

**ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ / TRANSPORT AND TRANSPORT-TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF THE COUNTRY, ITS REGIONS AND CITIES, ORGANIZATION OF PRODUCTION IN TRANSPORT**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛАДОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Научная статья

**Адволотикин Д.И.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-3376-1454;

<sup>1</sup> Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск, Красноармейск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (advolotkin1[at]mail.ru)

**Аннотация**

Обеспечение бесперебойного функционирования инфраструктуры железнодорожного транспорта страны, является важнейшей задачей, решаемой в интересах как стабильной работы предприятий промышленности, так и обеспечения безопасности. В рамках принимаемых инженерных и организационных мер, направленных на решение этой задачи, не последнее место занимает своевременное создание запасов материальных средств, потребных для производства строительно-восстановительных работ на железных дорогах.

Использование современных методов моделирования на этапе выработки замысла по созданию баз хранения строительно-восстановительных материалов должно помочь в проведении аналитической оценки доступных вариантов реализации разрабатываемых решений, в том числе с целью объективной оценки степени нагрузки на их отдельные элементы и формирования предложений по способам функционирования и составу.

В статье изложен способ применения методов моделирования, разработанный автором для оценки эффекта, получаемого при изменении площадей складских площадок и различных стратегий управления потоками поступающих и отгружаемых материальных средств. Оценка выполняется на основании ожидаемых объемов производства строительно-восстановительных работ и мощностей предприятий по поставке материалов верхнего строения железнодорожного пути. Результатом моделирования являются вероятностные параметры состояний баз хранения запасов материальных средств.

Основной целью разработки моделей является научное обоснование предварительной оценки, вариантов создания складов хранения элементов верхнего строения железнодорожного пути, в условиях дефицита исходных данных и сложности проведения натурного эксперимента с реальными объектами, путем решения задачи расчёта основных параметров складских площадок. К решенным в процессе исследования задачам относятся: анализ степени загруженности складов и математическое обоснование их оптимальной емкости, в целях снижения времени простоя складских территорий и обеспечения непрерывности производственных процессов на объектах работ.

Исследуемые процессы моделировались исходя из принятых вариантов организации и технологии выполнения работ. Разработанные модели могут использоваться как для решения текущих задач планирования, так и выступать в роли источника статистических данных для организационно-связанных многоканальных моделей функционирования формирований транспортного строительства, в процессе производства строительно-восстановительных работ.

**Ключевые слова:** моделирование, система массового обслуживания, верхнее строение железнодорожного пути, склады хранения материальных средств, рельсошпальная решетка, укладка рельсошпальной решетки.

**MODELLING OF WAREHOUSES FOR THE STORAGE OF RAILWAY TRACK TOP CONSTRUCTION MATERIALS**

Research article

**Advolotikin D.I.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-3376-1454;

<sup>1</sup> Research and Testing Center of the Railway Troops, Krasnoarmeysk, Russian Federation

\* Corresponding author (advolotkin1[at]mail.ru)

**Abstract**

Ensuring uninterrupted operation of the country's railway transport infrastructure is the most important task to be solved in the interests of both stable operation of industrial enterprises and ensuring safety. Within the framework of engineering and organizational measures aimed at solving this task, the timely creation of stocks of material resources required for construction and restoration work on railways is important.

The use of modern modelling methods at the stage of concept development for the creation of storage bases for construction and restoration materials should help in the analytical evaluation of available options for the implementation of the developed solutions, including for the purpose of objective assessment of the degree of load on their individual elements and the formation of proposals for ways of functioning and composition.

The article describes the method of application of modelling methods developed by the author to estimate the effect obtained by changing the areas of storage sites and different strategies for managing the flow of incoming and outgoing materials. The assessment is made on the basis of the expected production volumes of construction and rehabilitation works

and the capacity of the enterprises to supply railway track superstructure materials. The result of modelling is probabilistic parameters of states of storage bases of material supplies.

The main purpose of the models development is the scientific substantiation of the preliminary assessment of the options for the creation of warehouses for the storage of railway track superstructure elements, under the conditions of the initial data deficit and the complexity of the field experiment with real objects, by solving the problem of calculating the main parameters of the storage areas. The tasks solved in the process of research include: analysis of the degree of loading of warehouses and mathematical justification of their optimal capacity in order to reduce the idle time of storage areas and ensure the continuity of production processes at work sites.

The studied processes were modelled on the basis of the adopted variants of organization and technology of work execution. The developed models can be used both to solve current planning tasks and to act as a source of statistical data for organizationally connected multichannel models of transport construction formations functioning in the process of construction and restoration works.

