

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

**АЛМУНТАФЕКИ Асель Фарис Марзуг**

**Оценка эффективности функционирования транспортно-логистических  
процессов промышленного предприятия на основе моделирования  
оптимальных параметров грузоперевозки**

**Шифр и наименование научной специальности**

2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор Гончаренко С.Н.

Москва – 2024

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** На сегодняшний день транспортно-логистические системы промышленных предприятий сталкиваются с необходимостью решения ряда ключевых задач, связанных с оценкой эффективности функционирования двух основных направлений своей деятельности. Во-первых, это наличие простоев, невыполнение временных параметров и систематическое недостижение технико-технологических показателей работы буферных емкостей зон хранения и мест погрузки различных видов готовой продукции. Во-вторых, это ряд проблем, связанных с использованием имеющегося автопарка транспортных средств в контуре логистических процессов и вариантами сезонной доставки готовой продукции потенциальным потребителям. В такой ситуации необходимо определение факторов риска безотказной погрузки соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината, дифференцированных по способам отгрузки и номенклатуре производимой продукции. Помимо этого, отсутствие подходов к рациональному выбору вариантов использования транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината требует разработки научно-обоснованных механизмов, методов и инструментов, которые позволят получить максимальную эффективность транспортной составляющей при стабильной и управляемой цепи поставок. Наличие в существующих цепях поставок перевалочных пунктов в виде транспортно-логистических терминалов и использование различных видов автомобильного и железнодорожного транспорта для доставки готовой продукции комбината конечным потребителям диктует потребность в формировании и формализованном описании процедур сценарного моделирования, базирующихся на экспертных методах получения, анализа и обработки информации. Решение данных задач предопределяет объективную необходимость рассмотрения логистических процессов промышленного предприятия как комплексной многопродуктовой транспортной системы, позволяющей реализовать процесс поиска оптимальных технико-экономических показателей погрузки и перевозки готовой продукции.

В этой связи повышение эффективности управления и надежности функционирования транспортно-логистической системы комбината на основе совершенствования управления погрузочно-разгрузочными процессами и оптимизации показателей транспортировки готовой продукции является актуальной научной и практической задачей.

**Целью работы** является повышение эффективности функционирования транспортно-логистической системы промышленного предприятия на основе определения оптимальных параметров грузоперевозки и оперативного мониторинга технико-экономических показателей погрузочно-разгрузочных работ.

**Идея работы** заключается в формировании оптимальных сценарных решений плана перевозки готовой продукции на основе определения потоков минимальной стоимости и максимальной производительности транспортных сетей комбината.

**Новизна научных исследований** заключается в следующем:

1. Разработаны новые подходы к определению временных интервалов и вероятности возникновения риска бесперебойной отгрузки произведенной продукции (безотказной работы буферной емкости), которые, в отличие от существующих, включают в себя прогнозные оценки риска переполнения склада и остановки производства из-за отсутствия мест хранения готовой продукции и риска простоя транспортных средств ввиду отсутствия своевременных поставок готовой продукции.

2. Получены новые данные о взаимосвязях цены доставки готовой продукции комбината от плеча с учетом специфических особенностей транспортировки грузов на различные расстояния, а также определены зависимости средней скорости движения от расстояния перевозки.

На основе поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Анализ показателей функционирования транспортно-логистического терминала промышленной площадки комбината и прогнозирование параметров загрузки одного автомобиля для различных вариантов грузоподъемности выделяемых под погрузку транспортных средств.

2. Определение вероятностей наступления риска бесперебойной отгрузки готовой продукции: вероятность безотказной работы буферной емкости погрузки; вероятность простоя системы погрузочных терминалов при отсутствии автомобилей под погрузку; вероятность занятости машинами всех погрузочных терминалов; результирующая вероятность безотказной работы всей системы погрузки готовой продукции транспортно-логистического терминала комбината.

3. Обоснование и выбор транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината с учетом логистических технико-экономических показателей, вариантов расположения груза, системы взаимосвязей размеров причинённого вреда от превышения допустимых осевых нагрузок и допустимой массы для различных видов транспортных средств.

4. Формализация и решение транспортной задачи перевозки готовой продукции комбината для различных сценариев доставки грузов (автомобильный и железнодорожный транспорт), а также критериев оптимальности (объемы перевозок, время работы транспортного средства, суммарные затраты на транспортировку всего объема продукции) с учетом условий неполного использования парка транспортных средств и уровня значимости (приоритетности) определенных маршрутов доставки готовой продукции комбината.

5. Моделирование сценариев доставки грузов и показателей эффективности функционирования автопарка комбината с учетом привлечения сторонних транспортных средств в периоды сезонных ограничений.

**Методы исследования** включают системный и статистический анализ транспортно-логистических показателей промышленного предприятия, теорию принятия решений, математическое моделирование, теорию вероятностей, теоретико-информационный анализ транспортно-логистической деятельности промышленного предприятия.

**Научные положения:**

1. Определение зон эффективной загрузки на промышленной площадке комбината возможно осуществить на основе полученных зависимостей временных интервалов загрузки различной грузоподъемности транспортных средств от скорости загрузки и рисков безотказной отгрузки для соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината, дифференцированных по номенклатуре производимой продукции, способам отгрузки и размеру фракции сыпучей массы песков.

2. Обоснование и выбор транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината необходимо осуществлять на основе сформированного исходного множества альтернативных вариантов использования транспортных средств, разработанной совокупности оценочных критериев для оценки эффективности перевозки готовой продукции и структуры предпочтений оценочных критериев для определенного типа транспортных средств.

3. Поиск оптимальных сценарных решений плана перевозки готовой продукции возможно осуществить на основе решения многопродуктовой транспортной задачи с промежуточными пунктами в виде транспортно-логистических терминалов и конечными пунктами доставки объемов разнородной продукции за определенный временной интервал с использованием методов анализа транспортных сетей с двусторонними пропускными способностями дуг и определении потоков минимальной стоимости и максимальной производительности транспортной сети.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования** обеспечивается: репрезентативностью исходных статистических выборок показателей транспортно-логистического терминала комбината; корректным использованием в обработке информации о сценарных вариантах поставок готовой продукции методов математической статистики и теории принятия решений; эффективным использованием современного программного обеспечения.

**Научная и практическая значимость**

1. Разработана матрица рисков безотказной погрузки для соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината с дифференциацией по номенклатуре

производимой продукции, способам отгрузки и размеру фракций сыпучей массы песков.

2. Разработан механизм решения задачи выбора (слоевого упорядочивания) транспортных средств для эффективной перевозки готовой продукции комбината по множеству оценочных критериев, базирующийся на результатах моделирования решения задачи выбора транспортных средств по их технической готовности (технические критерии), организационной обеспеченности (организационные критерии) и экономической эффективности (рыночные, экономические критерии).

3. Произведена прогнозная оценка стоимости доставки готовой продукции потребителям и потенциальных возможностей транспортных компаний по предоставлению необходимого количества транспортных услуг для широкого диапазона интервальных значений плеча доставки грузов. Прогнозные модели формировались исходя из анализа статистических данных по каждой, отдельно взятой компании и учета ее доли на рынке сервисных платформ для построения маршрутов и анализа тарифов.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Основные положения диссертации использованы в деятельности торгово-транспортной компании «Аль Райян» и ООО «Шопини Экспресс» - транспортно-логистические услуги (Республика Ирак).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме - «Неделя горняка-2024».

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 5 научных работах, рекомендованных ВАК РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 126 наименований и представлена на 162 страницах, включая 70 рисунков, 46 таблиц.

### **Основное содержание работы**

Моделирование параметров оценки эффективности функционирования буферных емкостей хранения и номинальных скоростей отгрузки готовой продукции на промышленной площадке комбината базировалось на следующих предпосылках. Комбинат выпускает некоторое исходное множество видов готовой продукции  $ГП = \{К, ФП, СП\}$ , где  $К = \overline{1,3}$  – производственные концентраты,  $ФП = \overline{1,3}$  – фракционированные пески,  $СП = \overline{1,3}$  – пески для стекольной промышленности.

На территории комбината можно выделить некоторое исходное множество зон хранения готовой продукции  $ЗХ = \{ЗХ_1, ЗХ_2, ЗХ_3, ЗХ_4, ЗХ_5, ЗХ_6\}$ :  $ЗХ_1$  - зона хранения производственных концентратов;  $ЗХ_2$  - зона хранения фракционированного песка в МКР;  $ЗХ_3$  - зона хранения навалом

фракционированного песка с помощью силоса; ЗХ<sub>4</sub> - зона хранения фракционированного и стекольного песка навалом с помощью силосов; ЗХ<sub>5</sub> - зона хранения стекольного песка в МКР; ЗХ<sub>6</sub> - зона хранения влажного песка навалом.

В результате проведенных исследований были смоделированы параметры времени загрузки одного автомобиля Т (21 МКР), мин. и скорости загрузки,  $v$ , т/ч (рисунок 1), а также методом наименьших квадратов построена регрессионная взаимосвязь вида  $T = 938,02v^{-0,843}$  и определен коэффициент корреляции  $R^2 = 0,96$ , позволившие выделить для всех мест хранения на промышленной площадке зоны эффективной и неэффективной загрузки готовой продукции комбината.

