

Научная статья
УДК 519.87

Применение логистических моделей в задачах программно-целевого планирования и управления жизненным циклом вооружения и военной техники

Александр Иванович Буравлев, Игорь Михайлович Чаткин

Аннотация. В статье рассмотрен комплекс логистических моделей для решения задач планирования и управления техническим состоянием и качеством образцов вооружения и военной техники на всех этапах жизненного цикла. Выбор этих моделей осуществлялся на принципах унификации и простоты математического описания, физической и экономической интерпретации моделей, возможностей определения их параметров по статистическим и экспертным данным. В качестве критерия оценки технического состояния и качества образцов вооружения и военной техники используется интегральный показатель их военно-технического уровня, построенный на базе тактико-технических характеристик в сопоставлении с эталонными образцами. Предлагаемые модели целесообразно использовать в задачах планирования и прогнозирования состояния разработки, производства и технической эксплуатации образцов вооружения и военной техники, в том числе системах их информационно-аналитической поддержки.

Ключевые слова: жизненный цикл вооружения и военной техники; показатель военно-технического уровня образцов вооружения и военной техники; логистическая модель «эффект-затраты»; динамика изменения показателя военно-технического уровня и стоимости затрат на этапах жизненного цикла

Для цитирования: Буравлев А.И., Чаткин И.М. Применение логистических моделей в задачах программно-целевого планирования и управления жизненным циклом вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2026. №2(76). С. 30-44.

Original article

The Logistic Models Application in the Tasks of Program-Oriented Planning and Life Cycle Management of Weapons and Military Equipment

Aleksandr I. Buravlev, Igor M. Chatkin

Abstract. The article considers a set of logistic models for planning and management problems solution concerning the weapons and military equipment technical condition and quality at all stages of life cycle. The model selection was based on the principles of mathematical description unification and simplicity, physical and economic model interpretation, and the ability to determine their parameters based on statistical and expert data. As a criterion for the technical condition and quality assessment of weapons and military equipment samples, an integral indicator of their military-technical level is used, based on tactical and technical characteristics in comparison with reference samples. It is advisable to use the proposed models in the planning and forecasting tasks of weapons and military equipment samples development, production and technical operation status, and their information and analytical support systems as well.

Keywords: the life cycle of weapons and military equipment; an indicator of the military-technical level of weapons and military equipment samples; effect-input logistics model; dynamics of changes in the indicator of military-technical level and cost of inputs at the stages of the life cycle

For citation: Buravlev A.I., Chatkin I.M. The Logistic Models Application in the Tasks of Program-Oriented Planning and Life Cycle Management of Weapons and Military Equipment. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 76(2): 30-44. (In Russ.).

Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) образцов ВВТ включает себя последовательность стадий и этапов разработки, производства, эксплуатации и применения (утилизации) образцов ВВТ по назначению [1]. Все эти этапы реализуются в течение определенного времени, составляющего продолжительность жизненного цикла. Распространенной структурно-параметрической моделью ЖЦ является сетевая модель, задаваемая сетевым графиком или диаграммой Ганта [2-4]. Для моделирования процесса изменения технического состояния изделия

в процессе ЖЦ широко применяются различного рода математические и компьютерные модели [1-5].

В прикладных задачах программно-целевого планирования систем вооружения [1; 3-6] важно иметь модели для интегральной оценки и прогнозирования военно-технического уровня как существующих, так и перспективных образцов ВВТ. В качестве интегрального показателя военно-технического уровня (ВТУ) образцов ВВТ широко используются различные свертки их тактико-технических характеристик [1; 2]. Показатель военно-технического уровня $K_{ВТУ}$, рассчитываемый по основным (агрегированным) тактико-техническим характеристикам относительно заданного эталонного (базового) образца ВВТ, часто представляется аддитивной линейной и мультипликативной степенной свертками:

$$K_{ВТУ} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{x_i}{x_i^0}; K_{ВТУ} = \prod_{i=1}^m \left(\frac{x_i}{x_i^0} \right)^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где: $\frac{x_i}{x_i^0}$, $(i = \overline{1, m})$ – количественное соотношение характеристик исследуемого и эталонного образца ВВТ;

$\alpha_i > 0$; $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ – нормированные коэффициенты значимости, определяемые экспертами.

Если $K_{ВТУ} > 1$, то исследуемый образец интегрально (по совокупности характеристик) имеет более высокий военно-технический уровень по сравнению с эталонным. В противном случае приоритет остается за эталонным образцом.

Мультипликативная свертка в отличие от аддитивной обращается в нуль, если хотя бы одна характеристика образца ВВТ принимает нулевое значение. Это означает, что в мультипликативной свертке не допускается компенсация характеристик образцов ВВТ другими характеристиками, не предусмотренными техническим заданием (ТЗ). Мультипликативная свертка является многопараметрическим индексом, а индексный метод анализа и прогнозирования широко используется в технике, экономике, социологии.

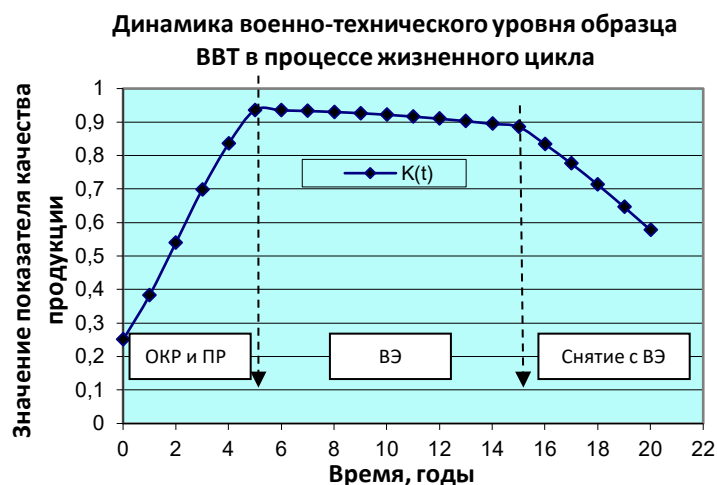
Использование показателя $K_{ВТУ}$ позволяет проследить всю динамику изменения военно-технического уровня образца ВВТ в течение его жизненного цикла.

