

УДК 339.543.012.24:004.9

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОТОКОВОГО ИДК
ПРИ ТАМОЖЕННОМ КОНТРОЛЕ
В АВТОМОБИЛЬНОМ ПУНКТЕ ПРОПУСКА****Афонин Д.Н.***Санкт-Петербургский имени В.Б. Бобкова филиал
Российской таможенной академии***MATHEMATICAL MODELING OF EFFICIENT USE
OF STREAMING X-RAY NON-INTRUSIVE INSPECTION SYSTEMS
DURING CUSTOMS CONTROL AT AUTOMOTIVE CHECKPOINTS****Afonin D.N.***St. Petersburg named after V.B. Bobkov Branch of the Russian Customs Academy***Аннотация**

В статье разработана комплексная математическая модель оптимизации работы потокового рентгеновского инспекционно-досмотрового комплекса (ИДК) в условиях автомобильного пункта пропуска. Модель основана на аппарате теории массового обслуживания, теории принятия статистических решений, методов компьютерной томографии и оптимального управления. Предложены алгоритмы динамического распределения потоков транспортных средств, адаптивной настройки параметров сканирования и автоматического анализа рентгеновских изображений с целью максимизации вероятности обнаружения запрещенных к перемещению товаров при заданных ограничениях на пропускную способность пункта пропуска.

Ключевые слова: потоковый ИДК, математическое моделирование, теория массового обслуживания, статистическое решение, оптимальное управление.

Abstract

This article develops a comprehensive mathematical model for optimizing the operation of an overhead streaming X-ray Non-Intrusive Inspection (NII) system in the context of an automotive checkpoint. The model is based on the apparatus of queuing theory, statistical decision theory, computed tomography methods, and optimal control. Algorithms for the dynamic distribution of vehicle flows, adaptive adjustment of scanning parameters, and automatic analysis of X-ray images are proposed to maximize the probability of detecting items prohibited from movement under given constraints on the checkpoint's throughput capacity.

Keywords: streaming X-ray NII system, mathematical modeling, queuing theory, statistical decision, optimal control.

Ссылка для цитирования: Афонин Д.Н. Математическое моделирование эффективного использования потокового ИДК при таможенном контроле в автомобильном пункте пропуска // Бюллетень инновационных технологий. – 2025. – Т. 9. – № 4 (36). – С. 5-8. – EDN QJUDRA.

Введение

Поточное сканирование инспекционно-досмотровыми комплексами (далее – ИДК) представляет собой технологию, позволяющую проводить непрерывный осмотр контейнеров и транспортных средств в движении, минимизируя задержки на таможенных пунктах [1, 2]. Данная методика основана на использовании рентгеновских лучей для создания изображений содержимого контейнеров или автомобилей без необходимости их вскрытия, что делает ее ключевым инструментом в современном таможенном контроле [3, 4]. В контексте глобализации торговли, где объемы грузов растут экспоненциально, такие комплексы помогают бороться с контрабандой наркотиков, оружия и других запрещенных товаров, одновременно обеспечивая бесперебойный поток легитимных поставок [5, 6]. Однако, как показывают международные практики,

внедрение этой технологии требует учета технических, экономических и этических аспектов, включая радиационную безопасность и интеграцию с искусственным интеллектом [7, 8].

Эффективность работы потокового рентгеновского ИДК в условиях интенсивного автомобильного потока определяется не только его техническими характеристиками, но и алгоритмами управления процессом сканирования и анализа данных [9, 10]. Необходима целостная математическая модель, позволяющая синхронизировать работу ИДК с ритмом работы пункта пропуска, минимизировать время простоя и максимизировать достоверность контроля. Такая модель должна интегрировать физику процесса сканирования, статистику потоков транспортных средств и экономику затрат на пропуск и задержку.

1. Модель потока транспортных средств как многофазной системы массового обслуживания

Поток автомобилей в пункте пропуска формализуется как сеть массового обслуживания с K узлами. Каждый узел представляет собой этап контроля: Q₁ – первичный контроль, Q₂ – зона ожидания ИДК, Q₃ – сам ИДК, Q₄ – зона детального досмотра.

Входной поток автомобилей описывается неоднородным пуассоновским процессом с интенсивностью λ(t), зависящей от времени суток. Время обслуживания в i-м узле есть случайная величина τ_i с функцией распределения F_i(t).

