

## МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПУТЕМ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ТЕПЛОВОЗОВ

Цыганов В. В.<sup>1</sup>, Еналеев А. К.<sup>2</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Савушкин С. А.<sup>3</sup>

(ФГБУН Институт проблем транспорта  
им. Н.С. Соломенко РАН, Москва)

Разработан организационный механизм планирования и стимулирования устойчивого развития организационной системы. Найдены достаточные условия оптимальности этого механизма. На основе полученных результатов рассмотрена проблема устойчивого развития железнодорожного транспорта путем капитального ремонта тепловозов. Разработан организационный механизм снижения выбросов вредных веществ тепловозом в результате капитального ремонта. Этот механизм включает алгоритм нормирования и категорирования показателей выбросов основных вредных веществ, алгоритм свертки категорий показателей выбросов и формирования категории экологичности тепловоза, а также процедуру стимулирования за капитальный ремонт тепловоза. Нормативы выбросов вредных веществ формируются на основе отечественных стандартов, а также национальных и региональных требований за рубежом. При этом категория выбросов вредных веществ определенного типа признается удовлетворительной, если показатель этих выбросов не превышает нормы, указанной в соответствующем отечественном экологическом стандарте, хорошей – если этот показатель также соответствует требованиям национальных или региональных экологических стандартов стран передового тепловозостроения, и отличной – если этот показатель соответствует лучшим мировым стандартам. Алгоритм свертки этих категорий определяет комплексную оценку экологичности тепловоза после капитального ремонта. В зависимости от этой оценки осуществляется стимулирование заинтересованных лиц. Приведены примеры расчетов категорий экологичности отечественных и зарубежных тепловозов. Разработанные нормативы показателей выбросов основных вредных веществ могут использоваться в качестве ориентиров при капитальном ремонте тепловозов. Полученные результаты использованы при разработке

---

<sup>1</sup> Владимир Викторович Цыганов, д.т.н., профессор (bbc@ipu.ru).

<sup>2</sup> Анвер Касимович Еналеев, к.т.н., с.н.с. (anverena@mail.ru).

<sup>3</sup> Сергей Александрович Савушкин, к.ф-м.н., с.н.с. (ssavushkin@mail.ru).

*концепции требований к тепловозам ОАО «РЖД» в области охраны окружающей среды.*

Ключевые слова: организация, устойчивое развитие, планирование, стимулирование, тепловоз, выбросы загрязняющих веществ

## **1. Введение**

Устойчивое развитие (УР) больших систем подразумевает такое их функционирование, при котором обеспечивается долгосрочное существование и развитие в экономическом, социальном и экологическом аспектах [6]. Текущие цели глобального УР [26] включают эффективное использования ресурсов и уменьшение выбросов, вредных для здоровья людей и окружающей среды. В результате достижения этих целей формируется баланс между текущими потребностями и интересами организации с одной стороны, и охраны окружающей среды – с другой, при сохранении возможности удовлетворения потребностей в будущем [9].

Устойчивое развитие организации предполагает:

- экономическую устойчивость, обеспечивающую эффективным использованием ресурсов, внедрением инноваций и повышением конкурентоспособности;
- экологическую устойчивость, обеспечивающую минимизацией негативного воздействия на окружающую среду, рациональным использованием невозобновляемых природных ресурсов, внедрением экологически чистых технологий и снижением выбросов.

Примеры УР организаций связаны с повышением эффективности использования ресурсов, внедрением «зеленых» технологий и снижением выбросов [9]. Устойчивое развитие организации обеспечивает:

- долгосрочную стабильность и выживание вследствие лучшей адаптации к изменениям и снижения рисков;
- улучшение репутации организации, поскольку ответственное отношение к экологическим вопросам укрепляет её имидж и повышает доверие со стороны потребителей, инвесторов и общества;

- конкурентное преимущество, поскольку устойчивые организации часто становятся лидерами в своих отраслях, внедряя инновации и предлагая услуги, отвечающие потребностям УР;
- разрешение глобальных проблем, таких как изменение климата.

Проблемы УР больших систем требуют комплексного изучения. В частности, необходимы исследования и разработки, позволяющие связать организационные механизмы обеспечения устойчивости социально-экономических и природных систем. Основой таких исследований является теория организационного управления, в которой разработан широкий спектр моделей и методов, создающих предпосылки для эффективного внедрения ее результатов [7, 13].

Однако попытки применения этих моделей и методов на практике сталкиваются со сложностью идентификации параметров реального объекта управления, в составе которого присутствуют люди со своими целями и представлениями об объекте и применяемой системе управления. При этом характеристики конкретного объекта управления обычно уникальны и редко подходят под стандартизованные описания, принятые в математических моделях. Кроме того, они не известны точно органу управления (Центру) и трудно измеримы на практике. В этом случае применение математических моделей, основанное на попытках детализации параметров объекта управления, их идентификации и последующем использовании точных значений этих параметров, не приводит к улучшению качества управления. Более того, возможно ухудшение качества управления вследствие введения Центра в заблуждение относительно реального состояния системы.

Видятся два подхода к решению указанных проблем внедрения результатов теории организационного управления. Первый подход связан со стремлением к максимально точному описанию объекта управления, позволяющему непосредственно применить математические модели, разработанные в теории организационного управления. Этот подход связан с расширением спектра моделей и методов, используемых при уточнении значений неизвестных характеристик объекта управления для по-

вышения адекватности описания и управления объектом. К ним относятся, в частности, модели и методы адаптивного управления, обучения и самоорганизации [11, 12, 18].

Второй подход связан с заведомо приближенным описанием объекта управления и использованием только ключевых характеристик объекта, отражающих самые существенные его свойства. Часто это не количественные, а качественные характеристики объекта. При этом снижаются требования к детализации и идентификации параметров объекта управления, а также к точности решений, вычисляемых на выходе системы управления. Пример – переход к выработке управлений, измеряемых в порядковых шкалах, значения которых называются категориями. Для этого широко используются процедуры матричной свертки [1–3, 14, 16, 18, 25, 28].

В [1] исследуются вопросы применения обобщенных медианных механизмов согласования мнений агентов в процедурах комплексного оценивания. В [2] рассмотрена задача и метод поиска матричных сверток, при которых комплексная оценка равна оценке, получаемой с помощью экспертов. В [3, 14, 25, 28] рассмотрена проблема идентификации процедур комплексного оценивания на основе набора статистических данных. Предложены алгоритмы построения соответствующих деревьев и матричных сверток.

Процедуры матричной свертки используются и для решения прикладных задач управления, в частности, на железнодорожном транспорте. В [18] рассмотрена комплексная оценка влияния изменения климата на устойчивость транспортной инфраструктуры для принятия решений по её адаптации. В [16] предложена процедура комплексного оценивания вредных воздействий локомотивов на окружающую среду.

Заметим, что задача выбора процедуры комплексного оценивания тесно связана со спецификой объекта такого оценивания. При этом часто трудно или даже невозможно получить статистические данные об объекте в объеме, достаточном для идентификации процедур комплексного оценивания. В этом случае приходится прибегать к использованию мнений экспер-

тов и на их основе формировать порядковые шкалы для оценки состояний объекта.

На практике для обеспечения адекватности комплексного оценивания объектов приходится сочетать формальные и экспертные методы. Пример такого оценивания экологичности капитально отремонтированных тепловозов рассмотрен в разделах 3–6 настоящей статьи. При этом для получения оценок отдельных вредных выбросов этими тепловозами используются формализованные методы измерений их состояний (раздел 4), а также их нормирования и категорирования (раздел 5). Затем эти оценки объединяются с помощью мнений экспертов (раздел 6). Полученная при этом комплексная оценка экологичности тепловоза используется в организационном механизме снижения выбросов (раздел 7). Рассмотрены примеры применения этой процедуры комплексного оценивания на практике (раздел 8).

Учитывая вышесказанное, далее в разделе 2 будем предполагать, что процедура комплексного оценивания так или иначе увязана со спецификой объекта управления. Это позволяет рассматривать задачу синтеза оптимальной системы стимулирования агента. Именно, для случая оценки результатов действий (стратегий) агентов, измеряемых в категориях, будем адаптировать и развивать результаты синтеза механизмов согласованного управления и устойчивого функционирования активных систем [5, 17].

## **2. Математическая модель механизма планирования и стимулирования**

Рассмотрим двухуровневую организационную систему УР, на нижнем уровне которой находится агент, а на верхнем – управляющий орган (Центр). Агент выбирает некоторый набор действий (стратегий)  $\bar{u} = (u_1, \dots, u_n)$ ,  $u_i \in U_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , где  $U_i$  – компактные множества допустимых значений действий  $u_i$ , где  $i$  обозначает компоненту действия агента из набора действий  $\bar{u} = (u_1, \dots, u_n)$ . Предположим, что Центр (исходя из соображе-

ний, которые будут рассмотрены ниже) разбивает множества  $U_i$  на непересекающиеся подмножества  $V_i^j$ ,  $U_i = \bigcup_{j=0}^{m_i} V_i^j$ ,

$\bigcap_{j=0}^{m_i} V_i^j = \emptyset$ . Если  $m_i = 0$ , то  $U_i = V_i^0$ , т.е. разбиение тривиально. Поэтому будем считать, что  $m_i \geq 1$ . Каждому подмножеству  $V_i^j$  присваивается категория  $k_i^j$ , измеряемая в целых числах.

