УДК 656.025.4/.6

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

И.А. Русинов

MODELLING OF CONTAINER TERMINALS FUNCTIONING

I.A. Rusinov

Рассматривается формализация процессов переработки грузов на контейнерном терминале в виде разомкнутой системы массового обслуживания. Определяются вероятностные модели процессов переработки грузов в динамических и стационарных режимах.

Ключевые слова: формализация, каналы переработки грузов, аппарат массового обслуживания, моделирование, оптимизация.

There are formalization of processes of cargo handling on the container terminal as open-loop systems of mass service is considered. Probabilistic models of processes of cargo handling in dynamic and stationary modes are defined.

Keywords: formalisation, cargo handling channels, the device of mass service, modelling, optimization.

Введение

Морские контейнерные перевозки являются наиболее удобным и экономичными способом транспортировки грузов. Основным транспортным узлом в морских контейнерных перевозках является контейнерный терминал морского порта. В контейнерном терминале осуществляется переработка грузов, их складирование и распределение, а также перевозка грузов автотранспортом к ближайшим отправителям и потребителям.

В настоящее время, когда возможности экстенсивного роста большинства портов за счет городских территорий исчерпаны, необходимо производить оптимизацию работы, стремясь сократить сроки и повысить объемы обработки морских судов. Формализация задач оптимизации связана со сложностью вычислительных моделей процессов.

Допустим, что оптимизация проводится по критерию максимизации коэффициента использования причального фронта, характеризующего количество контейнерных грузов, переработка которых за единицу времени приходится на единицу длины причальной линии. Однако, максимальный коэффициент причального фронта достигается только при условии непрерывной замены одного судна другим, т. е. при стремлении коэффициента загрузки причала к единице. Это приводит к постоянной очереди судов, т. е. при увеличении времени ожидания (простоя) судов. В результате, значительно ухудшается качество услуг судоходным кампаниям и во многих случаях может в соответствии с условиями контрактов быть причиной для выставления санкций.

Наиболее корректно задача решается в тех случаях, когда прибыль терминала может быть выражена через коэффициент использования причалов и среднего времени пребывания судов в очереди. Для решения этой задачи необходимо разработать вычислительную модель процесса переработки контейнерных грузов, на основе которой могут быть определенны аналитические выражения для указанных вероятностных показателей качества. Применение аппарата массового обслуживания позволяет описать процесс обработки судов в контейнерном терминале с помощью линейных дифференциальных уравнений и во многих случаях представить выражения для вероятностных показателей процессов в аналитической форме.

1. Моделирование процессов переработки контейнерных грузов

Для описания процессов обработки судов на грузовых причалах контейнерных терминалов необходимо пользоваться вероятностными моделя-

Русинов **Игорь** Александрович - доцент кафедры экономики и основ управления ГМА имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; sbe@list.ru

Rusinov Igor Aieksandrovich - assistant professor of Economics and Control Fundamentals Department of State Naval Academy of admiral S.O. Makarov, Saint-Petersburg; sbe@list.ru

ми. Процессы, протекающие при обработке судов на грузовых причалах, состоят в том, что исследуемые системы обработки грузов в случайные моменты времени переходят из одного состояния в другое. Возможные состояния системы обработки грузов будут:

E_0 - ни один причал не занят;

E_1 — занят 1 причал;

E_i - занято ровно i причалов;

E_s - заняты все S причалов;

E_{s+1} — заняты все S причалов. В очереди находится 1 судно;

E_{s+d} - заняты все S причалов. В очереди находится d судов.

Классическая теория обслуживания предусматривает исследование многоканальной системы, причем число приборов S равно числу каналов. Каждый канал может обслуживаться одним прибором независимо от других каналов (СМО без взаимопомощи), кроме того, каналы могут обслуживать все свободные приборы или часть свободных приборов (СМО с полной или частичной взаимопомощью). Интенсивность потока обработки грузов каждого канала μ_0. Вероятности переходов системы из состояния E_n в состояния E_{n-1}, т. е. вероятность обслуживания одной заявки зависит от числа работающих каналов обслуживания. Результирующая интенсивность обслуживания в n-м состоянии определяется на основе принципа линейной суперпозиции, т. е. равна суммарной интенсивности всех приборов обслуживания и кратна расчетной интенсивности одного прибора μ_0. Таким образом, результирующая интенсивность обслуживания в этом случае не может превышать $S\mu_0$, т. е. $\mu_p \le S\mu_0$, а интенсивность обслуживания одним прибором μ_0 не меняется в зависимости от состояния СМО. Кроме того, процесс обслуживания считается непрогнозируемым и неуправляемым, т. е. администратору СМО не известно число заявок, которые в ближайшее время поступят в систему, и он не может в зависимости от состояния СМО менять интенсивности приборов обслуживания.