**Keywords:** modelling, mass maintenance system, railway track superstructure, material storage warehouses, rail-sleeper grate, laying of rail-sleeper grate.

## Введение

В Российской Федерации железнодорожная сеть всегда являлась одним из важнейших элементов инфраструктуры государства, обеспечивающей транспортную связь регионов и городов, являющуюся одним из локомотивов роста экономического потенциала и обороноспособности страны [1].

Инфраструктура железнодорожного транспорта общего пользования – технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные пути общего пользования и другие сооружения, железнодорожные станции, устройства электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы и систему управления движением и иные обеспечивающие функционирование этого комплекса здания, строения, сооружения, устройства и оборудование [2].

В свое время термин «инфраструктура» пришел из военного дела, в котором под ним понимается система из сооружений, предназначенная для обеспечения действий войск (сил) в которую входят склады вооружения, боеприпасов и материальных средств, полигоны, аэродромы и прочее [3].

И в настоящее время от инфраструктуры железнодорожного транспорта на прямую зависит не только состояние экономики страны, но и ее безопасность. К решению задач по обеспечению бесперебойности её функционирования привлекаются специальные формирования Федеральных органов исполнительной власти и подразделения силовых ведомств.

При решении этих задач выполняются мероприятия по осуществлению всесторонней подготовки объектов транспортной инфраструктуры, привлекаемых сил и средств, к восстановлению поврежденных, сооружению новых и ремонту существующих объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Выполнение данных мероприятий требует использования запасов различного рода материальных средств, к первоочередным из которых можно отнести элементы верхнего строения железнодорожного пути. Общие вопросы организации хранения верхнего строения железнодорожного пути отражены в разделе V Правил [4] «Требования к хранению, транспортированию и складированию материалов верхнего строения железнодорожного пути для обеспечения охраны труда работников». Но в настоящее время не до конца проработан вопрос по расчету потребных объемов находящихся на складах материалов и мест их расположения. В настоящее время объемы хранения определяются исходя из установленных в [5] норм километрового запаса материалов верхнего строения пути для главных путей железных дорог и порядка их применения, порядок организации хранения определен в [6]. Но данные нормы не в полной мере учитывают случаи производства значительных объемов работ, по укладке верхнего строения железнодорожного пути, выполняемых в соответствии с текущей обстановкой, которая может сложиться при стихийных бедствиях, в ходе подготовки и ведения боевых действий. В этих случаях для обеспечения установленных темпов сооружения верхнего строения железнодорожного пути склады (в том числе вновь сформированные) должны иметь оптимальное расположение и емкость площадок хранения. В настоящей статье описываются модели, которые можно использовать для решения данной задачи. Модели относятся к вероятностным математическим и базируются на теории управления запасами с использованием аппарата теории массового обслуживания на основе Марковских случайных процессов.

Эффективное использование складских площадей в этом случае будет выступать в качестве основного целевого показателя эффективности функционирования системы [7].

## Описание математической модели

Возможности обеспечения требуемого темпа сооружения верхнего строения железнодорожного пути (далее – ВСЖП) возможно только в случае бесперебойного подвоза его элементов к месту производства работ. В свою очередь, решение этой задачи обеспечивается только при поддержании требуемого значения вероятности наличия запаса материальных средств на складах с которых организована их поставка. Соответственно, при наличии непосредственной связи между поддержанием требуемых темпов выполнения работ по укладке пути и доступными запасами материальных средств, постановку задачи можно изложить как определение рациональных объемов хранения запасов ВСЖП с учетом принятой стратегии управления и директивных ограничений.

Наиболее очевидным будет использование вероятностной модели построенной с использованием аппарата теории массового обслуживания, представляя имеющиеся складские запасы материальных средств в виде очереди, при этом параметрами определяющими интенсивности восполнения и расходования материальных средств будут выступать потоки поступления заявок ( $\lambda$ ) и их обслуживания ( $\mu$ ). Данный аппарат теории массового обслуживания [8] работает с дискретными величинами, что полностью соответствует моделируемым процессам. Для упрощения расчетов в модели

в качестве расчётной единицы берется количество материалов, содержащихся на складе, потребное для сооружения одного метра ВСЖП.

