

### Список литературы

1. Ассоциация морских торговых портов (АСОП) [Электронный ресурс] / сайт ИА PortNews.
2. Портал Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [Электронный ресурс].
3. *Король Р. Г.* Обоснование целесообразности организации мультимодальных «сухих портов»: [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Ключевые аспекты научной деятельности—2014: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Польша, 7–15 января 2014 г. — Ч. 20: Технические науки.
4. Материалы «Инвестиционная ярмарка АТЭС». — Владивосток, 2002.
5. *Галин А. В.* Сухие порты как часть транспортной инфраструктуры. Направления развития: [Текст] / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — Вып. 2 (24). — С. 87–92.
6. *Поваров Г. В.* Логистический подход к функционированию транспортного комплекса: [Текст] / Г. В. Поваров // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2012. — Вып. 1. — С. 207–211.
7. *Тараканов Н. Л.* Формирование терминально-распределительных комплексов в системе взаимодействия с интегрированными логическими платформами морских портов: [Текст] / Н. Л. Тараканов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — Вып. 2 (21). — С. 108–111.

**УДК 656.621/.626**

**Ю. Я. Зубарев,**  
д-р техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**Д. С. Ловяников,**  
аспирант,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

### **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПОРТНО-ИМПОРТНЫХ И КАБОТАЖНЫХ СУДОВ НА КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛАХ**

### **OPTIMAL MANAGEMENT OF THE PROCESS OF COASTING AND INTERNATIONAL VESSELS JOINT HANDLING AT CONTAINER TERMINALS**

*В работе рассматриваются полиномиальные модели процессов совместной обработки экспортно-импортных и каботажных контейнерных судов. На основе планов вычислительного эксперимента определяются зависимости между факторами процессов обработки контейнерных судов и значениями их показателей качества. С помощью полученных моделей производится оптимальное управление этими процессами на основе технико-экономических показателей. Решение этой задачи позволяет осуществлять планирование оптимальной загрузки терминала, обоснование программы развития производственных мощностей терминала и оценку качества функционирования терминала.*

*Polynomial models of the process of coasting and international trade container vessels joint handling are discussed in the article. Dependence between factors of process and indicators of quality is determined by processing of the results of computing experiment. Obtained models help to provide optimal management of the above process based on the technical and economic indicators. Solution to this problem provides us to carry out planning of optimal terminal's load, justification of its development program and quality assessment of terminal's operation.*

*Ключевые слова: совместная обработка экспортно-импортных и каботажных контейнерных судов, полиномиальные модели, оптимальное управление процессами.*

*Key words: coasting and international trade container vessels joint handling, polynomial models, optimal management.*

**В** ОЗРАСТАЮЩАЯ сложность современных перерабатывающих терминалов и ужесточение требований к качеству обработки контейнерных судов выдвигают задачу оптимального управления этими процессами на различных стадиях проектирования и эксплуатации терминалов.

Повышение эффективности функционирования контейнерных терминалов путем решения задачи оптимального управления процессами совместной обработки экспортно-импортных и каботажных судов на основе вероятностных вычислительных и полиномиальных моделей.

В результате проведенных исследований доказана целесообразность и эффективность использования теоретических разработок и предлагаемых моделей для решения конкретных задач, возникающих при оптимальном управлении процессами обработки экспортно-импортных и каботажных контейнерных судов. Указанные полиномиальные модели и алгоритмы оптимального управления позволяют повысить эффективность проектирования контейнерных терминалов в морских портах с учетом противоречивых требований, предъявляемых к качеству процессов обработки судов.

#### Полиномиальные модели показателей качества

При решении задач оптимального управления процессами обработки экспортно-импортных и каботажных судов возникает необходимость использования аналитических методов оптимизации.

Однако, как показано в [3, с. 70–74; 4, с. 74–76; 5], расчет показателей качества процессов обработки контейнерных судов является процедурой, включающей достаточно большое число итераций. Это приводит к увеличению временных и вычислительных ресурсов, необходимых для получения конечного результата, а также существенно усложняет задачу оптимизации. Для упрощения оптимизационных расчетов целесообразно воспользоваться полиномиальными моделями процессов обработки контейнерных судов. Это позволяет решать задачи оптимизации аналитическими методами.

