УДК 614.84+519.83
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.012

Теоретико-игровые модели организации деятельности контрольно-надзорных органов в области пожарной безопасности

Д.Ф. Кожевин[1]✉, А.М. Егошин[1], А.Л. Козлов[2]

[1]Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Музей железных дорог России – структурное подразделение Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме. Статья посвящена применению теоретико-игрового аппарата для анализа и оптимизации деятельности контрольно-надзорных органов на примере Государственного пожарного надзора МЧС России. Обоснован структурный изоморфизм систем «инспектор – нарушитель» в различных сферах, что позволяет использовать единый класс математических моделей – инспекционные игры. Представлена базовая статическая модель в смешанных стратегиях, модифицированная с учетом специфики пожарной безопасности: введены вероятностный ущерб, социальные потери (включая стоимость человеческих жизней) и персональная ответственность инспектора за пожар на непроверенном объекте. Выведены аналитические условия равновесия Нэша для нарушителя и инспектора с переходом к временному измерению всех платежных характеристик. Проведен систематический обзор расширений базовой модели – иерархические игры Штакельберга, байесовские игры с асимметрией информации о типах агентов, эволюционно-динамические модели и многоуровневый контроль. Особое внимание уделено понятию минимальной интенсивности проверок как ключевому параметру эффективности. Предложены концепции расчета этого порога (сдерживание нарушителя, предотвращение коррупции, защита от худшего типа, эволюционная устойчивость) и разработан интегральный критерий для назначения индивидуальной частоты проверок каждого объекта защиты. На численном примере для трех типов объектов (торговый центр, школа, склад) показано дифференцирование интенсивности – школа с высоким социальным ущербом требует проверок в 48,6 % случаев, а склад – лишь 9,3 %. Предложен алгоритм, учитывающий бюджетное ограничение рабочего времени инспекторов. Метод позволяет перейти от унифицированной нормативной частоты к научно обоснованному риск-ориентированному планированию надзорной деятельности.

Ключевые слова: теория игр, пожарный надзор, инспекционные игры, равновесие Нэша, управление рисками, интенсивность проверок.

Для цитирования: Кожевин Д.Ф., Егошин А.М., Козлов А.Л. Теоретико-игровые модели организации деятельности контрольно-надзорных органов в области пожарной безопасности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(11). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2580 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.012

Theoretical and game models of the activities of control and supervisory bodies in the field of fire safety

D.F. Kozhevin[1]✉, A.M. Egoshin[1], A.L. Kozlov[2]

[1]St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, St. Petersburg, the Russian Federation

© Кожевин Д.Ф., Егошин А.М., Козлов А.Л., 2026

[2]*The Museum of Russian Railways is a structural unit of the Oktyabrskaya Railway, a branch of Russian Railways, St. Petersburg, the Russian Federation*

Abstract. The article is devoted to the application of a game-theoretic apparatus for analyzing and optimizing the activities of control and supervisory authorities using the example of the State Fire Supervision of the Ministry of Emergency Situations of Russia. The structural isomorphism of "inspector – violator" systems in various fields is substantiated, which makes it possible to use a single class of mathematical models – inspection games. A basic static model in mixed strategies is presented, modified to take into account the specifics of fire safety: probabilistic damage, social losses (including the cost of human lives) and personal responsibility of the inspector for a fire at an uninspected facility are introduced. The analytical conditions of the Nash equilibrium for the violator and the inspector are derived with the transition to the time measurement of all payment characteristics. A systematic review of extensions of the basic model is carried out – hierarchical Stackelberg games, Bayesian games with information asymmetry about agent types, evolutionary dynamic models and multilevel control. Special attention is paid to the concept of minimum inspection intensity as a key performance parameter. Concepts for calculating this threshold have been proposed (deterrence of violators, prevention of corruption, protection from the worst type, evolutionary stability) and an integral criterion has been developed for assigning an individual frequency of inspections to each protection facility. A numerical example for three types of facilities (shopping center, school, warehouse) shows the differentiation of intensity – a school with high social damage requires inspections in 48.6 % of cases, and a warehouse – only 9.3 %. An algorithm is proposed that takes into account the budgetary limitation of inspectors' working hours. The method makes it possible to move from a unified regulatory frequency to a scientifically based risk-based planning of supervisory activities.

Keywords: game theory, fire supervision, inspection games, Nash equilibrium, risk management, inspection intensity.