К началу технической разработки образца ВВТ его военно-технический уровень и готовность к реализации определяется научно-техническим заданием (НТЗ). Далее в ходе эскизного и технического проектов НТЗ материализуется в конструктивно-технологические решения, которые далее воплощаются в реальном производстве. На всех этапах жизненного цикла вплоть до создания серийного образца происходит развитие и совершенствование образца. После завершения производства серийные образцы ВВТ поступают на эксплуатацию в войска. В ходе войсковой эксплуатации для поддержания ВТУ изделия ВВТ подвергаются периодическому техническому обслуживанию, ремонту в случае возникновения отказов и неисправностей, а также доработкам, связанным с их модернизацией. С течением времени показатель военно-технического уровня $K_{ВТУ}$ образцов снижается в силу их физического и морального устаревания. Эта естественная эволюция образца завершается либо его глубокой модернизацией, либо снятием его с эксплуатации и заменой новыми образцами. На рисунке 1 показан типичный график динамики изменения военно-технического уровня образца ВВТ, на котором отмечены этапы зарождения, создания, эксплуатации и применения по назначению, вплоть до утилизации.

Для каждого этапа жизненного цикла существует разработанный научно-методический аппарат, включающий концепции, модели и расчетные методики, а также программные и инструментальные средства для их реализации.

Анализ многочисленных источников, в которых рассматривается научно-методический аппарат по обоснованию, разработке, производству и использованию образцов различных промышленных изделий, показывает, что его основу составляют *логистические* модели [1-5]. Логистические модели представляют собой нелинейные функции, содержащие в себе механизмы положительных и отрицательных обратных связей, обеспечивающие

монотонное, но с убывающей скоростью возрастание целевой функции вплоть до ее «насыщения». Поэтому иногда логистическую функцию называют функцией с насыщением или S-образной функцией.



Примечание: ОКР и ПР – опытно-конструкторская разработка и производство; ВЭ – войсковая эксплуатация.

Рисунок 1 – Динамика изменения военно-технического уровня образца ВВТ

Среди большого количества уже известных логистических моделей [7-13] авторами отобраны наиболее простые и вполне адекватные как с физической, так и экономической точки зрения логистические модели в целях унификации научно-методического аппарата научных исследований. Это облегчает задачу поиска и освоения научного инструментария, его погружение в «цифровую среду» и разработку прикладных компьютерных программ для автоматизированных информационных систем, в том числе с наличием элементов искусственного интеллекта.

1 Логистическая модель концептуального формирования изделия ВВТ на этапе НИОКР

На этапе формирования научно-исследовательских и опытно конструкторских работ (НИОКР) динамика разработки технологий и инженерно-конструкторских решений для перспективного образца ВВТ может быть описана логистической функцией для показателя $K_{ВТУ}$ (1). В качестве базовых рассматриваются зарубежные или перспективные отечественные технологии и их техническое воплощение, применяемые в различных областях техники. Количественная оценка соотношения сравниваемых технологий и показатели их значимости может быть получена известными экспертно-экспериментальными методами [13].

Уравнение динамики ВТУ изделия можно описать следующим уравнением:

$$dK/dt = vK(1 - t/T_{ПР}), \quad (2)$$

при краевых условиях: $t = 0$; $K(0) = K_0$; $t = T_{ПР}$; $K(T_{ПР}) = K_{зад}$,

где: v_T , $1/\text{время}$ – интенсивность роста показателя военно-технического уровня изделия во времени;

$T_{ПР}$ – время реализации проекта;

$K_{зад}$ – заданное значение показателя ВТУ к моменту окончания проекта.

В этой модели показатель K , стоящий в правой части уравнения (2) реализует положительную, а множитель $(1 - t/T_{\text{ПР}})$ – отрицательную обратную связь для процесса наращивания военно-технического уровня изделия ВВТ. В отличие от известных моделей [3-5; 7; 8; 10-12] данная модель реализует возможность достижения заданного результата на конечном интервале времени.

Решение уравнения (1) при начальном условии $t = 0$; $K(0) = K_0$ имеет вид:

$$K(t) = K_0 \exp[v_T T_{\text{ПР}}/2 (1 - (1 - t/T_{\text{ПР}})^2)]. \quad (3)$$

Из заданного краевого условия $t = T_{\text{ПР}}$; $K(T_{\text{ПР}}) = K_0 \exp[v_T T_{\text{ПР}}/2] = K_{\text{зад}}$ находим требуемую интенсивность роста НТЗ для реализации проекта:

$$v_T = 2/T_{\text{ПР}} \ln(K_{\text{зад}}/K_0). \quad (4)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (2), получаем более компактное выражение для решения уравнения (2):

$$K(t) = K_{\text{зад}} \exp[-\beta(1 - t/T_{\text{ПР}})^2], \quad (5)$$

где: $\beta = \ln(K_{\text{зад}}/K_0)$ – безразмерный коэффициент.

Формулы (3) и (5) являются эквивалентными с точки зрения получения численного результата и отличаются только формами записи и использованием разных начальных условий.

Интенсивность разработки новых материалов, технологий, инженерно-конструкторских решений во многом зависит от финансирования фундаментальной и прикладной науки, уровня подготовки научных и инженерных кадров, эффективной организации их работы и внедрения полученных результатов в практику.

Решающим фактором здесь выступает объем и порядок финансирования НИОКР, поскольку при отсутствии финансирования все остальные факторы не имеют значимого влияния на процесс разработок. В этом случае важно иметь модель связи показателя ВТУ с объемом финансирования разработок. Такая модель может быть получена из уравнения (2) путем замены временного аргумента t на стоимостной $C(t)$:

$$dK/dC = v_c K[1 - C/C_{\text{ПР}}], \quad (6)$$

с краевыми условиями: $t = 0$; $C(0) = 0$; $K(0) = K_0$; $t = T_{\text{ПР}}$; $C(T_{\text{ПР}}) = C_{\text{ПР}}$; $K(T_{\text{ПР}}) = K_{\text{зад}}$,

где: v_c , 1/д. е. – интенсивность роста ВТУ за единицу стоимости затрат;
 $C_{\text{ПР}}$ – бюджет проекта.

В данной модели отрицательная обратная связь реализуется по расходу бюджета проекта.

Решение уравнения (6) имеет вид, аналогичный (5):

$$K(t) = K_{\text{зад}} \exp[-\beta(1 - C(t)/C_{\text{ПР}})^2]; \beta = \ln(K_{\text{зад}}/K_0). \quad (7)$$

Значения показателя K , рассчитанные по формулам (4) и (6) полностью совпадают при равномерном распределении бюджета проекта с постоянным годовым расходом:

$$c_t = C_{\text{ПР}}/T_{\text{ПР}}.$$

Во всех остальных случаях динамика прироста показателя ВТУ по времени и по стоимости годовых затрат будет различной.

Полученные выше уравнения связывают военно-технические и технико-экономические характеристики продукции с выходным показателем ее качества и временем реализации проекта, что является весьма актуальным для задач программно-целевого планирования и управления развитием ВВТ.

