

УДК 656.02

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕГРУЗОК НА АВТОДОРОЖНЫХ ТЕРМИНАЛАХ**

**Вакуленко С.П.**

*к.т.н., профессор,  
Российский университет транспорта,  
Москва, Россия*

**Пересветов Ю.В.**

*к.т.н., доцент,  
Российский университет транспорта,  
Москва, Россия*

### **Аннотация**

В статье рассматривается и решается проблема сокращения затрат при перегрузке контейнеров на автомобильном терминальном комплексе при заданной интенсивности поступления контейнеровозов на вход терминала. Процесс поступления контейнеровозов на вход терминала и перегрузок контейнеров формализован моделью Эрланга. В результате получена формула оценки оптимального значения интенсивности перегрузок контейнеров при котором входящий поток контейнеровозов с заданной интенсивностью будет обслуживаться контейнерными перегружателями терминала с минимальной интенсивностью суммарных затрат, что в свою очередь позволит заинтересованным лицам принимающих управленческие решения организовать оптимальный режим работы контейнерных перегружателей и их оптимальное количество, а также оптимизировать инфраструктуру терминала. Также получена экстремаль функциональной зависимости оптимального значения интенсивности перегрузок от интенсивности потока контейнеровозов, которая может быть полезна проектировщикам автомобильных терминалов для предварительной оценки оптимальных перегрузочных мощностей и размеров площадок размещения контейнеров и техники.

**Ключевые слова:** автомобильный терминальный комплекс, контейнерные перегрузки, контейнеровоз, контейнерный перегружатель, модель Эрланга, интенсивность входного потока, интенсивность перегрузок, интенсивность суммарных затрат, оптимальная экстремаль.

## **OPTIMIZATION OF CONTAINER TRANSSHIPMENT AT ROAD TERMINALS**

**Vakulenko S.P.**

*PhD, professor,*

*Russian University of Transport,  
Moscow, Russia*

**Peresvetov Yu.V.**  
*PhD, Associate professor,  
Russian University of Transport,  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

The article discusses and solves the problem of reducing costs when reloading containers at an automobile terminal complex at a given rate of arrival of container ships at the terminal entrance. The process of container ships entering the terminal and reloading containers is formalized by the Erlang model. As a result, a formula was obtained for estimating the optimal value of container transshipment intensity, at which the incoming flow of container ships with a given intensity will be serviced by the terminal's container transporters with a minimum intensity of total costs, which in turn will allow interested management decision makers to organize the optimal operating mode of container transporters and their optimal number, as well as optimize the terminal infrastructure. We also obtained an extreme functional dependence of the optimal overload intensity on the intensity of the container ship flow, which may be useful to designers.

**Keywords:** automobile terminal complex, container transshipment, container ship, container loader, Erlang model, input flow intensity, overload intensity, total cost intensity, optimal extreme.

### **Введение**

Динамические изменения организационно-правовых условий бизнеса в стране, усиление интеграционных процессов в экономике, повышение требований к качеству продукции и услуг при сокращении суммарных затрат на организацию производства, перевозок, хранения и распределения продукции убедительно свидетельствуют о том, что только эффективное управление взаимодействием различных видов транспорта при мультимодальных перевозках в цепях поставок, включая перевалочные пункты, способно обеспечить конкурентоспособную доставку грузов по принципу «от двери до двери» [5, 7]. Контейнерные перевозки наилучшим образом соответствуют этим условиям, поскольку позволяют максимально механизировать и

стандартизировать процесс перегрузок в перевалочных пунктах, что способствует существенному повышению экономической эффективности интермодальных перевозок [4, 6].

В статье представлен анализ процесса перегрузок контейнеровозов на контейнерные площадки автомобильного перевалочного узла и синтез оптимальных управленческих рекомендаций.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данного исследования является оптимизация перегрузочного процесса на автомобильном перегрузочном терминале по критерию минимизации интенсивности полных затрат при заданной интенсивности потока контейнеровозов на вход терминала. Для этого были решены следующие задачи:

- анализ с использованием математического аппарата теории массового обслуживания [1] процесса перегрузок контейнеровозов на контейнерные площадки автомобильного перевалочного узла и обратно;
- определение функции интенсивности полных затрат при организации перегрузочного процесса;
- исследование функции полных затрат на экстремум и минимум;
- определение формулы оценки оптимальной точки функции интенсивности полных затрат;
- определение экстремали, как функции точки оптимальности от интенсивности потока контейнеровозов;
- оценка оптимальной вместимости площадки терминала, предназначенной для контейнеровозов.

