1. ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

УДК 519.8: 330.45 **DOI** 10.5281/zenodo.15101812

БУРЛОВ Вячеслав Георгиевич[1],
ЧЕРНОГОРСКИЙ Сергей Александрович[1],
ШВЕЦОВ Константин Владимирович[1]
[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ – БЕЗОПАСНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОЖНОЙ СЕТИ РЕГИОНА

Основа устойчивого развития территории – коммуникации. Без дорожной сети коммуникации в регионе весьма проблематичны. Но строительство дорожной сети – одно из самых травматичных производств. Такая ситуация является препятствием для устойчивого развития региона. Поэтому для устранения этого препятствия в статье представлена методология обеспечения безопасности дорожного строительства и как следствие – формирование одного из факторов, способствующего устойчивому развитию региона. В настоящий момент органам управления при обеспечении безопасности не хватает аналитических моделей и структурированных процессов для предупреждения потенциальных угроз. Поэтому в настоящей статье поставлена и решена задача разработки аналитической динамической модели обеспечения безопасности в дорожном строительстве. В данной статье затрагивается вопрос оценки эффективности процессов обеспечения безопасности. В процессе разработки подхода к оценке эффективности управления лицом, принимающим решение, была разработана математическая модель. Для адекватности решения необходимо использовать системообразующий фактор. Практическим признаком наличия системообразующего фактора является то, что разработанная (правильно построенная система) дает требуемый результат (академик АМН СССР и АН СССР П.К. Анохин). Из этой цепочки логических рассуждений следует фундаментальный и весьма полезный для практики вывод – все объекты окружающего мира, созданные человеком, являются реализацией модели принятия решений человеком – главным конструктором. Для достижения поставленной цели в статье были решены следующие задачи: обобщены теоретический и практический опыт безопасности дорожного строительства; проанализированы известные методы и модели безопасности строительства дорог; разработана методика управления безопасностью дорожного строительства на основе системной интеграции базовых процессов строительства; разработана модель системной интеграции процессов управления безопасностью дорожного строительства.

Разработанная аналитическая модель управления технологическими процессами на основе синтеза применима к любой отрасли экономики, включая промышленность, торговлю, финансы, сферу услуг и другие. Она позволяет обеспечить безопасность реализации назначения объекта на каждом этапе его эксплуатации, что вносит существенный вклад в общую концепцию национальной безопасности. Модель обеспечивает оптимальное распределение ресурсов, минимизацию рисков и своевременное принятие решений, что способствует устойчивому развитию объекта и его адаптации к изменяющимся внешним деструктивным условиям.

Ключевые слова: *устойчивое развитие территории, безопасность, дорожное строительство, модель, синтез, эффективность, система контроля, исследование операций.*

Введение. Основа устойчивого развития территории – коммуникации. Без дорожной сети коммуникации в регионе весьма проблематичны. Но строительство дорожной сети – одно из самых травматичных производств. Такая ситуация является препятствием для устойчивого развития региона. Поэтому для устранения этого препятствия в статье представлена методология обеспечения безопасности дорожного строительства и как следствие – формирование одного из факторов, способствующего устойчивому развитию региона. Строительство дорог – одна из наиболее востребованных и динамично развивающихся отраслей народного хозяйства. Дорожные коммуникации объединяют все районы страны, что является необходимым условием ее территориальной целостности, единства ее экономического пространства. Они связывают страну с мировым сообществом, являясь материальной основой обеспечения внешнеэкономических связей и ее интеграции в глобальную экономическую систему. В настоящий момент органам управления при обеспечении безопасности не хватает аналитических моделей и структурированных процессов для предупреждения потенциальных угроз [1]. Поэтому в настоящей статье поставлена и решена задача разработки аналитической динамической модели обеспечения безопасности в дорожном строительстве.

Литературный обзор. В статье [2] разработана система выбора безопасных технологий в зонах дорожно-строительных работ. Результаты исследования представляют пошаговый подход к принятию обоснованных решений, которые могут повысить уровень безопасность в зонах проведения дорожно-строительных работ.

В статье [3] уровень безопасности строительных рабочих зависит от четырех факторов: уровня безопасности в организации, требований к работе, оценки работы и оценки безопасности рабочих.

В статье [4] представлена модель отслеживания основных причин аварий, адаптированная к потребностям строительной отрасли. В модели считается, что несчастные случаи происходят из-за трех причин: неспособность идентифицировать угрозы, которые существовали до начала деятельности или возникли после того, как деятельность была начата; продолжение работы после того, как работник определит существующие угрозы; продолжение работы даже при первоначальных обнаруженных грозах.

В статье [5] предложена автоматизированная система обнаружения и предотвращения опасностей. Система предназначена для обнаружения потенциальных угроз и предупреждения о потенциальных столкновениях. Авторами разработан алгоритм обнаружения опасной близости между рабочими, автоматизированными транспортными средствами и строительным оборудованием.

В статье [6] рассмотрены различные устройства, которые помогают операторам оборудования контролировать слепые зоны с целью предотвращения столкновений с рабочими и другими объектами.

В статье [7] описана система освещения с высокими мачтами, которая более безопасна, чем переносные осветительные мачты. Авторы показали, что система освещения с высокой мачтой снижает риск травмирования строительных рабочих.

