

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

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЧИСЛО СУДОВ В ОЧЕРЕДИ

PROBABILISTIC FORMALIZATION OF CONTAINERIZED CARGO HANDLING PROCESS CONSIDERING LIMITATION OF VESSELS IN THE QUEUE

В работе осуществляется формализация процессов переработки контейнерных грузов экспортно-импортных и каботажных судов с учетом ограничения на число судов в очереди.

This article contains the formalization of containerized cargo handling of inland and international trading vessels considering limitation of vessels in the queue.

Ключевые слова: обработка контейнерных грузов, вероятностная формализация, комбинированные сети систем массового обслуживания.

Key words: containerized cargo handling, probabilistic formalization, combined queueing networks.

Введение

Возрастающая сложность современных перерабатывающих терминалов и ужесточение требований к качеству переработки грузов выдвигают задачу исследования и оптимизации этих процессов на различных стадиях проектирования и эксплуатации терминалов.

В настоящее время возможности экстенсивного роста большинства существующих портов исчерпаны, так как все они в той или иной степени «зажаты» активно развивающейся в последнее время городской инфраструктурой. В связи с этим дальнейшее развитие таких портов возможно только за счет оптимизации работы действующих терминалов в целях повышения интенсивности погрузочно-разгрузочных работ и максимального сокращения сроков обработки судов. При этом наиболее важной и сложной задачей является оптимизация процессов переработки грузов путем оптимального планирования и оперативного управления этими процессами.

Решение оптимизационных задач сталкивается с рядом трудностей, связанных с отсутствием моделей, адекватно описывающих процессы одновременной обработки экспортно-импортных и каботажных судов.

При выборе числа причалов или оптимальной загрузки перегрузочных терминалов традиционно используются детерминированные модели процессов переработки грузов. Однако при обработке детерминированных моделей принимаются допущения, существенно идеализирующие процессы переработки грузов. Впервые задача определения оптимального числа причалов на основе марковских моделей массового обслуживания была сформулирована Б. В. Гнеденко более сорока лет тому назад.

Однако применение марковских моделей массового обслуживания для исследования процессов обработки контейнерных грузов не является целесообразным, так как эти модели недостаточно адекватно описывают процессы переработки грузов в реальных условиях функционирования.

Так, при использовании марковских моделей СМО предполагается, что длительность перехода судна из порта в порт и длительность обработки подчиняются показательному закону распределения. Принятие этих допущений может привести к весьма существенным ошибкам при расчете показателей качества процессов переработки экспортно-импортных и каботажных контейнерных грузов в стационарном режиме [3, с. 70–74].

В работах автора [3; 4, с. 74–76] рассматривались вопросы вероятностной формализации и оптимизации процессов обработки каботажных или экспортно-импортных судов. В настоящей работе рассматриваются процессы совместной работы каботажных и экспортно-импортных судов, представленных в виде комбинированных сетей систем массового обслуживания (СМО).

Разработка вероятностных моделей, адекватно описывающих процессы одновременной обработки каботажных и экспортно-импортных судов, учитывая ограничение на число судов в очереди на терминал. При этом учет взаимного влияния судов в терминале осуществляется путем введения в модели систем средних значений времени ожидания судов в очереди.

Полученные математические модели и алгоритмы на основе описываемых в статье вероятностных характеристик позволяют существенно повысить эффективность проектирования перегрузочных контейнерных терминалов в морских портах, обрабатывающих как каботажные, так и экспортно-импортные грузы. Применение указанных моделей позволяет производить оптимизацию процессов переработки экспортно-импортных и каботажных грузов путем оптимального планирования и оперативного управления этими процессами.

Математическая формулировка задачи

Одной из важнейших задач, возникающих при переработке контейнерных грузов, является разработка вероятностных моделей, адекватно описывающих процессы переработки. В работах автора [3; 4] рассматривались вопросы вероятностной формализации и оптимизации процессов обработки каботажных или экспортно-импортных судов. Ниже рассматриваются процессы совместной работы каботажных и экспортно-импортных судов, представленных в виде комбинированных сетей систем массового обслуживания (СМО). При этом учитывается ограничение на число судов в очереди.

Впервые потоки прихода в порт судов, перевозящих генеральные грузы, подробно рассмотрены в работах Б. В. Гнеденко. Обработка фактических данных по ряду портов показала, что гипотезу простейшего потока приходящих в порт судов в первом приближении можно принять с достаточной точностью. Простейший (стационарный пуассоновский) поток обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последействия.

После анализа данных по динамике грузооборота контейнерного терминала ПКТ за последние годы можно сделать вывод, что число переработанных контейнеров (а значит, и обработанных судов) в течение года от недели к неделе меняется незначительно, а значит, весь годовой период можно считать стационарным. Исключением являются только периоды, которые выпадают на новогодние праздники и 8 Марта.