Состояние системы в момент времени t описывается вектором $\vec{N}(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_K(t))$, где n_i(t) – число автомобилей в i-й очереди. Динамика системы описывается системой дифференциальных уравнений Чепмена-Колмогорова для вероятностей состояний P(\vec{N} , t):

$$\frac{\partial P(\vec{N}, t)}{\partial t} = \sum_{\vec{N}' \neq \vec{N}} [q(\vec{N}', \vec{N})P(\vec{N}', t) - q(\vec{N}, \vec{N}')P(\vec{N}, t)],$$

где q(\vec{N}, \vec{N}') – интенсивность перехода из состояния \vec{N} в \vec{N}' .

Пропускная способность всего пункта пропуска определяется как предельная интенсивность входного потока λ_{max}, при которой среднее время пребывания автомобиля в системе E[T] не превышает заданного лимита T_{max}. Согласно формуле Литтла:

$$E[T] = \frac{E[\vec{N}]}{\lambda_{max}} \leq T_{max},$$

где E[\vec{N}] – среднее общее число автомобилей в системе.

2. Модель процесса сканирования и распознавания изображения

Процесс получения рентгеновского изображения в потоковом режиме формализуется в рамках теории томографической реконструкции. Пусть f(x, y, z) – функция, описывающая распределение коэффициента ослабления рентгеновского излучения в сканируемом объекте. В потоковом режиме сканирование происходит при непрерывном движении автомобиля со скоростью v вдоль оси z.

Интенсивность прошедшего излучения измеряется линейкой детекторов и описывается интегралом вдоль пути луча L(θ, p, z):

$$I(\theta, p, z) = I_0 \exp \left(- \int_{L(\theta, p, z)} f(x, y, z) dl \right),$$

где θ – угол проекции, p – координата на детекторе.

В дискретном виде для каждого z-среза измеренные данные образуют матрицу проекций P_z, связанную с матрицей изображения F_z через систему линейных уравнений:

$$P_z = A_z F_z + E_z,$$

где A_z – матрица системы, элементы которой равны длинам пересечения лучей с вокселями, E_z – матрица шума.

Распознавание изображения сводится к решению этой системы. Для учета движения используется модифицированный алгоритм получения и анализа изображения с поправкой на скорость транспортного средства, движущегося через ИДК:

$$\hat{f}(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(\theta, p', z) h(p - p') dp',$$

где \tilde{p} – фильтрованные проекции, h – функция фильтра.

3. Статистическая модель принятия решения о наличии запрещенных товаров

Задача анализа изображения формализуется как задача проверки статистических гипотез. Гипотеза H₀: на изображении нет запрещенных предметов. Гипотеза H₁: присутствует хотя бы один запрещенный товар.

Пусть $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_M)$ – вектор признаков, извлеченных из реконструированного изображения (плотность, форма, текстура). Решающее правило основано на сравнении отношения правдоподобия с порогом:

$$\Lambda(\vec{X}) = \frac{p(\vec{X} | H_1)}{p(\vec{X} | H_0)} \geq \eta,$$

где порог η выбирается исходя из критерия Неймана-Пирсона для фиксированного уровня ложных тревог α.

Для многомерного нормального распределения признаков решающая статистика имеет вид квадратичной формы:

$$\Lambda(\vec{X}) = (\vec{X} - \vec{\mu}_0)^T \Sigma^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}_0) - (\vec{X} - \vec{\mu}_1)^T \Sigma^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}_1),$$

где $\vec{\mu}_0, \vec{\mu}_1$ – средние векторы признаков для гипотез H₀ и H₁, Σ – ковариационная матрица.

4. Модель оптимального управления параметрами сканирования

Параметры ИДК (напряжение на трубке U, ток I, скорость движения конвейера v) являются управляющими переменными, влияющими на качество изображения и пропускную способность. Качество изображения оценивается через отношение сигнал/шум (SNR) в пространстве проекций:

$$SNR(U, I, v) = \frac{\mu_s(U)}{\sigma_n(U, I, v)},$$

где μ_s – средний сигнал, σ_n – стандартное отклонение шума, которое зависит от скорости: σ_n ~ 1/√v.

