

УДК 656.615:519.872

К. А. Аблязов,

канд. техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской
университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»;

Г. Л. Козенкова,

доцент,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской
университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»;

Э. К. Аблязов,

канд. техн. наук, ст. преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный морской
университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
ДЛЯ АНАЛИЗА ДЛИНЫ ОЧЕРЕДИ
И ЗАДЕРЖКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ И АВТОМАШИН
ПРИ ПЕРЕВАЛКЕ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ В МОРСКИХ ТЕРМИНАЛАХ
(На примере ОАО «Новороссийский зерновой терминал»)**

**THE USAGE OF MONTE-KARLO METHOD
FOR AN ANALYSIS OF QUEUING LENGTHS AND DELAYS
OF RAILWAY WAGONS AND AUTO TRACKS
BY HANDLING BULK CARGOES IN SEA TERMINALS
(For example of JSC “Novorossiysk grain terminal”)**

В статье предложено использование метода Монте-Карло для оценки длины очереди и задержки железнодорожных вагонов и автомашин, возникающих при разгрузке транспортных средств на приемных пунктах морского терминала.

The article suggests the usage of Monte-Karlo method for evaluation of queuing lengths and delays of railway wagons and auto tracks arising during unloading transports on receiving stations of the terminal.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, система массового обслуживания, железнодорожные вагоны, автомашины, зерновой терминал, приемные пункты для разгрузки транспортных средств.

Key words: Monte-Karlo method, queuing theory, railway wagons, auto tracks, grain terminal, receiving stations for unloading transports.



КСПОРТЕРЫ зерна доставляют навалочный груз на морской терминал в автомашинах и железнодорожных вагонах (например, ОАО «Новороссийский зерновой терминал»). Автомашины и железнодорожные вагоны разгружаются на приемных разгрузочных пунктах терминала.

Одной из важнейших задач своевременной разгрузки транспортных средств, а именно железнодорожных вагонов и автомобильного транспорта, является определение оптимального количества приемных разгрузочных пунктов, которые оборудованы подземными приемными бункерами и ленточными транспортерами, расположенными в подземных галереях под бункерами [1; 2]. В трех приемных разгрузочных пунктах для железнодорожных вагонов зерновой груз с вагонов высыпается в бункер через решетку, на которую уложен подъездной железнодорожный путь. Практический анализ эксплуатационной производительности разгрузочных пунктов для железнодорожных вагонов, произведенный в течение 2012 г., показал, что в течение одного часа разгружаются

8 вагонов. Из приемного бункера через затвор-питатель груз поступает на продольные ленточные транспортеры, расположенные под бункерами, а затем в приемный башмак ковшового элеватора нории. Нории поднимают груз в верхнюю часть конвейерной системы для дальнейшей передачи на ленточные раздаточные транспортеры и распределения его в силосы.

Автомашина заезжает на платформу приемного разгрузочного пункта, которая затем наклоняется и зерновой груз высыпается в приемный бункер под платформой. Далее технологический процесс ничем не отличается от случая, когда происходит выгрузка железнодорожных вагонов. С учетом суммарной мощности разгрузочных пунктов для выгрузки автомашин, так как используются три разгрузочных пункта, можно считать, что выгрузка одной автомашины происходит в течение 10 мин. Для разгрузки автотранспорта необходимо иметь на участке разгрузки оптимальное количество приемных разгрузочных пунктов, которые сокращают очередь ожидания автотранспортом разгрузки. Необходимо отметить, что площадь территории на терминале, выделенная под стоянку автотранспорта, ограждена и ограничена. В пиковые периоды года длина очереди автомашин для выгрузки простирается на многие километры. По этой причине в районе с. Владимирка г. Новороссийска был построен терминал для автомашин, ожидающих разгрузки.

В статье рассматриваются математические и имитационные модели, которые могут быть использованы для оценки задержки транспорта и длины очереди в зависимости от различного уровня потока и условий их обработки (выгрузки) [2; 3]. Эта оценка произведена в соответствии с разгрузочной способностью приемных пунктов как для железнодорожных вагонов, так и для автомашин.