Рассмотрим транспортную систему, включающую два терминала, которые содержат  $S_1$  и  $S_2$  причалов. На терминалы поступают  $m_1$  и  $m_2$  экспортно-импортных судов. Между терминалами функционируют  $m_3$  каботажных судов. Все суда обладают одинаковой контейнеровместимостью. Суммарное среднее время движения каботажного судна по маршруту равно  $\bar{T}_M$ , среднее время обработки судна —  $\bar{T}_{обр}$ , а среднее время ожидания судна в очереди —  $\bar{T}_{ож}$ . При рассмотрении движения однотипных судов целесообразно перейти к приведенным средним значениям временных интервалов  $\bar{\tau}_M = \frac{\bar{T}_M}{\bar{T}_{обр}}$  и  $\bar{\tau}_{ож} = \frac{\bar{T}_{ож}}{\bar{T}_{обр}}$ .

Под полиномиальными моделями показателей качества процессов обработки контейнерных судов будем подразумевать полиномиальные зависимости функций отклика (показателей качества)  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \dots, \mathcal{I}_m$  от факторов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Показатели качества процессов обработки контейнерных судов представляют собой приведенные значения среднего времени ожидания судов в очереди  $\bar{\tau}_{ож}$  и среднего числа судов в очереди  $\bar{d}$ . В качестве расчетных параметров можно рассматривать параметры  $m_1, m_2, m_3, \varphi_1, \varphi_2, S_1, S_2$  и  $\bar{\tau}_M$ . Однако, хотя формально параметры  $\bar{\tau}_M, m_3, S_1$  и  $S_2$  являются независимыми величинами, в ходе эксперимента они могут принимать любые сочетания значений, при практических расчетах приходится учитывать их взаимосвязь. Поэтому при расчете показателей качества обработки судов на первом терминале необходимо вместо параметра  $\bar{\tau}_M$  рассматривать приведенный расчетный параметр  $r = \frac{m_3}{(\bar{\tau}_M + 1)S_1}$ , который практически не связан с величинами  $S_1, S_2$  и  $m_3$ .

Кроме того, для повышения точности моделей рассмотрим локальные модели с фиксированным числом причалов  $S_1$ .

Для определения полиномиальных моделей необходимо осуществить вычисления значения коэффициентов этих моделей. Процесс вычисления коэффициентов представляет собой задачу активной идентификации, решение которой производится на основе планирования вычислительного эксперимента.

В процессе идентификации определяются зависимости между расчетными параметрами (факторами) и значениями их показателей качества процессов. Каждый фактор при вычислительном эксперименте может принимать определенное число значений (дискретных уровней). Каждый фиксированный набор значений (уровней) факторов определяет состояние процесса обработки судов и представляет условие проведения эксперимента (расчета). В результате расчетов определяется вектор значений показателей качества  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \dots, \mathcal{I}_m$ .

Как известно, диапазоны изменения различных параметров  $q_1, q_2, q_n$  отличаются друг от друга, что существенно затрудняет планирование и обработку результатов вычислительного эксперимента. Поэтому необходимо производить нормирование факторов, причем область определения нормированных параметров ограничивается неравенством  $-1 \leq q_n \leq 1$ . В дальнейшем будем считать, что факторы  $q_i (i = 1, 2, \dots, 7)$  являются нормированными.

Нормирование факторов для параметров  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $r$  будет связано с числом причалов  $S_1$ . Нормирование остальных факторов для всех причалов одинаково. Результаты нормирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	№ фактора	Обозначение фактора	$S_1$	Нормированные значения				
				-1	-0,5	0	0,5	1
1	$q_1$	$\varphi_1$	2	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
2			3	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
3			4	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
4	$q_2$	$r$	2	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
5			3	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
6			4	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
7	$q_3$	$m_3$	2	4	5	6	7	8
8			3	4	6	8	10	12
9			4	4	8	12	16	20
10	$q_4, q_6$	$m_1, m_2$	2-4	40	50	60	70	80
11	$q_5$	$\varphi_2$	2-4	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
12	$q_7$	$S_2$	2-4	2	3	4	5	6

Полиномиальные модели показателей качества  $\bar{\tau}_{\text{ож}}$  и  $\bar{d}$  представляют собой неполные полиномы третьего порядка вида:

$$\bar{\mathcal{I}}(\bar{q}) = b_0 + \sum_{i=1}^7 b_i q_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^7 b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^7 b_{ii} q_i^2 + \sum_{i=1}^2 b_{iii} q_i^3. \quad (1)$$

Проведенные исследования показали, что полиномиальная модель результирующей приведенной плотности прихода судов к терминалу  $\psi_{\Sigma}$  достаточно точно может быть представлена линейной моделью вида:

$$\mathcal{I}(\bar{q}) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i q_i. \quad (2)$$

Планы эксперимента включают 54 точки, том числе 32 точки дробного факторного эксперимента, 14 звездных точек, 4 точки полного факторного эксперимента и 4 звездные точки на два первых фактора. Обработка плана производилась на основе метода наименьших квадратов.

