нестационарности потока отказов.

В течении времени эксплуатации параметр потока отказов $\lambda(t)$ не всегда постоянен. Это связано со старением агрегатов. График изменения интенсивности отказов со временем показан на рис. 6.

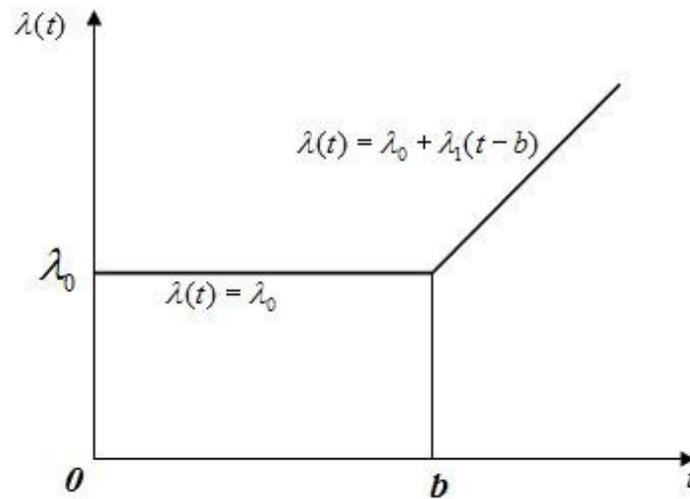


Рис. 6. Модель изменения интенсивности отказов

Функцию $\lambda(t)$ представляют следующей аналитической моделью:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0, & t < b \\ \lambda_0 + \lambda_1(t - b), & t \geq b \end{cases}, \quad (1.25)$$

где λ_0 – начальная интенсивность отказов, b – момент времени, когда начинается резкое возрастание интенсивности, λ_1 – параметр изменения интенсивности отказов.

Ранее расчеты проводились для случая $\lambda(t) = \lambda_0$.

Принятой модели изменения интенсивности отказов соответствующая плотности вероятности времени безотказной работы:

$$f(t) = e^{-\int \lambda(t) dt} = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \\ [\lambda_0 + \lambda_1(t - b)] e^{-(\lambda_0 - \lambda_1 b)t - \frac{\lambda_1}{2}(t^2 + b^2)} \end{cases} \quad (1.26)$$

Таким образом, модель применима и для нестационарного пуассоновского потока.

Рассмотрев данную модель алгоритма расчета обменного фонда восстанавливаемых агрегатов для АТ, мы можем формировать их рациональный запас.

Список литературы

1. Бром А.Е., Колобов А.А., Терентьева З.С. Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла наукоемкой продукции. А.А. Колобов, ред. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 296 с.

2. Барзилович Е.Ю., Мезенцев В.Г., Савенков М.В. Надежность авиационных систем. М.: Транспорт, 1982. 182с.
3. Левин А.И., Судов Е.В. Концептуальные основы управления конкурентоспособностью наукоемкой продукции. Методический материал. М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2005. 33 с.
4. Материалы конференции «ТОиР: Перспективы Российского рынка», 2006.