Для оценки задержки транспорта и длины очереди необходимо измерить продолжительность разгрузки автомобильного и железнодорожного транспорта на разгрузочных пунктах. Время ожидания разгрузки транспортного средства измеряется в зависимости от следующих условий:

- пункт разгрузки свободен в момент времени прибытия транспортного средства;
- транспортное средство находится в очереди, прежде чем достигает пункта разгрузки.

Для разработки математической модели работы приемных пунктов [2] воспользуемся тем, что автомобильный транспорт разгружается в среднем по времени 10 мин с учетом трех разгрузочных пунктов, а железнодорожный с учетом трех разгрузочных пунктов — 6–7,5 мин. Это время разгрузки транспортных средств было определено в ходе проведения хронометражных наблюдений в 2012 г. Рассматривая поток транспортных средств как поток требований разгрузки в системе массового обслуживания (СМО), имеющий показательный закон распределения для каждого вида транспортного средства (железнодорожный и автомобильный транспорт), определяем две простые СМО, соответствующие реальным условиям эксплуатации. Так как время выгрузки как для автомобильного, так и для железнодорожного транспорта имеет постоянное значение, то, пользуясь обозначениями Д. Кендалла (табл. 1 и 2) [1; 2], определяем для железнодорожного транспорта тип СМО: $M/D/1$. Очередь транспортных средств подчиняется правилу: «первым пришел — первым обслужен (ПППО)». Для автомобильного транспорта будет тип СМО: $M/D/1$ и ПППО соответственно.

Таблица 1

Основные обозначения Д. Кендалла

Обозначение	Пояснение
P_0	Вероятность начального состояния системы (система свободна)
P_i	Вероятность того, что в очереди находятся $(i - 1)$ заявок
Θ	Интенсивность нагрузки системы
L_q	Средняя длина очереди
L	Среднее число транспортных средств в системе
w_q	Среднее время ожидания в очереди
w	Среднее время ожидания в системе

Таблица 1
 (Окончание)

M	Символ, обозначающий, что поток — пуассоновский, либо длительность обслуживания распределена по экспоненциальному закону
D	Время обслуживания постоянно
n	Число требований
c	Число каналов обслуживания
μ	Интенсивность обработки заявок
λ	Интенсивность поступления заявок на обработку

Таблица 2

Формулы аппарата теории массового обслуживания

№ п/п	Обозначение Кендалла	Используемые формулы	Ограничения
1	$M/M/1$	$\Theta = \frac{\lambda}{\mu} < 1; \quad L = \frac{\Theta}{1 - \Theta};$ $L_q = \frac{\Theta^2}{1 - \Theta}; \quad w_q = \frac{\Theta}{\mu(1 - \Theta)};$ $w = \frac{1}{\mu(1 - \Theta)}$	Нет ограничений на количество транспортных средств в системе
2	$M/M/C$	$\Theta = \frac{\lambda}{C\mu} < 1;$ $P_n = \frac{(C\Theta)^n}{n!} \cdot P_0, \text{ если } 0 \leq n \leq C - 1;$ $P_n = \frac{C^c}{C!} \cdot \Theta^n P_0, \text{ если } n \leq C \geq;$ $P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{c-1} \frac{(C \cdot \Theta)^i}{i!} + \frac{(C \cdot \Theta)^c}{C!} \cdot \frac{1}{1 - \Theta}};$ $L_q = \frac{(C\Theta)^c}{C!} \cdot \frac{\Theta}{(1 - \Theta)^2} \cdot P_0; \quad L = L_q + C\Theta;$ $w_q = \frac{L_q}{\lambda}; \quad w = \frac{L}{\lambda}$	Нет ограничений на количество транспортных средств в системе
3	$M/D/1$	$\Theta = \frac{\lambda}{\mu} < 1;$ $w_q = \frac{\Theta}{2\mu(1 - \Theta)}; \quad w = \frac{2 - \Theta}{2\mu(1 - \Theta)};$ $L_q = \frac{\Theta^2}{2(1 - \Theta)}; \quad L = \frac{\Theta(2 - \Theta)}{2(1 - \Theta)}$	Нет ограничений на количество транспортных средств в системе