For citation: Kozhevin D.F., Egoshin A.M., Kozlov A.L. Theoretical and game models of the activities of control and supervisory bodies in the field of fire safety. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2026;14(11). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2580 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.012

Введение

В современных исследованиях организационных систем контрольно-надзорные мероприятия (КНМ) рассматриваются не как вспомогательный инструмент, а как системообразующий элемент управления, обеспечивающий гомеостаз, надежность и безопасность [1]. Эволюция роли контроля от пассивной фиксации нарушений к активному управлению рисками требует адекватного математического аппарата, способного описывать стратегическое поведение участников контрольного процесса [2, 3].

Таблица 1 – Классификация теоретико-игровых моделей контроля
Table 1 – Classification of game-theoretic control models

Литературный источник	Тип игры	Социальный ущерб	Ответственность инспектора	Динамика	Применимость к пожарному надзору
[6]	Иерархическая	нет	да (коррупция)	нет	механизмы сдержек
[7]	Штакельберг (стат.)	нет	нет	нет	прямая
[8]	Байесовская	косвенно	нет	обучение	требует калибровки

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

[9]	Эволюционная	нет	нет	да	вывод о квадратичных штрафах
[10]	Игра со взаимным влиянием	косвенно	да (входит в издержки)	присутствует качественно	косвенная
[11]	Риск-игра (морской контроль)	нет	нет	нет	косвенная

Из Таблицы 1 следует, что ни одна из представленных моделей не учитывает в полной мере все особенности деятельности инспектора государственного пожарного надзора (ГПН), а именно:

– социальный ущерб (включая стоимость человеческих жизней);

– персональную ответственность инспектора за пожар на непроверенном объекте;

– иерархию «принципал → инспектор → собственник».

Углубленной математической формализации деятельности контрольно-надзорных органов через призму теоретико-игровой аналогии с крупье в казино в контексте пожарного надзора посвящена настоящая статья.

Материалы и методы

С позиций теории управления организационными системами, деятельность крупье в казино и работа инспектора ГПН МЧС России демонстрируют структурную аналогию, приведенную в Таблице 2.

Таблица 2 – Трехзвенная иерархическая модель «принципал – агент-контролер – подконтрольный субъект»
Table 2 – Three-tier hierarchical model "principal – agent-controller – controlled entity"

Элемент системы	Казино	Пожарный надзор
Принципал	Служба безопасности	Государство (МЧС России)
Агент-контролер	Крупье	Инспектор ГПН (пожарный инспектор)
Подконтрольный субъект	Игрок	Владелец объекта защиты
Оппортунизм агента	Сговор с игроком, присвоение фишек	Взятки, снижение усилий
Риск принципала	Финансовые потери	Гибель людей, катастрофический ущерб
Математический аппарат	Инспекционные игры, теория контрактов	Инспекционные игры, иерархические игры

Эта аналогия позволяет применять единый класс математических моделей – инспекционных игр – для анализа обеих систем. Однако содержательная специфика целевых функций (финансовые потери, с одной стороны, социальный ущерб – с другой) требует модификации классических моделей путем введения безразмерных коэффициентов социальной значимости или использования мультикритериальных подходов [2, 3].

В наиболее общем виде взаимодействие контрольно-надзорного органа и подконтрольного субъекта представляется как игра двух лиц в нормальной форме [4]:

$$\Gamma = \langle I, \{S_i\}_{i\in I}, \{u_i\}_{i\in I} \rangle, \quad (1)$$

где $I = \{И,Н\}$ – множество игроков (Инспектор и Нарушитель); $S_И = \{s_1,s_2\}$ – множество стратегий инспектора (проверять / не проверять); $S_Н = \{t_1,t_2\}$ – множество стратегий нарушителя (соблюдать / нарушать); $u_i: S_И \times S_Н \rightarrow R$ – функция выигрыша.

В смешанном расширении стратегией инспектора является вероятность проверки $p \in [0,1]$, стратегией нарушителя – вероятность нарушения $q \in [0,1]$.

Обобщенная платежная матрица с параметрами, специфичными для пожарного надзора, приведена в Таблице 3.

Таблица 3 – Обобщенная платежная матрица
Table 3 – Generalized payment matrix

Нарушитель / Инспектор	**Проверять (p)**	**Не проверять ($1-p$)**
Нарушать (q)	$-F - \pi_N L$; $-k$	$-\pi_N L - \pi_N S$; $-\pi_N R$
Соблюдать ($1-q$)	$-c - \pi_0 L$; $-k$	$-c - \pi_0 L$; $-\pi_0 R$

где c – затраты нарушителя на соблюдение норм (прямые издержки); k – стоимость проверки; F – штраф за нарушение; L – ожидаемый ущерб нарушителя от пожара; S – общественный ущерб ($S \gg L$); R – ответственность инспектора в общественном ущербе; π_0 – вероятность пожара при соблюдении норм; π_N – вероятность пожара при нарушении ($\pi_N > \pi_0$).