Примем, что для каждого  $i$  множества  $V_i^j$  пронумерованы по  $j$  так, что  $k_i^j = j$ ,  $j = 0, \dots, m_i$ .

Выбранная процедура разбиения множеств  $U_i$  для определения категорий действий агента задается отображением  $K_i: U_i \rightarrow J_i$ , где множества  $J_i = \{0, \dots, m_i\}$  определяют шкалу категорий для показателя  $i$ .

Пример, иллюстрирующий способ разбиения, основывается на использовании нормативов для  $u_i$ . Пусть в этом примере  $u_i$  принимает значение на числовой полуоси,  $u_i \geq 0$ , и для  $u_i$  заданы нормативные значения  $r_i^j$ , где  $1 \leq j \leq m_i$ . Примем, что последние упорядочены по убыванию, т.е.  $r_i^1 > r_i^2 > \dots > r_i^{m_i-1} > r_i^{m_i}$  при  $m_i > 1$ . Если выбранное агентом действие  $u_i$  попадает в отрезок  $u_i \in [0, r_i^{m_i}]$ , то этому действию приписывается максимальная категория  $k_i = m_i$ , если  $u_i \in (r_i^{m_i}, r_i^{m_i-1}]$  и  $m_i > 1$ , то категория  $k_i$  равна  $m_i - 1$ , и т.д., если  $u_i > r_i^1$ , то выбору действия агента присваивается категория  $k_i = 0$ .

Набор категорий, соответствующих действиям агента  $\bar{u} = (u_1, \dots, u_n)$ , обозначим  $\bar{k} = (k_1, \dots, k_n)$ .

Для оценки результативности выбора действий с использованием набора категорий предположим, что выбрана процедура  $Q$  свертки этого набора в интегральную категорию  $Q: \bar{k} \rightarrow q$ , где  $q$  обозначает интегральную категорию, принимающую значение в порядковой шкале  $(0, 1, \dots, m)$ . По сути, процедура  $Q$  преобразует многокритериальный выбор к одному критерию  $q$ .

Выбранная процедура разбиения множеств  $U_i$  для определения категорий действий  $K_i: U_i \rightarrow J_i$  агента в совокупности с процедурой свертки  $Q$  задает отображение  $\tilde{K}: U = \{U_i\} \rightarrow \{0, 1, \dots, m\}$ , которое назовем процедурой комплексного оценивания деятельности агента. Примерами таких процедур являются процедуры матричной свертки [1–3, 14, 16, 18, 25, 28].

В рамках описания оценки деятельности агента, использующего понятие категории  $q$ , предположим, что целевая функция агента равна

$$f(x, q, z) = s(x, q) - \zeta(q, z),$$

где  $s(x, q)$  – функция стимулирования, устанавливаемая Центром;  $x$  – план, назначаемый Центром;  $z$  – параметр функции затрат  $\zeta(q, z)$  агента на реализацию им интегральной категории  $q$ . Обычно, план  $x$  интерпретируется как желаемое для Центра значение интегральной категории. Предполагается, что функция затрат  $\zeta(q, z)$  возрастает по  $q$ . Параметр  $z$  определяет «степень крутизны роста» функции затрат либо предельно достижимое агентом значение  $q$ . Примерами функций затрат являются  $\zeta(q, z) = aq^2/2z$  и  $\zeta(q, z) = -a \ln(1 - q/z)$ , где  $a > 0$  – коэффициент, характеризующий функцию затрат. Для функции затрат  $\zeta(q, z) = -a \ln(1 - q/z)$  естественно потребовать  $m < z$ .

Пусть целевая функция Центра, которую он стремится максимизировать, равна

$$F(x, q/z) = \Psi(q/z) - \gamma s(x, q),$$

где  $\Psi(q/z)$  – функция выигрыша Центра, монотонно возрастающая по  $q$ ,  $\gamma > 0$  – коэффициент, дающий соизмерение выигрыша Центра с потерями от величины поощрения  $s(x, q)$ , выплачиваемого агенту; отношение  $q/z$  характеризует удельное значение категории к параметру  $z > 0$ .

Примем, что агент при заданной процедуре комплексного оценивания  $\tilde{K}$  и функции стимулирования  $s(\cdot, \cdot)$  выбирает свои действия таким образом, чтобы максимизировать целевую функцию  $f(x, q, z)$  по  $q$ . Обозначим через  $q^* = q^*(x, s, z)$  категорию, при которой достигается максимум функции  $f(x, q, z)$  по  $q$ .

при  $q \in [0, m]$ . Тогда Центр получает выигрыш  $F(x, q^*/z) = \Psi(q^*/z) - \gamma s(q, z)$ .

Таким образом, в расширенном представлении *постановка задачи* для Центра может быть сформулирована следующим образом: найти на заданном множестве  $\mathcal{M}$  допустимых механизмов  $M = (\tilde{K}, x, s)$  организационный механизм  $M^* = (\tilde{K}^*, x^*, s^*)$ , при котором выполняется неравенство

$$(1) \quad F(x^*, q^*(x^*, s^*, z), z) = \Psi(q^*(x^*, s^*, z)/z) - \gamma s^*(x^*, q^*(x^*, s^*, z)) \geq \sup_{\mathcal{M}} F(x, q(x, s, z), z) - \varepsilon,$$

где  $\varepsilon > 0$ .

Задача выбора организационного механизма (при заданной процедуре комплексного оценивания) сводится к определению механизма планирования и стимулирования  $\mu^* = (x^*, s^*)$ , дающее-го решение задачи (1) для случая, когда множество допустимых механизмов задается следующими требованиями:

$$(2) \quad x \in [0, m], \quad 0 \leq s(x, q) \leq g,$$

где  $g$  – заданный максимальный размер стимулирования.

Рассмотрим два случая: 1) полная информированность – Центру известна функция затрат (в том числе значение параметра  $z$ ); 2) неполная информированность – Центр не знает значение  $z$  и запрашивает его оценку у агента.

Рассмотрим сначала случай полной информированности. Для определения решения задачи (1), (2) воспользуемся утверждением 1 из [17]. Из этого утверждения следует, что при  $g \geq \max_{0 \leq q \leq m} \zeta(q, z)$  оптимальная функция стимулирования равна

$$s^* = s^*(x, q) = \begin{cases} L + \zeta(x, z), & \text{если } q = x, \\ 0, & \text{если } q \neq x; \end{cases} \quad L = \max_{0 \leq q \leq m} [-\zeta(q, z)].$$

Если предположить, что затраты агента для достижения нулевой категории  $q = 0$  равны 0, то для рассматриваемой модели получаем  $L = 0$ .

Оптимальный план в этом случае определяется условием  $x^* = \arg \max_{0 \leq x \leq m} [\Psi(x/z) - \gamma(L + \zeta(x, z))]$ . Функция стимулирова-

ния в [7, 17] называется компенсаторной, поскольку компенсирует агенту его затраты.

При  $g < \max_{0 \leq q \leq m} \zeta(q, z)$  определим категорию  $q^{\#} < m$ , такую что  $\zeta(q^{\#}, z) = g^{\#} \leq g$  и  $\zeta(q^{\#} + 1, z) > g$ . Тогда оптимальная функция стимулирования равна

$$s^* = s^*(x, q) = \begin{cases} g^{\#}, & \text{если } q = x \geq q^{\#}, \\ L + \zeta(x, z), & \text{если } q = x < q^{\#}, \\ 0, & \text{если } q \neq x; \end{cases}$$

а оптимальный план определяется условием  $x^* = \arg \max_{0 \leq x \leq q^{\#}} [\Psi(x / z) - \gamma(L + \zeta(x, z))]$ . При полной информированности Центра функция стимулирования является оптимальной как на множестве  $[0, m]$  значений  $q$ , представляющем собой отрезок числовой оси, так и на множестве дискретных значений категорий из набора целых чисел  $\{0, 1, \dots, m\}$ .

Исследуем теперь случай неполной информированности Центра о параметре  $z$ , где  $0 < z \leq z^0$ .

Центр просит сообщить агента значение параметра  $z$ . Заметим, что агент может сообщить вместо  $z$  значение  $p \neq z$ , если это позволит получить более выгодный для него план и величину поощрения при использовании Центром механизма планирования и стимулирования, который был оптимальным для случая полной информированности [5, 7, 17].

Рассмотрим подход к построению оптимального механизма  $\mu^* = (x^*, s^*)$ , где  $x^* = x^*(p)$  – оптимальная процедура планирования,  $s^* = s^*(x, q)$  – оптимальная процедура стимулирования.

Заметим, что в условиях неполной информированности Центр перед решением задачи синтеза оптимального механизма не знает выбора категории  $q^*$  агентом и не знает размера стимула, который будет выплачен агенту. Поэтому можно предположить, что он рассчитывает на возможность максимального использования фонда стимулирования. Следовательно, примем, что при решении задачи синтеза он ориентируется на выраже-

ние своей целевой функции  $F^*(x, z) = \Psi(q^*/z) - \gamma g$ , которая отражает использование всего фонда стимулирования.