Таблица 2
(Окончание)

4	$M/D/C$	$\Theta = \frac{\lambda \cdot \text{const}}{c}; \quad w = \frac{B}{c(1-\Theta)\lambda},$ где $B = \frac{1}{2} \left[c(c-1)(P(0) + P(1)) + \sum_{i=2}^{c-1} P(i) [c(c-1) - i(i-1)] - (c - c\Theta)^2 + c \right]$ Неизвестные вероятности $P(0), P(1), \dots, P(c-1)$ находятся извлечения корней уравнения $z^c = e^{c\Theta(z-1)}.$ Метод нахождения корней этого уравнения хорошо известен в теории исследования операций [3]	Нет ограничений на количество транспортных средств в системе
---	---------	--	--

Соотношения, приведенные в табл. 2, для случая $M/D/1$ и ПППО будут справедливы для железнодорожного транспорта. В этих соотношениях λ представляет собой интенсивность потока требований разгрузки железнодорожных вагонов, время обслуживания которых изменяется по показательному закону, а μ — среднее значение интенсивности выгрузки. Если имеются свободные пункты выгрузки, то по прибытии транспортное средство устанавливается на свободный пункт выгрузки случайным образом. Относительная интенсивность обслуживания железнодорожного транспорта Θ , среднее время ожидания в системе w будут определяться соотношениями, приведенными в табл. 2.

Соотношения, приведенные в табл. 2, для случая $M/D/1$ и ПППО будут справедливы и для автомобильного транспорта. Для этого случая время выгрузки — величина постоянная и равна const . Относительная интенсивность обслуживания автомобильного транспорта Θ , среднее время ожидания в системе транспортного средства w будут определяться соотношениями, приведенными в табл. 2.

Практическое использование вышеприведенных соотношений

Рассмотрим использование имитационной модели для случая выгрузки зерна с автомашин. Используя данные табл. 3, в которой приведены количество автомашин, обработанных в ОАО «НЗТ» в 2012 г., рассчитаем среднегодовое значение относительной интенсивности обслуживания (Θ_r) на приемных разгрузочных пунктах для автомашин за 2012 г., а также среднегодовое время ожидания выгрузки автомашин в системе. Для автомобильного транспорта будет справедлив тип СМО $M/D/1$ и ПППО. Тогда согласно формуле, приведенной в табл. 2:

$$\Theta_r = \lambda_r / \mu_r = 91,05/144 = 0,63 < 1.$$

Так как $\Theta_r < 1$, то это свидетельствует о том, что очередь не будет расти до бесконечности.

$w_{qr} = \Theta_r / [2 \mu_r (1 - \Theta_r)] = 0,63 / [2 \cdot 144 \cdot (1 - 0,63)] = 0,0059$ сут, или 8,5 мин, что практически означает очень малое среднегодовое время ожидания.

Таблица 3

Сводная таблица по переработке автомашин за 2012 г.

Месяцы	Кол-во автомашин, (шт.)	Среднее значение интенсивности прибытия, λ (авто/сут) $\lambda = \text{кол-во автомашин в месяце} / \text{кол-во дней в месяце}$	Среднее значение интенсивности выгрузки, μ (авто/сут) $\mu = 6 \text{ авто/ч} \cdot 24 = 240 \text{ авто/сут}$
Январь	3716	119,87	144
Февраль	3433	122,61	144

Таблица 3
 (Окончание)

Март	5363	173	144
Апрель	1475	49,17	144
Май	905	29,19	144
Июнь	1763	58,77	144
Июль	2311	74,55	144
Август	3690	123	144
Сентябрь	6005	200,17	144
Октябрь	1700	54,84	144
Ноябрь	1571	52,37	144
Декабрь	1087	35,06	144
Итого за год: 33 019		$\lambda_r = 1092,6/12 = 91,05$	$\mu_r = 144$