В случаях когда склад хранения запасов ВСЖП организуется в целях текущего обеспечения строительно-восстановительных работ, в таком случае, как правило, объемы единовременной поставки материальных средств на порядок больше, чем разовые объемы отгрузки. В частности, поставка может осуществляться с использованием подвижного железнодорожного состава, а отгрузка, для укладки поргальными тракторными путеекладчиками, на путевые тележки. При этом за расчётную единицу должен приниматься средний объем отгружаемой партии ВСЖП, в единицах которой необходимо измерять объемы поступающих материальных средств. В отдельных случаях может наблюдаться картина когда интенсивность поступления материальных средств на склад совпадает с интенсивностью отгрузки (выдачи), что может определяться удаленностью от производственных площадок или центральных баз хранения. Для площадок организуемых в местах сборки звеньев рельсошпальной решетки будет характерна картина когда поступление материалов (готовых звеньев РШР) будет происходить более мелкими партиями, чем отгрузка.

Временно организуемые площадки (склады) хранения материалов ВСЖП, создаваемые в районах по возможности приближенных к местам производства работ, будут характеризоваться тем, что отгрузка материальных средств будет осуществляться фактически непрерывно, при этом потоки поступления и отгрузки материалов должны быть примерно равными. В том случае постановка задачи на моделирование может быть сформулирована следующим образом «Определение вместимости склада, в целях обеспечения наименьшей вероятности полного расходования хранящихся материальных средств», данную постановку можно дополнить еще одним условием «Определение вместимости площадок хранения склада, обеспечивающих наименьшую вероятность отсутствия свободных площадей, в любой момент времени». С помощью методов теории массового обслуживания данная задача может решаться с применением многоканальных систем массового обслуживания [9], в этом случае вместимость площадок хранения определяется числом каналов, выражающимся через равные объемы поставок и выдачи ВСЖП.

При текущей постановке задачи возможно ввести следующие допущения:

- максимальное число партий поставки на склад равно  $N$ ,
- при выдаче очередной партии ВСЖП незамедлительно формируется заявка на поставку очередной партии для покрытия текущего некомплекта,
- отгрузка материальных средств со склада осуществляется с интенсивностью  $\lambda$ ,
- в случае пустого склада, отгрузка не выполняется,
- усредненная продолжительность выполнения заявки на поставку равна  $T = 1 / \mu$ .

Соответственно, получилось описание системы в которой обеспечено непрерывное пополнение запасов ВСЖП, и суммарное значение имеющихся и заказанных материальных средств в поставляемых и отгружаемых партиях будет равно фиксированному числу  $N$ .

Данная модель, аналогична описанной в [10] и относится к системе массового обслуживания, в качестве требований при этом выступают отгрузки материалов, а обслуживанием будет представляться поставка на склад новых партий.

Вероятности состояний системы можно представить в виде дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} dP_0/dt &= -\mu \cdot N \cdot P_0 + \lambda \cdot P_1 \\ dP_n/dt &= -[\lambda + (N - n) \cdot \mu] \cdot P_n + \lambda \cdot P_{n+1} + \mu \cdot (N - n + 1) \cdot P_{n-1} \\ &\text{при условии } n < N; \quad dP_N/dt = -\lambda \cdot P_N + \mu \cdot P_{N-1} \end{aligned} \quad (1)$$

В стационарном режиме, решение будет иметь следующий вид:

Для вероятности пустого склада

$$P_0 = \left[ N! \sum_{n=0}^N \frac{(\mu/\lambda)^n}{(N-n)!} \right]^{-1} \quad (2)$$

Вероятность наличия на складе  $n$  партий материальных средств

$$P_n = \frac{N!}{N - n!} \cdot \left( \frac{\mu}{\lambda} \right)^n P_0 \quad (3)$$

при условии  $n < N$

Вероятность заполнения всего объема склада (прием новых партий невозможен)

$$P_N = N! \cdot \left( \frac{\mu}{\lambda} \right)^N P_0; \quad (4)$$

$$\sum_{n=0}^N P_n = 1 \quad (5)$$

Определение средних значений запаса на складе (в партиях поставки) можно вычислить выражением

$$Z_{\text{сред.}} = \sum_{n=0}^N n \cdot P_n \quad (6)$$

Описанную модель можно использовать для определения параметров временных «полевых» площадок хранения материалов, для вариантов когда поставка осуществляется подвижным составом с интенсивностью  $\mu$ , а выдача выполняется для покрытия, поступающих случайным образом от восстановительных подразделений, заявок с интенсивностью  $\lambda$ . Вычисление количественных показателей ВСЖП, исходя из расчётных партий поставок выполняется перемножением количества партий поставки –  $n$  на их единичный размер –  $q$ .