Стоимость, штрафы, затраты и ущербы применительно к решаемой задаче рассмотрены не в денежном эквиваленте, а во временном, так как время – величина, которая не может быть восполнена, при этом приведенные выше платежные характеристики пересмотрены через временную призму:

$$c = \tau_1 = \frac{\text{С}_1}{\text{Д}_\text{н}}, \quad (2)$$

$$F = \tau_2 = \frac{\text{Ш}}{\text{Д}_\text{н}}, \quad (3)$$

$$L = \tau_3 = \frac{\text{У}}{\text{Д}_\text{н}}, \quad (4)$$

$$k = \tau_4 = \frac{N_\text{инс} \cdot S_\text{об} \cdot \tau_\text{пр}}{\sum N_\text{инс} \cdot \sum S_\text{об}}, \quad (5)$$

$$S = S_\text{чел} + S_\text{гражд} + S_\text{рег}, \quad (6)$$

$$S_\text{чел} = \tau_5 = \frac{N_\text{постр} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_\text{постр}} \left(\frac{(\text{Т}_\text{пред} - \text{Т}_{\text{постр}_i})}{365 \cdot 24} \cdot \text{С}_{\text{постр}_i} \right) \right)}{N_\text{рег} \cdot \text{С}_\text{рег}}, \quad (7)$$

$$S_\text{гражд} = \tau_6 = \sum_{i=1}^{j} \left(\frac{\text{У}_i}{\text{Д}_i} \right), \quad (8)$$

$$S_\text{рег} = \tau_7 = \frac{\text{У}_\text{рег}}{\text{Д}_\text{рег}}, \quad (9)$$

где С_1 – затраты нарушителя на соблюдение норм, тыс. руб; $\text{Д}_\text{н}$ – часовой доход нарушителя (гражданина или предприятия), тыс. руб/час; Ш – штраф за нарушение, тыс. руб.; У – ожидаемый ущерб нарушителя от пожара, тыс. руб; $\text{N}_\text{инс}$ – количество инспекторов ГПН, осуществляющих проверку, чел; $\text{S}_\text{об}$ – площадь объекта проверки, м^2; $\tau_\text{пр}$ – время проверки, час; $\sum \text{N}_\text{инс}$ – общее количество инспекторов в регион, чел; $\sum \text{S}_\text{об}$ –

общая площадь объектов проверки в регионе, м^2; $N_{постр}$ – число пострадавших от пожара на объекте нарушителя, чел; $Т_{пред}$ – пенсионный возраст, год; $Т_{постр}$ – возраст пострадавшего, год; $С_{постр}$ – средний часовой доход пострадавшего, тыс. руб./час; $N_{рег}$ – число жителей в регионе, чел; $С_{рег}$ – средний часовой доход в регионе, тыс. руб./час; $У_i$ – ожидаемый ущерб i-го пострадавшего от пожара на объекте (определяется по статистическим данным, для объектов данного класса функциональной пожарной опасности), тыс. руб.; $У_{рег}$ – ожидаемый ущерб региона от пожара на объекте нарушителя, тыс. руб.; $Д_i$ – часовой доход i-го пострадавшего от пожара на объекте нарушителя, тыс. руб./час; $Д_{рег}$ – часовой доход региона, тыс. руб./час.

Равновесие Нэша в смешанных стратегиях реализует условие безразличия для нарушителя. Инспектор выбирает p так, чтобы нарушителю было безразлично, нарушать или соблюдать:

$$U_{\text{Н}}^{\text{соблюдать}} = p \cdot (-c - \pi_0 L) + (1-p) \cdot (-c - \pi_0 L) = -c \; - \; \pi_0 \; \cdot L, \tag{10}$$

$$U_{\text{Н}}^{\text{нарушать}} = -pF - \pi_N L - \pi_N S + p \cdot \pi_N S. \tag{11}$$

Условие безразличия:

$$-c \; - \; \pi_0 \; \cdot L \; = \; -p \cdot F \; - \; \pi_N \cdot L - \pi_N S + p \cdot \pi_N S. \tag{12}$$

Приравнивая:

$$p = \frac{c + \pi_0 \cdot L - \pi_N \cdot L - \pi_N \cdot S}{F - \pi_N \cdot S}. \tag{13}$$

Равновесная вероятность проверки p:

– возрастает с увеличением затрат нарушителя на безопасность, так как большее количество систем противопожарной защиты необходимо проверять инспектору;

– убывает с ростом ожидаемого ущерба нарушителя L (высокий собственный риск дисциплинирует) и ростом социального ущерба;

– убывает с ростом штрафа F (жесткие санкции позволяют реже проверять).