Поток автомобильного транспорта рассматривается как поток требований разгрузки в системе массового обслуживания (СМО), имеющего показательный закон распределения [2; 3]. Так как время выгрузки зерна для случая разгрузки зерна с автомашин — величина постоянная и равна 10 мин (или 0,167 ч), то определяем: $M/D/1$, $\lambda_r = 91,05$ авто/сут, μ — величина постоянная и равна 144 авто/сут. Используя формулу $RN = e^{-\lambda t}$, где RN — случайные числа в области 0–1 в таблице случайных чисел, определяем время прибытия автомашин по формуле $t = -1/\lambda \ln(RN)$ и составим табл. 4 прибытия и обработки автомашин.

$$t = -1/\lambda \ln(RN) = -1/91,05 \cdot \ln(RN) \text{ (сут)} = -0,26 \ln(RN) \text{ (ч)}.$$

Таблица 4

Сводная таблица имитации прибытия и обработки автомашин в 2012 г.

Прибытие			Обработка		
Случайные числа (RN)	Время между прибытиями автомашин, ч	Общее время, ч	Начало, ч	Конец (ч)	Время в очереди, ч
0,1400	0,5112	0,5112	0,5112	0,6782	0
0,0188	1,0332	1,5444	1,5444	1,7114	0
0,6681	0,1049	1,6493	1,7114	1,8784	0,0621
0,4315	0,2185	1,8678	1,8784	2,0454	0,0106
0,2040	0,4133	2,2811	2,2811	2,4481	0
0,3319	0,2866	2,5677	2,5677	2,7347	0
0,1285	0,5335	3,1012	3,1012	3,2682	0
0,5484	0,1562	3,2574	3,2682	3,4352	0,0108
0,6454	0,1139	3,3713	3,4352	3,6022	0,0639
0,9737	0,0069	3,3782	3,6022	3,7692	0,2240
Всего в очереди:					0,3714

Среднее время ожидания автомашин в очереди равно

$$w_q = 0,3714/10 = 0,0371 \text{ ч} = 2,226 \text{ мин.}$$

Если это время рассчитать для системы $M/D/1$ со значением $\Theta = 0,63$, то

$$w_{qr} = \Theta_r / [2 \mu_r (1 - \Theta_r)] = 0,63 / [2 \cdot 144 \cdot (1 - 0,63)] = 0,0059 \text{ сут, или } 8,5 \text{ мин.}$$

Рассчитанное среднее время ожидания автомашин в очереди с использованием имитационного моделирования и таблицы случайных чисел оказывается меньше, чем время, рассчитанное для СМО с параметрами $M/D/1$.

Теперь рассмотрим использование имитационной модели для случая выгрузки зерна с вагонов. Используя данные табл. 5, в которой приведено количество вагонов, обработанных в ОАО «НЗТ» в 2012 г., рассчитаем среднее значение относительной интенсивности обслуживания на приемных разгрузочных пунктах для вагонов за 2012 г., а также среднее время ожидания выгрузки вагонов в системе. Для железнодорожного транспорта будет справедлив тип СМО $M/M/1$ и ПППО. Тогда согласно формуле, приведенной в табл. 2:

$$\Theta_r = \lambda_r / \mu_r = 142,33/192 = 0,74 < 1.$$

Так как $\Theta_r < 1$, то это свидетельствует о том, что очередь не будет расти до бесконечности.

Таблица 5

Сводная таблица по переработке вагонов за 2012 г.