Материалы и методы. Управление процессами обеспечения безопасности дорожного строительства, как фактора, способствующего устойчивому развитию региона, является важной научной и практической задачей. Решение такой задачи позволяет обосновывать требуемый уровень безопасности дорожного строительства [8-9].

Деятельность – действие по удовлетворению потребности. Основа деятельности – решение [10]. Цель деятельности лица, принимающего (ЛПР) – удовлетворение потребности. Задача всегда возникает перед объектом (субъектом) или ЛПР.

Деятельность основана на решении человека (ЛД). Деятельность основана на модели. Для адекватности решения необходимо использовать системообразующий фактор. Практическим признаком наличия системообразующего фактора является то, что разработанная (правильно построенная система) дает требуемый результат (академик АМН СССР и АН СССР П.К. Анохин). Из этой цепочки логических рассуждений следует фундаментальный и весьма полезный для практики вывод – все объекты окружающего мира, созданные человеком, являются реализацией модели принятия решений человеком – главным конструктором [8].

Модель решения характеризует процесс дорожного строительства [11-12]. В статье авторы синтезировали математическую модель решения ЛПР. Авторами разработан и применён естественно-научный подход (ЕНП) для решения задач управления безопасностью дорожного строительства [13].

Разработку такой модели управления рассмотрим в следующих разделах статьи. Человек решает задачи на основе трёх категорий – система, модель, предназначение. В статье [14] получены результаты решения задач обеспечения безопасности дорожного строительства.

Для учёта целевого процесса (ЦП) ЛПР разработана методология решения задач обеспечения безопасности в дорожном строительстве. Она основана на системной интеграция ЦП, процессов проявления проблемы (ППП), идентификации (ПИП) и нейтрализации проблемы (ПНП) и показателя эффективности реализации решения (ПЭРР) ЛПР.

Общий подход к синтезу модели решения при управлении

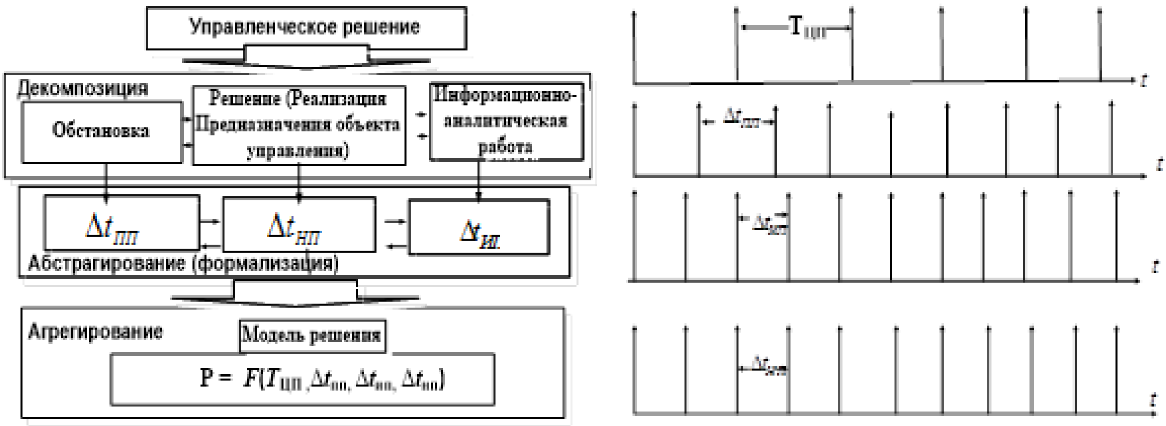
На рис. 1(а) представлена структурная схема процесса синтеза адекватной математической модели. Для синтеза модели применим методы декомпозиции, абстрагирования и агрегирования. Применяя метод декомпозиции, решение представим в виде трёх взаимосвязанных компонент. Применяя метод абстрагирования, мы формируем три элемента соответствующих элементам, полученным на основе декомпозиции. Математической моделью целевого процесса (ЦП) является среднее время ЦП ЛПР $T_{ЦП} = f_0(\aleph_1, \aleph_2,\ldots\aleph_e)$, где вектор ℵ характеризует состояния ЦП ЛПР.

Математической моделью ППП является среднее время проявления проблемы для ЛПР $\Delta t_{пп} = f_1(x_1, x_2,\ldots x_n)$. Вектор X характеризует ППП ЛПР. Математической моделью информационно-аналитической работы является среднее время идентификации проблемы для ЛПР $\Delta t_{ип} = f_2(\mathrm{y}_1, \mathrm{y}_2,\ldots \mathrm{y}_n)$. Вектор Y характеризует состояния процесса идентификации проблемы (ПИП) ЛПР. Математической моделью процесса нейтрализации проблемы (ПНП) является среднее время нейтрализации проблемы для ЛПР $\Delta t_{\text{нп}} = f_3$ $(\mathrm{z}_1, \mathrm{z}_2, \ldots \mathrm{z}_n)$. Вектор Z характеризует состояния процесса нейтрализации проблемы (ПНП) ЛПР. Функции $f_0(\ldots)$, $f_1(\ldots)$, $f_2(\ldots)$, $f_3(\ldots)$ описывают действия (работы), которые надо выполнить для достижения требуемых состояний векторов ℵ, X, Y, Z. Характеристики четырёх процессов представлены на рис. 1(б).