В реальных условиях функционирования контейнерного терминала процессы переработки грузов не адекватны указанным допущениям. Поэтому в реальных условиях результирующая интенсивность обработки грузов, как правило, не бывает кратной средней интенсивности обработки μ_0 и в отдельных случаях может превышать величину $S\mu_0$. Следует учитывать возможность изменений интенсивности отдельных приборов обслуживания в зависимости от состояния СМО. Поэтому одним из научных результатов проведенного исследования является развитие классической теории массового обслуживания с учетом возможности изменения значения интенсивности обслуживания отдельными приборами в зависимости от состояния СМО. При этом элементы матрицы интенсивности остаются постоянными величинами.

Рассмотрим контейнерный терминал, включающий S грузовых причалов (каналов), на вход которого поступает простейший поток судов (заявок) с интенсивностью λ. Результирующая интенсивность обработки грузов в состоянии $E_n = r_n\mu_0$, где r_n - коэффициент интенсивности обработки может быть как целым, так и дробным числом. Как правило, когда заняты все причалы, т. е. $n \ge S$ предполагается что $r_n = \text{const}$ (обычно $r_n = \max$). Однако, в отдельных случаях, интенсивность обработки грузов меняется и при $\eta > S$. В этом случае определяется состояние S', при достижении которого результирующая интенсивность обработки остается постоянной.

Обозначим вероятность нахождения системы в состояние E_n в момент времени t через $P_n(t)$, тогда всем состояниям системы будет соответствовать стохастический вектор

$$\overline{P}^T(t) = \left[P_0(t), P_1(t), P_2(t)\ldots\right],\ 0 \le P_n(t) \le 1,$$

$$n = 0, 1, 2, 3\ldots$$

Если последовательность указанных состояний представляет собой Марковский процесс (цепь Маркова), то каждой паре состояний E_n и E_v можно поставить в соответствие вероятность $P_{n,v}$ того, что система находится в состоянии E_v в момент времени $t + dt$, при условии что в момент времени t она находилась в состоянии E_n. Тогда можно записать следующее уравнение в матричной форме

$$\overline{P}^T(t+dt) = \overline{P}^T(t)J(t), \tag{1}$$

где $J(t)$ - стохастическая матрица переходов.

Осуществив операцию транспонирования над левой и правой частями стохастической матрицы переходов, получим

$$\vec{P}(t+dt) = J^T(t)\ \vec{P}(t), \tag{2}$$

где $J^T(t)$ - матрица, транспонированная к матрице переходов $J(t)$; $\vec{P}(t)$ - вектор столбец вероятностей размерностей nx1.

Представим (2) в виде

$$\vec{P}(t+dt) = \left[J^T(t) - E_n\right]\ \vec{P}(t) + \vec{P}(t).$$

Перенеся $\vec{P}(t)$ в левую часть и разделив левую и правую части на dt, получим

$$\vec{P}'(t) = R\vec{P}(t), \tag{3}$$

где $R = \dfrac{1}{dt}\left[J^T(t) - E_n\right]$ – матрица, которая имеет вид:

$$\begin{bmatrix} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 & \cdots & E_{S-1} & E_s & E_{s+1} \\ -\lambda & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \mu_0 & -(\lambda+r_1\mu_0) & \lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2\mu_0 & -(\lambda+r_2\mu_0) & \lambda & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -(\lambda+r_{S-1}\mu_0) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & r_n\mu_S & -(\lambda+r_S\mu_0) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & r_S\mu_0 & -(\lambda+r_3\mu_0) \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Учитывая уравнение (1), получим следующие дифференциальные уравнения, представленные в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \overline{P}'(t) \\ I_{1\times1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ I_{1\times(m+1)} \end{bmatrix}; \ \overline{P}(t) = \begin{bmatrix} RP(t) \\ \sum\limits_{n=0}^{m} P(t) \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где $I_{1\times1}$ и $I_{1\times(m+1)}$ — единичные подматрицы соответствующих размерностей.