В этом случае требуемый размер складских площадок может быть вычислен исходя из их вместимости и заданных вероятностей опустошения склада, объема партии поставки и усредненных значений запасов материальных средств обеспечиваемых в заданном периоде.

Самым частым случаем будет ситуация, в которой размер поставляемой партии материалов значительно больше, чем объем партии отгрузки. Данный вариант реализуется при организации хранения материалов на складах путевых машинных станций АО «РЖД» и хранилищах Росрезерва, при их вывозе непосредственно на объекты производства работ. В таком случае будет актуальна задача определения оптимальных (рациональных) площадей площадок хранения и размеров принимаемых партий материальных средств, нацеленная на общее снижение затрат на содержание и обслуживание складских территорий.

Рассмотрим вариант расчета для следующих исходных данных.

Выполняется строительство (восстановление) участка железнодорожного пути, при котором требуется производство работ по укладке 1000 м рельсошпальной решетки (далее – РШР). Расстояние от базы хранения до места производства работ 5000 м. Отгрузка выполняется на путевые тележки типа ПТ-13 пакетами по три звена длиной по 25 метров, всего в партии 150 м. Скорость транспортировки к месту производства работ автомобильным транспортом, оборудованным универсальным устройством комбинированного хода, обеспечивающим возможность его движения по железнодорожному пути, составляет 1,389 м/с (5 км/ч).

Погрузка (выгрузка) пакета звеньев РШР (в одном пакете 3 звена РШР по 25 м) с железнодорожных платформ на складские площадки (со складских площадок на путевые тележки) занимает – 960 с (16 минут), 1 920 с для партии при использовании одного автомобильного крана [11]. Временные затраты на разгрузку и укладку одного звена РШР составляет – 510 с (8,5 мин), для пакета – 1530 с (25,5 мин), 3 060 для партии. Общее время между отгрузками партий со склада 9 960 с.

Поставка партии РШР на склад выполняется со склада Росрезерва находящегося на удалении – 500 000 м с использованием подвижного железнодорожного состава, партиями объемом по [12] – 2 пакетов РШР на четырехсотой платформе, в расчетном поезде 30 платформ, общий объем партии – 4 500 м (30 партий отгрузки), скорость движения поезда - 19,444 м/с (70 км/ч), время выгрузки 57 600 с (960 мин), среднее время выполнения одной поставки 83 314 с (2 777 с/партию отгрузки). Исходные данные для расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные параметры склада

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133.1>

№ п/п	Параметр	Условное обозначение	Значение
1	Размер пакета отгрузки материалов ВСП (погонных метров)	$q$	150
2	Интенсивность отгрузки партий материалов со склада (шт./с)	$\lambda$	0,00036
3	Интенсивность поступления партий материалов на склад (шт./с)	$\mu$	0,0001
4	Максимально возможное число партий поставки на склад (шт.)	$N$	4
5	Время поставки партии на склад (с)	$T$	83 314
7	Размер партии поставки ВСП на склад (партия отгрузки)	$w$	30

Исходя из приведенных исходных данных, выполнив расчёты для стационарного режима, мы получаем следующие значения.

Согласно (2) вероятность пустого склада  $P_0 = 0,28$ .

Согласно (3) вероятность наличия на складе  $n$  партий материальных средств при выполнении условия  $n < N$

$P_1 = 0,52$

$P_2 = 0,30$

$P_3 = 0,14$

По формуле (4) рассчитываем вероятность заполнения всего объема склада  $P_4 = 0,04$ .

Также по выражению (5) вычислим средние значения запаса на складе (в партиях поставки)

$$Z_{\text{сред.}} = 1,725$$

Полученные при расчётах результаты показывают, что емкость склада рассчитанная на 4 партии с высокой вероятностью позволит обеспечить снабжение восстановительных работ потребными материалами.

Но что будет, если мы увеличим темп производства работ за счет сокращения времени укладки на 15 минут, в том случае интенсивность отгрузки партий материалов со склада (шт./с)  $\lambda = 0,00053$ .

Выполним расчёт мы получаем следующие значения.

Согласно (2) вероятность пустого склада  $P_0 = 0,42$ .

Согласно (3) вероятность наличия на складе  $n$  партий материальных средств при выполнении условия  $n < N$

$$P_1 = 0,43$$

$$P_2 = 0,19$$

$$P_3 = 0,06$$

По формуле (4) рассчитываем вероятность заполнения всего объема склада  $P_4 = 0,01$ .

Также по выражению (5) вычислим средние значения запаса на складе (в партиях поставки)  $Z_{\text{сред.}} = 1,07$ .