Далее для построения механизма для рассматриваемой дискретной модели сначала исследуем модель, описываемую для переменных  $x, q$ , принимающих значения на всем связном отрезке  $[0, m]$ , где  $z > 0$ .

Предположим также, что функция затрат  $\zeta(q, z)$  агента дважды дифференцируема по первой переменной, существует смешанная производная  $\ddot{\zeta}_{qz}(q, z)$  и выполнены следующие условия:

$$(3) \quad \dot{\zeta}_q(q, z) > 0, \quad \ddot{\zeta}_{qq}(q, z) > 0, \quad \dot{\zeta}_z(q, z) < 0, \quad \ddot{\zeta}_{qz}(q, z) < 0.$$

Заметим, что функции затрат в приведенных выше примерах удовлетворяют этим условиям.

Далее будем рассматривать функции стимулирования вида

$$(4) \quad s(x, q) = \begin{cases} \sigma(x), & \text{если } q = x, \\ 0, & \text{если } q \neq x. \end{cases}$$

Для таких функций обеспечивается выполнение плана, так как выигрыш агента  $f(x, q, z) \leq 0$  при  $q \neq x$ .

В [5] отмечено, что необходимым и достаточным условием сообщения агентом достоверной информации является выполнение для назначаемого агенту Центром плана условий совершенного согласования, которые для рассматриваемой модели записываются следующим образом:

$$(5) \quad \forall p \in [0, m]: \quad f(x(p), x(p), p) = \max_{0 \leq v \leq m} f(v, v, p).$$

Известно [5, 17], что оптимальная процедура планирования  $x^*(p)$  содержится среди процедур планирования, удовлетворяющих условию совершенного согласования. В предположении о дифференцируемости функции  $\sigma(x)$  из (4), необходимые условия для (5) можно представить (за исключением граничной точки  $x = m$ ) в виде

$$(6) \quad \dot{\sigma}(x) = \dot{\zeta}_x(x, p).$$

В [5] показано: при выполнении условий (3), процедура планирования  $x(p)$ , удовлетворяющая необходимым условиям совершенного согласования (6) является неубывающей.

Обозначим  $\lambda$  некоторый достижимый уровень значений целевой функции Центра  $F^*(x, z)$  при всех допустимых значениях пар  $(x, p)$ . Тогда можно записать

$$(7) \quad \Psi(x/p) - \gamma g \leq \lambda$$

Рассмотрим уравнение  $\Psi(x/p) = \lambda + \gamma g$  и разрешим его относительно  $x$ . Предполагается, что функция  $\Psi(x/p)$  монотонно возрастает по  $x$  при всех  $p$ . Обозначим обратную функцию к  $\Psi(x/p)$  через  $\varphi(\cdot)$ . Тогда существует решение уравнения  $x = p\varphi(\lambda + \gamma g)$ . Отсюда  $p = x/\varphi(\lambda + \gamma g)$ .

Построим теперь функцию стимулирования  $\tilde{\sigma}(x)$ , для которой условие (6) выполняется для пар  $(x, p)$ , описываемых соотношением  $p = x/\varphi(\lambda + \gamma g)$ . Такая функция при выполнении условий монотонности (3) равна  $\tilde{\sigma}(x) = \int_0^x \dot{\zeta}_t(t, t/\varphi(\lambda + \gamma g)) dt$ , где  $\dot{\zeta}_t(t, t/\varphi(\lambda + \gamma g))$  – частная производная функции затрат по первой переменной и  $x \leq m$ . Справедливость выражения для  $\tilde{\sigma}(x)$  проверяется подстановкой  $\tilde{\sigma}(x)$  в (6) при  $p = x/\varphi(\lambda + \gamma g)$ .

**Теорема.** Оптимальный механизм  $\mu^* = (x^*, s^*)$  определяется следующими соотношениями:

$$(8) \quad x^* = x^*(p, \lambda^*, g) = \begin{cases} p\varphi(\lambda^* + \gamma g), & \text{если } p\varphi(\lambda^* + \gamma g) < m, \\ m, & \text{если } p\varphi(\lambda^* + \gamma g) \geq m; \end{cases}$$

$$(9) \quad s^* = s^*(x, q) = \begin{cases} 0, & \text{если } q = 0 \text{ или } q \neq x, \\ \int_0^x \dot{\zeta}_t(t, t/\varphi(\lambda^* + \gamma g)) dt, & \text{если } q = x, x \leq m\varphi(\lambda^* + \gamma g) \leq m, \\ g, & \text{если } x > m\varphi(\lambda^* + \gamma g); \end{cases}$$

где оптимальное значение целевой функции Центра  $\lambda^*$  вычисляется из уравнения

$$(10) \quad g = \int_0^{x^*(p, \lambda^*, g)} \dot{\zeta}_t(t, t/\varphi(\lambda^* + \gamma g)) dt.$$

**Доказательство.** Из оптимальности принципа открытого управления (см. например [5]) и используемого уравнения  $\Psi(x/p) = \lambda + \gamma g$  определяется план  $x = p\varphi(\lambda + \gamma g)$ , который обеспечивает значение целевой функции Центра, равное  $\lambda$ . Функция стимулирования (9) построена таким образом, чтобы план  $x^*$ , определяемый выражением (8), удовлетворял условию (5). Условие (10) обозначает, что при заданном фонде  $g$  устанавливается максимальное значение  $\lambda^*$  параметра  $\lambda$ . Таким образом, механизм (8)–(10) обеспечивает оптимальность выбора агентом категории  $q^* = x^*$ . Теорема доказана.

При использовании формул (3)–(10) и в формулировке теоремы предполагается, что значение  $q$  определено на всем отрезке  $[0, m]$ . При использовании понятия категорий действия агента  $q$  соответствующий план принимает дискретные значения из набора целых чисел  $\{0, 1, \dots, m\}$ . Применим теорему для такого измерения действий агентов. Справедливо следующее следствие теоремы.

**Следствие.** Применение процедур планирования (8) и стимулирования (9) обеспечивают эффективность  $F^*(x^*, z) = \Psi(x^*/z) - \gamma g = \lambda^*$ , когда  $q^* = x^*$  принимает значения из шкалы категорий (т.е. дискретные значения из набора целых чисел  $\{0, 1, \dots, m\}$ ) и  $p \in [0, m/\varphi(\lambda^* + \gamma g)]$ .

**Доказательство.** Рассмотрим значения  $s^*(x, q)$  функции стимулирования (9) и значения планов  $x^*(p, \lambda^*, g)$  из процедуры планирования (8) в точках  $q^* = x^* \in (0, 1, \dots, m)$ . Из теоремы следует, что для этих точек, поскольку они принадлежат отрезку  $[0, m]$  при  $p \in [0, z^0]$ , где  $z^0 = m/\varphi(\lambda^* + \gamma g)$ , значение эффективности механизма, измеряемого значением целевой функции равно  $\lambda^* = F^*(x^*, z) = \Psi(x^*/z) - \gamma g$ .

**Замечание 1.** При использовании механизма (8), (9), выполнены условия совершенного согласования (5), когда агенту назначается выгодный план. В этом случае вместо достоверного значения параметра  $p = z$  агент может сообщить в Центр значение выгодного для него плана  $x^* = x^*(p, \lambda^*, g)$ , реализуя метод встречного планирования [7].

**Замечание 2.** Центр при выполнении условий (5) может не запрашивать встречный план, поскольку  $q^* = x^*$ , а получать результат выбора действия агента в виде реализации категории  $q^*$ .

**Пример применения теоремы.** Пусть  $\Psi(q/z) = q/z$ ,  $\zeta(q, z) = aq^2/z$ . Тогда неравенство (7) принимает вид  $x/p - \gamma g \leq \lambda$ . Следовательно, процедура планирования (8) приобретает вид  $x^*(p, \lambda^*, g) = p(\lambda^* + \gamma g)$ . Вычислим

$$\int_0^x \dot{\zeta}_t(t, t/\varphi(\lambda^* + \gamma g)) dt = \int_0^x at/(t/\lambda^* + \gamma g) dt = ax(\lambda^* + \gamma g).$$

Отсюда получаем вид оптимальной функции стимулирования

$$s^* = s^*(x, q) = \begin{cases} 0, & \text{если } q = 0 \text{ или } q \neq x, \\ ax(\lambda^* + \gamma g), & \text{если } q = x, x \leq m(\lambda^* + \gamma g), \\ g, & \text{если } x > m(\lambda^* + \gamma g). \end{cases}$$

Значение параметра  $\lambda^*$  вычисляется из уравнения

$$am(\lambda^* + \gamma g)^2 = g, \text{ или } \lambda^* = \sqrt{g/m} - \gamma g.$$

Этот пример показывает, что при естественных предположениях о функции затрат и целевой функции Центра, в которой доход пропорционален категории, получаем линейную зависимость функции стимулирования от значения категории.