Задача оптимального управления формулируется как максимизация целевого функционала, учитывающего вероятность обнаружения и пропускную способность:

$$J(U, I, v) = P_d(U, I, v) \cdot \Phi(v) - \beta \cdot C(U, I) \rightarrow \max,$$

где P_d – вероятность обнаружения, $\Phi(v)$ – пропускная способность как функция скорости, $C(U, I)$ – стоимость эксплуатации, β – весовой коэффициент. Ограничения: $U_{min} \leq U \leq U_{max}$, $I_{min} \leq I \leq I_{max}$, $v_{min} \leq v \leq v_{max}$.

Решение находится с применением принципа максимума Понтрягина, где сопряженная система описывает чувствительность вероятности обнаружения к изменению параметров сканирования.

5. Интегральная модель экономической эффективности ИДК

Экономическая эффективность внедрения ИДК оценивается через минимизацию общих затрат, включающих затраты на пропуск запрещенных товаров и затраты на задержку товаропотока. Вводится функционал полных затрат за время T:

$$C_{total} = \int_0^T [c_f \cdot \lambda(t) \cdot P_{miss}(t) + c_d \cdot \bar{n}(t)] dt + C_{IDK},$$

где c_f – стоимость пропуска одного запрещенного товара, $P_{miss}(t)$ – вероятность пропуска, c_d – стоимость задержки одного автомобиля в единицу времени, $\bar{n}(t)$ – среднее число автомобилей в системе, C_{IDK} – капитальные и операционные затраты на ИДК.

Как видно из Рис. 1, предложенная математическая модель позволяет количественно обосновать выбор оптимального режима работы ИДК. Кривая целевой функции $J(v)$ имеет четко выраженный максимум, что свидетельствует о суще-

ствовании единственного оптимального значения скорости движения транспорта через зону контроля. При скорости ниже оптимальной существенно снижается пропускная способность пункта пропуска, тогда как при превышении v_{opt} значительно ухудшается качество контроля по отношению к уменьшению времени экспозиции и соответствующему снижению отношения сигнал/шум на рентгеновском изображении. Выявленная оптимальная точка $v_{opt} = 0.833$ м/с может быть рекомендована в качестве базового значения при настройке параметров работы ИДК в условиях интенсивного автомобильного потока.

Оптимизация работы пункта пропуска сводится к задаче минимизации C_{total} по управляющим параметрам ИДК и правилам принятия решений.

Заключение

Разработанная комплексная математическая модель позволяет проводить многокритериальную оптимизацию работы потолочного рентгеновского ИДК в реальных условиях автомобильного пункта пропуска. Модель синтезирует подходы из теории массового обслуживания, томографической реконструкции, статистической теории обнаружения и оптимального управления. Практическая реализация модели требует создания системы поддержки принятия решений, интегрированной с аппаратным обеспечением ИДК. Дальнейшие исследования должны быть направлены на учет нестационарности потоков, разработку адаптивных алгоритмов обучения системы распознавания и интеграцию с другими видами досмотра.

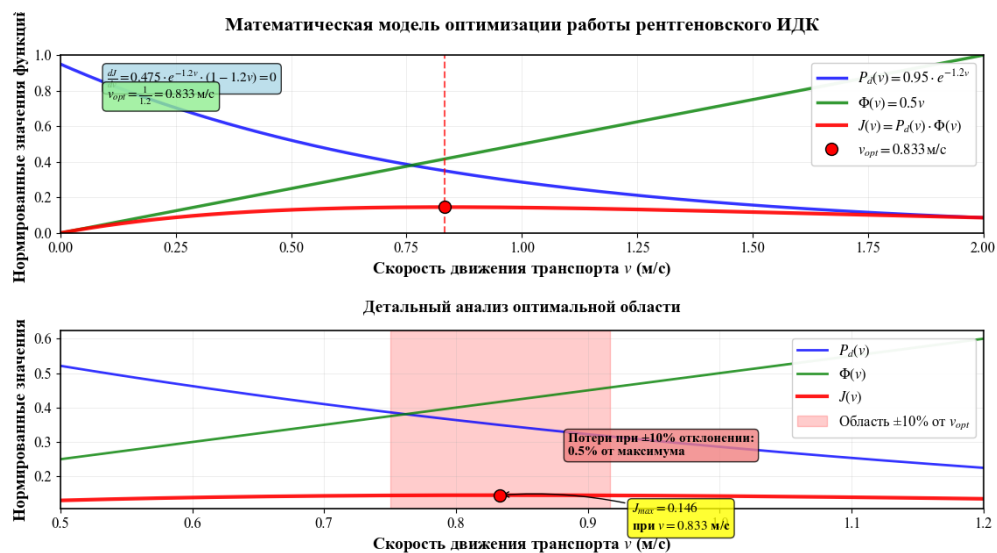


Рис. 1. Математическая модель оптимизации работы потокового ИДК в условиях автомобильного пункта пропуска.