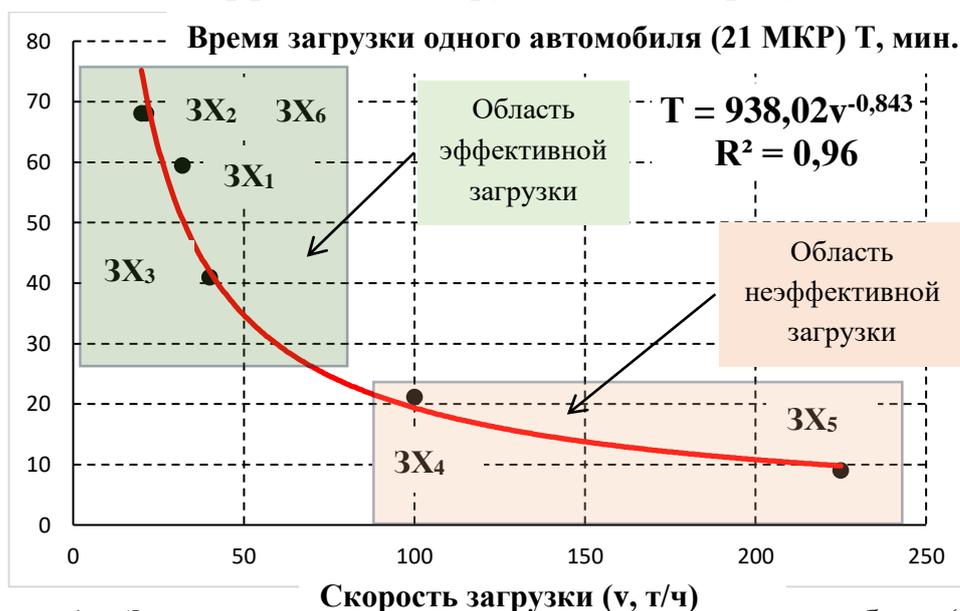


Рисунок 1 – Зависимость времени загрузки одного автомобиля (21 МКР), мин. от скорости загрузки  $v$ , т/час для исходного множества зон хранения готовой продукции  $ZX = \{ZX_1, ZX_2, ZX_3, ZX_4, ZX_5, ZX_6\}$

Аналогичным образом было получено семейство прогнозных кривых для различных вариантов грузоподъемности транспортных средств, выделяемых под погрузку в зонах хранения готовой продукции комбината в диапазоне от 10 до 41 т. (рисунок 2).

При рассмотрении производственной задачи определения параметров функционирования погрузочного терминала промышленной площадки комбината был произведен расчет риска отгрузки произведенной продукции (безотказной работы буферной емкости погрузки) ( $R_{бе}$ ). В данной постановке ( $R_{бе}$ ) складывается из двух составляющих  $R_{бе} = R_{пс} + R_{пт}$ : риск переполнения склада и остановки производства из-за отсутствия места хранения готовой продукции ( $R_{пс}$ ); риск простоя транспортных средств ввиду отсутствия готовой продукции и невыполнения договорных обязательств по ее доставке конечному потребителю ( $R_{пт}$ ).

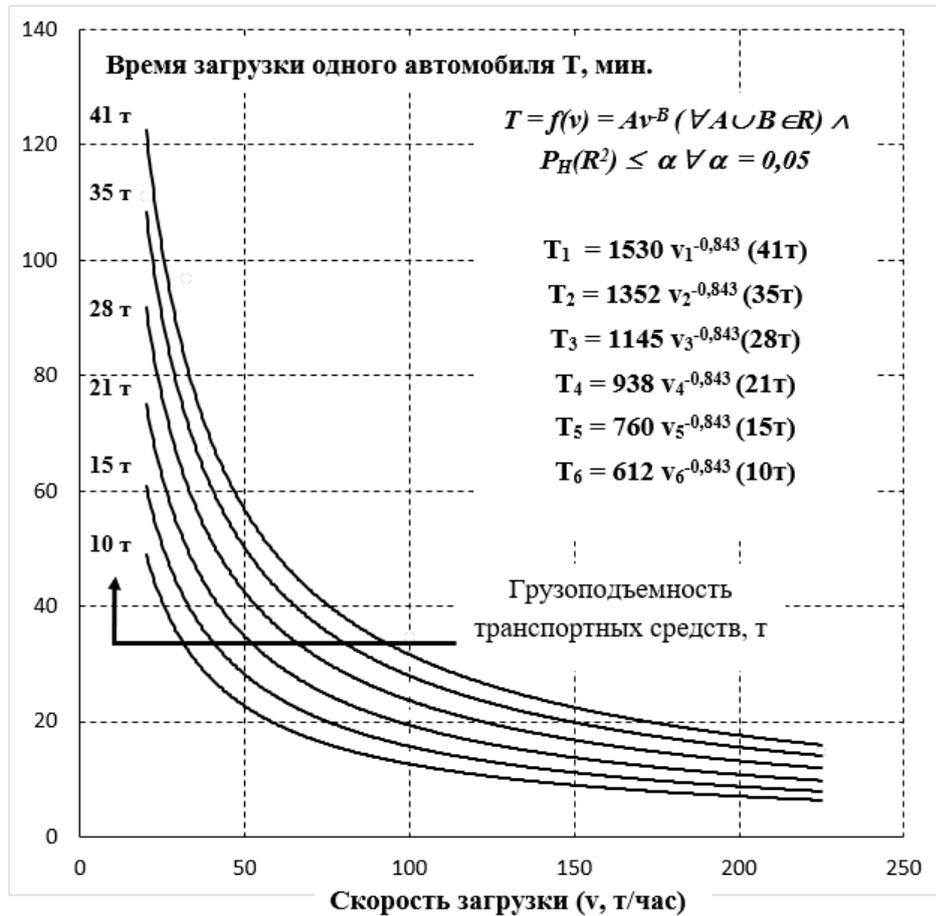


Рисунок 2 – Прогнозные зависимости времени загрузки одного автомобиля T, мин. от скорости загрузки v, т/ч для различной грузоподъемности транспортных средств, выделяемых под погрузку в зонах хранения готовой продукции комбината

В традиционной постановке, каждый из этих рисков является функцией ущерба от данного вида риска и вероятности его возникновения. Рассматривая вероятностную компоненту для условий данной задачи, можно определить, что вероятность возникновения риска будет зависеть от ряда составляющих, среди которых необходимо отметить следующие: производительность наполнения буфера хранения готовой продукции  $\Pi_n$ , т/ед.т.; емкость буфера хранения готовой продукции  $E_6$ , м<sup>3</sup> или т; скорость/производительность разгрузки буфера хранения  $v$ , т/ед.т. Таким образом, вероятность наступления рисковогого события есть некоторая функция  $P = f(\Pi_n, E_6, v)$ . Исходя из специфики производственного процесса, интенсивность заполнения минимально необходимого уровня буферной емкости хранения готовой продукции ( $БХ_{\min}$ , м<sup>3</sup>) характеризуется функцией производительности заполнения буферной емкости хранения готовой продукции, м<sup>3</sup>/ед.т,  $\text{ПЗБХ}_f = \{(t, \text{ПЗБХ}(t)) \in T \times \text{ПЗБХ} \mid t \in T\}$ . При этом, результирующий вектор прироста/снижения объема готовой продукции в емкости хранения м<sup>3</sup>/ед.т, будет определяться функцией  $\text{РВГП}_f = \{(t, \text{РВГП}(t)) \in T \times \text{РВГП} \mid t \in T\}$ , зависящей от

векторной суммы двух компонент  $\overline{РВГП}_f = \overline{ПЗБХ}_f + \overline{ПРБХ}_f$ , где  $\overline{РВГП}_f$  – функция результирующего вектора прироста/снижения объема готовой продукции в емкости хранения  $\text{м}^3/\text{ед.т}$ ,  $\overline{РВГП}_f = \{(t, \text{РВГП}(t)) \in \text{T} \times \overline{РВГП} \mid t \in \text{T}\}$ ;  $\overline{ПЗБХ}_f$  – функция производительности заполнения буферной емкости хранения готовой продукции,  $\text{м}^3/\text{ед.т}$ ,  $\overline{ПЗБХ}_f = \{(t, \text{ПЗБХ}(t)) \in \text{T} \times \overline{ПЗБХ} \mid t \in \text{T}\}$ ;  $\overline{ПРБХ}_f$  – функция производительности разгрузки буферной емкости хранения готовой продукции,  $\text{м}^3/\text{ед.т}$ ,  $\overline{ПРБХ}_f = \{(t, \text{ПРБХ}(t)) \in \text{T} \times \overline{ПРБХ} \mid t \in \text{T}\}$ . В такой постановке, риск переполнения склада и остановки производства из-за отсутствия места хранения готовой продукции (переполнение) ( $R_{\text{пс}}$ ) будет характеризоваться выражением  $(\forall t_1, t_2 \in \text{M}) t_2 > t_1 \Rightarrow \overline{РВГП}_f(t_2) > \overline{РВГП}_f(t_1)$  (рисунок 3 (А)), а риск простоя транспортных средств ввиду отсутствия готовой продукции и невыполнения договорных обязательств по ее доставке конечному потребителю (недостаток) ( $R_{\text{пт}}$ ) соответственно  $(\forall t_1, t_2 \in \text{M}) t_2 > t_1 \Rightarrow \overline{РВГП}_f(t_2) < \overline{РВГП}_f(t_1)$  (рисунок 3 (Б)).