### 3. Устойчивое развитие железнодорожного транспорта и капитальный ремонт тепловозов

Рассмотрим применение теоретических результатов, полученных в разделе 2, для анализа и разработки механизмов УР железнодорожного транспорта (ЖДТ). Ключевое значение для УР ЖДТ имеет расширение локомотивного парка, поскольку к 2036 году прогнозируется нехватка около 1,5 тыс. локомотивов [10]. Однако существующих мощностей российских машиностроительных заводов недостаточно для производства нужного количества новых локомотивов (с учетом их выбытия из-за окончания срока службы). Ликвидировать дефицит можно за счет капитального ремонта существующих тепловозов, который, к тому же, намного дешевле их производства. В связи с этим Минпромторг РФ, Минтранс РФ и ОАО «РЖД» подготовили

программу капитального ремонта тягового подвижного состава до 2030 года.

Однако при её выполнении необходимо учитывать, что тепловозы выбрасывают в атмосферу отработавшие газы (ОГ) с продуктами горения, в том числе оксиды азота и твердые частицы, создающие проблемы со здоровьем людей [24], а также оксиды углерода и углеводороды, относящиеся к парниковыми газами (наряду с оксидами азота) [23]. В связи с этим возрастаёт актуальность решения проблемы УР тепловозов при капитальном ремонте, при котором эффективно используются ресурсы и снижаются выбросы, вредные для здоровья людей и окружающей среды.

При решении этой проблемы необходимо учитывать, что выбросы тепловозами вредных веществ (кратко – ВВ) в ОГ происходят в основном в результате сгорания углеводородного топлива. Поэтому снижение выбросов тепловозами ВВ в ОГ коррелирует со снижением потребления таких не возобновляемых природных ресурсов, как нефть и газ. Таким образом, УР тепловоза можно характеризовать снижением выбросов ВВ в ОГ.

Базовые национальные, региональные и мировые требования к экологичности тепловозов касаются ограничений выбросов в ОГ основных ВВ – оксидов азота, оксида углерода, углеводородов и твердых частиц [4, 15, 19, 27]. Помимо национальных требований (таких, например, как требования Агентства по охране окружающей среды США – Environmental Protection Agency, или EPA [19, 27]), существуют и региональные требования (например, требования Европейского агентства по охране окружающей среды – Europeen Environmental Agency, или EEA [15]). При этом перспективные отечественные экологические стандарты [4], а также самые высокие национальные и региональные зарубежные требования [15, 19, 27] определяют мировой уровень экологичности тепловозов.

В этих условиях возрастаёт значение устойчивого – экономичного и экологичного капитального и капитально-восстановительного ремонта (кратко – капремонта) эксплуатируемых тепловозов. В русле концепции устойчивого развития

железнодорожного транспорта существующие практики устойчивого капремонта улучшают экологические характеристики тепловозов. В связи с этим компании должны тщательно оценивать капремонт тепловозов с точки зрения улучшения экологичности тепловозов.

Традиционно требования к их экологичности отражаются в национальных и региональных стандартах [4, 15, 19, 27]. Они лежат в основе стратегических организационных механизмов, стимулирующих повышение экологичности тепловозов в долгосрочной перспективе. Однако продолжением достоинств этих стандартов являются их недостатки. Именно, в XXI веке эти стандарты не меняются в течение десятилетий. В это же время появляются новые, более экологичные технологии. Однако устаревшие стандарты подчас не стимулируют их внедрение. В первую очередь это касается уже эксплуатируемых тепловозов, которые изначально удовлетворяли указанным стандартам. В результате до настоящего времени отсутствуют организационные механизмы, которые бы стимулировали применение новых технологий для повышения экологичности в процессе капремонта эксплуатируемых тепловозов.

В связи с этим весьма актуально создание организационного механизма, стимулирующего разработку и внедрение инноваций для улучшения экологичности эксплуатируемых тепловозов в процессе капремонта, в то время как национальные и региональные экологические стандарты неизменны.

#### ***4. Требования к выбросам вредных веществ отремонтированными тепловозами***

Как указывалось выше, базовые национальные и региональные требования к выбросам ВВ в ОГ тепловозов касаются четырех типов ВВ: оксидов азота (для краткости; присвоим этому типу ВВ номер  $i$ , равный 1): ( $i = 1$ ); оксида углерода ( $i = 2$ ); углеводородов ( $i = 3$ ); твердых частиц ( $i = 4$ ). ГОСТ 33754–2016 ([4], таблица 5.1) ограничивает допустимые удельные средневзвешенные выбросы этих ВВ в ОГ в зависимости от того, на какой стадии развития тепловозостроения был создан тепловоз

и его двигатель. Для тепловозов после капитального ремонта допустимые значения выбросов оксида углерода и твердых частиц увеличиваются на 10% по отношению к указанным в таблице 5.1 [4], а углеводородов – на 5%.

Тепловоз, подлежащий капитальному ремонту, может относиться к одной из трех стадий, номера и определения которых даны в таблице 1. При этом номер стадии  $c$  принимает значения от 0 до 2 (кратко –  $c = 0, 1, 2$ ). Обозначим допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ под номером  $i$  тепловозом стадии  $c$  через  $a_{ic}$ , где  $i$  принимает значения от 1 до 4 (кратко –  $i = 1, \dots, 4$ ). Предельные значения этих выбросов при сертификационных испытаниях тепловоза стадии  $c$  после капитального ремонта указаны в таблице 1 для оксидов азота ( $a_{1c}$ ), оксида углерода ( $a_{2c}$ ) и углеводородов ( $a_{3c}$ ).

Как видно из таблицы 1, выбросы твердых частиц при сертификационных испытаниях тепловозом стадии  $c$  после капитального ремонта не ограничиваются. Формально это означает, что  $a_{4c} = \infty$  при  $c = 0, 1, 2$ .

*Таблица 1. Допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ тепловоза после капитального ремонта по ГОСТ [4]*

	Отремонтированные тепловозы	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт·ч		
		Оксидов азота $a_{1c}$	Оксида углерода $a_{2c}$	Углеводородов $a_{3c}$
0	С двигателями, поставленными на производство до 2000 г.	25	11	$\infty^*$
1	Постройки до 2016 г. с двигателями, поставленными на производство до 2000 г.	18	6,6	2,52
2	С двигателями, поставленными на производство с 2000 г. до 2020 г.	12	3,85	1,05

\* Математический символ « $\infty$ » («бесконечность») формально отражает тот факт, что ГОСТ [4] не ограничивает выбросы соответствующего ВВ тепловозом данной стадии.

Проведем обзор и рассмотрим возможность сопоставления и соизмерения с ГОСТ [4] базовых требований к экологичности

отремонтированных тепловозов в странах с развитым тепловозостроением – в США и Европейским Союзом (ЕС), касающихся ограничения выбросов основных ВВ – оксидов азота и углерода, углеводородов и твердых частиц.

В США отремонтированный тепловоз сертифицируется по финальным правилам EPA [19] – в зависимости от соответствия удельных средневзвешенных выбросов основных ВВ (измеряемых в США, по традиции, в г/л.с.-ч) одному из уровней стандартов (Tier of standards), определяемых периодом постройки данного тепловоза (т.е. стадией  $c$  в терминах таблицы 1). Именно, для отремонтированных тепловозов постройки до 2001 года (по сути, стадии  $c = 0$ ) EPA принят уровень ограничений выбросов ВВ Tier 0, постройки 2002–2004 годов (аналог стадии  $c = 1$ ) – Tier 1, постройки после 2004 года (стадии  $c = 2$ ) – Tier 2 [19].

Для сопоставления и соизмерения с ГОСТ [4] указанных уровней EPA Tier необходимо выразить в г/кВт·ч ограничения на удельные средневзвешенные выбросы ВВ отремонтированных тепловозов, принятые в правилах EPA. Эти ограничения указаны в таблице 2, сформированной на основе финальных правил EPA [19] по образу и подобию таблицы 1 из ГОСТ [4]. Рассмотрим особенности формирования некоторых из этих ограничений, обусловленные разной степенью детализации требований ГОСТ [4] и правил EPA [19].

В правилах EPA [19] указаны ограничения на выбросы оксидов азота, углеводородов и твердых частиц. Заметим, что в таблице III-1 документа [19] указаны допустимые выбросы ВВ Tier 0 для отремонтированных магистральных тепловозов с отдельным контуром охлаждения всасываемого воздуха и без такого контура. С другой стороны, как видно из таблицы 1, в ГОСТ [4] такая детализация допустимых выбросов ВВ российскими тепловозами не предусмотрена. Поэтому для сопоставления и соизмерения с российскими требованиями [4] в таблице 2 указано среднее значение допустимых выбросов ВВ, соответствующее уровню Tier 0 для отремонтированных тепловозов с отдельным контуром охлаждения всасываемого воздуха и без него.

Аналогичным образом в таблицах III.-1 и III.-2 правил EPA [19] указаны допустимые выбросы оксидов азота, углеводородов и твердых частиц для магистральных и маневровых тепловозов, соответственно. Как видно из таблицы 1, подобная детализация (для магистральных и маневровых тепловозов) в ГОСТ [4] также не предусмотрена. Поэтому для сопоставления и соизмерения правил EPA [19] с российскими требованиями [4] в таблице 2 указаны средние значения упомянутых выбросов для магистральных и маневровых тепловозов.