Применяя метод агрегирования, получим условие существования решения в виде следующего соотношения:

$$P = F\ (T_{ЦП}, \Delta t_{ПП}, \Delta t_{ИП}, \Delta t_{НП}), \quad (1)$$

где P – характеризует степень достижения цели в условиях проявления проблем (угроз). Это есть вероятность того, что проблема идентифицирована и нейтрализована, при учете ограничений на информационные ресурсы, деятельностные ресурсы, ресурсы обстановки.



(а) (б)

Рис. 1. (а) **Структурная схема процесса синтеза математической модели**
(б) **Схема проявления основных элементов формирования модели решения**

Синтез модели управления базовым процессом обеспечения безопасности дорожного строительства

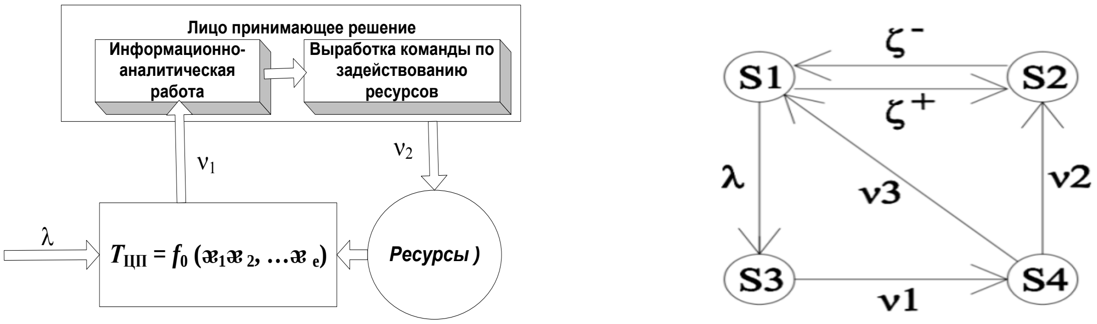
Понятие «управленческое решение» преобразовано в математическую модель (1). Базовая модель управленческого решения имеет четыре элемента. Это обобщённые характеристики ЦП ЛПР ($T_{ЦП}$), ППП ($\Delta t_{пп}$), ПИП ($\Delta t_{ип}$), ПНП ($\Delta t_{нп}$), возникшей при принятии решения.

При решении практических задач целесообразно использовать сетевые модели, которые позволяют увязывать временные интервалы и состояния процессов безопасности с критическим временем и состояниями сетевых моделей [15-17].

На рис. 2(а) представлена схема управления процессом обеспечения безопасности, где λ – величина, обратная среднему времени проявления проблемы; ν_1 – величина, обратная среднему времени идентификации проблемы; ν_2 – величина, обратная среднему времени нейтрализации проблемы; $T_{ЦП}$ – среднее время ЦП.

На рис. 2(б) представлен граф процесса формирования решения ЛПР с учетом процесса функционирования целевого объекта в условиях проявления проблемы (угрозы). Для описания процесса изменения состояний на графе необходимо сделать допущения. В работе руководствуемся допущениями, заимствованными из статьи [18]. Процессы, представленные на рис. 1(б), характеризуют ЦП, ППП, ПИП, ПНП. Характеристики этих процессов $T_{ЦП}$, $\Delta t_{пп}$, $\Delta t_{ип}$, $\Delta t_{нп}$ удовлетворяют отмеченным допущениям. Введенные допущения позволяют использовать систему дифференциальных уравнений (ДУ) Колмогорова [19]. В рамках наших рассуждений модель решения ЛПР находится в четырех состояниях.

S_1 – начальное состояние формирования решения ЛПР. S_2 – конечное состояние формирования решения ЛПР в условиях идентификации и нейтрализации проблемы. Для перехода из состояния S_1 в состояние S_2 требуется время $T_{ЦП}$. Для применения уравнений Колмогорова перейдем от абсолютных значений времени к частоте наступления событий: $\zeta^+ = 1/T_{ЦП}$, $\lambda = 1/\Delta t_{пп}$, $\nu_1 = 1/\Delta t_{ип}$, $\nu_2 = 1/\Delta t_{нп}$. ν_3 – частота срыва процесса идентификации проблемы (угрозы) возникающей перед ЛЦП.



(а) *(б)*

Рис. 2. (а) **Схема управления процессом обеспечения безопасности**
(б) **Граф состояний с возможностью срыва процесса управления**

Для оценивания возможности недостижения цели деятельности ЛПР в модель введен показатель недостижения цели ζ^-. Как предложено авторами работ [20-22]) ζ^- – право на риск, право на ошибку ЛПР.

S_3 – состояние проявления проблемы ЛПР; S_4 – состояние идентификации проблемы, которую надо решить ЛПР. Теперь составим систему ДУ для нашей ситуации. Она будет иметь вид, представленный на рис. 3(а). Если предположить, что мы имеем стационарный процесс, тогда наша исходная система ДУ трансформируется в систему линейных алгебраических уравнений, представленную на рис. 3(б) [18].