Рассмотрим два контейнерных терминала, включающих S_1 и S_2 причалов. На терминалы поступают на обработку m_1 и m_2 экспортно-импортных судов. Потоки судов являются стационарными пуассоновскими и имеют интенсивность λ_1 и λ_2 . Между терминалами перевозки каботажных грузов можно рассматривать как последовательность циклических операций, когда m_3 судов перевозят груз от одного терминала к другому, а потом возвращаются и повторяют операцию. Предполагается, что каботажные и экспортно-импортные суда обладают одинаковыми характеристиками, то есть одинаковой контейнеровместимостью, а каботажные суда к тому же и одинаковой средней скоростью движения. Таким образом, математическое ожидание суммарного времени движения судов по маршруту в прямом и обратном направлениях $\bar{T}_m$ одинаковы.

При выполнении определенных условий можно рассматривать потоки прихода каботажных судов к терминалам как пуассоновские потоки.

При этом взаимное влияние различных терминалов, как показано ниже, будет осуществляться путем учета влияния значений математического ожидания среднего времени судов в очереди каждого из терминалов на интенсивность прихода этих судов в другой терминал.

Возникает задача определения математических ожиданий $\bar{d}_1$ и $\bar{d}_2$ числа судов, находящихся в очереди на первом и втором терминалах, а также математических ожиданий времени ожидания в очереди $\bar{T}_{ож1}$ и $\bar{T}_{ож2}$ и суммарного времени пребывания в терминалах $T_{\Sigma 1}$ и $T_{\Sigma 2}$.

При функционировании контейнерных терминалов в отдельные периоды времени могут возникать ситуации, когда загрузка причалов существенно возрастает. Предполагается, что если все причалы терминалов заняты, то диспетчер терминала ставит судно в очередь, если число судов в очереди d_1 и d_2 не превышает заданных чисел l_1 и l_2 . В противном случае суда передаются на смежные терминалы три и четыре.

Формализация может быть представлена в виде комбинированной сети СМО, где двум открытым СМО соответствует обработка экспортно-импортных судов, а замкнутой сети СМО — обработка каботажных судов.

Рассмотрим движение каботажных судов в прямом и обратном направлении. Время цикла операции T_{Σ} является случайной величиной. Необходимо определить математическое ожидание времени цикла, равное сумме математических ожиданий отдельных составляющих:

$$\bar{T}_{\Sigma} = \bar{T}_m + \bar{T}_{об1} + \bar{T}_{об2} + \bar{T}_{ож1} + \bar{T}_{ож2}. \quad (1)$$

При этом первые три слагаемых считаются известными, а два последних определяются методом последовательных приближений.

Интенсивность прихода каждого каботажного судна на первый терминал будет зависеть от времени пребывания судна вне этого терминала и определяться выражением

$$\lambda'_3 = \frac{1}{\bar{T}_{об2} + \bar{T}_{ож2} + \bar{T}_m}. \quad (2)$$

Соответственно результирующая интенсивность моментов прихода каботажных судов на первый терминал будет определяться интенсивностью λ'_3 и числом заявок, находящихся вне первого терминала:

$$\lambda_3 = \lambda'_3(m - \bar{d}_1).$$

Определим вероятность того, что каботажное судно находится в одном из терминалов. Выделим на оси времени отрезок, соответствующий суммарному времени пребывания каждого судна в терминале, то есть в очереди и на обработке. Тогда вероятность того, что хотя бы одно судно находится в терминале, будет пропорциональна времени пребывания этого судна в терминале. Но так как время пребывания этого судна в очереди и время обработки являются случайными величинами, то следует рассматривать математические ожидания этих величин. Тогда вероятность пребывания каботажного судна в первом терминале будет определяться выражением

$$p_3^{(1)} = \frac{\bar{T}_{ож1} + \bar{T}_{об1}}{\bar{T}_{\Sigma}}. \quad (3)$$

Аналогичные выражения получаются для вероятностных характеристик второго терминала.

Рассмотрим вероятностные характеристики экспортно-импортных судов.

Вероятность того, что хотя бы одно экспортно-импортное судно находится в терминале, будет пропорциональна интенсивности прихода каждого судна и суммарному времени пребывания этого судна в терминале. Тогда вероятность пребывания экспортно-импортного судна в первом терминале будет определяться выражением

$$p_1^{(1)} = \lambda'_1(\bar{T}_{об1} + \bar{T}_{ож1}) = \frac{\lambda_1}{m}(\bar{T}_{об1} + \bar{T}_{ож1}). \quad (4)$$

Таким образом, в первый терминал может поступить $m^{(1)} = m_1 + m_3$ судов, суммарной интенсивностью $\lambda^{(1)} = \lambda_1 + \lambda_3$.

Определение вероятностных характеристик

При определении вероятностных характеристик процессов целесообразно воспользоваться частной теоремой о повторении опытов [1, с. 35–39].