На рисунке 2 показаны графики динамики формирования НТЗ для опытно-конструкторских работ при разных темпах финансирования программ. Одна программа финансируется с годовым бюджетом $c_T = 0,5$ у.е. в течение $T_{\text{ПР}} = 10$ лет, вторая – с годовым бюджетом $c_T = 2,0$ у.е. в течение $T_{\text{ПР}} = 5$ лет. Обе программы имеют одинаковые начальные и конечные значения показателя НТЗ.

Как видно из рисунка, используемая логистическая модель описывает нелинейный характер роста уровня НТЗ в зависимости от объемов и темпов финансирования и отражает присущую высокотехнологической военно-технической продукции закономерность ее эволюционного развития.

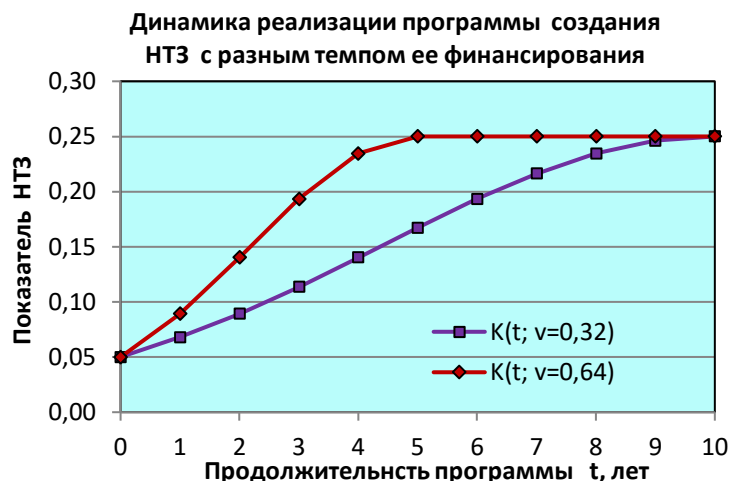


Рисунок 2 – Динамика реализации программы НТЗ с разными условиями финансирования

С течением времени в результате естественного роста цен, а также инфляции происходит обесценивание денежных средств, составляющих бюджеты проектов и программ [2; 14; 15]. Учет влияния инфляции можно осуществить посредством уменьшения количества денег в бюджете проекта. Динамику снижения объема бюджетного финансирования под действием инфляции можно описать следующим уравнением:

$$C(t) = C(t-1) + C_t(1-u)^{t-1}; \quad (t = 1, 2, \dots, T_{\text{ПР}}), \quad (8)$$

где: C_t , ($t = 1, 2, \dots, T_{\text{ПР}}$) – годовой объем финансирования проекта;

$u > 0$ – среднегодовой темп инфляции в оборонно-промышленном комплексе (ОПК).

Уменьшение объема финансирования C в правой части уравнения (7) приводит к уменьшению показателя военно-технического уровня K продукции. В целях сохранения заданных показателей военного производства $T_{\text{ПР}}$, $K_{\text{ВТУ}}$ необходимо увеличивать финансирование проекта на величину дефлятора $d > 0$:

$$C^*(t) = C^*(t-1) + C_t(1-u+d)^{t-1}. \quad (9)$$

В существующих методиках [2; 14; 15] влияние инфляции также учитывается дефлятором, однако его величина не всегда отражает истинный уровень инфляции, возникающий в определенной сфере экономики, отрасли производства, вида и типа производимой продукции. В формуле (9) дефлятор d сравнивается с конкретным уровнем инфляции u , что позволяет установить реальную компенсацию затрат на производство продукта.

На рисунке 3 показаны графики динамики показателя НТЗ в различных технико-экономических условиях: отсутствие инфляции ($u = 0$), ее наличии ($u = 0,10$) и частичной ее компенсации ($d = 0,07$).

Практика финансирования оборонных программ показывает, что компенсация инфляции осуществляется после завершения расчетного года, т.е. с опозданием как минимум на год. В результате предприятие вынуждено в текущем году осуществлять финансирование за счет собственных средств либо использовать заемные средства с определенной процентной ставкой. Все это приводит к увеличению финансовой нагрузки на предприятие.

Рассмотренные выше модели позволяют прогнозировать возможный рост цен на комплектующие и материалы, и заранее формировать финансовые резервы для обеспечения предстоящего производственного процесса.

Важным вопросом является также выбор стратегии финансирования программы (проекта) по годам программного периода. В практике программно-целевого планирования чаще всего применяется равномерное распределение бюджета программы с постоянным годовым объемом $c_T = C_{\text{ПР}}/T_{\text{ПР}}$. Эта схема является наиболее простой с точки зрения планирования, в том числе с учетом инфляции. Однако равномерное распределение не всегда является оптимальным. Вполне очевидно, что бюджет программы должен отражать динамику изменения показателя ВТУ создаваемой продукции. Это соответствие можно обеспечить, если темп финансирования будет согласован с темпом роста военно-технического уровня продукта при заданном бюджете $C_{\text{ПР}}$:

$$dC/dt = \gamma dK/dt, \quad (10)$$

где: $\gamma > 1$ – коэффициент пропорциональности темпов роста эффекта и затрат на его достижение.

Интеграл от этого уравнения при краевых условиях: $t = 0$; $K(0) = K_0$; $C(0) = 0$; $t = T_{\text{ПР}}$; $K(T_{\text{ПР}}) = K_{\text{зад}}$; $C(T_{\text{ПР}}) = C_{\text{ПР}}$ приводит к следующему выражению:

$$C(t) = C_{\text{ПР}} \cdot (K(t) - K_0) / (K_{\text{зад}} - K_0). \quad (11)$$

На рисунке 4 приведены графики функций затрат на реализацию программы НИОКР при равномерном (6) и неравномерном (8) распределении бюджета.

Оценка среднего годового расхода бюджета при равномерном распределении оказывается на 9 % выше, чем при распределении, пропорционально темпу роста $K_{\text{ВТУ}}$.