При этом, вероятность наступления рискованного события возможно рассмотреть, как некоторый случай безотказной работы буферной емкости хранения готовой продукции. В данном случае, среднее время безотказной работы буферной емкости хранения готовой продукции (наработка на отказ) ( $t_2 < T < t_{\text{риск}}$ ) представляет собой математическое ожидание ее работы до одного из критических состояний (переполнение/недостаток). В такой постановке, используя традиционные подходы, возможно определить

$$T = (t_{\text{риск}} - t_2) = \int_{t_2}^{t_{\text{риск}}} t \times f(t) dt = \int_{t_2}^{t_{\text{риск}}} P(t) dt \Rightarrow f(t) = -\frac{dP(T)}{dt},$$

где  $f(t)$  – функция плотности вероятности возникновения критического состояния (безотказной работы) буферной емкости хранения готовой продукции (переполнение (объем готовой продукции  $\rightarrow \text{БХ}_{\text{max}}$ ) / недостаток (объем готовой продукции  $\rightarrow 0$ )),  $\text{БХ}_{\text{max}}$  – максимальный уровень буферной емкости хранения готовой продукции,  $\text{м}^3$ ;  $P(T)$  – вероятность безотказной работы буферной емкости хранения в интервале времени  $t_2 < T < t_{\text{риск}}$ .

Проведенный анализ статистических данных показателей погрузочных работ для различных зон хранения транспортно-логистического терминала позволил выявить плотности распределения вероятностей переполнения склада и остановки производства из-за отсутствия места хранения готовой продукции и простоя транспортных средств ввиду отсутствия готовой продукции и невыполнения договорных обязательств по ее доставке конечному потребителю для большинства позиций номенклатуры производимой продукции. Кроме того, различные варианты функционирования погрузочного терминала возможно описать в терминах и моделях теории массового обслуживания, где за основу решения задачи берется разомкнутая система с ограниченной длиной очереди, так как машины на предприятии загружаются в отведенном терминале и имеют возможность перехода

внутри промышленной площадки в другие места погрузки в зависимости от длины очереди. В такой постановке входящий пуассоновский поток требований погрузки готовой продукции описывается интенсивностью  $\lambda$ , а его обслуживание происходит  $n$  – погрузочными терминалами с интенсивностью  $\nu$ , при этом время загрузки автомобиля имеет экспоненциальный закон распределения.

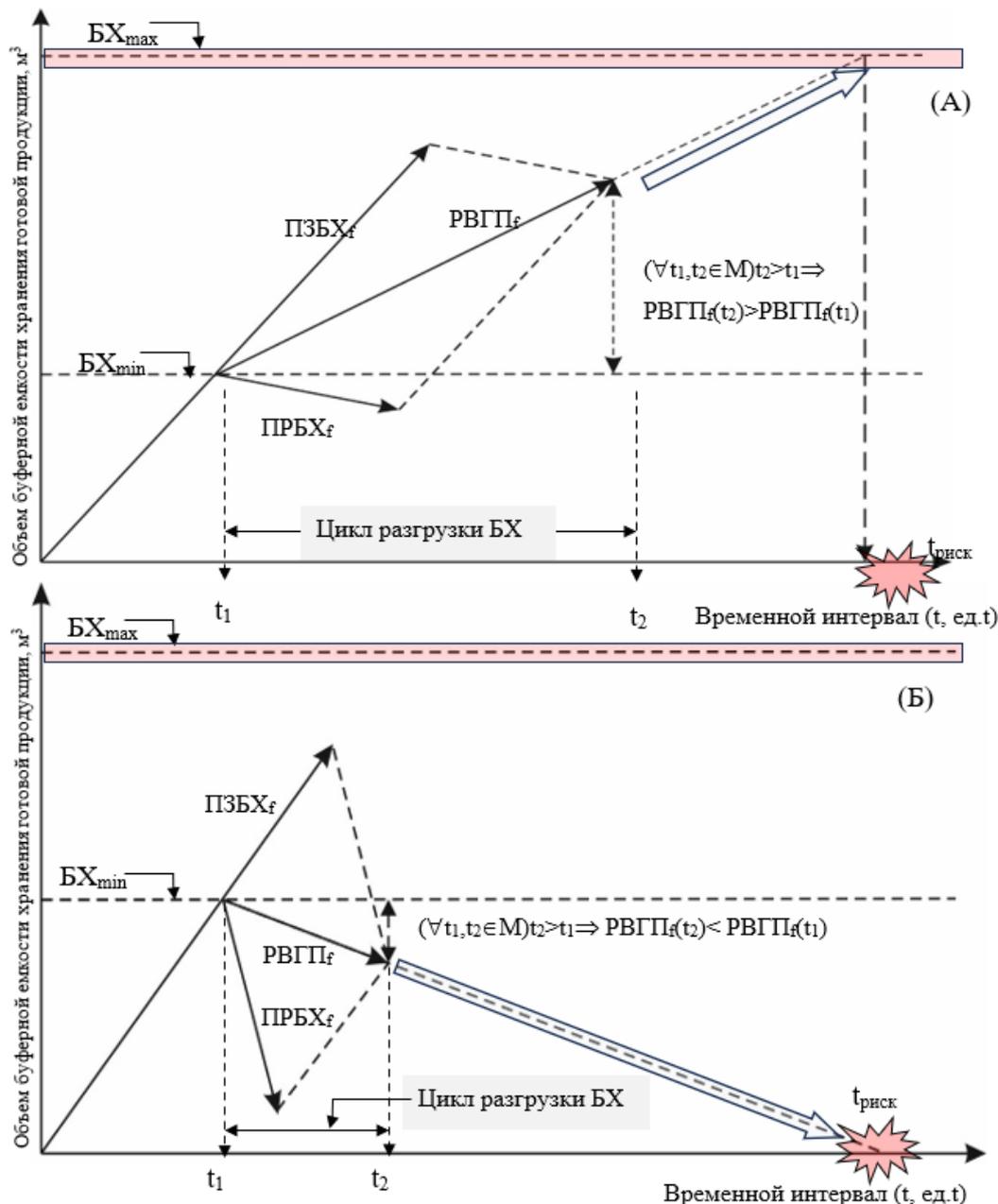


Рисунок 3 – Моделирование временных интервалов и вероятности возникновения риска отгрузки произведенной продукции (безотказной работы буферной емкости)  $R_{бс}$ : (А) - риск переполнения склада и остановки производства из-за отсутствия места хранения готовой продукции ( $R_{пс}$ ); (Б) - риск простоя транспортных средств ввиду отсутствия готовой продукции и невыполнения договорных обязательств по ее доставке конечному потребителю ( $R_{пт}$ ).

Условные обозначения к рисунку 3.

$BX_{\max}$  - максимальный уровень буферной емкости хранения готовой продукции,  $m^3$ ;

$BX_{\min}$  - минимально необходимый уровень заполнения буферной емкости хранения готовой продукции,  $m^3$ ;

$ПЗБХ_f$  – функция производительности заполнения буферной емкости хранения готовой продукции,  $m^3/ед.t$ ,  $ПЗБХ_f = \{(t, ПЗБХ(t)) \in T \times ПЗБХ \mid t \in T\}$ ;

$ПРБХ_f$  – функция производительности разгрузки буферной емкости хранения готовой продукции,  $m^3/ед.t$ ,  $ПРБХ_f = \{(t, ПРБХ(t)) \in T \times ПРБХ \mid t \in T\}$ ;

$РВГП_f$  – функция результирующего вектора прироста/снижения объема готовой продукции в емкости хранения  $m^3/ед.t$ ,  $РВГП_f = \{(t, РВГП(t)) \in T \times РВГП \mid t \in T\}$ ;

$t_{\text{риск}}$  – время наступления рискованного события (переполнение/недостаток) готовой продукции в буферной емкости хранения;

$t_1$  – время наполнения минимально необходимого уровня заполнения буферной емкости хранения готовой продукции;

$t_2 - t_1$  – время цикла разгрузки буферной емкости хранения готовой продукции.

В таком случае вероятность простоя системы погрузочных терминалов (вероятность отсутствия автомобилей под погрузку) будет определяться по следующей формуле (1):

$$P_o = \left[ 1 + \frac{p^1}{1!} + \frac{p^2}{2!} + \dots + \frac{p^n}{n!} \frac{p/n - (p/n)^{l+1}}{1 - p/n} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $p$  – приведенная интенсивность потока машин под погрузку в терминале, которая характеризует среднее количество машин, поступающих под погрузку за среднее время погрузки одной машины.

Вероятность отказа в погрузке будет определяться из расчета вероятности наличия в системе  $(n+1)$  машин, когда будут заняты все погрузочные терминалы  $n$  и все места в очереди  $l$  (2):

$$P_{\text{отк}} = P_{n+l} = P_o \frac{p^{l+n}}{n^l n!}. \quad (2)$$

Относительная ( $q$ ) и абсолютная пропускные ( $a$ ) способности терминалов погрузки будут определяться через следующие соотношения  $q = 1 - P_{\text{отк}}$ ,  $a = q\lambda$ , а среднее количество занятых погрузкой терминалов  $Z = a/v$ .

Обозначив  $p/n$  через  $\chi$  возможно получить выражение для среднего количества машин в очереди под загрузку (3):

$$r = \frac{p^{n+1} p_o (l+1) \chi^l + l \chi^{l+1}}{n - n! (1 - \chi)^2}, \quad (3)$$

а среднее количество машин под загрузку, среднее время ожидания и среднее время загрузки автомобиля будут определяться выражениями  $k=r+z$ ,  $t_{ож} = r/\lambda$ ,  $t_{сп} = t_{ож} + t_{обсл}$ .