Первые n + 1 дифференциальных уравнений системы обработки грузов можно также представить в виде

$$\begin{aligned} &P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + r_1\mu_0 \ P_1(t); \\ &P_n'(t) = -\lambda P_{n-1}(t) + (\lambda + r_1\mu_0)P_n(t) + \\ &+r_{n+1}\mu_0 \ P_{n+1}(t), \ \ n = 1, 2, 3\ldots \end{aligned} \tag{6}$$

Будем считать, что процесс обработки грузов является марковским случайным эргодическим, то есть по истечению достаточно продолжительного промежутка времени (теоретически при $t \to \infty$ вероятности состояний систем обработки грузов практически не зависит от того, в каком состоянии систем находилась в начальный момент времени при $t = О$ и не зависит от самого промежутка времени. Такое допущение возможно, так как все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое являются простейшими, т. е. все элементы матрицы R являются постоянными величинами.

Для определения значений вероятностей отдельных состояний в стационарных режимах необходимо приравнять к нулю значения производных состояний, т. е. левых частей системы уравнений (6), а также перенести в каждом уравнении одно из слагаемых в левую часть. В результате получим:

$$\begin{aligned} &r_1\mu_0 \ P_1 = \lambda P_0; \\ &r_2\mu_0 \ P_2 = (\lambda + r_1\mu_0)P_1 - \lambda P_0; \\ &r_3\mu_0 \ P_3 = (\lambda + r_2\mu_0)P_2 - \lambda P_1; \\ &\qquad\vdots \\ &r_n\mu_0 \ P_n = (\lambda + r_{n-1}\mu_0)P_{n-1} - \lambda P_{n-1}. \end{aligned} \tag{7}$$

Введем обозначение $\psi = \dfrac{\lambda}{\mu_0}$ и назовем ее приведенной плотностью потока прихода судов. Тогда, решив систему уравнений (7), получим следующее выражение соотношений между стационарными значениями вероятностей отдельных состояний:

$$\begin{aligned} &P_1 = \frac{1}{r_1}\psi P_0; \\ &P_2 = \frac{1}{r_2}\psi P_1 = \frac{1}{r_1 r_2}\psi^2 P_0; \\ &P_3 = \frac{1}{r_3}\psi P_2 = \frac{1}{r_2 r_3}\psi^3 P_0; \\ &P_n = \frac{1}{r_n}\psi P_{n-1} = \frac{1}{\prod\limits_{i=1}^{n} r_i}\psi^n P_0. \end{aligned} \tag{8}$$

Используя выражение (1), получим нормировочное условие

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{D} \frac{1}{\prod\limits_{i=0}^{n} r_i}\psi^n\right] = 1, \tag{9}$$

где r_0 берется равным 1.

Нормировочное условие можно записать следующим образом:

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{S-1} \frac{\psi^S}{\prod\limits_{n=1}^{S} r_n} + \frac{\psi^S}{\prod\limits_{n=1}^{S-1} r_n}\sum_{d=0}^{\infty}\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d\right] = 1, \tag{10}$$

где $d = n - S$, d – число судов, находящихся в очереди.

Определим среднее число судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = \sum_{n=S+1}^{\infty}(n-S)P_n = \sum_{d=1}^{\infty} dP_{S+d} = P_S\sum_{d=1}^{\infty} d\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d, \tag{11}$$

где $P_S = P_0 \dfrac{\psi^S}{\prod\limits_{i-1}^{S} r_i}$. (12)

Известно, что

$$\sum_{d=1}^{\infty} d\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d = \frac{\dfrac{\psi}{r_{\max}}}{\left(1 - \dfrac{\psi}{r_{\max}}\right)^2}. \tag{13}$$