Далее, допустимые выбросы оксида углерода, соответствующие уровням Tier 0, Tier 1 и Tier 2, указаны в таблице 1–28 правил EPA отдельно для магистральных и маневровых тепловозов [27]. Как видно из таблицы 1, подобная детализация (для магистральных и маневровых тепловозов) в ГОСТ [4] также не предусмотрена. И в этом случае для сопоставления и соизмерения правил EPA [19,27] с российскими требованиями [4] в таблице 2 указаны средние значения выбросов оксида углерода для магистральных и маневровых тепловозов.

*Таблица 2. Допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ отремонтированных тепловозов по правилам EPA [19, 27]*

Стадия <i>c</i>	Уровень EPA	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт·ч			
		Оксидов азота <i>t<sub>1c</sub></i>	Оксида углерода <i>t<sub>2c</sub></i>	Углеводородов <i>t<sub>3c</sub></i>	Твердых частиц <i>t<sub>4c</sub></i>
0	Tier 0	13,1	8,7	1,93	0,32
1	Tier 1	12,3	3,2	1,17	0,32
2	Tier 2	9,1	2,6	0,6	0,15

В ЕС первые нормы регулирования выбросов дизельных двигателей транспортных средств вводились в два этапа: стандартами Stage I в 1999–2000 гг. для двигателей, поставленных на производство до 2000 г. (что соответствует, в терминах таблицы 1, начальной стадии постройки тепловозов *c* = 0), и стандартами Stage II в 2001-2004 гг. (что соответствует первой стадии: *c* = 1). Допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ дизельных двигателей транспортных средств, регла-

ментируемые стандартами EEA Stage I и II, определены в таблице 1 [15] и приведены в двух верхних строках таблицы 3.

На третьем этапе регулирования выбросов транспортных средств удельные средневзвешенные выбросы отремонтированных тепловозов регламентируются стандартом EEA Stage IIIA [15] (соответствующим второй стадии:  $c = 2$ ). При этом в таблице 8 документа [15] определены допустимые выбросы тепловозов с двигателями категории RL A мощностью 130–560 кВт (типа маневровых тепловозов), а также тепловозов с двигателями категории RH A мощностью 561–2000 кВт и более 2000 кВт (в основном магистральных тепловозов). Как видно из таблицы 1, подобная детализация выбросов в зависимости от мощности двигателей тепловозов в ГОСТ [4] также не предусмотрена. Поэтому для сопоставления и соизмерения стандарта Stage IIIA [15] с российскими требованиями, указанными в таблице 1 согласно ГОСТ [4], в нижней строке таблицы 3 указаны средние значения упомянутых выбросов для тепловозов с двигателями мощностью 130–560 кВт, 561–2000 кВт и более 2000 кВт.

*Таблица 3. Допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ тепловозов с дизельными двигателями согласно стандартам ЕЕА*

Стадия $c$	EEA Stage	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт·ч			
		Оксидов азота $s_{1c}$	Оксида углерода $s_{2c}$	Углеводородов $s_{3c}$	Твердых частиц $s_{4c}$
0	I	9,2	5,0	1,3	0,54
1	II	6,0	3,5	1,0	0,20
2	IIIА	5,7	3,5	0,38	0,20

## 5. Алгоритм нормирования и категорирования показателей выбросов

Обозначим фактическую величину показателя удельных средневзвешенных выбросов  $i$ -го ВВ тепловозом стадии  $c$  после капитального ремонта, выраженную в г/кВт·ч, через  $u_{ic}$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ,  $c = 0, 1, 2$ . Рассмотрим следующий алгоритм отнесения показателя  $u_{ic}$  к одной из четырех категорий  $k$ : неудовле-

творительная ( $k = 0$ ), удовлетворительная ( $k = 1$ ), хорошая ( $k = 2$ ) и отличная ( $k = 3$ ), исходя из национальных и региональных требований. Именно, нормативы  $r_{ic}^k$  отнесения  $i$ -го показателя  $u_{ic}$  выбросов отремонтированного тепловоза стадии  $c$  к категории  $k$  (где  $k = 0, 1, 2, 3$ ,  $c = 0, 1, 2$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ) вычисляются на основе соответствующих национальных и региональных экологических стандартов:

- норматив  $r_{ic}^1$  отнесения показателя  $i$  к категории 1 равен норме ГОСТ по этому показателю  $a_{ic}$ , указанной в таблице 1:  $r_{ic}^1 = a_{ic}$ ,  $c = 0, 1, 2$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ;
- норматив  $r_{ic}^2$  отнесения показателя  $i$  к категории 2 равен максимальной (менее обременительной) из норм соответствующих регионального и национального стандарта по этому показателю (соответственно,  $s_{ic}$  и  $t_{ic}$ ), указанных в таблицах 2 и 3:  $r_{ic}^2 = \max(s_{ic}, t_{ic})$ ,  $c = 0, 1, 2$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ;
- норматив  $r_{ic}^3$  отнесения показателя  $i$  к категории 3 вычисляется как минимальная (более обременительная) из норм соответствующих регионального и национального стандартов по этому показателю (соответственно,  $s_{ic}$  и  $t_{ic}$ ), указанных в таблицах 2 и 3:  $r_{ic}^3 = \min(s_{ic}, t_{ic})$ ,  $c = 0, 1, 2$ ,  $i = 1, \dots, 4$ .

Содержательно, норматив  $r_{ic}^2$  соответствует локальному (национальному и/или региональному) уровню экологичности отремонтированного тепловоза стадии  $c$  по показателю  $i$ . Норматив  $r_{ic}^3$  соответствует мировому уровню экологичности отремонтированного тепловоза стадии  $c$  по показателю  $i$ .

Соответственно, нормативы в таблице 4 рассчитываются по формулам:

$$(11) \quad r_{ic}^1 = a_{ic}, \quad r_{ic}^2 = \max(s_{ic}, t_{ic}), \quad r_{ic}^3 = \min(s_{ic}, t_{ic}), \\ c = 0, 1, 2, i = 1, \dots, 4.$$

Полученные с помощью (11) столбцы выраженных в г/кВт·ч нормативов категоризации удельных средневзвешенных выбросов ВВ в ОГ отремонтированных тепловозов  $r_{ic} = (r_{ic}^1; r_{ic}^2; r_{ic}^3)^T$ ,  $c = 0, 1, 2$ ,  $i = 1, \dots, 4$  указаны в таблице 4.

На основе нормативов  $r_{ic}^k$ , указанных в таблице 4,  $i$ -му показателю  $u_{ic}$  выбросов отремонтированного тепловоза стадии  $c$  присваивается категория

$$(12) k_{ic} = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{ic} > r_{ic}^1; \\ 1, & \text{если } r_{ic}^2 < u_{ic} \leq r_{ic}^1; \\ 2, & \text{если } r_{ic}^3 < u_{ic} \leq r_{ic}^2; \\ 3, & \text{если } u_{ic} \leq r_{ic}^3. \end{cases}$$

*Таблица 4. Нормативы категоризации удельных средневзвешенных выбросов ВВ в ОГ отремонтированных тепловозов, г/кВт·ч*

Стадия <i>c</i>	Отремонтированные тепловозы	Нормативы удельных средневзвешенных выбросов			
		Оксидов азота <i>r<sub>1c</sub><sup>k</sup></i>	Оксида углерода <i>r<sub>2c</sub><sup>k</sup></i>	Углеводо- родов <i>r<sub>3c</sub><sup>k</sup></i>	Твердых частиц <i>r<sub>4c</sub><sup>k</sup></i>
0	С двигателями, поставленными на производство до 2000 г.	(25; 13,1; 9,2)	(11; 8,7; 5)	(∞; 1,93; 1,3)	(∞; 0,54; 0,32)
1	Постройки до 2016 г. с двигателями, поставленными на производство до 2000 г.	(18; 12,3; 6)	(6,6; 3,5; 3,2)	(2,52; 1,17; 1)	(∞; 0,32; 0,20)
2	С двигателями, поставленными на производство с 2000 г. до 2020 г.	(12; 9,1; 5,7)	(3,9; 3,5; 2,6)	(1,05; 0,6; 0,38)	(∞; 0,20; 0,15)

Категория 0 означает несоответствие ГОСТ. Например, согласно таблице 1, если  $u_1$  оксидов азота отремонтированного тепловоза стадии 0 больше 25 г/кВт·ч, т.е. не соответствует ГОСТ, то присваивается категория 0. Если выброс  $u_1$  больше 13,1 и не превышает 25, то присваивается категория 1. Если выброс  $u_1$  больше 9,2 и не превышает 13,1 г/кВт·ч, то присваивается категория 2. Если выброс  $u_1$  не превышает 9,2 г/кВт·ч, то присваивается категория 3.

## 6. Алгоритм свертки категорий показателей выбросов

Принципиальная схема алгоритма свертки категорий показателей выбросов отремонтированных тепловозов представлена на рис. 1.