Определив безотказную работу буферной емкости погрузки как событие ( $S_1$ ) с вероятностью наступления  $P(T)$ , простой системы погрузочных терминалов при отсутствии автомобилей под погрузку через событие ( $S_2$ ) с вероятностью наступления  $P_0$ , а занятость машинами всех погрузочных терминалов через событие ( $S_3$ ) с вероятностью появления  $P_{отк}$  имеем возможность рассчитать вероятность безотказной работы системы погрузки готовой продукции предприятия. В такой постановке результирующая сумма вероятности трех событий ( $P_{рез}$ ) будет определяться из следующего соотношения (4):

$$P_{рез} = P\left(\sum_{i=1}^{i=3} S_i\right) = \sum_i P(S_i) - \sum_{i,j} P(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} P(S_i S_j S_k). \quad (4)$$

Таким образом, величина риска безотказной погрузки ( $R_{бп}$ ) готовой продукции на промышленной площадке комбината будет выражаться следующим соотношением  $R_{бп} = R_{бе} + R_{прс} + R_{оп}$ , где  $R_{бе}$  - риск безотказной работы буферной емкости погрузки готовой продукции предприятия ( $R_{бе} = R_{пс} + R_{пт}$ , где риск переполнения склада из-за отсутствия места хранения ( $R_{пс}$ ); риск простоя транспортных средств ввиду отсутствия готовой продукции ( $R_{пт}$ ));  $R_{прс}$  - риск простоя системы погрузочных терминалов при отсутствии автомобилей под погрузку;  $R_{оп}$  - риск отказа в погрузке (занятость машинами всех погрузочных терминалов). В такой постановке величина безотказной погрузки готовой продукции на промышленной площадке комбината будет складываться из следующих составляющих  $R_{бп} = R_{пс} + R_{пт} + R_{прс} + R_{оп}$ , каждое из которых представляет собой математическое ожидание соответствующего ущерба для определенной зоны хранения и места погрузки готовой продукции комбината (рисунок 4).

На основании оценок вероятностей возникновения рисков и уровня влияния (в объемном и стоимостном эквиваленте) на процессы погрузочных работ была построена матрица рисков безотказной погрузки для всей номенклатуры производимой продукции в разрезе соответствующих зон хранения и мест погрузки транспортно-логистического терминала комбината (рисунок 5).

Обоснование и выбор типа транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината основывались на том, что необходимо предложить подходы, методы и инструменты, которые позволят получить максимальную эффективность транспортной составляющей при стабильной и управляемой цепи поставок.

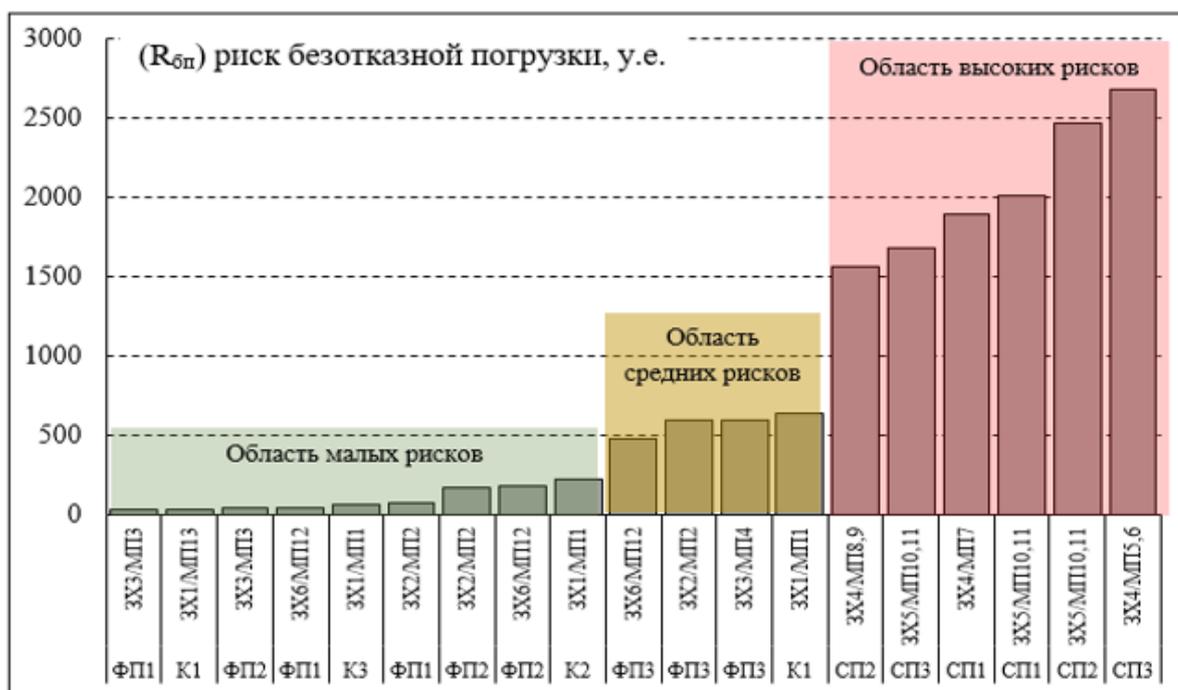


Рисунок 4 – Ранжированный ряд рисков безотказной погрузки для соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината

[80;100]			(СП2) 3X <sub>4</sub> /МП <sub>8,9</sub>		(СП3) 3X <sub>4</sub> /МП <sub>5,6</sub> ; (СП2) 3X <sub>5</sub> /МП <sub>10,11</sub>
[60;80]			(К1) 3X <sub>1</sub> /МП <sub>1</sub>	(СП1) 3X <sub>5</sub> /МП <sub>10,11</sub>	(СП1) 3X <sub>4</sub> /МП <sub>7</sub> ;
[40;60]	(ФП1) 3X <sub>2</sub> /МП <sub>2</sub>	(ФП3) 3X <sub>2</sub> /МП <sub>2</sub>		(ФП3) 3X <sub>3</sub> /МП <sub>4</sub> ;	(СП3) 3X <sub>5</sub> /МП <sub>10,11</sub>
[20;40]	(ФП2) 3X <sub>3</sub> /МП <sub>3</sub> ; (ФП2) 3X <sub>6</sub> /МП <sub>12</sub>	(К3) 3X <sub>1</sub> /МП <sub>1</sub> ; (ФП1) 3X <sub>2</sub> /МП <sub>2</sub> ; (ФП1) 3X <sub>6</sub> /МП <sub>12</sub>	(ФП3) 3X <sub>6</sub> /МП <sub>12</sub>		
[0;20]		(ФП1) 3X <sub>3</sub> /МП <sub>3</sub> ; (К1) 3X <sub>1</sub> /МП <sub>13</sub>	(К2) 3X <sub>1</sub> /МП <sub>1</sub>		
<b>Влияние</b> <b>Вероятность</b>	[0;20]	[20;40]	[40;60]	[60;80]	[80;100]

Рисунок 5 – Матрица рисков безотказной погрузки для соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината

Основные этапы решения задачи выбора транспортных средств для транспортировки готовой продукции комбината заключаются в следующем:

Этап 1. Формирование исходного множества альтернативных вариантов транспортных средств и совокупности оценочных критериев для оценки эффективности перевозки готовой продукции комбината;

Этап 2. Формирование структуры предпочтений оценочных критериев для определенного типа транспортных средств перевозки готовой продукции комбината;

Этап 3. Формирование упорядоченного множества транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината.

В рамках первого этапа «Формирование исходного множества альтернативных вариантов транспортных средств и совокупности оценочных критериев для оценки эффективности перевозки готовой продукции комбината» выбор подвижного состава происходил на основании следующих групп критериев.

1. Группа 1. Технические особенности подвижного состава и весовых параметров транспортного средства (*технические критерии*):

2. Группа 2. Расположение груза в кузове, сохранность груза при транспортировке, безопасности погрузочно-разгрузочных операций (*организационные критерии*):

3. Группа 3. Совмещение потенциальных технических и технологических интересов с возможностями рынка автотранспортных услуг (*экономические, рыночные*).

Далее производилось определение степени предпочтения транспортного средства  $ТС_d$  над транспортным средством  $ТС_g$  по оценочному критерию  $F$  с помощью введения величины  $\eta_F(ТС_d, ТС_g) \in [0,1]$ . Для решения задачи выбора транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината необходимо осуществить процедуру слоевого упорядочивания альтернатив (транспортных средств). Для этих целей для всех пар транспортных средств по каждому оценочному критерию заданы матрицы  $\|\eta_F(ТС_d, ТС_g)\|$  и  $\|\mu(F_z, F_x)\|$ . В данной постановке задача выбора наиболее предпочтительных транспортных средств, составляющих подмножество  $ТС_{нп}$  выглядит следующим образом (5):

$$ТС_{нп} = \operatorname{argmax}_{(u)} \varphi_{нп}(ТС_u) \quad \forall u = \overline{1,9}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{нп}(ТС_u)$  - значение функции принадлежности транспортного средства  $ТС_u$  к подмножеству предпочтительных  $ТС_{нп}$ .

Для определения расчетных значений функции  $\varphi_{нп}(ТС_u)$  предварительно необходимо осуществить следующие операции.