Подставить (12) и (13) в (11), получим выражение для среднего числа судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = P_0 \frac{\psi^S}{\prod_{i=1}^{S} r_i} \frac{\frac{\psi}{r_{\max}}}{\left(1 - \frac{\psi}{r_{\max}}\right)^2} = P_0 \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i \left(r_{\max} - \psi\right)^2}. \quad (14)$$

Определим среднее число судов, находящихся в терминале:

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=0}^{S} nP_n + \sum_{n=S+1}^{\infty} nP_n. \quad (15)$$

Рассмотрим второе слагаемое:

$$\sum_{n=S+1}^{\infty} nP_n = \bar{d} + \sum_{n=S+1}^{\infty} SP_n = \bar{d} + S\left(1 - \sum_{n=0}^{S} P_n\right).$$

Тогда среднее общее число судов в терминале

$$\bar{n} = \bar{d} + S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} p_0. \quad (16)$$

Следует отметить, что независимо от значения ψ и S среднее число в терминале равно сумме среднего числа обрабатываемых судов и среднего числа судов, находящихся в очереди, т. е.

$$\bar{n} = \bar{n}_{\text{обр}} + \bar{d}.$$

Соответственно, среднее число судов, находящихся в обработке:

$$\bar{n}_{\text{обр}} = S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} P_0. \quad (17)$$

Среднее время ожидания судна в очереди и среднее общее время пребывания судна в терминале определяются с помощью формул Литтла:

$$\bar{T}_{\text{ож}} = \frac{\bar{d}}{\lambda} = \frac{P_0}{\lambda} \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{\max} - \psi)^2}. \quad (18)$$

Среднее общее время пребывания судна в терминале:

$$\bar{T}_{\Sigma} = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{\bar{d}}{\lambda} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) P_n\right] =$$

$$= \bar{T}_{\text{ож}} + \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) P_n\right]. \quad (19)$$

Соответственно среднее время обработки одного судна:

$$\bar{T}_{\text{обр}} = \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) P_n\right]. \quad (20)$$

Для удобства преобразований в дальнейшем будем пользоваться средним приведенным временем ожидания и пребывания в терминале:

$$\bar{\tau}_{\text{ож}} = \bar{T}_{\text{ож}}\mu = \frac{\bar{d}}{\psi} \text{ и } \bar{\tau}_{\Sigma} = \bar{T}_{\Sigma}\mu = \frac{\bar{d}_{\Sigma}}{\psi}. \quad (21)$$

На основе приведенных аналитических выражений вероятностных показателей была произведена оптимизация процессов переработки контейнерных грузов в стационарных режимах.

2. Технико-экономические критерии оптимальности

Наиболее наглядным и обоснованным критерием оптимальности, как указывалось выше, является экономический критерий, характеризующий максимальную прибыль. Рассмотрим условия, при которых размер прибыли указанного показателя можно выразить через технические показатели качества процесса. Предполагается, что доходы контейнерного терминала от обработки грузов пропорциональна суммарному потоку λ, а следовательно и приведенной плотности потока ψ. Рассмотрим выражения для экономических показателей процесса обработки груза. Доход терминала за единицу времени (сутки) в соответствии с условием пропорциональности будет определяться выражением

$$Э_0 = C_0\lambda = C'_0\psi, \quad (22)$$

где C_0 — коэффициент, характеризующий средний доход терминала от переработки контейнерных грузов одного судна; $C_0' = C_0\mu$ - приведенный коэффициент, характеризующий средний доход переработки грузов за единицу времени.

Затраты терминала на обработку грузов можно условно разделить на три составляющие.

Первая составляющая затрат, связана с приведенными потерями судоходной компании, связанными с простоем судов:

$$Э_1 = C_1\bar{d} = C_1\psi\bar{\tau}_{\text{ож}}, \quad (23)$$

где C_1 – приведенная стоимость простоя судна за единицу времени (сутки).

Если учитывать не только время простоя, но и общее время пребывания судна в терминале:

$$Э_{1\Sigma} = C_1\psi\left(\bar{\tau}_{\Sigma} - \bar{\tau}_{\text{н.обр}}\right),$$

где $\tau_{\text{н.обр}}$ – приведенное нормированное время.