На верхнем графике представлены:

- вероятность обнаружения $P_d(v) = 0,95 \times e^{-1,2v}$ (синяя кривая);
- нормированная пропускная способность $\Phi(v) = 0,5v$ (зеленая кривая);
- целевая функция эффективности $J(v) = P_d(v) \times \Phi(v)$ (красная кривая).

Аналитически определенная оптимальная скорость $v_{opt} = 0,833$ м/с (красная точка) соответствует максимуму целевой функции $J_{max} = 0,146$.

Нижний график детализирует область вблизи оптимума, демонстрируя незначительное снижение эффективности (менее 5%) при отклонении скорости в диапазоне $\pm 10\%$ от оптимального значения.

Список литературы

1. Афонин Д.Н. Применение инспекционно-досмотровых комплексов при таможенном контроле: Учебник. – [б. м.]: Общество с ограниченной ответственностью «Издательские решения», 2025. – 90 с.

2. Афонин Д.Н., Афонин П.Н., Гамидуллаев С.Н. и др. Анализ информации, полученной с использованием ИДК Учебно-наглядное пособие. – Санкт-Петербург: РИО Санкт-Петербургского филиала Российской таможенной академии, 2019. – 110 с.

3. Афонин П.Н., Афонин Д.Н., Лямкина А.Ю. Система управления рисками в таможенном деле: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: ИЦ "Интермедия", 2017.

4. Буров А.В. Неразрушающий контроль с применением порталных ИДК компании ИСБ.А: перспективные разработки и обучение с СПбГЭТУ "ЛЭТИ" // Интеллектуальный пункт пропуска в России и мире: компетентностный подход к созданию: Сборник докладов Международной практической конференции, Санкт-Петербург, 16–17 февраля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2023. – С. 40-41.

5. Гомон И.В., Бруев Е.И., Кузнецова А., Папахян А. Оценка таможенного контроля товаров и транспортных средств, перемещаемых через границу Российской Федерации // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 111-3. – С. 50-56.

6. Башлы П.Н., Вербов В.Ф. Инспекционно-досмотровые комплексы: практика применения, импортозамещение и перспективы для интеллектуальных пунктов пропуска // Вестник Российской таможенной академии. – 2024. – № 2(67). – С. 22-33.

7. Афонин Д.Н. Правовое обеспечение информатизации таможенного контроля в настоящее время // Цифровые технологии и право: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, Казань, 22 сентября 2023 года. – Казань: Издательство "Познание", 2023. – С. 114-118.

8. Афонин Д.Н. Современные тенденции информатизации таможенной службы // Бюллетень инновационных технологий. – 2024. – Т. 8, № 4(32). – С. 5-9.

9. Афонин Д.Н. Таможенные органы на пути международного терроризма. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Русайнс", 2025. – 212 с.

10. Афонин Д.Н. Применение искусственного интеллекта и технологий больших данных для таможенного контроля контейнерных перевозок // Научные исследования в современном мире. Теория и практика: сборник статей XLIV всероссийской (национальной) научной конференции, Санкт-Петербург, 17 января 2025 года. – Санкт-Петербург: Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2025. – С. 72-73.

Поступила в редакцию 17.10.2025

Сведения об авторе:

Афонин Дмитрий Николаевич – профессор кафедры таможенных операций и таможенного контроля Санкт-Петербургского имени В.Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии, доктор медицинских наук, доцент, e-mail: dnafonin@gmail.com



Электронный научно-практический журнал **"Бюллетень инновационных технологий"** (ISSN 2520–2839) является сетевым средством массовой информации регистрационный номер Эл № ФС77-73203 по вопросам публикации в Журнале обращайтесь по адресу bitjournal@yandex.ru