Учет ответственности инспектора представляет собой наказание за пожар на непроверенном объекте (административная и уголовная ответственность). Этот учет строго задан функцией выигрыша инспектора (Таблица 4), на основе которой далее выведено условие равновесия.

Таблица 4 – Учет ответственности инспектора
Table 4 – Accounting for inspector's liability

Стратегия нарушителя	Стратегия инспектора	Платеж инспектора	Пояснение
Соблюдает	Проверять	$-k$	Стоимость проверки
Соблюдает	Не проверять	$-\pi_0 r$	Ожидаемый платеж: пожар с вероятностью π_0
Нарушает	Проверять	$-k$	Стоимость проверки
Нарушает	Не проверять	$-\pi_n r$	Ожидаемый платеж: пожар с вероятностью π_n

Примечание. Ответственность R наступает только в случае пожара на объекте, который инспектор не проверял. Платежи в строках «Не проверять» приведены как ожидаемые (с учетом вероятности пожара), при отсутствии пожара платеж равен 0.

Вероятность пожара: если нарушитель нарушает с вероятностью q, то

$$P(\text{пожар} | \text{нет проверки}) \; = \; q \cdot \pi_N \; + \; (1-q) \cdot \pi_0. \tag{14}$$

Тогда ожидаемый выигрыш инспектора от стратегии «Не проверять»:

$$U_{\text{И}}^{(\text{Не проверять})} = -R \cdot (q \cdot \pi_N + (1-q) \cdot \pi_0). \quad (15)$$

Выигрыш от стратегии «Проверять»:

$$U_{\text{И}}^{\text{Проверять}} = -k. \quad (16)$$

Условие безразличия инспектора:

$$-k = -R \cdot (q \cdot \pi_N + (1-q) \cdot \pi_0). \quad (17)$$

Исходя из вышеизложенного условие равновесия будет иметь вид:

$$q = \frac{k/R - \pi_0}{\pi_N - \pi_0} \text{ при условии, что } k/R > \pi_0 \text{ и } 0 \le q \le 1. \quad (18)$$

Равновесный уровень соблюдения норм растет с увеличением ответственности инспектора R и падает с ростом стоимости проверок k. Реальная ситуация сложнее так как инспектор сам является агентом для вышестоящего органа, подобный сценарий описывается иерархической игрой Штакельберга [7].

В рамках подобной игры принципал выбирает механизм стимулирования инспектора в виде зарплаты w и бонусов за выявление нарушений b, инспектор выбирает уровень усилий $e \in [0,1]$, влияющий на вероятность обнаружения $p(e)$ (возрастающая вогнутая функция), нарушитель выбирает вероятность нарушения q.

Функция полезности инспектора:

$$U_{\text{И}}(e) = w + b \cdot p(e) \cdot q - \psi(e), \quad (19)$$

где $\psi(e)$ – функция тягот усилий (возрастающая выпуклая).

Функция полезности принципала:

$$U_{\text{П}} = -(1 - p(e) \cdot q) \cdot S - w - b \cdot p(e) \cdot q. \quad (20)$$

Нарушитель максимизирует:

$$U_{\text{Н}}(q) = q \cdot \big(G - p(e) \cdot F - \big(1 - p(e)\big) \cdot \pi_N L\big) + (1-q) \cdot (-c), \quad (21)$$

где G – выгода от нарушения.

Равновесие находится методом обратной индукции, что позволяет принципалу выбрать способ стимулирования инспектора (w, b), обеспечивающий требуемый уровень безопасности.

Важным элементом КНМ является интенсивность проверок, чем выше интенсивность, тем эффективнее КНМ.

Минимальная интенсивность проверок – это наименьшая частота (вероятность) контрольных мероприятий, при которой достигается требуемый уровень соблюдения норм (или удержания нарушений в допустимых пределах). Теория игр позволяет вывести несколько вариантов такого порога в зависимости от постановки задачи и учитываемых факторов.