Если считать, что нормированное время обработки судна $T_{\text{обр}} = 1/\mu$, то приведенное время обработки $\overline{\tau_{\text{обр}}} = 1$.

Тогда выражение (23) можно представить в виде

$$Э_1 = C_1(d - \psi). \quad (24)$$

Можно легко показать, что при отсутствии взаимопомощи затраты, определяемые по выражениям (23) и (24), совпадают. При наличии взаимопомощи $Э_{1\Sigma}$ чуть меньше чем $Э_1$, так как среднее приведенное время обработки меньше единицы. Однако ввиду того, что коэффициент загрузки причалов в оптимальном режиме достаточно высок, разницы между $Э_1$ и $Э_{1\Sigma}$ достаточно мала, и процесс оптимизации по указанным критериям дает практически одинаковые результаты.

Вторая составляющая затрат представляет собой приведенные расходы на содержание коллектива людей и комплекса технических средств, обеспечивающих выполнение работ:

$$Э_2 = C_2\lambda + C_2'(1-\varphi)\mu S K_{пр}, \quad (25)$$

где C_2 - расходы на непосредственное выполнение работ по переработке одного судна; $K_{пр}$ - коэффициент простоя, характеризующий относительные затраты при простое коллектива людей и комплекса технических средств; $\varphi = \psi/5$ - коэффициент загрузки причалов.

Первое слагаемое соответствует расходам, возникающим при непосредственном производстве работ, а второе - расходам при простое оборудования.

Выражение (25) удобно представить в виде

$$Э_2 = C_2'\psi = C_2'\psi(1-K_{пр}) + C_2' S K_{пр}, \quad (26)$$

где $C_2' = C_2\mu$.

Третья составляющая затрат представляет собой приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию причалов. Будем считать, что эти затраты пропорциональны числу причалов. Тогда

$$Э_3 = C_3 S,$$

где C_3 — коэффициент, характеризующий приведенные затраты на содержание и эксплуатацию одного причала за единицу времени (сутки).

Соответственно суммарные приведенные затраты:

$$Э_\Sigma = Э_1 + Э_2 + Э_3. \quad (27)$$

Если при определении первой составляющей затрат использовать выражение (23), то выражение для прибыли терминала в единицу времени примет следующий вид:

$$Э_n = C_0'\psi S - C_1\psi S\tau_{ож} - C_2'\psi S(1-K_{пр}) - C_2' S K_{пр} - C_3 S = C_0''\psi S - C_1\psi S\tau_{ож} - C_2'' S, \quad (28)$$

где $C_0'' = C_0' - C_2'(K_{пр})$ и $C_2'' = C_2' K_{пр} - C_3'$.

На основе выражения для прибыли (28) могут быть сформулированы и решены различные задачи оптимизации процессов обработки на основе экономических критериев.

3. Оптимальное планирование работы терминала

Рассмотрим задачу оптимального планирования работы терминала при заданном числе причалов. Необходимо выбрать такую интенсивность потока прихода судов в порт (приведенную плотность потока), при которой величина прибыли в единицу времени (сутки) была бы максимальной. В основу оптимизации было положено выражение (28). Однако третье слагаемое в правой части (27) и часть второго слагаемого не зависит от приведенной плотности ψ, а остается постоянным. Поэтому при определении оптимального значения φ эти слагаемые могут быть отброшены. Кроме того, разделим оставшиеся слагаемые на величину C_1 и заменим ψ на φS. В результате получим:

$$\begin{aligned} Э_n' &= \frac{C_0''}{C_1'}\varphi S - d(\varphi, S); \\ C_0'' &= C_0' - C_2'(1-K_{пр}). \end{aligned} \quad (29)$$

Зависимости $Э_n'$ от коэффициента загрузки φ при различных значениях C_0''/C_1 представляют собой унимодальные функции с сильным макси-