Выражения для нормированных параметров определялись на основе правила нормирования и данных табл. 1. Полученные выражения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Число причалов	Выражения для нормированных параметров						
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$
2	$\frac{\varphi_1 - 0,5}{0,1}$	$\frac{r - 0,15}{0,1}$	$\frac{m_3 - 6}{2}$	$\frac{m_1 - 60}{20}$	$\frac{\varphi_2 - 0,5}{0,2}$	$\frac{m_2 - 60}{20}$	$\frac{S_2 - 4}{2}$
3	$\frac{\varphi_1 - 0,6}{0,1}$	$\frac{r - 0,4}{0,1}$	$\frac{m_3 - 8}{4}$	$\frac{m_1 - 60}{20}$	$\frac{\varphi_2 - 0,5}{0,2}$	$\frac{m_2 - 60}{20}$	$\frac{S_2 - 4}{2}$
4	$\frac{\varphi_1 - 0,7}{0,1}$	$\frac{r - 0,7}{0,1}$	$\frac{m_3 - 12}{8}$	$\frac{m_1 - 60}{20}$	$\frac{\varphi_2 - 0,5}{0,2}$	$\frac{m_2 - 60}{20}$	$\frac{S_2 - 4}{2}$

### Оптимальное управление процессами

Формализуем задачу оптимального управления, то есть задачу определения оптимальной загрузки на первом контейнерном терминале на основе технико-экономических показателей. Будем рассматривать навигационный период в течение которого интенсивности суммарных потоков прихода экспортно-импортных и каботажных судов к первому терминалу  $\lambda_1$  и  $\lambda_{3(1)}$  считаются постоянными. Будем также считать, что контейнерная вместимость судов примерно одинакова, то есть каждое судно перевозит определенное число контейнеров одного типа. Обработка судов осуществляется с интенсивностью  $\mu$ . Предполагается, что доходы контейнерного терминала от обработки судов пропорциональны числу этих судов, а следовательно, и потокам  $\lambda_1$  и  $\lambda_{3(1)}$ . В то же время простой судов приводит к экономическим потерям судоходных компаний, связанным с дополнительными эксплуатационными расходами при ожидании и недополучением доходов из-за потери провозной способности судна. Эти потери судоходная компания компенсирует штрафными санкциями, выставляемыми терминалу.

Рассмотрим выражения для экономических показателей процесса обработки судов. Доход терминала за единицу времени (сутки) в соответствии с условием пропорциональности будет определяться выражением

$$D = C_0 \lambda_1 + C_0 \lambda_{3(1)} = C'_0 \psi_1 + C'_0 \psi_{3(1)} = C'_0 \psi_{1\Sigma}, \quad (3)$$

где  $C_0$  — коэффициент, характеризующий средний доход терминала от обработки судна;

$C'_0$  — приведенный коэффициент, характеризующий средний доход от обработки судна за единицу времени:

$$C'_0 = C_0 \mu.$$

Затраты терминала на совместную обработку экспортно-импортных и каботажных судов можно условно разделить на три составляющие:

Первая составляющая затрат связана с приведенными потерями судоходной компании, зависящими от простоя судов:

$$Z_1 = C_1 \bar{d}_{1\Sigma}, \quad (4)$$

где  $C_1$  — приведенный коэффициент стоимости простоя судна за единицу времени.

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

$$Z_2 = C_2 \lambda_1 + C_2 \lambda_{3(1)} = C_2' \psi_1 + C_2' \psi_{3(1)} = C_2' \psi_{1\Sigma}, \quad (5)$$

где  $C_2$  — приведенный коэффициент стоимости работ, связанных с обработкой судна.

$$C_2' = C_2 \mu.$$

Третья составляющая представляет собой приведенные затраты на эксплуатацию причалов. Будем считать что эти затраты пропорциональны числу причалов и не зависят от перерабатываемых грузов.