Первый вариант определения минимальной интенсивности из условия безразличия нарушителя непосредственно вытекает из равновесия Нэша в смешанных стратегиях. Если фактическая интенсивность проверок $p_{факт}$ ниже значения p, то для рационального нарушителя стратегия «нарушать» становится строго предпочтительнее стратегии «соблюдать». Следовательно, для сдерживания нарушений необходимо обеспечить

$$p_{min}^{(1)} = \frac{c + \pi_0 \cdot L - \pi_N \cdot L - \pi_N \cdot S}{F - \pi_N \cdot S}. \quad (22)$$

При несовершенстве обнаружения (вероятность выявления нарушения $\gamma < 1$) формула модифицируется:

$$p_{min}^{(1)} = \frac{c+\pi_0 \cdot L-\pi_N \cdot L-\pi_N \cdot S}{\gamma \cdot (F-\pi_N \cdot S)}. \quad (23)$$

Данный порог тем ниже, чем выше штраф и чем больше ожидаемый ущерб для самого нарушителя.

В модели «принципал – агент» в иерархической игре (стимулирование инспектора) принципал может влиять на выбор усилий инспектора через контракт. Однако даже при оптимальном контракте существует минимальная частота проверок со стороны принципала (контроль второго уровня), необходимая для предотвращения оппортунизма инспектора. Эта частота определяется условием, при котором ожидаемая выгода от сговора (или снижения усилий) становится меньше ожидаемого наказания:

$$p_{min}^{(2)} = \frac{w+b}{R}, \quad (24)$$

где R – штраф для инспектора при обнаружении коррупции или халатности [6].

В эволюционном подходе Колокольцова [9] рассматривается динамика доли нарушителей $x(t)$. При квадратичных штрафах $F(x) = \beta x^2$ существует устойчивое внутреннее равновесие x. Чтобы это равновесие соответствовало низкому уровню нарушений, необходимо, чтобы интенсивность проверок p превышала некоторый порог, определяемый из условия устойчивости:

$$p_{min}^{(3)} > \frac{G\prime(x)}{2 \cdot \beta \cdot x}. \quad (25)$$

При более низких p равновесие смещается в область высоких нарушений.

Когда нарушители делятся на несколько типов с разной склонностью к соблюдению норм (добросовестные и недобросовестные), минимальная интенсивность должна быть достаточной, чтобы удерживать от нарушений наихудший тип. Тогда из условия безразличия для наихудшего типа:

$$p_{min}^{(4)} = \frac{c_N-\pi_N \cdot L_N}{\gamma \cdot (F-\pi_N \cdot S)}. \quad (26)$$

При этом для добросовестного этого значения может быть избыточным, но ресурсы распределяются с учетом априорной вероятности типа [8].

Представленные варианты показывают, что понятие «минимальная интенсивность» не является единственным и зависит от цели контроля, горизонта планирования, уровня иерархии и доступной информации. На практике для определения плановой частоты проверок целесообразно использовать комбинацию этих подходов, выбирая наибольшее из полученных значений как гарантирующее выполнение всех требований.

Для наглядности все предложенные способы определения минимального количества проверок сведены в Таблицу 5.

Таблица 5 – Концепции минимальной интенсивности проверок
Table 5 – Concepts of minimum inspection intensity

Концепция	Формула	Условия	Цель
А. Сдерживание нарушителя	$p^{(A)} = \frac{c + \pi_0 \cdot L - \pi_N \cdot L - \pi_N \cdot S}{\gamma \cdot (F - \pi_N \cdot S)}$	$c > \Delta\pi L$; γ – вероятность выявления	Сделать нарушение невыгодным для рационального собственника

Таблица 5 (продолжение)
Table 5 (continued)

B. Предотвращение коррупции (по Уразову [5])	$p^{(B)} = \frac{w+b}{R}$	R – штраф за коррупцию; $w + b$ – доход инспектора	Исключить выгоду от сговора инспектора с нарушителем
C. Защита от худшего типа (байесовский подход)	$p^{(C)} = \frac{c_N - \pi_N \cdot L_N - \pi_N \cdot S}{\gamma \cdot (F - \pi_N \cdot S)}$	c_N, L_N – параметры для недобросовестного типа	Обеспечить безопасность даже в присутствии самых злостных нарушителей
D. Эволюционная устойчивость (квадратичные штрафы)	$p^{(D)} > \frac{G'(x)}{2 \cdot \beta \cdot x}$	$F(x)=\beta x^2$, $G(x)$ – выгода от нарушения	Стабилизировать долю нарушителей на низком уровне

Примечание. Значение γ в формулах (A), (C) – вероятность выявления нарушения при проверке, в простейшем случае γ = 1. Значение R в концепции B принимается по ведомственным документам.