В качестве иллюстрации применения рассмотренных выше логистических функций построим модель технико-экономической оценки и прогнозирования результатов НИОКР, включающих в себя этапы создания НТЗ и ОКР некоторого образца ВВТ. Программа НТЗ реализуется в течение времени $T_{\text{НТЗ}} = 5$ лет с начальным уровнем задела $K_0 = 0,05$ до уровня $K_{\text{НТЗ}} = 0,25$, необходимого для начала ОКР. Объем финансирования НТЗ составляет

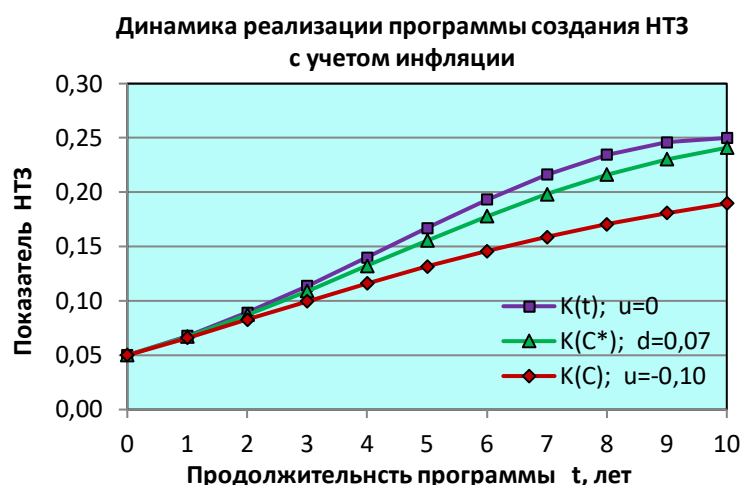


Рисунок 3 – Динамика реализации программы НТЗ с учетом инфляции

$C_{НТЗ} = 5,0$ у.е. Целью ОКР является создание опытного образца ВВТ и соответствующей технической документации для серийного производства изделия с показателем ВТУ $K_{ОКР} = 1,1$ относительно заданного эталонного образца в течение времени $T_{ОКР} = 5$ лет и бюджетом проекта $C_{ОКР} = 10,0$ у.е. Общие затраты на НИОКР составляют $C_{НИОКР} = 15$ у.е.

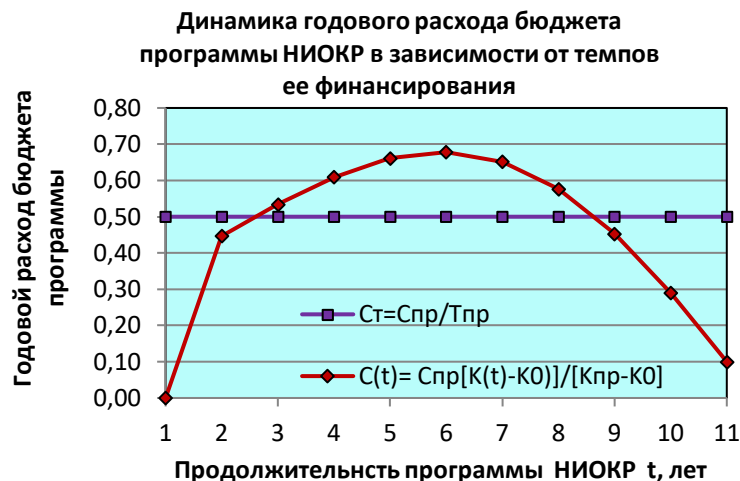


Рисунок 4 – Динамика годового расхода бюджета программы НИОКР для разных темпов ее финансирования

На рисунке 5 приведены графики ожидаемой динамики показателя $K_{ВТУ}$ общих затрат на НИОКР $C_{НИОКР}$. График расхода бюджета проекта на рисунке представлен в относительном виде $C_{пр}(t)/C_{НИОКР}$.

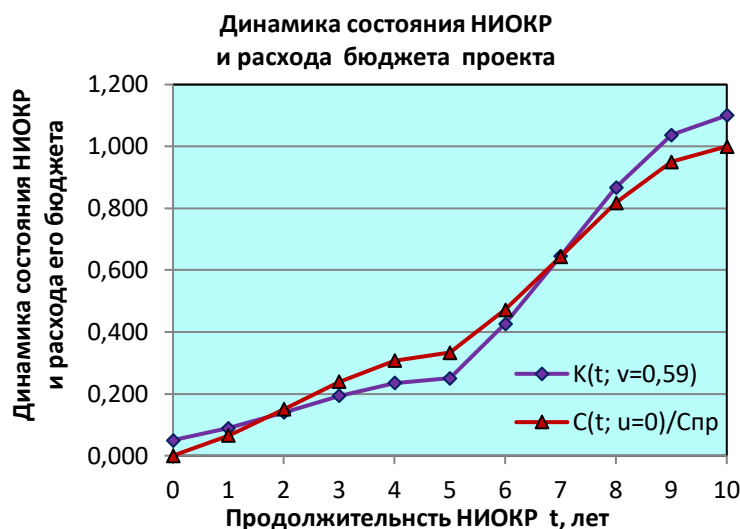


Рисунок 5 – Динамика технико-экономических показателей НИОКР

Как видно из графиков $K(t)$, $C_{пр}(t)$ их траектории практически совпадают, что соответствует принятой выше гипотезе. Дело остается за малым – найти масштаб соотношения «эффект-затраты» $C(t)/K(t)$. Эта задача рассматривается ниже.

Следующей стадией и этапом жизненного цикла является серийное производство изделий ВВТ.

2 Логистическая модель серийного производства изделия ВВТ

В процессе серийного производства происходит тиражирование конструкторско-технологических решений в серийных образцах ВВТ.

Задачей управления на данном этапе ЖЦ является обеспечение заданного объема производства и военно-технического качества изделий в соответствии с утвержденной технической документацией.

Основными технико-экономическими показателями производства являются:

- количество технологических потоков сборки и монтажа изделия;
- трудозатраты по технологическому циклу производства;
- уровень механизации и автоматизации технологических процессов;
- уровень квалификации производственного персонала;
- система менеджмента качества производственных и обеспечивающих процессов.

Все перечисленные характеристики имеют количественное измерение и агрегируются в ряд ключевых технико-экономических показателей:

- стоимость основных фондов (ОФ) производства;
- численность рабочих, инженерно-технических специалистов, управленцев и вспомогательного персонала;
- трудозатраты на выполнение различных производственных операций и продолжительность $T_{Ц}$ технологического цикла;
- мощность производства продукции – Q_m ед. в год;
- себестоимость производства единицы продукции C_c и рентабельность производства продукции r .

Для освоения серийного производства и выхода его на заданный уровень мощности требуется определенное время t_m . Динамику объема производства, измеряемого количеством произведенной продукции в течение года, часто описывают кусочно-линейной логистической функцией [1; 7]. Однако здесь также хорошо подходит логистическая модель «эффект-стоимость» (7):

$$Q(t) = \begin{cases} Q_m \exp[-\beta(1 - t/t_m)^2], & 0 \leq t < t_m \\ Q_m, & t \geq t_m \end{cases} \quad (12)$$

Затраты ресурсов, используемые при производстве продукции, выражаются показателем себестоимости единицы продукции $C_c(t)$, составляющими которой являются амортизация ОФ предприятия, закупка материалов и комплектующих, оплата труда работников основного и вспомогательных производств, административно-хозяйственные расходы [14]. Себестоимость определяет цену продаж $Ц$ продукции и зависит от условий поставки ее заказчику.