Расчеты показывают, что в данном случае складские площади рассчитанные на хранение 4 партий РШР будут избыточными.

При таком подходе управление объемами хранимых материальных средств производится через заявки на поставку и отгрузку. Рациональные площади хранения определяются для установившихся режимов работы складских площадок, задающихся значениями вероятностей пустого склада и (или) пустующих площадей, а также уровнем среднего объема находящихся на хранении материалов.

Определение усредненного объема отгружаемых партий –  $q$ , а также интенсивности поступления заявок на отгрузку –  $\mu$  производится по выражению

$$\mu = \frac{G_{\text{мес.}}}{720 \cdot q}, \text{ 1/час,} \quad (7)$$

где  $G_{\text{мес.}}$  – среднесуточный (среднемесячный, среднегодовой, среднеквартальный) объём отгрузки материальных средств со склада, в метрах ВСЖП.

Представим объем партии поставки материальных средств на склад, для хранения –  $Q$  в партиях отгрузки для производства строительно-восстановительных работ на объектах –  $q$ , что позволит использовать аппарат теории массового обслуживания. При этом примем отношение  $n = \frac{Q}{q}$ .

Это позволяет свести задачу к модели массового обслуживания с групповым поступлением заявок, в которой  $n$  – будет выступать в качестве объема групповой заявки на обслуживание, которая представляется как партии на отгрузку материалов.

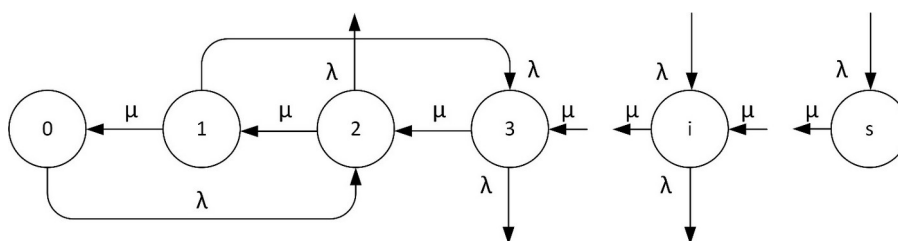


Рисунок 1 - Граф вероятностей состояний складских запасов материальных средств  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133.2>

Граф вероятностей состояний складских запасов материальных средств отображен на рис. 1,  $n=2$ , общая емкость складских площадок составляет  $s$  партий отгрузки.

Состояния системы массового обслуживания, схематично изображенной на рисунке 1, имеют следующий характер:

0 – на складских площадках отсутствуют запасы материальных средств;

1 – запас материальных средств на складских площадках позволяет осуществить одну отгрузку;

2 – запасы материальных средств на складских площадках позволяют осуществить две отгрузки;

3 – запасы материальных средств на складских площадках позволяют осуществить три отгрузки;

$i$  – запасы материальных средств на складских площадках позволяют осуществить  $i$  отгрузок;

$s$  – складские площадки заполнены полностью и позволяют осуществить  $s$  отгрузок;

Вероятности состояний системы, представленной на рисунке 1, можно представить в виде дифференциальных уравнений следующего вида

$$\begin{aligned}
 dP_0/dt &= -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 \\
 dP_1/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_1 + \mu \cdot P_2 \\
 dP_2/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_2 + \mu \cdot P_3 + \lambda \cdot P_0 \\
 dP_3/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_3 + \mu \cdot P_4 + \lambda \cdot P_1 \\
 dP_i/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_i + \mu \cdot P_{i+1} + \lambda \cdot P_{i-2} \\
 dP_s/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_s + \mu \cdot P_{s+1} + \lambda \cdot P_{s-2}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Для общего случая при  $n$  партий отгрузки со склада материальных средств в одной партии завозимой на склад

$$\{dP_i/dt = -(\lambda + \mu) \cdot P_i + \mu \cdot P_{i+1} + \lambda \cdot P_{i-n}\}
 \tag{9}$$

Для установившегося режима функционирования системы массового обслуживания при  $t \rightarrow \infty dP_s/dt=0$  дифференциальные уравнения можно представить в виде системы линейных, при этом к системе необходимо добавить условие

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = P_0 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} f_i(\mu, \lambda) = 1; \text{ откуда } P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} f_i(\lambda, \mu)}
 \tag{10}$$

где  $P_0$  – вероятность исхода при котором склад окажется пустым.

Значения функции  $f_i(\lambda, \mu)$  можно вычислить по рекуррентным формулам системы алгебраических уравнений [13].