На первом этапе вычисляются числовые характеристики степени принадлежности определенного транспортного средства к подмножеству наиболее предпочтительных по оценочному критерию  $F$  (6):

$$\varphi_{нп}(ТС_u, F) = 1 - \sup [\eta_F(ТС_d, ТС_g) - \eta_F(ТС_g, ТС_d)]. \quad (6)$$

Следующим шагом происходит формирование нечеткого отношения нестрогого предпочтения на множестве транспортных средств, исходя из определенных функций принадлежности транспортного средства  $TC_u$  к подмножеству предпочтительных транспортных средств  $TC_{np}$  и структурой предпочтений на множестве оценочных критериев  $\|\mu(F_z, F_x)\|$  (7):

$$\eta(TC_d, TC_g) = \sup \min_{(z,x)} [\varphi_{np}(TC_u, F_z); \varphi_{np}(TC_u, F_x); \mu(F_z, F_x)]. \quad (7)$$

Далее производится расчет значения функции принадлежности каждого транспортного средства к подмножеству предпочтительных (8):

$$\varphi_{np}(TC_u) = 1 - \sup [\eta(TC_d, TC_g) - [\eta(TC_g, TC_d)]]. \quad (8)$$

В случае необходимости производится корректировка значений  $\varphi_{np}(TC_u)$  исходя из следующих соотношений (9):

$$\varphi_{np}^*(TC_u) = \begin{cases} \varphi_{np}(TC_u), & \text{если } \eta_{Ti}(TC_d, TC_d) = 1, \\ \min [\varphi_{np}(TC_u), [\eta(TC_d, TC_d)]] , & \text{если } \eta(TC_d, TC_d) \neq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Реализация моделей (5)-(9) позволит решить задачу выбора (слоевого упорядочивания) транспортных средств по их приоритетности по сформированному множеству оценочных критериев (технические, организационные, экономические) и осуществить ранжирование (слоевое упорядочивание) транспортных средств для эффективной перевозки готовой продукции комбината на основе разработанного механизма (рисунок 6).

Разработанный механизм решения задачи выбора реализуется в два этапа.

В рамках первого этапа происходит формирование исходного множества транспортных средств. На основе комплексной оценки рыночных предложений транспортно-логистических услуг реализуется процедура регистрации и скрининга основных технико-экономических и организационных показателей исходного множества вариантов транспортных средств. После определения соответствия данных показателей условиям перевозки готовой продукции комбината формируется исходное множество допустимых транспортных средств для дальнейшего решения задачи выбора (слоевого/линейного упорядочивания).

В рамках второго этапа происходит формирование упорядоченного множества транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината. Ряд шагов данного этапа реализуется на базе экспертно-моделирующих процедур: формирование группы экспертов  $\{E\}$  и структуры предпочтений на множестве экспертов  $\|\mu(e_s, e_q)\|$ ; формирование экспертами структур предпочтений на множестве оценочных критериев  $\|\mu(F_z, F_x)\|$ ; формирование экспертами структур предпочтений на множестве транспортных средств по каждому критерию  $\eta_F(TC_d, TC_g) \in [0,1]$ ; проверка наличия отношений индеферентности  $R_{ind}$  и корректировка исходной структуры предпочтений на множестве экспертов  $\|\mu(e_s, e_q)\|$  (при необходимости). Результатом реализации данных шагов является определение значений элементов итоговой структуры предпочтений на множестве критериев

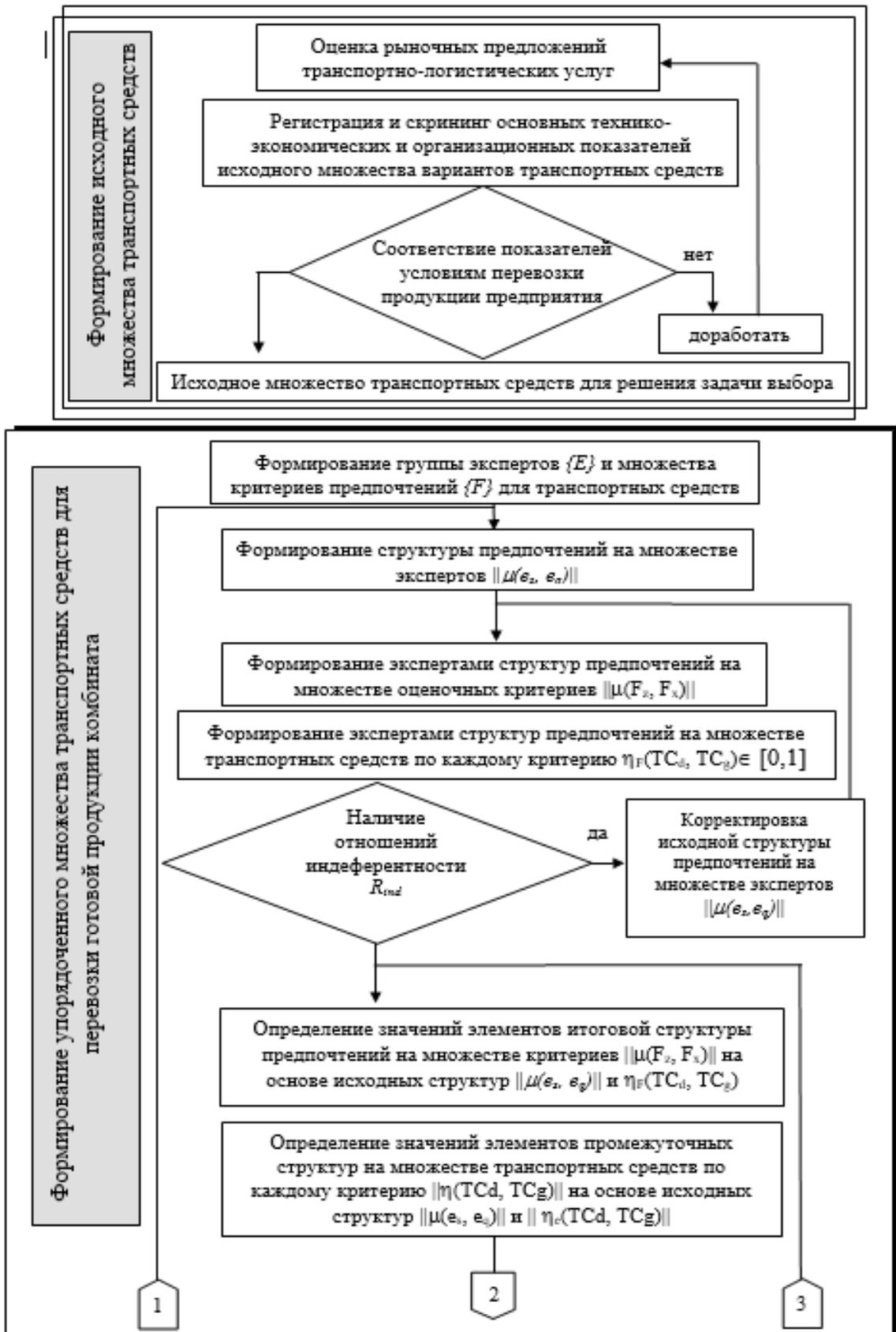


Рисунок 6 – Механизм решения задачи выбора (слоевого упорядочивания) транспортных средств для эффективной перевозки готовой продукции комбината по множеству оценочных критериев (технические, организационные, экономические)

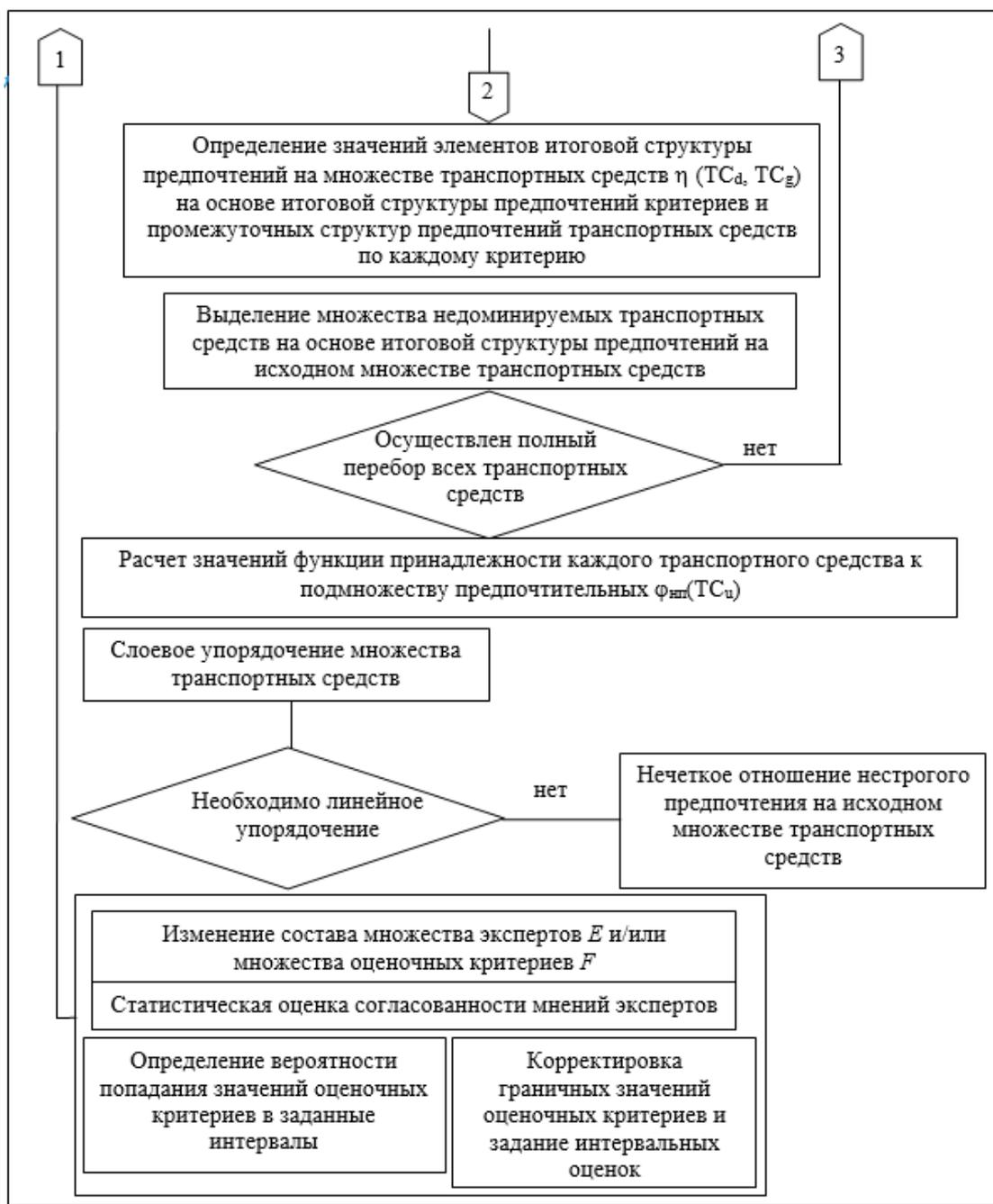


Рисунок 6 – Механизм решения задачи выбора (слоевого упорядочивания) транспортных средств для эффективной перевозки готовой продукции комбината по множеству оценочных критериев (технические, организационные, экономические) (Окончание)