Эффективность производства характеризуется показателем рентабельности $r = 1 - C_c/Ц$, который устанавливается контрактом на производство и поставку продукции заказчику. В процессе производства и поставки продукции заказчику гарантируется заданный военно-технический уровень качества $K^{зад}$ и своевременность поставки продукции.

Инфляция в экономике увеличивает себестоимость продукции. Задержка в компенсации инфляции или ее неполная компенсация, как уже отмечалось выше, приводит к задержкам или даже срыву плана поставок продукции заказчику, о чем свидетельствует практика исполнения оборонных заказов.

Важной задачей на данном этапе является контроль выполнения гособоронзаказа (ГОЗ) по технологическим графикам производства ВВТ, своевременное обнаружение отклонений от плана-графика и прогноз возможных последствий. Контролю в первую очередь подвергаются работы, лежащие на критическом пути $L_{кр}$ технологического графика и определяющие его продолжительность:

$$T_{кр} = \sum_{j \in L_{кр}} t_j.$$

Отклонения продолжительности выполнения работ имеют случайную природу, поэтому продолжительность критического пути $T_{кр}$ является случайной величиной, имеющей близкое к нормальному распределению вероятностей [2]. Это позволяет аналитически рассчитать риск невыполнения технологического графика производства по формуле:

$$R(T_{кр}^{зад}) \cong 1 - 2\Phi_0(T_{кр}^{зад} - \bar{T}_{кр})/\sigma_{кр}, \quad (13)$$

где: $\bar{T}_{кр}$, $\sigma_{кр}$ – оценки среднего значения и среднеквадратическое отклонение $T_{кр}$, рассчитываемые по результатам контроля технологического графика ГОЗ предыдущего периода; $T_{кр}^{зад}$ – заданная продолжительность критического пути для обеспечения требуемой производительности производственного процесса;

$\Phi_0(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_0^x \exp(-t^2/2)dt$ – табличная функция Лапласа-Гаусса, которая для практических вычислений хорошо аппроксимируется аналитической функцией:

$$\Psi_0(x) = \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2x^2}{\pi}\right)}/2.$$

В качестве аналитического инструмента календарного планирования производственных процессов в настоящее время широко используются известные программные средства Project Expert 3.0, Альт-Инвест, «Арена» и др. Однако в них отсутствуют алгоритмы автоматического расчета параметров технологических графиков и их коррекции с учетом отклонений реализаций от плановых значений. Также отсутствует прогноз риска невыполнения календарного плана за заданное время.

3 Логистическая модель технического обеспечения ВВТ на этапе войсковой эксплуатации

Эта задача подробно рассматривалась в работах [3-5; 9] с точки зрения обеспечения исправности и боевой готовности ВВТ в войсках. Исправность и боеготовность ВВТ являются важными компонентами показателя ВТУ и отражают пригодность ВВТ к выполнению боевых и специальных задач. В этом смысле они часто рассматриваются как показатели, связывающие *военно-технический уровень* и качество ВВТ с показателями его *боевой эффективности*.

Техническое обеспечение ВВТ в условиях войсковой эксплуатации осуществляется путем проведения *профилактического обслуживания* (целевые технические осмотры и проверки, пристрелка оружия и юстировка прицельных систем, регламентные работы, перевод на летнюю и зимнюю эксплуатацию и др.) и *ремонта* (текущего – устранение отказов, среднего – замена деталей, выработавших ресурс, капитального – восстановление технического ресурса изделия ВВТ).

В работах [3; 5; 9; 12] рассмотрены вероятностные модели управления техническим обеспечением образца ВВТ с использованием логистической модели его технической готовности. Показателем технической готовности является вероятность нахождения образца ВВТ в исправном (работоспособном) состоянии в любой момент срока службы t и подготовленности за заданное время $\tau_{пп}$ к боевому применению в варианте вооружения, установленным боевым расписанием:

$$P_{ТГ}(t + \tau_{пп}) = P_{ТГ}(t)P_{ТГ}(\tau_{пп}|t), \quad (14)$$

где: $P_{ТГ}(\tau_{пп}|t)$ – вероятность, что к моменту начала цикла боевого применения изделие будет находиться в боеготовом состоянии.

Умножив левую и правую части уравнения на вероятности сохранения работоспособного состояния в процессе боевого применения $P_{ТГ}(\tau_{бп})$, получаем показатель боеготовности образца ВВТ в цикле боевого применения:

$$P_{БГ}(t + \tau_{пп} + \tau_{бп}) = P_{ТГ}(t + \tau_{пп})P_{ТГ}(\tau_{бп}). \quad (15)$$

Показатель боеготовности характеризует успешность реализации конечной цели всей системы технического обеспечения на этапе войсковой эксплуатации ВВТ.

Для расчета вероятностей $P_{\text{ТГ}}(t + \tau_{\text{ПП}})$, $P_{\text{ТГ}}(\tau_{\text{БП}})$, как правило, используются известные в теории надежности и эксплуатации ВВТ модели, основанные на использовании пуассоновских потоков отказов и восстановления объектов [2; 3]. В прикладных задачах теории надежности потоки отказов представляются суммой потоков внезапных и постепенных отказов. Внезапные отказы проявляются в случайные моменты времени, их интенсивность возникновения не зависит от времени. Причиной их возникновения могут быть конструктивно-производственные недостатки, нарушение условий и регламента эксплуатации изделий, непредвиденные внешние воздействия и прочие факторы. Постепенные отказы возникают вследствие износа и старения материалов, они носят скрытый характер, их интенсивность зависит от времени и наработки агрегатов и механизмов изделий. Данное разделение является условным, поскольку отказ представляет собой случайное событие и установить его причинно-следственные связи с факторами, вызывающими появление этого события, практически невозможно. Однако для построения математических моделей оценивания и прогнозирования изменения технического состояния изделий такое представление является полезным.

При оперативном ремонте устраняется отказ изделия, а не его причина. Установленный изделию технический ресурс (срок службы) при этом не изменяется.

Профилактический (средний) и восстановительный (капитальный) ремонт предназначены для устранения причин накопления постепенных отказов, связанных с износом и старением материалов, разрегулировкой устройств изделия, а также необходимостью модернизации изделия. После проведения профилактического и восстановительного ремонта изделию устанавливается новый технический ресурс

Здесь рассматривается модель, в которой восстановление изделия при оперативном (текущем) ремонте осуществляется практически мгновенно, а при восстановительном (среднем, капитальном) ремонте с небольшим запаздыванием на время ремонта $\tau_{\text{БР}}$, что связано с малой длительностью выполнения ремонтных работ по сравнению с годовым расчетным периодом. Это допущение обосновано практикой войсковой эксплуатации образцов ВВТ, а также принятой системой мониторинга их технического состояния.