Месяцы	Кол-во, вагонов (шт.)	Среднее значение интенсивности прибытия, λ , ваг./сут $\lambda = \text{кол-во вагонов в месяце} / \text{кол-во дней в месяце}$	Среднее значение интенсивности выгрузки, M (ваг./сут) $\mu = 8 \text{ ваг./ч} \cdot 24 = 192 \text{ ваг./сут}$
Январь	5309	171,26	192
Февраль	4806	171,64	192
Март	5907	190,55	192
Апрель	5590	186,33	192
Май	3595	115,97	192
Июнь	4029	134,3	192
Июль	1931	63,29	192
Август	4245	136,94	192
Сентябрь	5643	188,1	192
Октябрь	4616	148,9	192
Ноябрь	3681	122,7	192
Декабрь	2417	77,97	192
Итого за год:	51 769	$\lambda_r = 51769/12 = 142,33$	$\mu_r = 192$

Так же как и для случая разгрузки автотранспорта, используем метод Монте-Карло для случая разгрузки зерна с вагонов. Так как время разгрузки зерна с вагонов — величина постоянная и равна 7,5 мин, или 0,125 ч, то определяем: $M/D/1$, $\lambda_r = 142,33$ ваг./сут, μ — величина постоянная и равна 192 ваг./сут. Используя формулу $t = -1/\lambda \ln(RN)$ для определения времени прибытия вагонов и таблицу случайных чисел в области 0–1, составим табл. 6 прибытия и обработки вагонов.

$$t = -1/\lambda \ln(RN) = -1/142,33 \cdot \ln(RN) \text{ (сут)} = -0,17 \ln(RN) \text{ (ч)}.$$

Таблица 6

Сводная таблица имитации прибытия и обработки вагонов в 2012 г.

Прибытие			Обработка		
Случайные числа (RN)	Время между прибытиями вагонов, ч	Общее время, ч	Начало, ч	Конец, ч	Время в очереди, ч
0,8140	0,0350	0,0350	0,0350	0,1600	0
0,5636	0,0975	0,1325	0,1600	0,2850	0,0275
0,9661	0,0059	0,1384	0,2850	0,4100	0,1466
0,8565	0,0263	0,1647	0,4100	0,5350	0,2453
0,1609	0,3106	0,4753	0,5350	0,6600	0,0597
0,9546	0,0079	0,4832	0,6600	0,7850	0,1768
0,3413	0,1827	0,6659	0,7850	0,9100	0,1191
0,7625	0,0461	0,7120	0,9100	1,0350	0,1980
0,3062	0,2012	0,9132	1,0350	1,1600	0,1218
0,6739	0,0671	0,9803	1,1600	1,2850	0,1797
Всего в очереди:					1,2745

Среднее время ожидания вагонов в очереди равно

$$w_q = 1,2745/10 = 0,1275 \text{ ч} = 7,65 \text{ мин.}$$

Если это время рассчитать для системы $M/D/1$ со значением $\Theta = 0,74$, то среднее время ожидания вагонов в очереди будет определяться:

$$w_{qr} = \Theta / [2 \mu_r (1 - \Theta)] = 0,74 / [2 \cdot 192 \cdot (1 - 0,74)] = 0,0074 \text{ сут, или } 10,66 \text{ мин.}$$

Таким образом, при недостатке исходных данных и при невозможности экспериментировать на реальном объекте использование имитационного моделирования в управлении операциями разгрузки транспортных средств позволяет произвести: расчет времени обработки транспортных средств (железнодорожные вагоны и автомашины); анализ длины очереди и задержки железнодорожных вагонов и автомашин; математически оправдать оптимальное количество приемных пунктов для производства разгрузки вагонов и автомашин, так как от этого зависит время ожидания транспортных средств разгрузки; разработку управленческих решений по увеличению количества приемных пунктов на терминале.

Список литературы

1. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т. Л. Саати. — М.: Сов. радио, 1971.
2. Аблязов К. А. Управление операциями в портах с использованием системы массового обслуживания / К. А. Аблязов, Г. Л. Козенкова, Л. И. Алимova // Транспорт: наука, техника, управление. — 2009. — № 8. — С. 46–49.
3. Хемди А. Таха. Введение в исследование операций / А. Таха Хемди. — М.: Вильямс, 2007.
4. Вершинин О. Е. Компьютер для менеджера / О. Е. Вершинин. — М.: Высш. шк., 1990. — С. 82–90.