$\|\mu(F_z, F_x)\|$  на основе исходных структур  $\|\mu(e_s, e_q)\|$  и  $\eta_F(TC_d, TC_g)$  и значений элементов промежуточных структур на множестве транспортных средств по каждому критерию  $\|\eta(TC_d, TC_g)\|$  на основе исходных структур  $\|\mu(e_s, e_q)\|$  и  $\|\eta_e(TC_d, TC_g)\|$ .

Определение значений элементов итоговой структуры предпочтений на множестве транспортных средств  $\eta$  ( $TC_d$ ,  $TC_g$ ) позволит осуществить выделение множества недоминируемых транспортных средств и произвести расчет значений функции принадлежности каждого транспортного средства к подмножеству предпочтительных  $\varphi_{\text{нп}}(TC_u)$ . Реализация данных процедур позволит получить слоевую структуру упорядочивания транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината.

Разработанный механизм, базирующийся на результатах моделирования решения задачи выбора транспортных средств по их технической готовности (технические критерии), организационной обеспеченности (организационные критерии) и экономической эффективности (рыночные, экономические критерии) позволил осуществить ранжирование (слоевое упорядочивание) транспортных средств для эффективной перевозки готовой продукции комбината. Результатом решения задачи выбора на основе сформированной совокупности оценочных критериев и определения размеров вреда от превышения допустимых осевых нагрузок и от превышения значений допустимой массы грузовика, в качестве приоритетных транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината были определены следующие варианты: пятиосный автопоезд в составе двухосного седельного тягача с колесной формулой 4x2 и трехосного полуприцепа («еврофура»); шестиосный автопоезд в составе трехосного седельного тягача и трехосного полуприцепа; самосвальный автопоезд в составе двухосного седельного тягача с колесной формулой 4x2 и трехосного полуприцепа.

На следующем этапе исследования были формализованы постановки оптимизационных задач для различных условий функционирования транспортно-логистической системы комбината.

На первом этапе моделирования происходит формирование маршрутов с учётом времени и расстояния до точки доставки, а также вариантов используемого транспортного средства. Каждый маршрут может иметь несколько точек доставки, а каждая точка доставки может быть включена в различные маршруты. На основании данной информации заполняется план объемов продаж и календарный график поставок готовой продукции предприятия. При этом должно выполняться условие, что в одну точку доставки может быть одновременно отгружено более одного продукта, а в одном маршруте может быть несколько точек доставки. Если в одном маршруте имеется несколько точек доставки, то расчет производительности производится для максимального плеча доставки, так как транспортное средство посетит все точки доставки по маршруту вне зависимости от распределения объемов на промежуточных точках доставки.

На основе составления графика поставок рассчитывается необходимое количество рейсов в периоды с наличием сезонных ограничений и в периоды без ограничений. На основе определения количества рейсов рассчитывается

количество транспортных средств, необходимое для выполнения рейсов в периоды без ограничений и в период с сезонными ограничениями. При этом производятся отдельные вычисления количества транспортных средств для подачи на загрузку и количества транспортных средств, находящихся в обороте. Количество транспортных средств в обороте отличается тем, что рейсы на длинные расстояния с продолжительностью более суток учитываются как занятые работой на каждый день до момента возвращения транспортных средств на предприятие, что позволяет произвести оценку парка транспортных средств, требуемого для выполнения всех поставок готовой продукции. На основе расчета количества рейсов и их протяженности (плеча доставки) вычисляются затраты на доставку для каждой точки доставки по каждому произведенному рейсу соответственно. Если в рейсе присутствует несколько точек доставки, то затраты рейса распределяются на каждую точку доставки в зависимости от расстояния и тоннажа перевозки.

В такой постановке транспортной задачи появляется возможность группировки затрат на логистические процессы по точкам доставки, потребителям и виду перевозимой продукции. Таким образом, получаем себестоимость доставки продукции предприятия в необходимых разрезах (точка доставки, вид продукции, транспортное средство). Смоделированные данные позволяют определить потребность в погрузоразгрузочных фронтах в зависимости от тоннажа в графиках отгрузок и нормативной производительности каждого места погрузки. Кроме того, в результате моделирования появляется новая потенциальная возможность выявления необходимых потребностей в складских площадях в зависимости от производительности и графика работы производства, графика отгрузок и взаимосвязи складов и продуктов на каждом этапе производственного потока, определяющего объемы отгрузки готовой продукции (влажный песок, бункера, склады МКР). Также возможно произвести прогнозную оценку потребности в дополнительных складских площадях под МКР и осуществить оценку инвестиций (при необходимости) в строительство нового склада под МКР.

В исходной постановке для перевозки готовой продукции комбината используется несколько типов транспортных средств, которые возможно использовать на различных по своим характеристикам маршрутам доставки, а также система ограничений (в том числе и сезонных) при перевозке грузов определенными транспортными средствами. Количество используемых транспортных средств каждого типа и его транспортно-логистические показатели на каждом маршруте доставки позволяют осуществить расстановку определенных типов транспортных средств по маршрутам доставки, которая обеспечивает либо минимизацию затрат (денежных или временных) на выполнение заданного объема перевозок, либо максимизацию объемов перевезенной продукции. Соответственно в качестве критериев оптимальности функционирования транспортно-логистической системы комбината могут выступать затраты (денежные или

временные) или объемы перевезенной продукции (в натуральном или денежном эквиваленте).

В первой постановке оптимизационной задачи необходимо так распределить транспортные средства по маршрутам доставки, чтобы общее время работы для выполнения всего объема перевозки было минимальным.

За критерий оптимальности примем общее время выполнения всего заданного объема перевозок ( $Z$ ). Общее время работ складывается из времени транспортировки грузов каждого вида транспортного средства  $i$  на всех участках  $j$  и выражается следующей целевой функцией задачи (10):

$$Z = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  – типы используемых транспортных средств;

$j = 1, 2, \dots, m$  – маршруты доставки;

$x_{ij}$  – объемы перевозки продукции  $i$ -м транспортным средством на  $j$ -м маршруте;

$\text{Пр}_{ij}$  – производительность  $i$ -го транспортного средства на  $j$ -м маршруте.

При решении оптимизационной задачи (10) должны выполняться следующие ограничения (11)-(13):

– по выполнению планового объема перевозок на каждом маршруте доставки:

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_{ij} = \text{ПО}_j, \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (11)$$

где  $\text{ПО}_j$  – плановый объем перевозок на  $j$ -м маршруте.

– по имеющемуся временному ресурсу транспортных средств (количеству транспортных средств):

$$\sum_{j=1}^{j=m} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} \leq \text{ВР}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

где  $\text{ВР}_i$  – временной ресурс транспортного средства  $i$ -го типа.

– по положительности решения задачи:

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Модель данной задачи с управляемыми переменными  $T_{ij}$  – время работы  $i$ -го транспортного средства на  $j$ -м маршруте имеет вид (14):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} T_{ij} \rightarrow \min, \quad (14)$$

при ограничениях (15)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=n} T_{ij} \text{Пр}_{ij} &= \text{ПО}_j, (j = 1, 2, \dots, m); \\ \sum_{j=1}^{j=m} T_{ij} &\leq \text{ВР}_i, (i = 1, 2, \dots, n); \\ x_{ij} &\geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (15)$$

Разработанные модели являются линейными и относятся к классу задач дискретного (целочисленного) линейного программирования, так как на определенном маршруте доставки может находиться только целое количество единиц транспортных средств.

Кроме того, при доставке грузов по различным маршрутам стоимость 1 машино-часа различных типов транспортных средств существенно отличается и равна  $C_i$ . В такой постановке в качестве критерия оптимальности возможно использовать суммарные затраты на перевозку всего объема продукции (16):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} C_i \rightarrow \min; \quad \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} T_{ij} C_i \rightarrow \min. \quad (16)$$

При решении задачи в данной постановке возможны варианты, когда при выполнении заданного объема перевозок нет необходимости использовать все имеющиеся в наличии транспортные средства. В этой связи уместно определять оптимальное распределение транспортных средств по маршрутам доставки, принимая в качестве критерия оптимальности не затраты (временные или денежные), а объемы перевезенной продукции предприятия (в натуральном или денежном эквиваленте), которые соответственно необходимо максимизировать (17):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} x_{ij} \rightarrow \max. \quad (17)$$

Ограничения имеют вид (18)-(20):

– по выполнению минимально необходимого объема перевозки на маршруте:

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_{ij} \geq \text{ПО}_j, (j = 1, 2, \dots, m). \quad (18)$$

– по имеющемуся временному ресурсу транспортных средств (количеству транспортных средств):

$$\sum_{j=1}^{j=m} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} \leq \text{ВР}_i, (i = 1, 2, \dots, n). \quad (19)$$

– по положительности решения задачи:

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (20)$$

В представленных моделях объемы перевозки грузов и грузоподъемности автосамосвалов на различных маршрутах доставки равноценны. Однако в ряде случаев бывает эффективнее изменить (увеличить) объемы поставок на отдельных маршрутах с использованием определенных транспортных средств, либо необходимо пропорционально (в месте и времени) сформировать план поставок между участниками транспортно-логистической цепи. В этом случае модель задачи необходимо трансформировать исходя из введенных дополнительных условий функционирования транспортно-логистической системы.