### **Основная часть**

Инфраструктура перевалочного процесса представлена на рисунке 1.



Рис. 1 – Перегрузочный терминал  
(авторская разработка)

Контейнеровозы по мере поступления заезжают на терминал и выстраиваются для перегрузки согласно представленной схеме (см. рис. 1). Контейнерные перегружатели согласно правилу: «первый пришел – первый обслуживается», организуют перегрузку контейнеров через контейнерную площадку. Обслуженные контейнеровозы покидают терминал.

Контейнеровозы на терминал прибывают от многих грузоотправителей и по многим направлениям, моменты их прибытия не могут быть точно определены заранее, поскольку имеется огромное количество случайных причин, в силу которых невозможно определить детерминированный график их прихода; т.е. поток контейнеровозов на вход терминала носит случайный характер [8, 9].

Кроме того, поскольку движение контейнеровозов по автодорогам от различных грузоотправителей не зависит друг от друга, то можно предположить, что момент появления каждого контейнеровоза на входе терминала не зависит от моментов появления контейнеровозов в прошлом; т.е. входной случайный поток контейнеровозов на вход терминала является потоком без последствия.

Также в реальности вероятность появления одновременно двух и более контейнеровозов на входе терминала ничтожно мала.

В силу вышеперечисленных факторов возможно входной поток контейнеровозов формализовать как пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda$ , где  $\lambda$  – среднее количество контейнеровозов, прибывших на вход терминала в заданный период времени.

Необходимо отметить, что при организации перегрузочных работ на терминале наблюдается значительный разброс длительности погрузочно-разгрузочных операций контейнерных перегружателей при обслуживании каждого контейнеровоза. Это обусловлено как субъективными, так и объективными причинами: погодные условия, квалификация водителей контейнерных перегружателей, различным местоположением необходимых при перегрузке контейнеров на контейнерной площадке [10].

Поскольку эти причины носят случайный характер, то и длительность обслуживания каждого контейнеровоза тоже случайная величина, причем в силу множественности независимых случайных факторов влияния распределенная по экспоненциальному закону с интенсивностью  $\mu$ , где  $\mu$  - среднее количество обслуженных контейнеровозов в заданный период времени.

Кроме того, представленная на рис. 1 инфраструктура терминала по сути является одноканальной, поскольку при заданной дисциплине очереди: «первым пришел – первым обслужен», контейнеровозы не распределяются строго по контейнерным перегружателям (каналам обслуживания), а наоборот контейнерные перегружатели распределяются по контейнеровозам в очереди.

Согласно вышеуказанным свойствам входящего потока контейнеровозов, каналов обслуживания и дисциплине очереди данная система массового обслуживания является системой  $(M/M/1)$  [3]; т.е.:

- входящий поток требований пуассоновский с интенсивностью  $\lambda$ ;
- длительность обслуживания распределена по экспоненциальному закону с интенсивностью  $\mu$ ;
- дисциплина очереди: «первым пришел – первым обслужили»;

- один канал обслуживания.

Основные характеристики такой системы позволяет оценить *модель Эрланга*:

$\rho$  - параметр устойчивости системы ( $M/M/1$ ):  $\rho = \lambda/\mu < 1$ ; поскольку если  $\rho \geq 1$ , то очередь контейнеровозов растет в бесконечность и система входит в неустойчивое состояние и теряет практический смысл.

$L = \rho/(1-\rho)$  – оценка среднего количества контейнеровозов на терминале.

$L_g = \rho^2/(1-\rho)$  – оценка средней длины очереди контейнеровозов, ожидающих обслуживания.

$W_g = \lambda/(\mu^2 - \lambda\mu)$  - оценка среднего времени ожидания контейнеровоза в очереди.

Математическая модель Эрланга дает возможность оценить средние временные потери от простоя контейнеровозов в очереди в заданный период времени ( $W$ ):

$$W = W_g \mu = \lambda/(\mu - \lambda) \quad (1)$$

Введем обозначения:

$C_1$  – денежные потери от простоя контейнеровоза в заданный период времени,

$C_2$  – эксплуатационные расходы при перегрузке контейнера.