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\zeta^+ + \lambda\right)\cdot P_1(t) + \zeta^-\cdot P_2(t) + \nu_3\cdot P_4(t), \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \zeta^+\cdot P_1(t) - \zeta^-\cdot P_2(t) + \nu_2\cdot P_4(t), \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda\cdot P_1(t) - \nu_1\cdot P_3(t), \\ \dfrac{dP_4(t)}{dt} = \nu_1\cdot P_3(t) - (\nu_3+\nu_2)\cdot P_4(t). \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = -\left(\zeta^+ + \lambda\right)\cdot P_1 + \zeta^-\cdot P_2 + \nu_3\cdot P_4, \\ 0 = \zeta^+\cdot P_1 - \zeta^-\cdot P_2 + \nu_2\cdot P_4, \\ 0 = \lambda\cdot P_1 - \nu_1\cdot P_3, \\ 1 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4. \end{cases}$$

(а) *(б)*

Рис. 3. (а) **Система ДУ для нашей ситуации**
(б) **Основные соотношения для формирования СЛАУ базовых состояний**

Решение системы линейных алгебраических уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\nu_3\cdot\zeta^-}{\lambda\cdot\nu_1\cdot\nu_2 + \lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^- + \lambda\cdot\nu_3\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^+ + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\zeta^+\cdot\nu_3 + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^-}. \\ P_2 &= \frac{\lambda\cdot\nu_1\cdot\nu_2 + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^+ + \nu_1\cdot\zeta^+\cdot\nu_3}{\lambda\cdot\nu_1\cdot\nu_2 + \lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^- + \lambda\cdot\nu_3\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^+ + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\zeta^+\cdot\nu_3 + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^-}. \\ P_3 &= \frac{\lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^- + \lambda\cdot\nu_3\cdot\zeta^-}{\lambda\cdot\nu_1\cdot\nu_2 + \lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^- + \lambda\cdot\nu_3\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^+ + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\zeta^+\cdot\nu_3 + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^-}. \\ P_4 &= \frac{\lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^-}{\lambda\cdot\nu_1\cdot\nu_2 + \lambda\cdot\nu_1\cdot\zeta^- + \lambda\cdot\nu_3\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^+ + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^- + \nu_1\cdot\zeta^+\cdot\nu_3 + \nu_1\cdot\nu_2\cdot\zeta^-}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вероятность P_2 нахождения модели решения ЛПР в состоянии S_2 из соотношения (2) характеризует факт достижения цели ЛПР в условиях идентификации и нейтрализации проблемы. Результат системной интеграции характеристик основных процессов, характеризующих модель решения ЛПР, представим в виде:

$$P = F(\zeta^{+}, \zeta, \lambda, \nu_1, \nu_2, \nu_3). \tag{3}$$

Установлена аналитическая зависимость обобщённых характеристик ЦП ($\zeta^{+} = 1/T_{ЦП}$), ППП ($\lambda = 1/\Delta t_{пп}$), ПИП ($\nu_1 = 1/\Delta t_{ип}$), ПНП ($\nu_2 = 1/\Delta t_{нп}$), показателя риска срыва ζ^{-} целевой деятельности ЛПР. Шестая характеристика ν_3, которая характеризует возможность срыва процесса идентификации угрозы, с другой стороны характеризует квалификацию ЛЦП. Соотношение для $P_2 = P_{ИНП}$ есть уравнение с несколькими неизвестными. (ИНП – идентификация и нейтрализации проблемы). Зная характеристики ЦП, ППП, для формирования модели решения ЛПР, поступим следующим образом. Изменяя показатель P_2, характеристику целевого процесса ζ^{+} и показатели риска ζ, ν_3, формируем требуемые ПИП и ПНП. То есть мы получили одно уравнение с двумя неизвестными. Формируя процесс идентификации и процесс нейтрализации, мы получаем возможность управление риском ζ и риском не распознания угрозы ЛПР ν_3.

Вероятность того, что проблема будет идентифицирована и нейтрализована, определяется соотношением:

$$P_2 = \frac{\lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \zeta^{+} + \nu_1 \cdot \zeta^{+} \cdot \nu_3}{\lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \zeta^{-} + \lambda \cdot \nu_3 \cdot \zeta^{-} + \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \zeta^{+} + \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \zeta^{-} + \nu_1 \cdot \zeta^{+} \cdot \nu_3 + \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \zeta^{-}} \tag{4}$$

Результаты.

Технология управления процессами обеспечения безопасности строительства дорог

В предыдущем параграфе была получена динамическая модель решения. Особенность модели в том, что она на основе закона сохранения целостности объекта сформирована из временных характеристик. Реальный процесс характеризуется состояниями и работами для достижений этих состояний. И здесь возникает интересная инженерная задача – построить зависимость временных компонентов в модели решения от состояний и работ, которые надо выполнить для достижения определённых состояний. Мы от традиционных функций как графики, вынуждены обратиться к функциям как правила. Для достижения такой цели подходят сетевые графики. Они позволяют установить зависимость временных компонентов модели решения – критического пути от состояний работ, выполняемых для достижений этих состояний. Мы работаем с характеристиками четырёх процессов $\zeta^{+} = 1/T_{ЦП}$, $\lambda = 1/\Delta t_{пп}$, $\nu_1 = 1/\Delta t_{ип}$, $\nu_2 = 1/\Delta t_{нп}$.

Приведем здесь сетевую модель мониторинга, которую определяем списком возможных проблем и работ, которые возникают вследствие тех или иных действий, и время, которое они требуют для идентификации угроз (см. табл. 1 и 2, рис. 4).