При наличии у предприятия автосамосвалов различной грузоподъемности, обслуживающих несколько маршрутов доставки, эффективная производительность доставки продукции будет зависеть от типа транспортного средства и маршрута (плеча доставки, характеристики и ограничений автодорог) доставки груза. В такой постановке имеющиеся в наличии транспортные средства необходимо распределить по маршрутам таким образом, чтобы максимизировать общий объем перевозок, соблюдая установленные соотношения объемов доставки между маршрутами.

Критерием оптимальности в данной постановке принимаем суммарный объем перевозки грузов в транспортно-логистической системе, который позволит достичь наиболее производительной работы автосамосвалов и, в свою очередь, снизить как суммарные, так и удельные затраты на перевозку готовой продукции комбината. В случае необходимости учета уровня значимости (приоритетности) определенных маршрутов и необходимости соблюдения соотношений объемов доставки грузов, определяемых плановыми условиями перевозок, возможно ввести коэффициент приоритетности  $j$ -го маршрута доставки  $K_j$ , соответственно, для всех маршрутов транспортно-логистической системы предприятия  $\sum_{j=1}^{j=m} K_j = 1$ . В такой постановке целевая функция решения задачи имеет вид (21):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} x_{ij} K_j \rightarrow \max. \quad (21)$$

Ограничения имеют вид (22)-(23):

– по количеству имеющихся в наличии транспортных средств

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} \leq N_i, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (22)$$

где  $N_i$  – количество транспортных средств  $i$ -го типа.

по соблюдению установленного соотношения объемов поставок между маршрутами

$$\frac{\sum_{j=1}^{j=m} x_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} x_{ij}} = V_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (23)$$

где  $V_j$  – отношение объемов перевозок по  $j$ -му маршруту к общему объему доставки грузов.

Дальнейшее моделирование производилось в разрезе двух сценариев плана продаж готовой продукции предприятия. Перечень потребителей и география поставок в сценариях отличаются ввиду разветвленной сети конечных потребителей и различной удаленности транспортно-логистических терминалов.

Сценарий «АВТО» предполагает доставку всего объема выпускаемой продукции потенциальным потребителям исключительно автомобильным транспортом.

Сценарий «ГЛТ» (транспортно-логистический терминал) предполагает доставку продукции потребителям автомобильным и железнодорожным транспортом через транспортно-логистические терминалы.

Для моделирования по сценарию «АВТО» возможно использовать традиционную постановку и модель многопродуктовой транспортной задачи, которая распадается на независимые однопродуктовые транспортные задачи в зависимости от количества видов выпускаемой продукции. При этом однопродуктовую транспортную задачу необходимо решить еще и для каждого тип транспортного средства, используемого для перевозки готовой продукции предприятия.

Суммарные транспортные затраты (ТЗ) будут выражены в виде (24):

$$\text{ТЗ} = \sum_{z=1}^{z=q} \sum_{g=1}^{g=f} \langle c_{zg}, v_{zg} \rangle \rightarrow \min, \quad (24)$$

где  $c_{zg}$  - стоимость перевозки единицы груза из  $z$ -го пункта погрузки в  $g$ -ю точку,  $p_z = (p_{z1}, p_{z2}, \dots, p_{zn})$ ;

$n$  – количество видов производимой продукции (концентраты, фракционные пески, пески для стекольной промышленности);

$v_{zg}$  - объем перевозок из  $z$ -го пункта в  $g$ -й,  $v_{zg} = (v_{zg1}, v_{zg2}, \dots, v_{zgn})$ ;

$q$  – количество пунктов хранения и погрузки (погрузочные терминалы обогатительной фабрики);

$f$  – количество точек доставки (потребители продукции предприятия).

В случае, если перевозимые продукты являются независимыми (не взаимозаменяемыми), то система ограничений в задаче будет иметь вид (25):

$$\sum_{g=1}^{g=f} v_{zg} = p_z, \text{ где } z = \overline{1, q}, \quad \sum_{z=1}^{z=q} v_{zg} = l_g, \text{ где } g = \overline{1, f}, v_{zg} \geq 0, \quad (25)$$

где  $p_z$  - объем погрузки в  $z$ -м пункте,  $p_z = (p_{z1}, p_{z2}, \dots, p_{zn})$ ;

$l_g$  - объем потребления в  $g$ -й точке доставки,  $l_g = (l_{g1}, l_{g2}, \dots, l_{gn})$ .

Для моделирования по сценарию «ТЛТ» возможно использовать формальную постановку многопродуктовой транспортной задачи с промежуточными пунктами, когда имеются пункты хранения и погрузки готовой продукции, промежуточные пункты в виде транспортно-логистических терминалов и конечные точки доставки разнородной продукции предприятия за определенный момент времени. При этом задается комплекс ограничений, связанных с хранением и погрузкой, потреблением в конечной точке доставки и потенциальными возможностями перевозки продукции определенным типом транспортного средства с учетом особенностей перевалки в промежуточных пунктах доставки. В данной задаче необходимо определить оптимальные объемы отгрузки готовой продукции предприятия за определенные промежутки времени, которые бы удовлетворяли заданной системе ограничений и были эффективными с точки зрения традиционных критериев (стоимостных и временных) транспортной задачи.

Формализованная постановка многопродуктовой транспортной задачи с промежуточными пунктами (26) может быть представлена как задача оптимизации (максимизации)  $x_{ijkst}$  – количество продукта  $s$ , которое должно быть отгружено и перевезено из пункта  $i$  через транспортно-логистический терминал  $j$  в конечную точку доставки (потребителю)  $k$  в момент времени  $t$ ,  $i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T$  :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{ijkst} \rightarrow \max, \quad (26)$$

где  $I$  – множество пунктов отгрузки готовой продукции комбината;

$J$  – множество транспортно-логистических терминалов в системе;

$K$  – множество конечных точек доставки (потребителей продукции);

$S$  – множество видов отгружаемой продукции;

$T$  – временные интервалы планирования отгрузки и доставки грузов в конечные точки.

Двусторонние ограничения модели (26) будут иметь вид (27)-(31):

-ограничения на общий объем хранения и отгрузки готовой продукции предприятия :

$$V^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{ijkst} \leq V^+, \quad (27)$$

где  $V^-$  и  $V^+$  - минимально и максимально возможные объемы перевозимой продукции, для которых выполняется следующее условие  $0 \leq V^- \leq V^+$ .

– ограничения на объемы каждого вида перевозимой продукции в заданные временные интервалы планирования перевозок:

$$M_{st}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkst} \leq M_{st}^+, s \in S, t \in T, \quad (28)$$

где  $M_{st}$  – минимальный объем продукции  $s$ , который должен быть перевезен в единицу времени  $t$ .

– ограничения на объемы, которые могут быть перевезены из транспортно-логистических терминалов в заданные интервалы планирования:

$$P_{jt}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq P_{jt}^+, j \in J, t \in T, \quad (29)$$

где  $P_{jt}^-$  и  $P_{jt}^+$  - минимально и максимально возможные объемы отгруженной продукции, которые могут быть перевезены в промежуточный пункт (транспортно-логистический терминал)  $j$  в момент времени  $t$ ,  $0 \leq P_{jt}^- \leq P_{jt}^+$ .

– ограничения на объемы по каждому виду отгружаемой продукции в погрузочных терминалах обогатительной фабрики в заданные интервалы планирования [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$0 \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkst} \leq G_{ist}, i \in I, s \in S, t \in T, \quad (30)$$

где  $G_{ist}$  – максимальный объем продукции  $s$ , который может быть отгружен пунктом  $i$  в момент времени  $t$ .

– ограничения на объемы продукции, которые могут быть перевезены из пункта хранения и погрузки через транспортно-логистический терминал в конечную точку доставки потребителю в заданные интервалы планирования:

$$Q_{ijkt}^- \leq \sum_{s \in S} x_{ijkst} \leq Q_{ijkt}^+, i \in I, j \in J, k \in K, t \in T, \quad (31)$$

где  $Q_{ijkt}$  – минимальный объем продукции, который должен быть перевезен из пункта погрузки  $i$  через транспортно-логистический терминал  $j$  в пункт потребления  $k$  в момент времени  $t$ .

Транспортно-логистический терминал в определенный момент времени планирования перевозок не может вместить больше груза, чем объемы перевозки за предыдущий момент времени (32):

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{ijkst} \geq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{ijkst+1}, j \in J, t \in T; \quad (32)$$

по положительности получаемого решения

$$0 \leq x_{ijkst} \leq V^+, i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, t \in T.$$

При этом

$$M_{st}^- = M_{st}^{\square}, M_{st}^+ = V^+, s \in S, t \in T; Q_{ijkt}^- = Q_{ijkt}^{\square}, Q_{ijkt}^+ = V^+, \\ i \in I, j \in J, k \in K, t \in T; G_{ist}^+ = G_{ist}^{\square}, i \in I, s \in S, t \in T,$$

исходя из приведенных условий может быть построена транспортная сеть с двусторонними пропускными способностями дуг и использованы методы решения потоковых задач, в частности алгоритмы поиска потока минимальной стоимости и максимального потока производительности сети.