Для практического планирования необходимо выбрать наибольшее значение, гарантирующее выполнение всех требований:

$$p_{plan} = max(p(A), p(B), p(C), p(D)). \quad (27)$$

Если какой-либо из порогов не определен (например, $c \leq \Delta\pi L$), то соответствующая концепция не может быть реализована только за счет проверок – необходимо ужесточение санкций или увеличение ответственности.

Результаты

Для иллюстрации работы критерия рассмотрен гипотетический регион с параметрами (все величины нормированы на средний часовой доход $W = 500$ руб./час), приведенными в Таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета
Table 6 – Initial data for the calculation

Наименование параметра	**Численное значение**	
	В абсолютных единицах	**В часах**
Затраты на соблюдение норм	$c = 50\,000$ руб.	$c = 100$
Штраф за нарушение	$F = 200\,000$ руб.	$F = 400$
Ущерб собственника при пожаре	$L = 5\,000\,000$ руб.	$L = 10\,000$
Прирост риска	$\Delta\pi = 0{,}001$ (с $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}1 \cdot 10^{-3}$)	–
Вероятность выявления	$\gamma = 0{,}8$	–
Зарплата инспектора	–	$w = 300$ час (в нормированном виде),
Премия	–	$b = 50$
Штраф за коррупцию	–	$R = 2000$
Для недобросовестного типа	–	$c_N = 20$, $L_N = 10\,000$
Квадратичный штраф	$\beta = 0{,}5$	–
Производная выгоды	$G'(x^*) = 100$	–
Равновесная доля	$x^* = 0{,}1$	–

Для приведенных в Таблице 6 исходных данных по формулам (24)–(27) определены значения интенсивности проверок по каждой концепции:

$$p^{(\mathrm{A})} = \frac{c+\pi_0 \cdot L-\pi_N \cdot L-\pi_N \cdot S}{\gamma \cdot (F-\pi_N \cdot S)} = 28{,}1\ \%, \tag{28}$$

$$p^{(\mathrm{B})} = \frac{w+b}{R} = 17{,}5\ \%, \tag{29}$$

$$p^{(C)} = \frac{c_N-\pi_N \cdot L_N-\pi_N \cdot S}{\gamma \cdot (F-\pi_N \cdot S)} = 3{,}1\ \%, \tag{30}$$

$$p^{(D)} > \frac{G\prime(x)}{2 \cdot \beta \cdot x} = 1000\ \%. \tag{31}$$

Из расчета по концепции «D» получилось абсурдно большое значение, что указывает на то, что при данных параметрах квадратичные штрафы не могут стабилизировать систему, следовательно, необходимо снижать β или $G'(x)$. Концепция «D» может давать непомерно высокие требования, поэтому на практике ее следует применять с калибровкой.

Если отбросить нереалистичный $p^{(D)}$, то максимум среди $p^{(A)}$, $p^{(B)}$, $p^{(C)}$ равен:

$$p = max(0{,}281; 0{,}175; 0{,}031) = 0{,}281.$$

Исходя из вышеизложенного для данного примера плановая интенсивность проверок должна составлять не менее 28 % от числа объектов в год (или за период).

Интенсивность проверок относительной загрузки инспектора важна для планирования деятельности надзорных органов, но для стратегии управления объектом важно определить индивидуальную интенсивность проверок для каждого объекта, т. е., сколько раз в год (в несколько лет) его будут проверять надзорные органы. Важно учитывать, что в реальных системах надзора объекты неоднородны, поэтому при ограниченном бюджете рабочего времени инспектора должно выполнятся следующее неравенство:

$$\sum_{i=1}^{N} p_i \le N\overline{p_{max}}, \tag{32}$$

где N – общее число объектов; p_i – вероятность проверки i-го объекта за период; $\bar{\mathrm{p}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i$ – средняя интенсивность (загрузка инспектора).

Задача принципала – назначить p_i так, чтобы для каждого объекта выполнялись условия сдерживания, коррупционной устойчивости и т. д., но с учетом индивидуальных параметров c_i, L_i, $\pi_{N,i}$, $\pi_{0,i}$.