Предлагаемая модель динамики технической готовности описывается следующим уравнением:

$$P_{\text{ТГ}}(t)/dt = \begin{cases} -(\lambda_0 + \alpha t)P_{\text{ТГ}}(t) + \rho[1 - P_{\text{ТГ}}(t)]\delta(t), & t \in (t_{\text{МР}}(k-1), t_{\text{МР}}(k)) \\ \delta(t - t_{\text{МР}} - \tau_{\text{МР}}), & t = t_{\text{МР}}(k), (k = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (16)$$

с начальным условием: $t = 0$; $P_{\text{ТГ}}(0) = 1$,

где: λ_0 – интенсивность внезапных отказов;

α – скорость нарастания постепенных отказов;

$0 < \rho \leq 1$ – полнота восстановления изделия;

$\delta(t)$ – дельта-функция Дирака;

$t = t_{\text{МР}}(k)$; $(k = 1, 2, \dots, m)$ – момент начала k -го восстановительного ремонта.

Полнота восстановления изделия ρ зависит от вида ремонта. При текущем ремонте устраняются последствия внезапных отказов, поэтому полнота восстановления составляет их долю от общего числа возможных отказов.

$$\rho(t) = (1 - \exp[-(\lambda_0 t)] / (1 - \exp[-(\lambda_0 t + \alpha t^2 / 2)])) \quad (17)$$

При восстановительном ремонте устраняются как внезапные, так и постепенные отказы, и причины их возникновения, поэтому $\rho = 1$.

С учетом сказанного интеграл уравнения (14) имеет вид:

$$P_{\text{ТГ}}(t) = \begin{cases} \exp[-(\lambda_0 t + \alpha t^2 / 2)] + (1 - \exp[-\lambda_0 t]), & t \in (t_{\text{МР}}(k-1), t_{\text{МР}}(k)) \\ 1(t - \tau_{\text{МР}}), & t = t_{\text{МР}}(k), (k = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (18)$$

На рисунке 6 приведены графики динамики показателя готовности изделия ВВТ в течение срока службы $P_{ТГ}(t)$ и его среднего значения $\bar{P}_{ТГ}(t) = \sum_{k=1}^t P_{ТГ}(k)/t$ по годовым срезам программного периода. В расчетах использованы следующие данные: срок службы изделия $t_{cc} = 24$ года; период между восстановительным ремонтом (средним и капитальным) $t_{БР} = 5$ лет, показатель технической готовности изделия после восстановительного ремонта $P_{ТГ} = 1,0$. Интенсивность внезапных отказов составляет $\lambda_0 = 0,025$ 1/год, темп роста постепенных отказов $\alpha = 0,015$ 1/год, среднее время выполнения текущего ремонта изделия $\tau_{ТР} = 1 \dots 5$ суток, среднее время восстановительного ремонта $\tau_{МР} = 1 \dots 6$ мес.

Как видно из рисунка 6, восстановление изделия путем устранения внезапных осуществляется частично. Постепенные отказы накапливаясь, снижают вероятность безотказной работы изделия на межремонтном интервале. И только после проведения восстановительного ремонта происходит полное восстановление технического состояния.

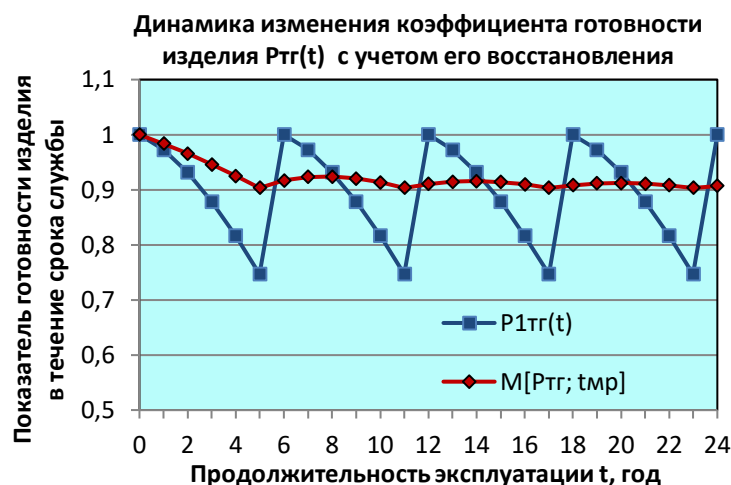


Рисунок 6 – Динамика изменения коэффициента готовности изделия с учетом его восстановления

На этапе боевого применения модель технической готовности определяется уравнением, учитывающим только возникновение внезапных отказов:

$$P_{ТГ}(t + \tau_{БР}) = P_{ТГ}(t + \tau_{ПП}) \exp[-\lambda_0 \tau_{БР}]. \quad (19)$$

В составе парка ВВТ могут находиться изделия различных типов и «возрастных» групп [5]. Их «возраст» определяется временем их поступления в состав парка относительно текущего момента времени. Для каждой «возрастной» группы изделий определенного типа должен рассчитываться свой коэффициент технической готовности. Обозначим $\beta(t - \tau)$, ($\tau = 0, 1, 2, \dots, m$) долю ВВТ с возрастом $(t - \tau)$ в составе парка ВВТ. Тогда среднее значение коэффициента технической готовности изделий определенного типа в парке рассчитывается по формуле:

$$\bar{P}_{ТГ}(t) = \sum_{\tau=0}^t \beta(t - \tau) P_{ТГ}(\tau). \quad (20)$$

Проведение мероприятий по техническому обеспечению ВВТ на этапе войсковой эксплуатации требует затрат материальных ресурсов и времени. Стоимость восстановления изделий в процессе эксплуатации, приведенная к стоимости их закупки может быть рассчитана по формуле [5]:

$$\bar{C}_3 = \sum_{i=1}^n C_{Bi} (1 + d)^t [1 - \bar{P}_{ТГ_i}(t)] N_i / \sum_{i=1}^n \bar{C}_{3i} N_i, \quad (21)$$

где: N_i – количество изделий i -го типа в парке;

C_{Bi} – стоимость восстановления единичного изделия в парке;

$\bar{C}_{3i}$ – средняя стоимость закупки единичного изделия i -го типа;

d – дефлятор стоимости затрат.

Завершение статьи мы посвящаем проблеме соотношения военно-технического уровня изделия ВВТ и стоимости затрат на его обеспечение.