Тогда суммарные затраты в заданный период времени (интенсивность затрат)  $C(\lambda, \mu)$  оценивается по формуле:

$$C(\lambda, \mu) = C_1 W + C_2 \mu = C_1 \lambda/(\mu - \lambda) + C_2 \mu \quad (2)$$

При заданной постоянной интенсивности потока контейнеровозов на вход грузового двора ( $\lambda_{const}$ ) формула (2) дает возможность определить оптимальное значение интенсивности перегрузок контейнеров ( $\mu^*$ ) на терминале контейнерными перегрузчиками, т.е. такое значение  $\mu^*$  при котором входящий поток контейнеровозов с заданной интенсивностью  $\lambda_{const}$  будет обслуживаться

контейнерными перегружателями терминала с минимальной интенсивностью суммарных затрат, т.е.:

$$C(\mu) = C_1 \lambda / (\mu - \lambda_{const}) + C_2 \mu \rightarrow \min \quad (3)$$

Объективная реальность указывает на то, что ОДЗ:  $\lambda_{const} \in (0, \infty)$ , а условие устойчивости модели Эрланга указывает на то, что ОДЗ:  $\mu \in (\lambda_{const}, \infty)$ .

Для определения точки  $\mu^*$  найдем экстремум функции  $C(\mu)$ , а затем проверим его на минимум.

Поиск экстремума гладкой функции  $C(\mu)$  по ее первой производной:

$$\begin{aligned} C'(\mu) &= -C_1 \lambda_{const} / (\mu - \lambda_{const})^2 + C_2 \\ &=> -C_1 \lambda_{const} / (\mu - \lambda_{const})^2 + C_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Решим уравнение (4) относительно  $\mu$  методом пропорций:

$$C_1 \lambda_{const} / (\mu - \lambda_{const})^2 = C_2 \Rightarrow C_1 = C_2 \lambda_{const} (\mu - \lambda_{const})^2 \Rightarrow \mu - \lambda_{const} = \sqrt{\lambda_{const} C_1 / C_2}$$

$\Rightarrow$  точка экстремума гладкой функции  $C(\mu)$  определяется как:  
 $\mu = \lambda_{const} + \sqrt{\lambda_{const} C_1 / C_2}$ .

Проверим точку экстремума на минимум гладкой функции  $C(\mu)$  по знаку ее второй производной:

$C''(\mu) = C_1 \lambda_{const} / (\mu - \lambda_{const})^3 > 0$ , отсюда следует, что оптимальное значение интенсивности перегрузок контейнеров  $\mu^*$ , при котором входящий поток контейнеровозов с заданной интенсивностью  $\lambda_{const}$  будет обслуживаться контейнерными перегружателями терминала с минимальной интенсивностью суммарных затрат  $C(\mu)$ , определяется по формуле:

$$\mu^* = \lambda_{const} + \sqrt{\lambda_{const} C_1 / C_2} \quad (5)$$

Знание численного значения  $\mu^*$  позволит заинтересованным лицам принимающим управленческие решения при известной интенсивности входного потока контейнеровозов  $\lambda_{const}$  организовать оптимальный режим работы контейнерных перегружателей, а также оптимальное их количество.

Кроме того, формула (5) и модель Эрланга позволяют предварительно оценить среднее количество контейнеровозов на территории терминала ( $L^*$ ), ожидающих в очереди на перегрузку плюс находящихся в процессе перегрузки, при оптимальной организации перевалочных работ:

$$L^* = \rho^*/(1-\rho^*) = \lambda_{const}/(\mu^* - \lambda_{const}) = \lambda_{const} / \sqrt{\lambda_{const} C_1/C_2} \quad (6)$$

Необходимо отметить, что случайная величина количества контейнеровозов на терминале в модели Эрланга распределена по закону Пуассона, отсюда следует, что площадка для гарантированного размещения на терминале контейнеровозов, ожидающих перегрузку и находящихся в процессе перегрузки, должна вмещать  $L^* + 3\sqrt{L^*}$  контейнеровозов [2].

Формула (5) дает возможность получить оптимальную экстремаль, как функцию  $\mu^*(\lambda)$ :

$$\mu^*(\lambda) = \lambda + \sqrt{\lambda C_1/C_2} \quad (7)$$

График этой функции представлен на рисунке 2.