Таблица 1

Значения коэффициента загрузки без учета взаимопомощи

C_0''/C_1	S				
	3	4	5	6	7
0,5					0,6
0,6				0,6	0,61
0,7				0,6	0,62
0,8			0,6	0,62	0,64
0,9			0,6	0,63	0,65
1		0,6	0,61	0,64	0,66
2	0,62	0,66	0,68	0,7	0,72
3	0,66	0,7	0,72	0,74	0,75
4	0,69	0,73	0,75	0,76	0,78
5	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
6	0,73	0,76	0,78	0,79	0,8
7	0,75	0,77	0,79	0,8	0,81
8	0,76	0,78	0,8	0,81	0,82
9	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83
10	0,78	0,8	0,81	0,83	0,83

Таблица 2

Значения коэффициента загрузки с учетом взаимопомощи

C_0''/C_1	S				
	3	4	5	6	7
0,5					0,65
0,6				0,65	0,66
0,7				0,65	0,67
0,8			0,65	0,67	0,69
0,9			0,65	0,68	0,7
1		0,65	0,66	0,69	0,71
2	0,67	0,71	0,73	0,75	0,77
3	0,71	0,75	0,77	0,79	0,8
4	0,74	0,78	0,8	0,81	0,83
5	0,77	0,8	0,82	0,83	0,84
6	0,78	0,81	0,83	0,84	0,85
7	0,8	0,82	0,84	0,85	0,86
8	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87
9	0,82	0,84	0,86	0,87	0,88
10	0,83	0,85	0,86	0,88	0,88

мумом, который соответствует оптимальному значению φ. Рассмотрим оптимальные значения φ, для различных S, исходя из максимума прибыли, без учета и с учетом взаимопомощи (табл. 1, 2). Одномерная оптимизация осуществляется методом пропорционального поиска. Как видно из таблиц, результаты оптимизации незначительно отличаются друг от друга. Величина оптимального коэффициента загрузки причала в зависимости от соотношения $C_0``/C_1$ меняется в пределах от 0,65 до 0,88. В большинстве практических случаев $C_0``/C_1$ можно считать большим пяти. Тогда нижний предел оптимального значения φ становится равным 0,76.

Определение оптимальной программы терминала, то есть определение значения интенсивности прихода судов в порт, соответствующей максимуму прибыли, осуществляется в следующей последовательности.

Зная значения коэффициентов C_0, C_1 и C_2, а также интенсивности обработки грузов μ и коэффициент простоя $K_ф$ вычисляется соотношение $C_o``/C_1$.

На основе этого соотношения и известного числа причалов S определяется оптимальное значение коэффициента загрузки причалов φ. Далее легко определяется оптимальная приведенная плотность входного потока судов и его оптимальная интенсивность.

Аналогичным образом могут быть сформулированы и решены другие оптимизационные задачи, в основу которых положены технико-экономические критерии.

Выводы

Для описания процессов обработки судов на грузовых причалах контейнерных терминалов следует использовать вероятностные модели. Система обработки грузов представляет собой систему дискретного типа с конечным множеством состояний. Переход системы из одного состояния в другое происходит в моменты, когда либо новое судно подходит к терминалу, либо освобождается один из причалов. Принятые допущения о пуассоновском потоке прихода судов и показательном распределении времени обработки контейнерных грузов, позволяют использовать для описания процессов в контейнерных терминалах аппарат массового обслуживания. Применение аппарата массового обслуживания позволяет описать процесс обработки судов в контейнерном терминале с помощью линейных дифференциальных уравнений и представить выражения для вероятностных показателей качества процессов в аналитической форме. Однако применение существующих моделей массового обслуживания для определения вероятностных характеристик процессов обработки судов не представляется целесообразным, так как указанные модели неадекватно описывают указанные процессы в реальных условиях функционирования. Поэтому основным научным результатом настоящей работы является развитие классической теории массового обслуживания с учетом специфики функционирования контейнерного терминала, т. е. с учетом возможности изменения значения интенсивности обслуживания отдельными приборами в зависимости от состояния СМО.

Литература

1. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. - М.: Наука, 1987. -336 с.

2. Русинов, И.А. Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированном терминале / И.А. Русинов. - СПб.: СПбИИ РАН, 2005. -168 с.

3. Русинов, И.А. Формализация и оптимизация процессов переработки рефрижераторных грузов на специализированных терминалах / И.А. Русинов. — СПб.: Политехника, 2008. — 472 с.

Поступила в редакцию 21 февраля 2010 г.