Поступление в терминал отдельных судов можно считать повторным проведением m_1 независимых испытаний, при этом экспортно-импортные суда могут оказаться в первом терминале с одной и той же вероятностью p_1 , определяемой выражением (4). Соответственно вероятность того, что каботажное судно находится не в первом терминале, обозначим как $q_1 = 1 - p_1$. Требуется найти все вероятности P_{n_1} того, что в терминале будет n_1 судов.

Число всех комбинаций такого рода равно $C_{m_1}^{n_1}$, то есть числу способов, какими можно из m_1 опытов выбрать n_1 , в которых произошло событие. Вероятность каждой комбинации по теореме умножения независимых событий равна $p^{n_1} q^{m_1 - n_1}$. Так как комбинации между собой несовместны, то

$$P_{n_1} = C_{m_1}^{n_1} p^{n_1} q^{m_1 - n_1} = \frac{m_1!}{n_1!(m_1 - n_1)!} p^{n_1} q^{m_1 - n_1}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно показать, что вероятность появления n_3 из m_3 каботажных судов будет определяться выражением

$$P_{n_3} = C_{m_3}^{n_3} p^{n_3} q^{m_3 - n_3} = \frac{m_3!}{n_3!(m_3 - n_3)!} p^{n_3} q^{m_3 - n_3}.$$

Соответственно вероятность появления $n_{\Sigma 1} = n_1 + n_3$ судов в первом терминале равна

$$P_{n_1 n_3} = P_{n_1} P_{n_3}.$$

Среднее суммарное число судов в очереди первого терминала имеет вид

$$d_1 = \begin{cases} \sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_3=0}^{m_3} P_{n_1} P_{n_3} n_{\Sigma 1} & \text{при } S_1 < n_{\Sigma 1} \leq l_1, \\ 0 & \text{при } n_{\Sigma 1} \leq S_1. \end{cases} \quad (6)$$

Среднее суммарное число судов в первом терминале можно найти по формуле

$$d_{\Sigma 1} = \sum_{n_1=1}^{m_1} n_1 P_{n_1} + \sum_{n_3=1}^{m_3} n_3 P_{n_3} \quad \text{при } n_{\Sigma 1} < l_1. \quad (7)$$

Соответственно вероятность того, что все экспортно-импортные и каботажные суда обработаны:

$$P_{0,1} = \sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_3=0}^{m_3} P_{n_1} P_{n_3} \quad \text{при } n_{\Sigma 1} < l_1. \quad (8)$$

Среднее время нахождения судна в очереди имеет вид

$$\bar{T}_{\text{ож}1} = \frac{d_1}{\lambda_1^{(1)}}. \quad (9)$$

Суммарное среднее время пребывания судна в первом терминале определяется выражением

$$\bar{T}_{\Sigma 1} = \frac{d_{\Sigma 1}}{\lambda^{(1)}}. \quad (10)$$

Аналогичные выражения можно записать для второго терминала.

Сложность расчетов вероятностных характеристик по выражениям (1)–(10) заключается в том, что не известны значения среднего времени ожидания судов в очереди на терминалы, а следовательно, и среднее общее время циклической операции $\bar{T}_{\text{ц}}$.

Поэтому указанные значения определяются методом последовательных приближений.

На первой итерации значения $\bar{T}_{\text{ож}1}$ и $\bar{T}_{\text{ож}2}$ для обоих терминалов берутся равными нулю, а значения $\bar{T}_{\Sigma 1} = \bar{T}_{\text{об}1}$ и $\bar{T}_{\Sigma 2} = \bar{T}_{\text{об}2}$. В первом приближении определяются искомые вероятностные характеристики. В следующей итерации $\bar{T}_{\text{ож}1}$ и $\bar{T}_{\text{ож}2}$ берутся из выражения (9) и пересчитываются

значения $\bar{T}_{\Sigma 1}, \bar{T}_{\Sigma 2}, \bar{T}_{\Sigma}$. Итерационные расчеты продолжаются до тех пор, пока n -й итерации $\bar{T}_{\Sigma 1}$ и $\bar{T}_{\Sigma 2}$ будут незначительно отличаться от сумм $\bar{T}_{ож1} + \bar{T}_{об1}$ и $\bar{T}_{ож2} + \bar{T}_{об2}$.

Вывод

Полученные выражения позволяют определить вероятностные модели процессов обработки экспортно-импортных и каботажных контейнерных судов с учетом их взаимного влияния друг на друга. Кроме того, эти модели позволяют учесть ограничение на число судов в очереди. Использование разработанных вероятностных моделей позволяет существенно расширить возможности и увеличить точность расчетов вероятностных показателей процессов переработки контейнерных грузов.

Это позволяет более точно решать задачи по оптимальному планированию и оперативному управлению процессами обработки экспортно-импортных и каботажных судов.

Указанный подход был использован для оптимизации процессов переработки и выбора оптимального числа судов и причалов на контейнерных терминалах в портах «Мурманск» и «Дудинка» для ГМК «Норильский никель».

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.
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 Гос. ун-та 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.