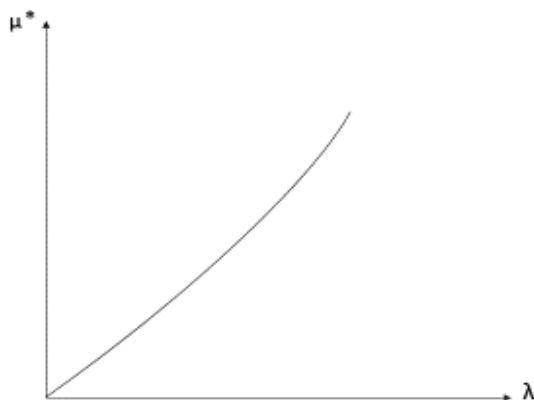


Рис. 2 – Оптимальная экстремаль  
(авторская разработка)

Эта экстремаль может быть полезна проектировщикам автомобильных терминалов для предварительной оценки оптимальных перегрузочных мощностей и размеров площадок размещения контейнеров и техники при различных  $\lambda$ .



## Результаты

1. Определена функция интенсивности полных затрат при организации перегрузок контейнеровозов на автомобильном перевалочном терминале, использующем контейнерные перегружатели.
2. Определена формула оценки точки оптимальности при заданной интенсивности поступления контейнеровозов под перегрузку.
3. Определена экстремаль, как функция точки оптимальности от интенсивности потока контейнеровозов.
4. Определена формула оценки оптимальной вместимости площадки терминала, предназначенной для контейнеровозов.

## Заключение

Знание численного значения точки оптимальности ( $\mu^*$ ) позволит заинтересованным лицам принимающим управленческие решения при известной интенсивности входного потока контейнеровозов организовать оптимальный режим работы контейнерных перегружателей и оптимальное их количество, а также оценить минимально возможную интенсивность полных затрат и оптимальные размеры площадки для размещения прибывших для перегрузки контейнеровозов.

Оптимальная экстремаль может быть полезна проектировщикам автомобильных терминалов для предварительной оценки оптимальных перегрузочных мощностей и размеров площадок размещения контейнеров и техники при различной интенсивности потока контейнеровозов.

## Библиографический список:

1. Саати Т. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. - М.: «Советское радио», 1965 г. - 510 с.

2. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчетам. - М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1966 г. - 403 с.
3. Майер Х., Эйджин Н., Тролл Р. и др. Исследование операций: в 2-х томах. Пер. с англ./ Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. - М: Мир, 1981 г. Т.1. -712 с.
4. Горев А.Э., Попова О.В. Грузовые контейнерные перевозки: учебник. – М.: КНОРУС, 2022 г. – 344 с.
5. Вакуленко С.П., Пересветов Ю.В., Евреенова Н.Ю. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках грузов: Учебное пособие. - М.: РУТ (МИИТ), 2024. -113 с.
6. Вакуленко, С. П. Обзор и анализ научных исследований контейнерно-контрейлерных перевозок / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, А. П. Иванов // Вестник транспорта. – 2025. – № 2. – С. 22-30. – EDN SZTNFZ.
7. Логистика транспортировки товаров и грузовых перевозок с древних времен до современности / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, А. П. Иванов, И. И. Носырев // Логистика. – 2024. – № 11(216). – С. 46-52. – EDN IZUDZS.
8. Евреенова, Н. Ю. Моделирование работы терминально-логистического комплекса в условиях неравномерности входящего потока / Н. Ю. Евреенова, К. А. Калинин // Логистика: современные тенденции развития : Материалы XXI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 апреля 2022 года / Отв. редактор В.С. Лукинский. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2022. – С. 119-125. – EDN HLLGLF.
9. Евреенова, Н. Ю. Разработка прогнозной модели неравномерного входящего потока транспортно-логистического центра / Н. Ю. Евреенова, К. А. Калинин, А. Д. Ершов // Вестник Уральского государственного университета

путей сообщения. – 2022. – № 1(53). – С. 81-91. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-1-81-91. – EDN IZWTLF.

10. Организация логистики грузов на радиальных участках Московского железнодорожного узла / П. В. Куренков, К. А. Калинин, И. В. Серяпова, П. В. Иванов // Логистика. – 2024. – № 11(216). – С. 40-45. – EDN EHEMRL.

*Оригинальность 77%*