Таблица 1. **Перечень событий мониторинга**

Обозначение	Наименование событий
1	**2**
a_0	Начало мониторинга
a_1	Проверка организации проведения работ по устройству АБП
a_2	Проверка ресурсов
a_3	Проверка надежности применяемого оборудования
a_4	Проверка организации движения транспорта

Окончание табл. 1

1	2
a_5	Проверка погодных условий
a_6	Проверка СИЗ
a_7	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с песком, цементом и гравием
a_8	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с бетонными конструкциями
a_9	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с АБС
a_{10}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с оборудованием для ручной укладки АБС
a_{11}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с температурой АБС
a_{12}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с парами битума (АБС)
a_{13}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с производственным шумом
a_{14}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с общей/локальной вибрацией
a_{15}	Проверка в процессе строительства дорог, связанная с нагретыми до высокой температуры жидкими вяжущими материалами
a_{16}	Составление отчета о проведении мониторинга

Таблица 2. **Перечень работ мониторинга**

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы	Предшествующие работы	Последующие работы
1	**2**	**3**	**4**	**5**
A_{01}	Мониторинг организации проведения работ по устройству АБП	5	-	A_{14} A_{15} A_{16}
A_{02}	Проведение проверки ресурсов	10	-	A_{27} A_{28} A_{29}
A_{03}	Проведение проверки надежности применяемого оборудования	5	-	A_{310}
A_{14}	Проведение проверки организации движения транспорта	35	A_{01}	A_{416}
A_{15}	Проведение проверки погодных условий	40	A_{01}	A_{516}
A_{16}	Проведение проверки СИЗ	55	A_{01}	A_{616}
A_{27}	Проведение проверки, связанной с песком, цементом, и гравием	25	A_{02}	A_{716}
A_{28}	Проведение проверки, связанной с бетонными конструкциями	35	A_{02}	A_{816}
A_{29}	Проведение проверки, связанной с АБС	25	A_{02}	A_{911} A_{912}
A_{310}	Проведение проверки оборудования для ручной укладки АБС	20	A_{03}	A_{1013} A_{1014} A_{1015}
A_{911}	Проведение проверки, связанной с температурой АБС	23	A_{29}	A_{1116}
A_{912}	Проведение проверки паров битума (АБС)	25	A_{29}	A_{1216}
A_{1013}	Проведение проверки производственного шума	35	A_{310}	A_{1316}
A_{1014}	Проведение проверки общей/локальной вибрации	15	A_{310}	A_{1416}
A_{1015}	Проведение проверки нагретых до высокой температуры жидких вяжущих материалов	25	A_{310}	A_{1516}
A_{416}	Составление отчета о проведении мониторинга движения транспорта в месте проведения работ по устройству АБП	5	A_{14}	-
A_{516}	Составление отчета о проведении мониторинга погодных условий	5	A_{14}	-
A_{616}	Составление отчета о проведении мониторинга применения СИЗ	5	A_{16}	-

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
A_{716}	Составление отчета о проведении мониторинга концентрации кремнеземной пыли в воздухе рабочей зоны	5	A_{27}	-
A_{816}	Составление отчета о проведении мониторинга физических перегрузок	5	A_{27}	-
A_{1116}	Составление отчета о проведении мониторинга опасности получения ожога	5	A_{911}	-
A_{1216}	Составление отчета о проведении мониторинга паров горячей АБС	5	A_{912}	-
A_{1316}	Составление отчета о проведении мониторинга уровня шума	5	A_{1013}	-
A_{1416}	Составление отчета о проведении мониторинга уровня общей/локальной вибрации	5	A_{1014}	-
A_{1516}	Составление отчета о проведении мониторинга горячих капель и брызг горячих материалов	5	A_{1015}	-