Тогда

$$Z_3 = C_3 S_1.$$

Следовательно, выражение для прибыли можно записать следующим образом:

$$\Pi = D - Z_1 - Z_2 - Z_3 = C_0' \psi_{1\Sigma} - C_1 \bar{d}_{1\Sigma} - C_2' \psi_{1\Sigma} - C_3 S_1. \quad (6)$$

Сформируем задачу оптимизации загрузки первого терминала. Будем считать, что известны характеристики второго терминала  $\varphi_2$ ,  $S_2$ ,  $m_2$ , характеристики каботажных перевозок  $\bar{\tau}_m$  и  $m_3$ , а также характеристики первого терминала  $S_1$  и  $m_1$ . Если число  $m_1$  не известно, то его следует взять максимальным, в частности  $m_1 = 80$ . Такой выбор  $m_1$  обеспечит гарантированную прибыль.

Затем необходимо выбрать такую интенсивность потока прихода судов в порт, при которой величина прибыли в единицу времени (сутки) была бы максимальной. Применение критерия максимизации прибыли в указанной постановке целесообразно в случаях, когда выполняются следующие условия:

- 1) контейнерный терминал включает достаточное число причалов, причем расходы на содержание причалов практически не зависят от числа обрабатываемых судов;
- 2) спрос на обработку судов превышает предложение, то есть для терминала имеются предложения по достаточно большому объему экспортно-импортных судов.

Тогда согласно (4) величину прибыли можно представить в виде

$$\Pi = \Delta C \psi_{1\Sigma} - C_1 \bar{d}_{1\Sigma} - C_3 S_1, \quad (7)$$

где  $\Delta C = C_0' - C_2$ .

Однако в дальнейшем при определении прибыли не будем учитывать постоянные расходы, не зависящие от интенсивности прихода судов к терминалу. К ним относятся приведенные затраты на содержание причалов  $C_3 S_1$ , то есть в этом случае критерий максимизации прибыли будет определяться выражением:

$$\Delta C \psi_{1\Sigma} - C_1 \bar{d}_{1\Sigma} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Для уменьшения числа переменных разделим выражение на  $C_1$ . В результате получим окончательное выражение для максимизации прибыли:

$$\frac{\Delta C}{C_1} \psi_{1\Sigma} - \bar{d}_{1\Sigma} \rightarrow \max. \quad (9)$$

Определение оптимальной загрузки терминала, то есть определение значения интенсивности прихода экспортно-импортных судов к терминалу, соответствующей максимуму прибыли, осуществляется в следующей последовательности.

Зная значения коэффициентов  $C_0$ ,  $C_1$  и  $C_2$ , определяют соотношение  $\frac{\Delta C}{C_1}$ . На основе этого соотношения и известных характеристик транспортной системы  $m_1$ ,  $S_2$ ,  $m_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $\tau_m$  и  $m_3$  определяется оптимальное значение коэффициента загрузки причалов  $\varphi_1^0$ . Далее легко определяется оптималь-

ная приведенная плотность входного потока экспортно-импортных судов и его оптимальная интенсивность  $\lambda_1^o$ :

$$\psi_1 = \varphi_1 S_1; \lambda_1^o = \mu \psi_1 = \mu \varphi_1^o S_1.$$

Определение оптимального значения загрузки первого терминала может быть осуществлено классическим аналитическим методом на основе полиномиальных моделей среднего числа судов в очереди  $\bar{d}$  и средней приведенной результирующей плотности прихода судов к первому терминалу  $\psi_{\Sigma 1}$ .

Оптимальные значения коэффициента загрузки  $\varphi_1^o$  могут быть получены на основе аналитического метода путем дифференцирования полиномиальных моделей отдельных слагаемых выражения (6) по параметру  $q_1$ , соответствующему  $\varphi_1$ . Представим приведенную прибыль в виде:

$$\Pi = \frac{\Delta C}{C_1} (b_0''' + \sum_{i=1}^7 b_i'' q_i) - b_0'' - \sum_{i=1}^7 b_i'' q_i - \sum_{i=1}^7 b_{ii}'' q_i^2 - \sum_{i=1}^7 b_{ij}'' q_i q_j - \sum_{i=1}^2 b_{iii}'' q_i^3. \quad (10)$$

Здесь и далее индекс  $b''$  соответствует коэффициентам полиномиальной модели среднего числа судов в очереди на первом терминале  $\bar{d}_1$ , а индекс  $b'''$  — модели суммарной плотности прихода судов на первый терминал  $\psi_{\Sigma 1}$ .