Для моделирования основных технико-экономических показателей перевозки готовой продукции комбината в рамках сценариев «АВТО» и «ТЛТ» были исследованы взаимосвязи и сформирована структура базы данных.

По каждому из вариантов реализации сценария «АВТО» произведен расчет основных технико-экономических показателей. Критерием оптимальности по результатам моделирования являлась годовая итоговая стоимость доставки готовой продукции комбината

Итоговое сравнение моделей сценариев «Авто-21» и «ТЛТ-21» (таблица 1) проводилось с акцентом на экономические (стоимостные) показатели доставки готовой продукции комбината на базе статистических индексов темпов роста и прироста. В качестве базы для сравнения были использованы стоимостные показатели сценария «ТЛТ-21»

$$T_{\text{пр.} \square}^{\square} = \frac{\Pi^{\text{«АВТО»}} - \Pi^{\text{«ТЛТ»}}}{\Pi^{\text{«ТЛТ»}}} 100\%, T_{\text{р.} \square}^{\square} = \frac{\Pi^{\text{«АВТО»}}}{\Pi^{\text{«ТЛТ»}}} 100\%.$$

По итогам сравнения результатов моделирования по сценариям «Авто-21» и «ТЛТ-21» экономически целесообразным считается вариант «Авто-21». Несмотря на то, что стоимость доставки по сценарию «Авто-21» на 2,45% выше ( $T_{\text{пр.}} = 2,45$ ), общая стоимость логистики на 5,09% ниже за счет отсутствия затрат на содержание ТЛТ и стоимости провоза продукции по путям общего пользования. При этом ежегодные затраты по сценарию «Авто-21» ниже затрат по сценарию «ТЛТ-21» на 24,1 млн. руб. без НДС.

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов моделирования вариантов реализации сценариев «АВТО» и «ТЛТ»

Параметры моделирования	Авто 21	ТЛТ 21	Т <sub>пр.</sub> * Т <sub>р.</sub> **	Т <sub>р.</sub> **
	Вариант (1)	Вариант (5)		
Стоимость доставки, руб./год без НДС	323 868 808	316 122 143	<b>2,45</b>	<b>102,45</b>
Стоимость содержания склада, руб./год без НДС	19 800 000	19 800 000		
Стоимость содержания ТЛТ, руб./год без НДС	-	<b>84 530 000</b>		
Стоимость амортизации ОС ТЛТ, руб./год без НДС	-	<b>25 570 000</b>		
Стоимость проезда по путям общего пользования, руб./год без НДС	-	<b>15 870 336</b>		
Стоимость МКР, руб. без НДС	105 425 280	11 306 304	<b>832,18</b>	<b>932,18</b>
<i>ИТОГО, стоимость логистики доставки готовой продукции потребителям, руб. в год с НДС</i>	449 094 088	473 198 783	<b>-5,09</b>	<b>94,9</b>
<i>НДС 20%, руб. в год</i>	89 818 818	94 639 757	<b>-5,07</b>	
<i>ИТОГО, стоимость логистики доставки готовой продукции потребителям, руб. в год без НДС</i>	538 912 905	567 838 540	<b>-5,09</b>	<b>94,9</b>
<i>ИТОГО(без НДС)«ТЛТ» - ИТОГО(без НДС «АВТО»)</i>	<b>24 104 696</b>			
<i>ИТОГО(с НДС)«ТЛТ» - ИТОГО(с НДС «АВТО»)</i>	<b>28 925 635</b>			
$T_{пр.}^* = \frac{П_{"АВТО"} - П_{"ТЛТ"}}{П_{"ТЛТ"}} 100\%, T_{р.}^{**} = \frac{П_{"АВТО"}}{П_{"ТЛТ"}} 100\%.$				

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований дано решение актуальной научной и практической задачи, заключающейся в повышении эффективности управления и надежности функционирования транспортно-логистической системы комбината на основе совершенствования процедур оперативного управления погрузочно-разгрузочными процессами и поиска оптимальных показателей транспортировки готовой продукции.

1. Статистический анализ основных технико-технологических показателей зон хранения и мест погрузки готовой продукции комбината позволил определить для каждой зоны взаимосвязи времени загрузки одного автомобиля от скорости загрузки для различных вариантов грузоподъемности выделяемых под погрузку транспортных средств в диапазоне от 10 до 41 т и выделить на промышленной площадке зоны эффективной и неэффективной загрузки.

2. Разработаны подходы к определению вероятности возникновения риска отгрузки произведенной продукции (безотказной работы погрузочных терминалов), произведен анализ основных рисковых показателей, построена матрица рисков и осуществлено ранжирование рисков для соответствующих зон хранения и мест погрузки готовой продукции в транспортно-логистическом терминале комбината, дифференцированных по номенклатуре производимой продукции, способам отгрузки и размеру фракции сыпучей массы песков.

3. Решена задача выбора транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината в рамках которой было сформировано: исходное множество альтернативных вариантов транспортных средств; совокупность оценочных критериев для оценки эффективности перевозки готовой продукции (технические, организационные, экономические, размеры вреда от превышения допустимых осевых нагрузок и от превышения значений допустимой массы для различных типов транспортных средств); структура предпочтений оценочных критериев для определенного типа транспортных средств. В результате проведенного исследования была реализована процедура слоевого упорядочивания исходного множества транспортных средств для перевозки готовой продукции комбината на сформированном множестве оценочных критериев.

4. Были формализованы и найдены численные решения транспортной задачи перевозки готовой продукции комбината для различных критериев оптимальности. В качестве альтернативных целевых функций выступали объемы перевозок, время работы транспортного средства, а также суммарные затраты на транспортировку всего объема продукции. При реализации процедур моделирования были учтены условия неполного использования парка транспортных средств и уровня значимости (приоритетности) определенных маршрутов доставки готовой продукции потребителям.

1. Для оценки эффективности функционирования транспортно-логистической системы комбината были сформированы исходные множества входных и результирующих технико-экономических показателей, а также сформированы сценарии реализации плана перевозки готовой продукции. Сценарии «АВТО» предполагают перевозку готовой продукции комбината только автомобильным транспортом, а сценарии «ТЛТ» - автомобильным и железнодорожным транспортом с участием транспортно-логистических терминалов.

2. Для моделирования по сценарию «АВТО» была формализована многопродуктовая транспортная задача для имеющегося в наличии парка транспортных средств, а также пунктов отгрузки и доставки готовой продукции. Для моделирования по сценарию «ТЛТ» была формализована многопродуктовая транспортная задача с промежуточными пунктами в виде транспортно-логистических терминалов и конечными пунктами доставки объемов разнородной продукции за определенный временной интервал. Поиск оптимальных решений данной задачи базировался на использовании методов анализа транспортных сетей

с двусторонними пропускными способностями дуг и заключался в определении потоков минимальной стоимости и максимальной производительности транспортной сети.

7. Проведенный регрессионный анализ взаимосвязей необходимого количества транспортных средств от количества реализованных рейсов позволил определить количественные соотношения парков арендованных и собственных транспортных средств, выполняемых рейсы по перевозке готовой продукции комбината в условиях осенне-весенних ограничений и в период нормального функционирования транспортно-логистических процессов.

**Основные положения диссертационной работы изложены в следующих опубликованных работах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России**

1. **Алмунтафеки А.Ф.М.** Моделирование риска отгрузки готовой продукции на основе оптимизации параметров производительности буферных емкостей промышленной площадки комбината // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т.12. – № 3(63). – С. 72-78. EDN: NEHMCF; eLIBRARY ID: 54514039; [https://vek21.penzgtu.ru/wp-content/uploads/2023/09/2023\\_63.pdf](https://vek21.penzgtu.ru/wp-content/uploads/2023/09/2023_63.pdf); <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54514039>, (ВАК 2023, п. 127);
2. **Алмунтафеки А.Ф.М.** Модели формирования структуры предпочтений и решения задачи выбора оптимальных параметров транспортно-логистической системы перевозки готовой продукции // «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2023. - №9(2). – С. 52-57. DOI 10.37882/2223-2982.2023.9-2.02. <http://www.nauteh-journal.ru/files/bf049aee-27da-4773-8e80-e172729b444b>, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55849177> (ВАК 2023, п.2291);
3. Аль-Саиди А.А., Темкин И.О., Алтай В.И., **Алмунтафеки А.Ф.**, Мохедхуссин А.Н. Повышение эффективности алгоритма Дейкстры с помощью технологий параллельных вычислений с библиотекой OpenMP // Инженерный вестник Дона. – 2023. - №8(104). – С. 90-105. EDN: PUCAEP; eLIBRARY ID: 54724882; <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8595>; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54724882>, (ВАК 2023, п. 1245);
4. Гончаренко С.Н., **Алмунтафеки А.Ф.М.** Моделирование параметров грузоперевозки на основе бенчмарк-анализа рынка транспортных компаний // Инженерный вестник Дона. – 2024. - №3. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9063> (ВАК 2023, п. 1245);
5. Гончаренко С.Н., **Алмунтафеки А.Ф.М.** Моделирование распределения продукции промышленного предприятия в иерархических транспортно-логистических системах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2024.- №3. – С.7-18. (ВАК 2023, п. 773).