4 Логистическая модель оценки стоимости затрат на разработку, производство и техническое обеспечение ВВТ

Выше были рассмотрены модели согласования стоимости затрат с военно-техническим уровнем образцов ВВТ на различных этапах жизненного цикла. Но эти модели не позволяют определить истинный масштаб соотношения между достигаемым эффектом $K_{ВТУ}(t)$ и затратами $C_{ВВТ}(t)$ на его достижения, т.е. соотношение $K_{ВТУ}(t) \leftrightarrow C_{ВВТ}(t)$. Это одна из ключевых проблем военной экономики и военно-экономического анализа. Разрешению этой проблемы посвящено немало публикаций. Наибольший интерес у авторов вызвали работы А.Гальченко, Е.Балабан, В.Тегина [16-20]. На обширном эмпирическом материале по авиационной, бронетанковой и подвижной ракетно-артиллерийской технике, собранном более чем за 90 лет, им удалось выявить закономерности роста стоимости боевой техники по показательному закону:

$$C(t; T) = C_0(1 + k)^{t-T}, \quad (22)$$

где: $C_0 = f(M_0, V, N, T)$ – начальная стоимость единичного изделия, зависящая от массы M_0 пустого (без оборудования и вооружения) изделия, средней (крейсерской) скорости его движения V , объема серийной партии изделий N и года T ее выпуска; $k = 0,07 \dots 0,09$ – темп роста себестоимости единицы боевой техники в год.

Показательный рост стоимости разработки и производства боевой техники связан с непрерывным внедрением новых научных знаний в технику, технологию, новые материалы, что требует дополнительных финансовых вложений.

Для создания новой техники и технологии нужны более квалифицированные инженерно-технические кадры, организаторы производства, на подготовку которых и оплату их труда также необходимы дополнительные финансовые затраты. Наконец, военные технологии необходимо внедрять в производство гражданской продукции, а это есть инвестиции, и они также стоят денег. Полученные авторами эмпирические коэффициенты, характеризующие темп роста стоимости ВВТ и, по-видимому, отражают динамику изменения *технологических* укладов (от начала IV в 1930-е гг. до начала VI в 2020-е гг.) [21].

Вторая особенность закона роста стоимости (17) состоит в получении эмпирической зависимости начальной стоимости от военно-технических характеристик изделия, в первую очередь его массы и скорости движения. Эти характеристики использовались и в более ранних работах, например, в области авиационной и ракетной техники [22]. С развитием науки, техники и технологий образцы ВВТ приобретают новые свойства: всепогодность применения, малую заметность в спектре электромагнитных излучений, снижение массогабаритных характеристик, сверхманевренность, гиперзвуковую скорость и др. Эти свойства увеличивают вклад в боевую эффективность по сравнению с традиционными энергомеханическими свойствами. Поэтому не случайно авторы настоящей статьи используют в качестве интегрального показателя военно-технического уровня образцов ВВТ мультипликативный индикатор (1), включающий в себя дополнительные военно-технические характеристики [1; 23]. Именно такой интегральный показатель необходимо положить в основу оценки стоимости современной боевой техники.

В этом случае необходимо связывать начальную стоимость образца ВВТ с показателем ВТУ. Такие модели авторам неизвестны, поэтому в первом приближении мы предлагаем показательную модель следующего вида:

$$C_0 = \begin{cases} \gamma C_0^{\varepsilon^{1/K_{ВТУ}}}, & K_{ВТУ} < 1 \\ \gamma C_0^{\varepsilon^{K_{ВТУ}}}, & K_{ВТУ} \geq 1 \end{cases}, \quad (23)$$

где: γ – коэффициент, учитывающий соотношение стоимостей данного продукта по отношению к эталонному образцу.

При $K_{ВТУ} = 1$ начальная стоимость образца с точностью до коэффициента γ соответствует стоимости эталонного образца; при $K_{ВТУ} < 1$ – стоимость образца ниже, а при $K_{ВТУ} > 1$ – выше стоимости эталонного образца ВВТ. При этом зависимости стоимости от $K_{ВТУ}$ нелинейная и асимметричная (рисунок 7).

Формула (6) отражает рост стоимости изделия при повышении показателя военно-технического уровня $K_{ВТУ}$ и это очевидный факт. При этом даже при $K_{ВТУ} < 1$ созданный образец имеет определенную полезность и может найти своего покупателя с меньшей стоимостью приобретения. Это правило успешно действует и сегодня на рынке вооружений. С точки зрения боевой эффективности образец ВВТ с высокой эффективностью, но в малом количестве будет уступать менее эффективному, но имеющемуся в большем количестве в вооруженных силах.

В качестве коэффициента стоимостного сравнения γ может быть принят показатель паритета покупательной способности (ППС) для продукции военного назначения (ПВН). Паритет покупательной способности определяется соотношением стоимостей (цен) некоторой совокупности продуктов, выраженных в разных валютах, но имеющих одинаковую полезность для потребителя. Данный показатель широко используется в мировой экономике при сопоставлении валового внутреннего продукта (ВВП) и связанных с ним макроэкономических показателей различных стран. Показатель представляет собой количество единиц национальной валюты в одном долл. США, принятого за базовую валюту и рассчитывается по формуле [24]:

$$\text{ППС} = C_{\text{НВ}} / 1_{\text{долл.}},$$

где: $C_{\text{НВ}}$ – цена национальной валюты в 1 долл.

Следует отметить, что многие ученые-экономисты [15; 20; 25] критически оценивают методику определения ППС, находя ее недостаточно объективной и политизированной. Тем не менее, инструментарий ППС внедрен в мировую экономическую практику, в том числе и в России¹. Используя показатель ППС для ПВН и предлагаемый авторами [20] метод его применения, можно получить следующую модернизацию формулы (17) оценки стоимости изделий ВВТ для экспортных поставок:

$$C_{\text{ВВТ}}(t; T) = \text{ППС}_{\text{ВВТ}} C_0(K_{\text{ВТУ}})(1 + k)^{t-T}. \quad (24)$$

Эта оценка имеет большую объективность и экономическую обоснованность, чем существующие оценки, рассчитываемые по известным методикам для продукции внутреннего потребления.

Россия в отличие от Запада, США, Китая – основных производителей ВВТ находится в более суровых природно-климатических условиях, требующих больших затрат энергии на производство продукции, обеспечения нормальной жизнедеятельности населения и трудовых ресурсов. Самая большая территория, недостаточно развитая транспортная инфраструктура требует значительных затрат в части логистического обеспечения экономики. Уже перечисленные факторы говорят о том, что себестоимость любой продукции, произведенной на территории России, будет выше, чем себестоимость западной продукции. Поэтому конкурентность нашей продукции должна обеспечиваться не снижением экспортных цен, а обеспечением более высокого качества и военно-технического уровня образцов ВВТ для внешних потребителей.