В представленном случае вероятность полного заполнения складских площадок –  $P_{>s}$  вычисляется по выражению

$$P_{>s} = 1 - \sum_{i=0}^{i=s} i \cdot P_i
 \tag{11}$$

Соответственно величина усредненных объемов материальных средств хранящихся на складе вычисляется по формуле

$$V = \sum_{i=1}^s q \cdot i \cdot P_i
 \tag{12}$$

Для оценки остальных параметров работы склада возможно применение других методов теории вероятностей с требуемой интерпретацией входных значений параметров и вычисленных результатов.

В случае моделирования складских площадок развертываемых в местах временного накопления материалов ВСЖП (в том числе в районах размещения звенооборотных баз, стенов) при поступлении материалов партиями меньшими, чем отгружаемые, модель воспроизводимого процесса представляется в виде системы массового обслуживания с групповым обслуживанием.

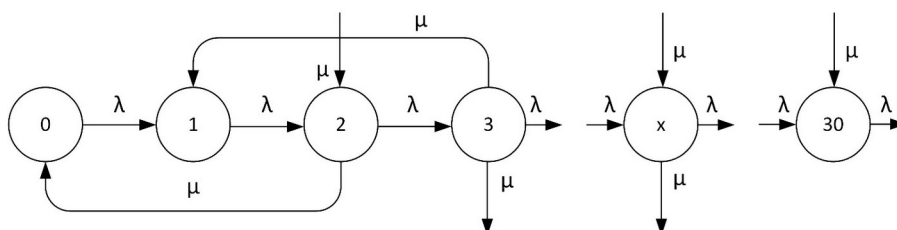


Рисунок 2 - Граф вероятностей состояний складских запасов материальных средств  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133.3>

*Примечание: при размере партии выдачи равной двум партиям поставки*

Граф вероятностей состояний складских запасов материальных средств отображённый на рисунке 2, демонстрирует случай, при котором объем выдаваемой партии в два раза превышает объем партий поступающих на склад, при общей вместимости складских площадок 15 партий поставки.

Данный пример характерен для тех случаев когда материалы ВСЖП поступают на площадки хранения либо по долгосрочным контрактам, либо со сборочных линий функционирующих в установившемся режиме, с плановыми поставками 15 партий в течении месяца, соответственно  $\lambda=0,5$  комплектов в сутки. Вывоз партий материальных средств осуществляется при накоплении на складских площадках запасов обеспечивающих их полную загрузку. В том случае когда на склад поступило запасов которыми может быть обеспечена две партии выдачи, подается заявка на подачу очередных транспортных средств. В модели время потребное для подачи транспорта под погрузку равно  $t_n$ , в этом случае  $\mu=1/t_n$ .

Состояния системы массового обслуживания, изображенной на рисунке 2:

- 0 – на складских площадках отсутствуют запасы материальных средств;
- 1 – на складские площадки поступила одна партия;
- 2 – на складские площадки подано 2 партии, имеется одна заявка на отгрузку;
- 3 – на складские площадки подано 3 партии, имеется одна заявка на отгрузку;
- 4 – на складские площадки подано 4 партии, имеется две заявки на отгрузку;

$x$  – на складские площадки подано  $x$  партий, имеется  $\text{Int}(x/2)$  заявок на отгрузку;

30 – на складские площадки подано 30 партий, имеется 15 заявок на отгрузку.

Вероятности состояний системы, представленной на рисунке 2, можно представить в виде дифференциальных уравнений следующего вида

$$\begin{aligned} dP_0/dt &= -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_2 \\ dP_1/dt &= -\lambda \cdot P_1 + \lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_3 \\ dP_2/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_2 + \mu \cdot P_1 + 2 \cdot \mu \cdot P_4 \\ dP_3/dt &= -(\lambda + \mu) \cdot P_3 + \mu \cdot P_2 + 2 \cdot \mu \cdot P_5 \\ dP_x/dt &= -\left[\lambda + \text{int}\left(\frac{x}{2}\right) \cdot \mu\right] \cdot \lambda \cdot P_x + \lambda \cdot P_{x+1} + \text{int}\left(\frac{x}{2}\right) \cdot \mu \cdot P_{x-2} \\ dP_{30}/dt &= -(\lambda + 15 \cdot \mu) \cdot P_{30} + \lambda \cdot P_{29} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^{31} P_i = 1, \text{ откуда } P_{31} = 1 - \sum_{i=0}^{30} P_i \quad (14)$$

где  $P_{31}$  – вероятность полной загрузки складских площадок, а  $P_0$  – вероятность полного освобождения склада.