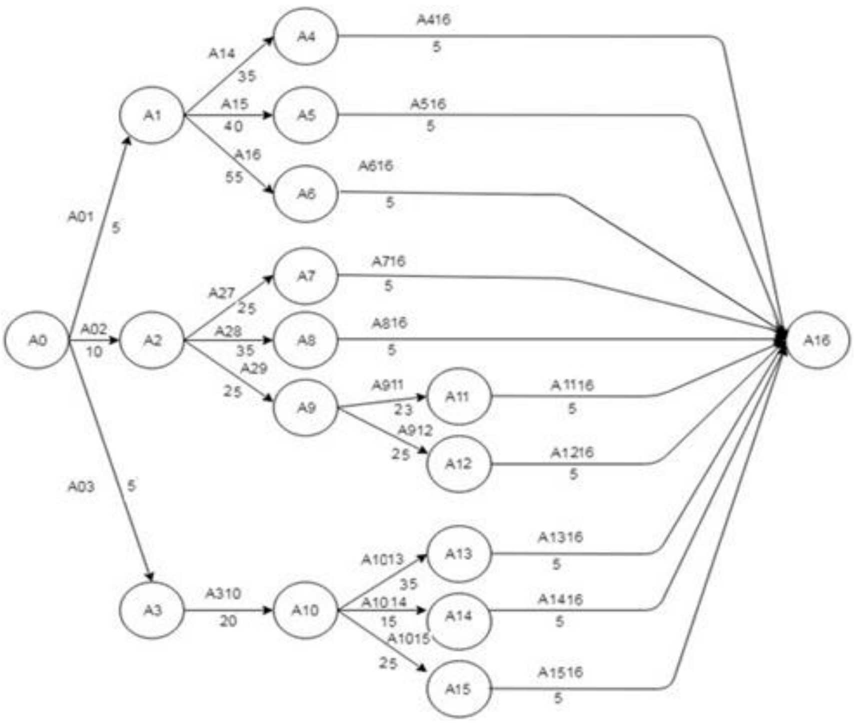


Рис. 4. **Сетевой график мониторинга**

Время решения задачи (рабочая смена) $T_Э$ = *480/60/24=0,333* суток. Количество проблем за смену (выработка одного рабочего), м/смену N_1 = *8,2*. Количество м/смену бригады из 4-х рабочих N_1 = *100/3=33,333*. Среднее время проявления проблемы $\Delta t_{ПП}$ = = *45/60/24=0,031* суток. Среднее время идентификации проблемы $\Delta t_{ИП}$ = *65/60/24=0,045* суток. Среднее время идентификации проблемы $\Delta t_{НП}$ = *55/60/24=0,038* суток. Следовательно, $\lambda = 1/\Delta t_{ПП} = 32$; $v_1 = 1/\Delta t_{ИП} = 22{,}154$; $v_2 = 1/\Delta t_{НП} = 26{,}182$.

Обсуждение результатов. Разработанная аналитическая модель управления технологическими процессами на основе синтеза применима к любой отрасли экономики, включая промышленность, торговлю, финансы, сферу услуг и другие. Она позволяет обеспечить безопасность реализации назначения объекта на каждом этапе его эксплуатации, что вносит существенный вклад в общую концепцию национальной безопасности. Модель обеспечивает оптимальное распределение ресурсов, минимизацию рисков и своевременное принятие решений, что способствует устойчивому развитию объекта и его адаптации к изменяющимся внешним деструктивным условиям.

Не нарушая общности рассуждений, мы всегда можем создать систему обеспечения безопасности требуемого уровня за счёт формирования процессов идентификации (мониторинга) угрозы и её нейтрализации при известных целевом процессе, процессе образования угрозы и показателях риска срыва целевой деятельности и риска срыва идентификации угроз (показателя квалификации работника).

В статьях [1-7] рассмотрены различные аспекты безопасности дорожного строительства, представлены методы обоснования модели ЛПР. Но отсутствие математической модели решения ЛПР не позволила авторам статей [1-7] рассчитать эффективность модели управления процессом.

Заключение.

1. Разветвлённая, качественная дорожная сеть – признак устойчивого развития региона. Однако создание такой дорожной сети весьма затруднено из-за высокого уровня рисков [23]. Для преодоления данной трудности в дорожном строительстве предлагается методология гарантированного обеспечения безопасности.

2. При решении задач формирования решения человека возникает проблема установления соответствия между временем и состоянием [24-25]. Сетевой график является моделью деятельности, которая отражает взаимосвязь работ (событий) и временные параметры их производства.

3. Показатель эффективности модели управления процессом в первом случае равен 0,702, во втором случае 0,679 (когда руководитель – квалифицированный специалист, а работники – нет). Таким образом, при снижении квалификации в команде уменьшается вероятность того, что угроза будет распознана и нейтрализована.

4. Кроме того, возможно осуществить установку средств для видеонаблюдения на строительную технику, либо видеорегистраторов, оборудованных технологией компьютерного зрения с возможностью подачи сигнала на пульт при нарушении процесса. Технологию можно совместить со звуковым пьезоизлучателем, для звукового оповещения об опасности.

5. Другие предлагаемые мероприятия по повышению безопасности дорожного строительства следующие:

- обучение безопасным методам выполнения работ;
- обучение безопасным приемам разгрузки автотранспорта при укладке асфальтобетонной смеси;
- ограждение мест производства работ, обозначение их дорожными знаками и знаками безопасности;
- установка дополнительных светофоров или регулировщиков;
- взаимодействие с машинистами укладчика асфальтобетона и катка;
- проведение контроля имеющейся системы реагирования.

Список литературы

1. Liu, J.; Zhou, Y.; Chen, J. A (2021). Two-Dimensional Partitioning of Fracture–Matrix Flow in Fractured Reservoir Rock Using a Dual-Porosity Percolation Model. Energies 2021, 14, 2209.

2. Nnaji, C., Lee, H.W., Karakhan, A., & Gambatese, J. (2018). Developing a Decision-Making Framework to Select Safety Technologies for Highway Construction. Journal of Construction Engineering and Management, 144(4), 04018016. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001466.