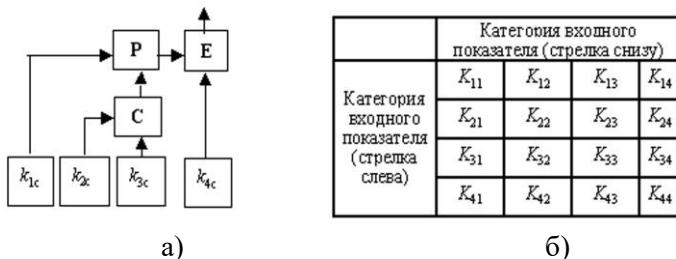


Рис. 1. Схема свертки категорий: а) последовательность свертки категорий показателей, б) общая структура таблицы свертки

На рис. 1а символы  $k_{1c}$ ,  $k_{2c}$ ,  $k_{3c}$ ,  $k_{4c}$ , обозначают категории входных показателей выбросов ВВ в ОГ. Символами **C**, **P**, **E** обозначены таблицы сверток категорий. Рисунок 1б показывает общую структуру таблицы сверток. Категория показателя  $i$  (обозначена на рис. 1а стрелкой, входящей в блок свертки слева) задает номер строки таблицы свертки, категория показателя  $j$  (на рис. 1а стрелка снизу) задает номер столбца таблицы свертки. Размерность шкалы категорий для показателей  $i$  и  $j$  определяют соответственно число строк и столбцов таблицы свертки. На рис. 1б эти размерности и количества строк и столбцов равны 4. В соответствии с (2), примем, что категории, равной 0, соответствует 1-я строка либо 1-й столбец таблицы свертки; категории, равной 1, соответствует 2-я строка (второй столбец) таблицы свертки и т.д. Например, если в таблице свертки, представленной на рис. 1б,  $K_{32} = 3$ , то категория свертки равна 3 для первого входного показателя (стрелка слева) со значением категории, равным 2 (третья строка таблицы свертки), и второго входного показателя (стрелка снизу) со значением категории, равным 1 (второй столбец таблицы свертки).

Согласно рис. 1а, выход таблицы **C** объединяет категории оксида углерода ( $k_{2c}$ ) и углеводородов ( $k_{3c}$ ). Выбросы этих двух ВВ определяют углеродный след тепловоза. Поэтому **C** называют таблицей углеродного следа. Соответственно, её выходом является категория углеродного следа тепловоза. Чем она выше, тем слабее углеродный след тепловоза.

Далее, выход таблицы **P** объединяет категорию оксида азота ( $k_{1c}$ ) и категорию углеродного следа как свертки категорий оксида углерода ( $k_{2c}$ ) и углеводородов ( $k_{3c}$ ). Эти три ВВ – основные парниковые газы в ОГ тепловозов. Поэтому **P** называют таблицей парниковых газов. Соответственно, её выходом является категория парниковых газов. Чем она выше, тем меньше парниковых газов в ОГ тепловоза.

Наконец, выход таблицы **E** объединяет категорию парниковых газов и категорию твердых частиц ( $k_{4c}$ ). В нем учтены категории выбросов всех четырех ВВ, комплексно характеризующих экологичность тепловоза. Поэтому **E** называют таблицей экологичности, а её выход ( $k_c$ ) – категорией экологичности тепловоза.

Настройка таблиц **C**, **P**, **E** основывается на требованиях к пропорциям степеней влияния ВВ на окружающую среду – человека, флору, фауну, климат. На рис. 2 приведены таблицы свертки категорий отремонтированных тепловозов, полученные при разработке концепции требований к локомотивам ОАО «РЖД» в области охраны окружающей среды.

Таблица С		Категория $k_{2c}$			
Категория $k_{2c}$	0	1	2	3	
0	0	0	1	1	
1	0	1	1	2	
2	1	1	2	3	
3	1	2	3	3	

а)

Таблица Р		Категория С			
Категория $k_{1c}$	0	1	2	3	
0	0	0	1	2	
1	0	0	1	3	
2	1	1	2	3	
3	1	2	3	3	

б)

Таблица Е		Категория $k_c$			
Категория Р	0	1	2	3	
0	0	0	0	0	
1	0	1	1	1	
2	0	1	1	2	
3	1	1	2	3	

в)

Рис. 2. а) С – таблица углеродного следа; б) Р – таблица парниковых газов; в) Е – таблица экологичности

## 7. Организационный механизм снижения выбросов отремонтированным тепловозом

Описанный метод классификации результатов снижения выбросов ВВ в ОГ после капитального ремонта тепловоза позволяет оценить и стимулировать результативность выполнен-

ных работ. Организационный механизм  $M = \{K, s^*\}$ , стимулирующий снижение выбросов ВВ отремонтированным тепловозом, включает алгоритм нормирования  $N$ , определяемой таблицей 4 и формулами (11), (12). Основываясь на общей теории построения организационных механизмов [7, 13], статьях [5, 17] и следствии теоремы, приведенной в разделе 2, предлагается использовать следующий организационный механизм.

Алгоритм  $K$  свертки показателей и определения категорий отремонтированного тепловоза представлен в разделе 6. В качестве комплексной оценки  $q$ , которая используется в процедуре стимулирования (9), примем  $k_c$ , т.е.  $q = k_c$ .

Процедура стимулирования  $s^*$  на основе использования категории  $k_c$  выбросов ВВ в ОГ отремонтированного тепловоза стадии  $c$  описывается формулой

$$(13) \quad s^* = s(k_c), \quad k_c \in \{0, 1, 2, 3\},$$

где  $s(0)$  – величина поощрения при 0-й категории,  $s(1)$  – величина поощрения при 1-й категории,  $s(2)$  – при 2-й категории,  $s(3)$  – при 3-й категории вычисляются на основе процедуры стимулирования (9) с учетом следствия теоремы и замечания 2 к ней. Размеры поощрений зависят от параметров функций затрат, которые на реальных объектах определяются опытным путем либо на основании экспертизы мнений. В случае справедливости условий примера из раздела 2 размеры поощрений  $s(1)$ ,  $s(2)$ ,  $s(3)$  линейно возрастают. Они зависят от фонда поощрения, выделенного на стимулирование снижения ВВ в ОГ и функции затрат, понесенных ремонтной организацией на выполнение работ по капитальному ремонту тепловозов.

## 8. Примеры оценки категорий экологичности отремонтированных тепловозов

При капитальном ремонте тепловоза появляются новые возможности использования достижений научно-технического прогресса. Рассмотрим некоторые примеры такого рода.

### 8.1. ЗАМЕНА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТЕПЛОВОЗА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКУЮ

С.Н. Флоренцев с соавторами [20, 29, 30] разработал подход к усовершенствованию маневровых тепловозов с гидромеханической трансмиссией. Этот подход заключается в замене последней на электромеханическую трансмиссию переменного тока. Результаты разработки и внедрения комплектов тягового электрооборудования на базе асинхронных мотор-генераторов и тяговых электродвигателей для электромеханических трансмиссий маневровых тепловозов в процессе капитального ремонта тепловоза ТГМ-6А с гидропередачей рассмотрены в [20, 29, 30]. Улучшены тягово-динамические характеристики и энергоэффективность отремонтированного тепловоза, названного ТЭМП1тт.

Удельные средневзвешенные выбросы оксидов азота тепловозом ТГМ-6А равны  $u_1 = 25 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ , а оксида углерода –  $u_2 = 010 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  [8]. Поскольку ТГМ-6А снабжен двигателем, поставленным на производство до 2000 г., то он относится к стадии 0 (т.е.  $c = 0$ ). В соответствии с алгоритмом категорирования (1) и нормативами таблицы 4 для стадии  $c = 0$ , выбросы этих ВВ соответствуют категории 1:  $k_{10} = 1$ ,  $k_{20} = 1$ . Кроме того, поскольку выбросы углеводородов и твердых частиц для тепловозов стадии 0 не нормируются, выбросы этих ВВ заведомо соответствуют категории 1:  $k_{30} = 1$ ,  $k_{40} = 1$ . Сворачивая категории  $k_{20}$  и  $k_{30}$  по схеме, показанной на рис. 1, на выходе таблицы С (рис. 2а) получаем категорию 1. Далее, сворачивая ее с категорией  $k_{10}$ , на выходе таблицы Р (рис. 2б) получаем категорию 0. Наконец, сворачивая ее с категорией  $k_{40}$ , на выходе таблицы Е (рис. 2в) получаем категорию  $k_0 = 0$ . Таким образом, тепловоз ТГМ-6А имеет низшую категорию экологичности  $k_0$ , равную 0.