Для небольших периодов рационально решать систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояния склада заданных входными значениями.

Для установившегося режима функционирования системы массового обслуживания при  $t \rightarrow \infty$  дифференциальные уравнения можно представить в виде системы линейных. При этом данный подход к решению задачи, с использованием рекурсивных формул, осложняется необходимостью рассмотрения системы уравнений, созданной под каждый конкретный случай, при этом число уравнений в системе будет на одно больше чем вместимость складских площадок, в рассматриваемых партиях поставки материальных средств.

Как и в первом случае, для оценки остальных параметров работы склада возможно применение других методов теории вероятностей с требуемой интерпретацией входных значений параметров и вычисленных результатов.

К примеру, средний ожидаемый объем материалов находящихся на складе можно вычислить по выражению

$$V_{\text{сред.}} = \sum_{x=1}^{30} x \cdot q \cdot P_i = q \cdot \sum_{x=1}^{30} x \cdot P_i \quad (15)$$

где  $q$  – объём 1 партии поставки, метров верхнего строения железнодорожного пути.

### Заключение

Проведенные расчёты показали, что при дефиците исходных данных и сложности проведения натурального эксперимента с реальными объектами применение описанных в статье моделей позволяет рассчитывать вероятностные параметры, характеризующие организацию складского обеспечения, процессов строительно-восстановительных работ на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта, и оценивать загруженность отдельных складских мощностей, математически обосновывать оптимальное количество потребных площадей хранения. Полученные результаты моделирования позволяют формулировать параметры основных мероприятий, направленных на снижение времени простоя технических средств, задействованных на транспортных и путевых работах, за счет своевременного подвоза материальных средств к местам производства работ.

Предлагаемые модели позволяют обосновать отдельные параметры логистических процессов, выполняемых в ходе производства работ на этапе формирования планов. Таким образом, еще на этапе выработки замысла, могут формироваться обоснованные предложения по включению в состав развертываемых строительных площадок складских зон, ориентированных на их материальное обеспечение. Дальнейшее развитие моделей позволит выполнить обоснование потребных составов команд, задействованных в производстве складских работ.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Балалаев А.Н., Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133.4>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

Balalae A.N., Samara State Transport University, Samara, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.133.4>

### Список литературы / References

1. «Военная доктрина Российской Федерации». утв. Президентом РФ 25.12.2014. — № Пр-2976.
2. Российская Федерация. Законы. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : федер. закон : [от 10 января 2003 г. N 17-ФЗ].
3. Потапов В.И. Транспортная инфраструктура / В.И. Потапов. — Самара: Издательство Самарского университета, 2018. — С. 7.
4. Об утверждении Правил по охране труда, экологической, промышленной и пожарной безопасности при техническом обслуживании и ремонте объектов инфраструктуры путевого комплекса ОАО РЖД: Распоряжение ОАО РЖД от 04.02.2014 (ред. от 30.12.2021). — № 255Р.