3. Niskanen, T. (1994). Safety climate in the road administration. Safety Science, 17(4), 237-255. doi: 10.1016/0925-7535(94)90026-4.
4. Abdelhamid, T.S., & Everett, J.G. (2000). Identifying root causes of construction accidents. Journal of Construction Engineering and Management, 126(1), 52-60. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:1(52).
5. Han, W., White, E., Mollenhauer, M., & Roofigari-Esfahan, N. (2019). Built Environment and Infrastructure Monitoring, Assessment, and Maintenance. Computing in Civil Engineering 2019. doi: 10.1061/9780784482445.031.
6. Ruff, T.M. (2004). Evaluation of Devices to Prevent Construction Equipment Backing Incidents. SAE Technical Paper Series. doi: 10.4271/2004-01-2725.
7. Freyssinier, J.P., Bullough, J.D., & Rea, M.S. (2008). Performance Evaluation of Semipermanent High-Mast Lighting for Highway Construction Projects. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2055(1), 53–59. doi: 10.3141/2055-07.
8. Burlov V. Andreev A. Gomazov F. (2018-1) Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity. MATEC Web of Conferences. 2018, 193, 02038.
9. Rudskaia, I. (2018) Transformation of manpower resources within the "Digital economy" program. Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2018, pp. 3627–3631.
10. Digby, James F., Harry H. Goode, and Robert E. Machol. 1957. “System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems.” Journal of the American Statistical Association 52 (280). https://doi.org/10.2307/2281721.
11. Eltawy, Nesrine, and David Gallear. 2017. “Leanness and Agility: A Comparative Theoretical View.” Industrial Management and Data Systems 117 (1). https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2016-0032.
12. Sabirova, S., Vasiliev V.A., and Chernogorskiy S. A. (2019) “Choosing a Quality Management Method.” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 666. https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012043.
13. Hirasawa M, Takemoto A, Asano M, Takada T. Study on Improving Worker Safety at Roadway Sites in Japan. Transportation Research Record. 2007; 2015(1): 41-54. doi: 10.3141/2015-06.
14. Cui, P., Schito, G., & Cui, Q. (2020). VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers. Journal of Cleaner Production, 244. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118757.
15. Nnaji, C., Jafarnejad, A., & Gambatese, J. (2020). Effects of Wearable Light Systems on Safety of Highway Construction Workers. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 25(2), 04020003. doi: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000469.
16. Lu M., Li H. (2003). Resource-activity critical path method for construction planning // Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 129. No. 4. Pp. 412-420.
17. Simpson III W.P., Patterson J.H. (1996). A multiple-tree search procedure for the resource-constrained project scheduling problem // European Journal of Operational Research. Vol. 89.No. 3. Pp. 525-542.
18. Papadakis V.M., Lioukas S., Chambers D. Strategic decision-making processes: The role of management and context. Strategic Management Journal. 1998. Vol. 19. No. 2. Pp. 115-147.
19. Kalman, R.E. 1960. “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.” Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME 82 (1). https://doi.org/10.1115/1.3662552.

20. David B. Brown (1976) Systems analysis and design for safety Safety Systems Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.

21. Goode, H.H., Machol, R.E. (1957). System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems. McGraw-Hill Book Co. New York, 551 p.

22. Mesarovic, M.D., TakaharaYa. (1975). General Systems Theory: Mathematical Foundations. ACADEMIC PRESS New York, San Francisco, London.

23. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. (2019) Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions. Studies in Systems, Decision and Control, v. 199, p. 608 – 62.

24. Dmitriev, N., Zaytsev, A., Dubanevich, L. (2020) “Determining the Strategic Prospects of an Enterprise by Assessing the Dynamics of its Intellectual Rent”, Montenegrin Journal of Economics, Vol. 16, No. 4, pp. 187-197.

25. Tereshko E., Romanovich M., & Rudskaya I. (2021) "Readiness of Regions for Digitalization of the Construction Complex" Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity 7, no. 1: 2. https://doi.org/10.3390/joitmc7010002.

Бурлов Вячеслав Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, профессор высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: burlov_vg@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7603-9786
AuthorID: 818734

Черногорский Сергей Александрович, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры экономической теории, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: chernog_sa@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3564-3925
AuthorID: 472907

Швецов Константин Владимирович, канд. экон. наук, доцент, доцент высшей школы административного управления, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shvetsov@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-9388-2406
AuthorID: 641231

Поступила в редакцию 20.11.2024 г.

UDC 519.8: 330.45 **DOI** 10.5281/zenodo.15101812

BURLOV Vyacheslav[1],
CHERNOGORSKIY Sergey[1],
SHVETSOV Konstantin[1]
[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya str., 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

THE BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE TERRITORY IS THE SAFE CONSTRUCTION OF THE REGIONAL ROAD NETWORK

The basis of sustainable development of the territory is communications. Without a road network, communications in the region are very problematic. But the construction of a road network is one of the most traumatic industries. Such a situation is an obstacle to the sustainable development of the region. Therefore, in order to eliminate this obstacle, the article presents a methodology for ensuring road construction safety and, as a consequence, the formation of one of the factors contributing to the sustainable development of the region. At present, when ensuring safety, management bodies lack analytical models and structured processes to prevent potential threats. Therefore, this article sets and solves the problem of developing an analytical dynamic model of ensuring safety in road construction. This article touches upon the issue of assessing the effectiveness of safety processes. In the process of developing an approach to assessing the effectiveness of management, the decision maker developed a mathematical model. For the adequacy of the solution, it is necessary to use a system-forming factor. A practical sign of the presence of a system-forming factor is that the developed (correctly constructed system) gives the required result (Academician of the USSR Academy of Medical Sciences and the USSR Academy of Sciences P.K. Anokhin). From this chain of logical reasoning follows a fundamental and very useful for practice conclusion – all objects of the surrounding world created by man are the implementation of the decision-making model of a man – the chief designer. To achieve the goal, the following tasks were solved in the article: the theoretical and practical experience of road construction safety was summarized; known methods and models of road construction safety were analyzed; a methodology for managing road construction safety based on the system integration of basic construction processes was developed; a model of system integration of road construction safety management processes was developed. The developed analytical model of technological process management based on synthesis is applicable to any sector of the economy, including industry, trade, finance, services and others. It allows to ensure the safety of the implementation of the purpose of the object at each stage of its operation, which makes a significant contribution to the overall concept of national security. The model ensures optimal resource allocation, risk minimization and timely decision-making, which contributes to the sustainable development of the object and its adaptation to changing external destructive conditions.