По результатам эксплуатации модернизированного тепловоза ТЭМП1тт в АО ЕВРАЗ достигнуты следующие значения показателей экологичности: оксидов азота –  $u_1 = 6,0 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ ; оксида углерода  $u_2 = 3,5$ ; углеводородов  $u_3 = 1,0$ ; твердых частиц  $u_4 = 0,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  [8]. ТЭМП1тт снабжен двумя дизельными двигателями Volvo Penta TAD1641 VE-B, поставленными на производство после 2000-го года. Поэтому, согласно таблице 1,

ТЭМП1тт относится к стадии 2, так что для оценки экологичности используются нормативы таблицы 4 при  $c = 2$ . Категории этих показателей определяются согласно (1) и таблице 4, равны  $k_{12} = 2$ ,  $k_{22} = 2$ ,  $k_{32} = 1$ ,  $k_{42} = 2$ . Сворачивая категории  $k_{22}$  и  $k_{32}$  по схеме, показанной на рис. 1, на выходе таблицы **C** (рис. 2а) получаем категорию 1. Далее, сворачивая ее с категорией  $k_{12}$ , на выходе таблицы **P** (рис. 2б) получаем категорию 1. Наконец, сворачивая ее с категорией  $k_{42}$ , на выходе таблицы **E** (рис. 2в) получаем категорию  $k_2 = 1$ . Таким образом, тепловоз ТЭМП1тт имеет категорию экологичности  $k_2$ , равную 1. В соответствии с алгоритмом стимулирования (3) разработчики и исполнители данного проекта капитального ремонта заслужили поощрение  $s(1)$ . В результате экологичность маневрового тепловоза повысилась. Улучшились и другие показатели его экологичности [8]:

- вес потенциальных жидких загрязнителей окружающей среды – горюче-смазочных материалов (ГСМ) и охлаждающей жидкости;
- расход дизельного топлива на холостом ходу и ГСМ (см. таблицу 5).

*Таблица 5. Сравнение прочих экологических показателей ТГМ 6А и ТЭМП1тт [8].*

Вес жидких загрязнителей	Тепловозы	
	ТГМ 6А /	ТЭМП1тт /
моторного масла, кг	480	82
масла в передаче, кг	280	0
прочих ГСМ, кг	42,7	40.4
охлаждающей жидкости, кг	550	122
Расход ГСМ		
топлива на холостом ходу, кг/час	5,7	3.4
моторного масла (в т.ч. на угар), г/кВт·ч	2.11 (1.58)	0.19 (0)
масла передачей, г/кВт·ч	290	0
масла компрессором/ воздушной системой, г/кВт·ч	5.67	6

## 8.2. УВЕЛИЧЕНИЕ ЧИСЛА ДВИГАТЕЛЕЙ

Компания Union Pacific проводит капитальный ремонт магистральных тепловозов, оснащая их тремя 667-сильными ди-

зельными двигателями. При низких потребных мощностях работает только один из двигателей, а два других отключаются. Когда требуется дополнительная мощность, второй и третий дизельные двигатели автоматически запускаются и подключаются. Обновленные тепловозы получили товарный знак Genset [21]. По сравнению с прототипом – магистральным тепловозом с одним двигателем, тепловоз Genset требует меньше топлива, что приводит к сокращению выбросов оксида углерода и углеводородов до 37%. Кроме того, на 80% снижаются выбросы оксидов азота и на 90% – твердых частиц. В результате 172 тепловоза серии Genset были сертифицированы EPA по стандартам Tier 3 [21].

Поскольку прототип тепловоза Genset был создан в 2002–2005 годах [22], то он относится к стадии 1 (т.е.  $c = 1$ ). Далее определяем категорию экологичности прототипа. Для этого из требований Tier 3, а также того факта, что Genset снижает выбросы оксидов азота на 80%, твердых частиц – на 90%, оксида углерода и углеводородов – до 37 % в сравнении с прототипом, вычисляем фактические показатели выбросов последнего. Затем, основываясь на этих показателях и нормативах таблицы 4 при  $c = 1$ , определяем категорию прототипа, а затем категорию Genset.

Таким образом, выбросы ВВ прототипа составляли: оксидов азота –  $u_1 = 35,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ , оксида углерода –  $u_2 = 3,32$ , углеводородов –  $u_3 = 0,95$ ; твердых частиц –  $u_4 = 1,30 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . В соответствии с алгоритмом категорирования (4) и нормативами таблицы 4 для стадии  $c = 1$  выбросы заменяемого тепловоза соответствуют категориям  $k_{11} = 0$ ,  $k_{21} = 2$ ,  $k_{31} = 3$ ,  $k_{41} = 1$ . Сворачивая категории  $k_{21}$  и  $k_{31}$  по схеме, показанной на рис. 1, на выходе таблицы **C** (рис. 2а) получаем категорию 3. Далее, сворачивая ее с категорией  $k_{11}$ , на выходе таблицы **P** (рис. 2б) получаем категорию 2. Наконец, сворачивая ее с категорией  $k_{41}$ , на выходе таблицы **E** (рис. 2в) получаем категорию  $k_1 = 1$ . Таким образом, заменяемый тепловоз относится к первой категории экологичности.

Определим теперь категорию экологичности тепловоза Genset. Поскольку он оснащен новыми двигателями, то он отно-

сится к стадии 2 (т.е.  $c = 2$ ). Далее, допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ тепловозов по правилам EPA Tier 3:  $t_1 = 7,04$  г/кВт·ч,  $t_2 = 2,09$ ,  $t_3 = 0,60$ ,  $t_4 = 0,13$  г/кВт·ч. Поскольку тепловоз Genset удовлетворяет стандарту EPA Tier 3, то его удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ ( $u_i$ ) не выше допустимых:  $u_i \leq t_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ . В соответствии с формулой (2) и таблицей 4, при  $c = 2$  имеем  $t_1 = 7,04 < 12,34$ ,  $t_2 = 2,09 < 3,15$ ,  $t_3 = 0,60 < 1$ ,  $t_4 = 0,13 < 0,20$ ; следовательно, категории этих показателей равны  $k_{10} = 2$ ,  $k_{20} = 3$ ,  $k_{30} = 3$ ,  $k_{40} = 3$ .

В результате свертки, в соответствии со схемой, показанной на рис. 1, на выходе таблицы **C** (рис. 2а) получаем категорию 3. Далее, сворачивая ее с категорией 2, на выходе таблицы **P** (рис. 2б) получаем категорию 3. Наконец, сворачивая ее с категорией 3, на выходе таблицы **E** (рис. 2в) получаем категорию  $k_0 = 3$ . Учитывая, что старый магистральный тепловоз компании Union Pacific относился к первой категории экологичности, получаем, что новый магистральный тепловоз Genset этой компании после переоборудования переместился из первой в высшую категорию экологичности. В соответствии с алгоритмом стимулирования (13) разработчики и исполнители данного проекта заслужили поощрение  $s(3)$ .

## 9. Заключение

Обеспечение условий для устойчивого развития больших систем является важной задачей, требующей комплексного подхода, учитывающего экономические и экологические аспекты. Для её решения предложен механизм устойчивого развития двухуровневой организационной системы. Опираясь на результаты синтеза оптимальных согласованных механизмов [5, 17], разработаны процедуры планирования и стимулирования, применимые при комплексном оценивании функционирования объектов, описываемых набором исходных показателей. На основе этих разработок сформирован организационный механизм, включающий процедуры:

- нормирования результатов деятельности объекта управления;

- перехода к порядковым шкалам на основе этих нормативов;
- комплексной свертки порядковых шкал (категорий);
- планирования и стимулирования результатов деятельности объекта управления, измеряемых комплексной оценкой.

Полученный результат проиллюстрирован на примере разработки механизма УР тепловоза путем капитального ремонта, играющего ключевую роль в УР ЖДТ. Сформирована система категорий показателей выбросов основных вредных веществ в воздух отремонтированными тепловозами. Разработаны нормативы отнесения этих показателей к разным категориям с учетом как отечественных, так и лучших зарубежных стандартов. Эти нормативы могут использоваться в качестве ориентиров экологизации при капитальном ремонте тепловозов. Разработана комплексная оценка экологичности тепловозов на основе этих категорий. Построена система поощрения лиц, проводящих капитальный ремонт, на базе этой оценки.

В целом, по сути, предложен инструмент УР тепловозов, призванный стимулировать внедрение экологических инноваций в процессе капитального ремонта тепловозов. Определение категории экологичности тепловоза облегчает сравнение проектов его капитального ремонта. Развитый подход является адаптивным, поскольку он позволяет подстраиваться к изменениям национальных и регионального стандартов путем настройки нормативов ранжирования выбросов основных вредных веществ.

Полученные результаты были использованы при разработке концепции системы требований в области охраны окружающей среды на локомотивы ОАО «РЖД». Они могут также быть использованы для снижения выбросов:

- основных вредных веществ в воздух на разных стадиях жизненного цикла тепловозов;
- других вредных веществ в воздух, воду и почву.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на обобщение полученных результатов для обеспечения УР:

- железнодорожной инфраструктуры ЖДТ;
- водного, автомобильного и других видов транспорта.