¹ Приказ Росстата от 19 августа 2025 г. №407 «Об утверждении официальных статистических методологий расчета показателей международных сопоставлений ВВП Российской Федерации и других стран по паритету покупательной способности и макроэкономических показателей Российской Федерации на основе годовых оценок паритетов покупательной способности».

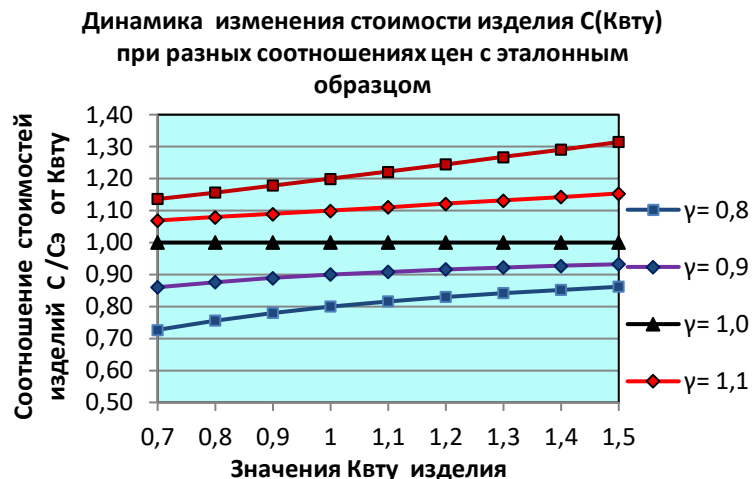


Рисунок 7 – Динамика изменения стоимости изделия ВВТ при разных соотношениях показателей «стоимость-качество»

Заключение

Предлагаемый в статье комплекс моделей целесообразно использовать в качестве инструмента при решении задач программно-целевого планирования и прогнозирования состояния и качества ВВТ на всех этапах жизненного цикла. Все параметры модели могут быть определены на основе расчетно-статистических данных, входящих в перечень Единой системы исходных данных для разработки государственных программ вооружения и государственных оборонных заказов. Полученные результаты могут быть использованы научными работниками и специалистами научно-исследовательских организаций, органов управления Минобороны России, министерств и ведомств оборонной промышленности, а также преподавателями и студентами их образовательных учреждений.

Список источников

1. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе: монография / Под ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2013. 520 с.
2. Методы военно-научных исследований систем вооружения: военно-научный труд / Под общ. ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2017. 512 с.
3. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники: монография. М.: Граница, 2015. 304 с.
4. Военная логистика: история, методология, современное состояние и перспективы развития: коллективная монография / Под ред. А.Х. Курбанова. СПб.: Копи-Р Групп, 2014. 284 с.
5. Управление техническим оснащением и обеспечением Вооруженных Сил Российской Федерации: логистический подход: монография / Под ред. В.Л. Гладышевского. М.: АПВЭиФ, Канцлер, 2025. 186 с.
6. Буренок В.М. Проблемы создания системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники // Вооружение и экономика. 2014. №2(27). С. 4-9.
7. Шаламов А.С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. М.: Университетская книга, 2008. 464 с.
8. Хрусталева Е.Ю., Хрусталева О.Е. Моделирование жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции // Экономический анализ: теория и практика. 2012. №16(271). С. 2-12.
9. Буравлев А.И. Методика оценки военно-технического уровня парка ВВТ в ходе реализации программных мероприятий по их закупке и ремонту // Вооружение и экономика. 2016. №4(37). С. 91-103.

10. Буравлев А.И. Модели управления ресурсным обеспечением проектов создания высокотехнологичной продукции // Вооружение и экономика. 2019. №4(50). С. 62-71.
11. Клочков В.В., Дутов А.В. Модель управления прикладными исследованиями и разработками в наукоемкой промышленности // Экономический анализ: теория и практика. 2020. №35(290). С. 9-17.
12. Буравлев А.И., Еланцев Г.А. Вероятностные модели управления жизненным циклом вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2021. №3(57). С. 45-65.
13. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: практика применения метода экспертных оценок. М.: ЛЕНАНД, 2015. 352 с.
14. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Оценка стоимостных показателей высокотехнологичной продукции: монография. М.: Граница, 2012. 424 с.
15. Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Ценообразование на продукцию военного назначения: от затратной к ценностной концепции // Вооружение и экономика. 2012. №1(17). С. 58-65.
16. Гальченко А.В., Тегин В.А. Долгосрочный прогноз стоимости боевых летательных аппаратов и численности ВВС стран мира // Вооружение и экономика. 2012. №3(19). С. 73-84.
17. Гальченко А.В., Тегин В.А. Долгосрочный прогноз стоимости танков и численности бронесил стран мира // Вооружение и экономика. 2013. №1(22). С. 71-86.
18. Балабан Е.И., Гальченко А.В., Тегин В.А. Применение ценометрического метода определения стоимости серийных поставок образцов боевой техники для долгосрочного прогноза исследовательского прогнозирования закупок // Вооружение и экономика. 2015. №1(30). С. 83-98.
19. Балабан Е.И., Гальченко А.В., Тегин В.А. Прогноз стоимости образцов материальной продукции военного назначения // Вооружение и экономика. 2017. №5(42). С. 65-72.
20. Гальченко А.В., Балабан Е.И., Тегин В.А. Великое противостояние. Экономика, высокие технологии, история и политика. Опыт количественного анализа и систематизации эмпирических закономерностей: монография. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 353 с.
21. Гуриева Л.К. Концепция технологических укладов // Инновации. 2004. №10(77). С. 70-76.
22. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. М.: Физматлит, 2006. 304 с.
23. Буравлев А.И. Аналитическая модель связи военно-технических характеристик образцов вооружения и военной техники с их боевым потенциалом // Вооружение и экономика. 2025. №4(74). С. 5-18.
24. Косаров А.Е., Сергеев С.М. Паритет покупательной способности валют: развитие методов и практики расчетов в ПМС СНГ 2014 // Вопросы статистики. 2017. №9. С. 19-26.
25. Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Экономико-математическая модель оценки и сопоставления стоимостных показателей мероприятий стадий жизненного цикла отечественной и зарубежной высокотехнологичной продукции // Вооружение и экономика. 2020. №4(54). С. 5-18.

Информация об авторах

А.И. Буравлев – доктор технических наук, профессор.
И.М. Чаткин – ORCID 0009-0004-3717-1097.