5. Об утверждении норм покилометрового запаса материалов верхнего строения пути для главных путей железных дорог и порядка их применения: Распоряжение ОАО РЖД от 26 ноября 2010 г. — № 2428р.
6. СТО РЖД 1.08.001-2008. Материалы, оборудование, запасные части и изделия. Правила хранения: утверждённый распоряжением ОАО «РЖД» от 11.04.2008, редакция от 25.05.2016. — № 753р.
7. Волгин В.В. Склад: логистика, управление, анализ / В.В. Волгин. — М.: Дашков и К°, 2019. — 736 с.
8. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания / М.А. Плескунов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — С. 7.
9. Черушева Т.В. Теория массового обслуживания / Т.В. Черушева, Н.В. Зверовщикова. — Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. — С. 106.
10. Косенков О.И. Аналитическая модель движения специального поезда при выполнении задач сопровождения воинского эшелона / О.И. Косенков, Д.И. Адволоткин, Д.В. Уфаев // Военная мысль. — 2017. — № 3. — С. 21–30.
11. Об утверждении межотраслевых норм времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы: Постановление Минтруда РФ от 17.10.2000 — № 76.
12. Инструкция по закреплению пакетов звеньев рельсо-шпальной решетки на четырехосных платформах и о порядке следования укладочных и разборочных поездов ЦП-4791 / Министерство путей сообщения. Главное управление пути. Проектно-технологическо-конструкторское бюро. — Утверждено Министерством путей сообщения СССР 12 апреля 1990 года.
13. Игумнов Л.А. Методы вычислительной математики решение уравнений и систем уравнений / Л.А. Игумнов, С.Ю. Литвинчук, Т.В. Юрченко. — Нижний Новгород, 2018. — С. 27–28.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. «Voennaja doktrina Rossijskoj Federacii» ["Military Doctrine of the Russian Federation"]. Approved by the President of the Russian Federation 25.12.2014. — № Pr-2976. [in Russian]
2. Rossijskaja Federacija. Zakony. O zheleznodorozhnom transporte v Rossijskoj Federacii [Russian Federation. Laws. About railway transport in the Russian Federation] : federal law : [from 10 January 2003 N 17-FZ]. [in Russian]
3. Potapov V.I. Transportnaja infrastruktura [Transport infrastructure] / V.I. Potapov. — Samara: Samara University Publishing House, 2018. — P. 7. [in Russian]
4. Ob utverzhdenii Pravil po ohrane truda, jekologicheskoj, promyshlennoj i pozharnoj bezopasnosti pri tehničeskom obsluzhivanii i remonte ob#ektov infrastruktury putevogo kompleksa ОАО RZhD [On Approving the Rules for Labour Protection, Environmental, Industrial and Fire Safety during Maintenance and Repair of Infrastructure Facilities of the Track Complex of JSCo Russian Railways]: Order of JSCo Russian Railways of 04.02.2014 (ed. 30.12.2021). — № 255R. [in Russian]
5. Ob utverzhdenii norm pokilometrovoego zapasa materialov verhnego stroenija puti dlja glavnyh putej zheleznyh dorog i porjadka ih primenenija [On Approval of the Norms of the Per Kilometre Stock of Track Maintenance Materials for the Main Tracks of Railways and the Procedure for Their Application]: Order of JSCo Russian Railways of 26 November 2010 — № 2428r. [in Russian]
6. SТО RZhD 1.08.001-2008. Materialy, oborudovanie, zapasnye chasti i izdelija. Pravila hranenija [STO RZHD 1.08.001-2008. Materials, equipment, spare parts and products. Storage rules]: approved by the order of JSCo "Russian Railways" dated 11.04.2008, revision dated 25.05.2016. — № 753r. [in Russian]
7. Volgin V.V. Sklad: logistika, upravlenie, analiz [Warehouse: logistics, management, analysis] / V.V. Volgin. — M.: Dashkov and K°, 2019. — 736 p. [in Russian]
8. Pleskunov M.A. Teorija massovogo obsluzhivanija [Theory of mass service] / M.A. Pleskunov. — Yekaterinburg : Publishing House of the Ural University, 2022. — P. 7. [in Russian]
9. Cherusheva T.V. Teorija massovogo obsluzhivanija [Theory of mass service] / T.V. Cherusheva, N.V. Zverovshhikova. — Penza : PSU Publishing House, 2021. — P. 106. [in Russian]
10. Kosenkov O.I. Analiticheskaja model' dvizenija special'nogo poezda pri vypolnenii zadach soprovozhdenija voinskogo jeshelona [Analytical model of special train movement when performing the tasks of escorting a military echelon] / O.I. Kosenkov, D.I. Advolotkin, D.V. Ufaev // Voennaja mysl' [Military Thought]. — 2017. — № 3. — P. 21–30. [in Russian]
11. Ob utverzhdenii mezhotraslevykh norm vremeni na pogruzku, razgruzku vagonov, avtotransporta i skladskie raboty [On approval of interbranch norms of time for loading, unloading of wagons, motor transport and warehousing works]: Resolution of the Ministry of Labour of the Russian Federation of 17.10.2000 — № 76. [in Russian]
12. Instrukcija po zakrepleniju paketov zven'ev rel'so-shpal'noj reshetki na chetyrehosnyh platformah i o porjadke sledovaniya ukladochnykh i razborochnykh poezdov CP-4791 [Instruction on fixing the packages of rail-sleeper grating links on four-axle platforms and on the order of laying and dismantling trains CP-4791] / Ministry of Railways. Main Track Department. Project-technological and design bureau. – Approved by the USSR Ministry of Railways on 12 April 1990. [in Russian]
13. Igumnov L.A. Metody vychislitel'noj matematiki reshenie uravnenij i sistem uravnenij [Methods of computational mathematics solving equations and systems of equations] / L.A. Igumnov, S.Ju. Litvinchuk, T.V. Jurchenko. — Nizhnij Novgorod, 2018. — P. 27–28. [in Russian]