### ***Литература***

1. АЛЕКСЕЕВ А.О., КАТАЕВА Т.А. *Применение механизмов комплексного оценивания и матричных неанонимных обобщенных медианных механизмов для согласования интересов агентов* // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, №3. – С. 75–89.
2. БУРКОВ В.Н., БУРКОВА И.В., ЩЕПКИН А.В. *Метод синтеза системы комплексного оценивания* // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, №4. – С. 63–73.
3. БУРКОВ В.Н., КОРГИН Н.А., СЕРГЕЕВ В.А. *Идентификация механизмов комплексного оценивания на основе умартного кода* // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – Вып. 87. – С. 67–85.
4. ГОСТ 33754–2016. *Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов автономного тягового и моторвагонного подвижного состава. Нормы и методы определения*. – М.: Стандартинформ, 2017. – 68 с.
5. ЕНАЛЕЕВ А.К. *Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах* // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 33.– С. 143–166.
6. КАКАДЖАНОВ В. *Теоретические аспекты эволюции понятия «Устойчивое развитие промышленных систем»* // Управление устойчивым развитием. –2024. – №2(51). – С. 31–36.
7. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 500 с.
8. *Перспективные маневровые тепловозы для промышленных предприятий*. – Нижний Тагил: Объединение производителей железнодорожный техники, АО ЕВРАЗ, 16.10.2023. – 24 с. – URL: <https://opzt.ru/news/sostojalos-zasedanie>

- komiteta-opzhtpo-koordinacii-lokomotivostroenija-i-ih-komponentov-3/ (дата обращения: 12.02.2025).
- 9. САВОСИНА М.И. *Оценка эффективности устойчивого развития транспорта* // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18, №2. – С. 50–66. – DOI:10.30932/1992-3252-2020-18-50-66.
  - 10. УСОВ П. Локомотив потребления // РЖД – Партнер. – 2024. – №15–16. – С. 20–21.
  - 11. ЦЫГАНОВ В.В. *Комплекс моделей стратегического управления крупномасштабной транспортной инфраструктурой* // Труды 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем». – М., ИПУ РАН, 2021. – С. 49–59. – DOI: 10.25728/7158.2021.28.16.001.
  - 12. ЦЫГАНОВ В.В. *Стратегическое адаптивное управление транспортом* // Труды 17-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем». – Москва, 2024. – С. 52–62.
  - 13. BURKOV V., KONDRATIEV V., KORGIN N. et al. *Mechanism Design and Management. Mathematical Methods for Smart Organizations* // Business Issues. Competition and Entrepreneurship. – New York: NOVA Publishers, 2013. – 187 p.
  - 14. BURKOV V.N., KORGIN N.A., SERGEEV V.A. *Identification of Integrated Rating Mechanisms as Optimization Problem* // Proc. of the 13th Int. Conf. "Management of Large-Scale System Development" (MLSD-2020). – М.: IEEE, 2020. – P. 1–5. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9247638>.
  - 15. *Emission Standards. EU: Nonroad Engines.* – URL: <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php> (дата обращения: 10.05.2025).
  - 16. ENALEEV A. *Comprehensive Assessment and Incentive Mechanism to Implement Environmental Requirements for Locomotives* // 6th Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – Lipetsk: IEEE, 2024. – P. 804–809. – DOI: 10.1109/SUMMA64428.2024.10803722.
  - 17. ENALEEV A., NOVIKOV D. *Sustainable Control of Active Systems: Decentralization and Incentive Compatibility* // IFAC-

- PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, Iss. 13. – P. 13–18. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.410.
- 18. ENALEEV A., TSYGANOV V. *Proactive Adaptation of Rail Infrastructure to Accelerated Climate Change* // 6th Int. Conf. on Control Systems Mathematical Modeling. Automation and Energy Efficiency. – Lipetsk: IEEE, 2024. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/SUMMA64428.2024.10803738.
  - 19. *Final Rule for Control of Emissions of Air Pollution From Locomotive Engines and Marine Compression-Ignition Engines Less Than 30 Liters per Cylinder. Emission Factors for Locomotives*. – April 2009. – URL: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-control-emissions-air-pollution-locomotive> (дата обращения 10.05.2025).
  - 20. FLORENTSEV S., POLYUKHOVICH V., EVPAKOV V. *Modernization of Industrial Shunting Diesel Locomotives for Technological Railway Transport* // Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. – Magnitogorsk: IEEE, 2022. – P. 64–68. – DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906764.
  - 21. *Genset switcher*. – URL: [https://www.up.com/cs/groups/public/@uprr/@environment/documents/up\\_pdf\\_nativedocs/pdf\\_up\\_emg\\_genset.pdf](https://www.up.com/cs/groups/public/@uprr/@environment/documents/up_pdf_nativedocs/pdf_up_emg_genset.pdf) (дата обращения: 10.02.2025).
  - 22. *GE Transportation. Early Locomotive Models*. – URL: <http://www.getransportation.com/rail/rail-products/locomotives/earlier-locomotive-models.html> (дата обращения: 10.02.2025).
  - 23. ILIEV S., STANCHEV H., MITEV E. *An Experimental Comparison of Emissions of a Common-rail Diesel Engine Fueled with Ethanol and Butanol Additives* // AIP Conf. Proc. – 2023. – Vol. 2868.020018.
  - 24. KIM M.-K., PARK D., KIM D.Y. *Quantification of the Ecological Value of Railroad Development Areas Using Logistic Regression Analysis* // Int. Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18, No. 22. – 11764. – DOI: 10.3390/ijerph182211764.
  - 25. KORGIN N.A., SERGEEV B.A. *Identification of Integrated Rating Mechanisms on Complete Data Sets* // Proc. of IFIP WG 5.7 Int. Conf. "Advances in Production Management Systems" (APMS 2021) (Artificial Intelligence for Sustainable and Resili-

- ent Production Systems). – Berlin: Springer, 2021. – Vol. 630. – P. 610–616.
26. POLLMAN E. *The Making and Meaning of ESG* // Harvard Bus. L. Review. – 2024. – Vol. 14. – P. 403.
27. *Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Locomotive Engines and Marine Compression Ignition Engines Less than 30 Liters Per Cylinder. CHAPTER 1: Industry Characterization. 1.2 Locomotive. 1.2.2 Current U.S. Emission Regulations.* – URL: [https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10023S4.PDF](https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10023S4.PDF?Dockey=P10023S4.PDF) (дата обращения: 10.05.2025).
28. SERGEEV V.A., KORGIN N.A. *Identification of Integrated Rating Mechanisms As An Approach To Discrete Data Analysis* // IFAC-PapersOnLine. – Moscow: Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 54, Iss. 13. – P. 134–139.
29. ZHUROV I., BAYDA S., FLORENTSEV S. *Field-Oriented Control of the Cargo Locomotive Induction Motor Electric Drive When Using Single Power Converter Feeding Two Traction Motors* // Int. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems. – Ufa: IEEE, 2021. – P. 37–42. – DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657434.
30. ZHUROV I., BAYDA S., FLORENTSEV S. *Parameters Estimation Technique of the Induction Motor Electric Drive With the Field-Oriented Control Taking Into Account Core Losses* // Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. – Magnitogorsk: IEEE, 2022. – P. 164–169. – DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906667.

## MECHANISMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF RAILWAY TRANSPORT BY MEANS OF CAPITAL REPAIRS OF DIESEL LOCOMOTIVES

**Vladimir Tsygannov**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (Tech.), professor (bbc@ipu.ru).

**Anver Enaleev**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, PhD (Tech.), Senior Scientist (anverena@mail.ru).

**Sergey Savushkin**, N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of RAS, Moscow, PhD (Math), Senior Scientist (ssavushkin@mail.ru).

*Abstract: An organizational mechanism for planning and stimulating sustainable development of the organizational system has been developed. Sufficient conditions for the optimality of this mechanism have been found. Based on the obtained results, the problem of sustainable development of rail transport through major repairs of diesel locomotives has been considered. An organizational mechanism has been developed to reduce emissions of harmful substances by a diesel locomotive as a result of major repairs. This mechanism includes an algorithm for standardizing and categorizing the indicators of emissions of the main harmful substances, an algorithm for collapsing the categories of emission indicators and forming a category of environmental friendliness of a diesel locomotive, as well as a procedure for stimulating for major repairs of a diesel locomotive. Emission standards for harmful substances are formed on the basis of domestic standards, as well as national and regional requirements abroad. In this case, the category of emissions of harmful substances of a certain type is recognized as satisfactory if the indicator of these emissions does not exceed the norm specified in the corresponding domestic environmental standard, good - if this indicator also meets the requirements of national or regional environmental standards of the countries of advanced diesel locomotive building, and excellent - if this indicator meets the best world standards. The algorithm of these categories' convolution defines a comprehensive assessment of the environmental friendliness of a diesel locomotive after a major overhaul. Depending on this assessment, incentives are provided for interested parties. Examples of calculations of environmental friendliness categories for domestic and foreign diesel locomotives are given. The developed standards for emission indicators of the main harmful substances can be used as guidelines for major overhauls of diesel locomotives. The results obtained were used in developing a concept of requirements for diesel locomotives of JSC Russian Railways in the field of environmental protection.*

**Keywords:** organization, sustainable development, planning, stimulation, diesel locomotive, pollutant emissions.

УДК 303.732.4+504.06+629.4.01

ББК 65+20.18+39.235

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии В.В. Клочковым.*

*Поступила в редакцию 04.07.2025.  
Опубликована 30.09.2025.*