Для каждого объекта i минимальная интенсивность определяется как максимум порогов, вычисленных по его характеристикам:

$$p_i^{min} = max\ (p_i^{(A)}, p_i^{(B)}, p_i^{(C)}, p_i^{(D)}), \tag{33}$$

где A (сдерживание собственника) объект недисциплинируем, требует постоянного контроля:

$$p_i^{(\mathrm{A})} = \frac{c_i+\pi_{0_i} \cdot L_i-\pi_{N_i} \cdot L_i-\pi_{N_i} \cdot S_i}{\gamma_i \cdot (F-\pi_N \cdot S)_i}. \tag{34}$$

B (предотвращение коррупции) (одинакова для всех объектов, зависит от системы оплаты инспектора):

$$p_i^{(\mathrm{B})} = \frac{w+b}{R}. \tag{35}$$

C (защита от худшего типа) – если тип собственника неизвестен, но известно распределение, то

$$p_i^{(\text{C})} = \frac{c_i^{\text{худш}} + \pi_{0i} \cdot L_i^{\text{худш}} - \pi_{N_i} \cdot L_i^{\text{худш}} - \pi_{N_i} \cdot S_i^{\text{худш}}}{\gamma_i \cdot (F - \pi_N \cdot S)_i}, \quad (36)$$

где индекс «худш» – наихудшие ожидаемые значения.

Порог B (коррупция) не зависит от объекта; он определяет минимальную среднюю интенсивность в системе, при которой инспектору невыгоден сговор. Если

$$\bar{\text{p}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i < p_i^{(\text{B})}, \quad (37)$$

то даже при высоких индивидуальных p_i инспектор может быть коррумпирован. Поэтому фактически:

$$\bar{\text{p}} \geq p_i^{(\text{B})} \text{ и } p_i \ \geq max\left(p_i^{(A)}, p_i^{(B)}, p_i^{(C)}, p_i^{(D)}\right). \quad (38)$$

Для определения интенсивности проверок каждого объекта по предлагаемому методу сформирован алгоритм, приведенный в Таблице 7.

Таблица 7 – Алгоритм определения интенсивности проверок объектов
Table 7 – Algorithm for determining the intensity of inspections of objects

№ этапа	Содержание этапа
1	Для каждого объекта *i* вычислить $p^A(i)$, $p^C(i)$, $p^D(i)$
2	Вычислить p^B по параметрам контракта
3	Если $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \max\left(p_i^{(A)}, p_i^{(B)}, p_i^{(C)}, p_i^{(D)}\right) < p_i^{(B)}$ то необходимо поднять интенсивность для всех объектов пропорционально, чтобы средняя достигла p^B. Иначе можно оставить индивидуальные значения.
4	При бюджетном ограничении $\sum_{i=1}^{N} p_i \leq P_{total}$ решать задачу оптимизации: минимизировать суммарный риск, назначая $p_i \geq p_i^{min}$

При применении алгоритма к конкретным объектам этапы 1–4 могут дополняться примечаниями.

Для апробации алгоритма для трех гипотетических объектов с характеристиками, приведенными в Таблице 8, осуществлен расчет интенсивности проверок.

Таблица 8 – Характеристики объектов
Table 8 – Properties of objects

Параметр	Объект A (торговый центр)	Объект B (школа)	Объект C (склад)
c_i (час)	100	200	30
L_i (час)	10 000	50 000	2000
$\Delta\pi_i$	0,001	0,0005	0,002
F_i (час)	400	400	400
γ_i	0,8	0,9	0,7

Общие параметры: $w = 300$, $b = 50$, $R = 2000 \rightarrow p^B = 0{,}175$ (параметры нормированы на $W = 500$ руб./час).

Результаты расчетов, осуществленные по алгоритму, приведенному в Таблице 7 сведены в Таблицу 9.

Таблица 9 – Расчетные данные
Table 9 – Calculated data

Интенсивность проверки по виду концепции	Тип объекта			Средняя интенсивность
	A	B	C	
p^A	0,281	0,486	0,093	–
p^C	0,125	0,208	0,039	–
Индивидуальные минимумы	0,281	0,486	0,093	0,287

Из данных Таблицы 9 следует, что объекты с высоким социальным ущербом (школа) проверяются чаще, что соответствует риск-ориентированному подходу при реализации контрольно-надзорной деятельности в Российской Федерации.

Обсуждение

Исходя из вышеизложенного, следует, что предлагаемый метод определения интенсивности проверок объектов защиты, основанный на теории игр, объединяющий базовую статическую игру с равновесием Нэша в смешанных стратегиях, иерархическую игру Штакельберга с учетом оппортунизма агента, эволюционные модели с динамикой популяции нарушителей и байесовские игры с асимметричной информацией о типах агентов, позволяет учесть специфику пожарного надзора (возможность гибели людей, необратимого ущерба). Эта специфика требовала модификации классических моделей введением параметра общественного ущерба $S \gg L$ и ответственности инспектора R, что математически выразилось в изменении условий равновесия и появлении дополнительных стимулирующих механизмов.