Продифференцировав выражение (10) по параметру  $q_1$ , получим

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q_1} = \frac{\Delta C}{C_1} b_1''' - b_1'' - 2b_{11}'' q_1 - q_1 \sum_{i=2}^6 b_{1i}'' q_i - 3b_{111}'' q_1^2 = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) можно представить в виде

$$a q_1^2 + b q_1 + c = 0,$$

где  $a = 3b_{111}''$ ;  $b = 2b_{11}'' + \sum_{i=2}^6 b_{1i}'' q_i$ ;  $c = b_1'' - \frac{\Delta C}{C_1} b_1'''$ .

Тогда оптимальное выражение фактора  $q_1^o = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ .

Соответственно оптимальное значение коэффициента загрузки  $\varphi_1^o$  имеет вид:

$$\varphi_1^o = \varphi_0 + q_1^o \Delta \varphi_1, \quad (12)$$

где  $\varphi_0$  — усредненное значение  $\varphi$ ;  
 $\Delta \varphi_1$  — полуинтервал изменения  $\varphi$ .

На величину оптимальной загрузки причалов наиболее существенное влияние оказывает соотношение между коэффициентами  $\Delta C$  и  $C_1$ . Чем больше это соотношение, тем больше оптимальное значение  $\varphi_1^o$ . Можно легко показать, что оптимальное значение  $\varphi_1^o$  лежит внутри заданного диапазона изменения  $\varphi$ . Действительно, при стремлении  $\varphi$  к единице значение второго слагаемого  $d(\varphi, S)$  существенно увеличивается, то есть величина прибыли становится отрицательной. При значительном уменьшении  $\varphi$  прибыль также уменьшается, так как выручка падает.

Данный метод оптимального управления был использован при эксплуатации контейнерного терминала ООО «Моби Дик» в рамках Федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010–2020 годы)».

Предварительный анализ показал, что для этого терминала ориентировочное соотношение коэффициентов  $\frac{\Delta C}{C_1}$  будет равно 0,4.

Подставив эти данные в оптимизационную модель на основе выражения (11), получим оптимальное значение коэффициента загрузки терминала  $\varphi_1^o = 0,458$ .



Сравнительно невысокое значение оптимального коэффициента загрузки терминала объясняется высокими требованиями к среднему времени ожидания судов в очереди и тем, что в терминале имеются только два причала.

### **Заключение**

Использование полиномиальных моделей неполного третьего порядка, на основе которых были определены показатели качества процессов совместной обработки экспортно-импортных и каботажных контейнерных судов, дает возможность непосредственно вычислять значения этих показателей, минуя промежуточные вычисления, связанные с расчетом вероятностей отдельных состояний процессов. Проведенные исследования позволяют решать задачи оптимального управления процессами одновременной обработки экспортно-импортных и каботажных судов на контейнерных терминалах.

Полученные результаты доведены до алгоритмов и программного обеспечения, которые использованы при эксплуатации контейнерного терминала ООО «Моби Дик» в соответствии с Федеральной целевой программой «Развитие транспортной системы России (2010–2020 годы)».

### **Список литературы**

1. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М.: Издат. центр «Академия», 2005. — 576 с.
2. *Гнеденко Б. В.* Об определении оптимального числа причалов / Б. В. Гнеденко, М. Н. Зубков // Морской сборник. — М., 1964. — № 1. — С. 35–3-9.
3. *Гайнулин А. С.* Вероятностная формализация процессов обработки каботажных судов на контейнерных терминалах / А. С. Гайнулин, Ю. Я. Зубарев // Журнал Университета водных коммуникаций — СПб.: СПбГУВК, 2011. — Вып. 1 (9).
4. *Зубарев Ю. Я.* Определение оптимальной загрузки контейнерного терминала при заданном времени ожидания / Ю. Я. Зубарев, А. С. Хвастунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — Вып. 4 (20).
5. *Зубарев Ю. Я.* Оптимизация процессов переработки каботажных грузов / Ю. Я. Зубарев, А. М. Тюкавин. — СПб.: Политехника, 2009. — 168 с.