Key words: *sustainable development of the territory, safety, road construction, model, synthesis, efficiency, control system, operations research.*

References

1. Liu, J.; Zhou, Y.; Chen, J. A (2021) Two-Dimensional Partitioning of Fracture–Matrix Flow in Fractured Reservoir Rock Using a Dual-Porosity Percolation Model. Energies 2021, 14, 2209.
2. Nnaji, C., Lee, H. W., Karakhan, A., & Gambatese, J. (2018) Developing a Decision-

Making Framework to Select Safety Technologies for Highway Construction. Journal of Construction Engineering and Management, 144(4), 04018016. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001466.

3. Niskanen, T. (1994) Safety climate in the road administration. Safety Science, 17(4), 237-255. doi: 10.1016/0925-7535(94)90026-4.

4. Abdelhamid, T.S., & Everett, J.G. (2000) Identifying root causes of construction accidents. Journal of Construction Engineering and Management, 126(1), 52-60. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:1(52).

5. Han, W., White, E., Mollenhauer, M., & Roofigari-Esfahan, N. (2019) Built Environment and Infrastructure Monitoring, Assessment, and Maintenance. Computing in Civil Engineering 2019. doi: 10.1061/9780784482445.031.

6. Ruff, T.M. (2004) Evaluation of Devices to Prevent Construction Equipment Backing Incidents. SAE Technical Paper Series. doi: 10.4271/2004-01-2725.

7. Freyssinier, J.P., Bullough, J.D., & Rea, M.S. (2008). Performance Evaluation of Semipermanent High-Mast Lighting for Highway Construction Projects. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2055(1), 53–59. doi:10.3141/2055-07.

8. Burlov V. Andreev A. Gomazov F. (2018-1) Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity. MATEC Web of Conferences. 2018, 193, 02038.

9. Rudskaia, I. (2018) Transformation of manpower resources within the "Digital economy" program. Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2018, pp. 3627–3631.

10. Digby, James F., Harry H. Goode, and Robert E. Machol (1957) “System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems” Journal of the American Statistical Association 52 (280). https://doi.org/10.2307/2281721.

11. Eltawy, Nesrine, and David Gallear (2017) “Leanness and Agility: A Comparative Theoretical View.” Industrial Management and Data Systems 117 (1). https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2016-0032.

12. Sabirova, S., Vasiliev V.A., and Chernogorskiy S.A. (2019) “Choosing a Quality Management Method.” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 666. https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012043.

13. Hirasawa M, Takemoto A, Asano M, Takada T. Study on Improving Worker Safety at Roadway Sites in Japan. Transportation Research Record. 2007; 2015(1): 41-54. doi: 10.3141/2015-06.

14. Cui, P., Schito, G., & Cui, Q. (2020) VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers. Journal of Cleaner Production, 244. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118757.

15. Nnaji, C., Jafarnejad, A., & Gambatese, J. (2020) Effects of Wearable Light Systems on Safety of Highway Construction Workers. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 25(2), 04020003. doi: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000469.

16. Lu M., Li H. (2003) Resource-activity critical path method for construction planning // Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 129. No. 4. Pp. 412-420.

17. Simpson III W.P., Patterson J.H. (1996). A multiple-tree search procedure for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. Vol. 89.No. 3. Pp. 525-542.

18. Papadakis V.M., Lioukas S., Chambers D. (1998) Strategic decision-making processes: The role of management and context. *Strategic Management Journal*. Vol. 19. No. 2. Pp. 115-147.

19. Kalman, R.E. 1960. “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.”

Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. 82 (1). https://doi.org/10.1115/1.3662552.

20. David B. Brown (1976) Ssystems analysis and design for safety. *Safety Systems Engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey.

21. Goode, H.H., Machol, R.E. (1957). System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems. McGraw-Hill Book Co. New York, 551 p.

22. Mesarovic, M.D., Takahara Ya. (1975) General Systems Theory: Mathematical Foundations. ACADEMIC PRESS New York, San Francisco, London.

23. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. (2019) Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions. Studies in Systems, Decision and Control, v. 199, pp. 608-621.

24. Dmitriev, N., Zaytsev, A., Dubanevich, L. (2020) Determining the Strategic Prospects of an Enterprise by Assessing the Dynamics of its Intellectual Rent. *Montenegrin Journal of Economics*. Vol. 16, No. 4, pp. 187-197.

25. Tereshko, E., Romanovich M., & Rudskaya I. (2021) Readiness of Regions for Digitalization of the Construction Complex. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 7, No. 1: 2. https://doi.org/10.3390/joitmc7010002/.

Burlov Vyacheslav, Dr. of engineering, professor, professor of the Higher School of technosphere safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
E-mail: burlov_vg@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7603-9786
AuthorID: 818734

Chernogorskiy Sergey, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of economic theory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
E-mail: chernog_sa@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3564-3925
AuthorID: 472907

Shvetsov Konstantin, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of administrative management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
E-mail: shvetsov@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-9388-2406
AuthorID: 641231

Received 20.11.2024