Заключение

Ключевыми элементами предложенного метода являются следующие положения:

1. Построена базовая статическая игра, различающая среднюю и индивидуальную интенсивность.
2. Систематизированы концепции порогов интенсивности, включая сдерживание, коррупцию, защиту от худшего типа и эволюционную устойчивость.
3. Предложен интегральный критерий $p_i^{min} = max\ (p_i^{(A)}, p_i^{(B)}, p_i^{(C)}, p_i^{(D)})$.
4. На численном примере показано дифференцирование интенсивности: школа (высокий ущерб) → 48,6 %, склад (низкий ущерб) → 9,3 %.

Предложенный метод позволяет перейти от единой нормативной частоты проверок к научно обоснованному риск-ориентированному планированию надзорной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Кожевин Д.Ф., Егошин А.М., Козлов А.Л. Контрольно-надзорные мероприятия как элемент управления организационной системой: системный подход к обеспечению надежности и безопасности. *Инженерный вестник Дона.* 2026;(4). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=91231635
Kozhevin D.F., Egoshin A.M., Kozlov A.L. Control and supervisory measures as an element of organizational system management: a systematic approach to ensuring reliability and safety. *Engineering Journal of Don.* 2026;(4). (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=91231635

2. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. *Математическое моделирование систем и процессов.* Санкт-Петербург: Стратегия будущего; 2022. 733 с. https://doi.org/10.37468/book_011222
Butyrskiy E., Matveev A. *Mathematical modeling of systems and processes.* Saint Petersburg: Strategy of the Future; 2022. 733 p. (In Russ.). https://doi.org/10.37468/book_011222
3. Матвеев А.В. *Методы моделирования и прогнозирования.* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; 2022. 230 с.
4. Чернов В.П. Оптимальные решения в вероятностном варианте игры «Инспекция». *Современная экономика: проблемы и решения.* 2023;6:8–15.
Chernov V.P. Optimal solutions in the probabilistic version of the game "Inspection". *Modern Economics: Problems and Solutions.* 2023;6:8–15. (In Russ.).
5. Ruixia G., Shuicheng T., Jian Sh. Dynamic game analysis of extinguishing behavior of fire forces. In: *IEEE Conference Anthology, 01–08 January 2013, China*. IEEE; 2013. https://doi.org/10.1109/ANTHOLOGY.2013.6785030
6. Уразов А.С. Оптимальные параметры иерархических контролирующих структур. *Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика.* 2013;(1):15–20.
Urazov A.S. Optimum parameters of hierarchical control structures. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics.* 2013;37(1):14–20. https://doi.org/10.3103/S0278641913010044
7. Agarwal P., Hunt K., Srinivasan Sh., Zhuang J. Fire code inspection and compliance: a game-theoretic model between fire inspection agencies and building owners. *Decision Analysis.* 2020;17(3):208–226. https://doi.org/10.1287/deca.2020.0410
8. Calderon A., Parkinson S. Towards compliance-based inspection modelling. *International Journal of Decision Support Systems.* 2024;5(1):1–13. https://doi.org/10.1504/IJDSS.2021.10043274
9. Kolokoltsov V.N. Inspection-corruption game of illegal logging and other violations: Generalized evolutionary approach. *Mathematics.* 2021;9(14):1619. https://doi.org/10.3390/math9141619
10. Albino D.K., Hu A., Bar-Yam Y. *Corporations and Regulators: The Game of Influence in Regulatory Capture.* arXiv. URL: https://arxiv.org/abs/1310.0057 [Accessed 18th May 2026].
11. Yang Zh., Yang Z., Yin J., Qu Zh. A risk-based game model for rational inspections in port state control. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.* 2018;118:477–495. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.08.001

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Федорович Кожевин, доктор технических наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: yagmort_kdf@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6418-107X

Dmitriy F. Kozhevin, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Department of Physical and Chemical Fundamentals of Combustion and Extinguishing Processes, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, St. Petersburg, the Russian Federation.

Алексей Михайлович Егошин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и экономики, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: al-ego@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2025-2590

Aleksej M. Egoshin, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department of Management and Economics, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, St. Petersburg, the Russian Federation.

Андрей Леонидович Козлов, заместитель директора Музея железных дорог России – структурного подразделения Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: 79217781359@yandex.ru

Andrej L. Kozlov, Deputy Director of the Russian Railway Museum, a branch of the Oktyabrskaya Railway, a subsidiary of Russian Railways, St. Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 01.09.2026; одобрена после рецензирования 02.11.2026; принята к публикации 19.11.2026.

The article was submitted 01.09.2026; approved after reviewing 02.11.2026; accepted for publication 19.11.2026.