3. ФИНАНСОВЫЙ АНАЛИЗ

3.1. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Русинов И.А., к.т.н., доцент кафедры
экономики и основ управления

*Государственная морская академия
имени адмирала С.О. Макарова*

Формализуется задача оптимальной переработки контейнерных грузов на основе аппарата массового обслуживания. Определяются аналитические модели процессов в стационарных режимах, позволяющие связать показатели качества процессов с экономическими показателями. Приводятся решение задачи выбора оптимального числа причалов и определения оптимальной производственной программы контейнерного терминала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Морские контейнерные перевозки – наиболее удобный и экономичный способ транспортировки грузов. Конструкция грузового контейнера обеспечивает сохранную перевозку грузов в любой комбинации водных и сухопутных видов транспорта. При этом интенсифицируются процессы переработки грузов, минимизируются затраты в транспортных узлах, упрощается мониторинг и сокращается время перевозок. 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 специализированных терминалов, подчинить всю деятельность терминалов главной задаче – максимальному сокращению сроков и повышению объемов обработки морских судов. При этом наиболее важная и сложная задача – оптимизация процессов переработки контейнерных грузов, то есть решение задач оптимального планирования и управления этими процессами, исходя из технико-экономических критериев оптимальности. В процессе эксплуатации и проектирования контейнерных терминалов возникает ряд оптимизационных задач, среди которых необходимо отметить следующие:

- оптимальное планирование производственной деятельности терминала, в частности определение оптимальной интенсивности потока прихода судов в порт;
- определение оптимального числа причалов, исходя из известной интенсивности входного потока судов;
- обоснование программы развития производственных мощностей контейнерного терминала;
- выбор оптимального варианта контейнерного терминала;
- проверка эффективности функционирования терминала.

Формализация задач оптимизации вызывает определенные сложности в связи со сложностью вычислительных моделей процессов и их взаимосвязи. Рассмотрим показатели качества процессов, которые необходимо учитывать при определении оптимальных решений. Наиболее известным и традиционным показателем качества работы терминала является коэффициент использования причального фронта, характеризующий количество контейнерных грузов, переработка которых за единицу времени приходится на единицу длины причальной линии. Однако при известной интенсивности обработки судов, определяемых материально-техническими ресурсами, квалификацией персонала, расположением складских помещений и подъездных путей максимальный коэффициент причального фронта достигается только при условии непрерывной замены одного судна другим, т.е. при стремлении коэффициента загрузки причала к единице. Такая организация работы терминала возможна лишь при наличии постоянной очереди судов, т.е. при увеличении времени ожидания (простоя) судов, что значительно ухудшает качество услуг судоходным кампаниям и во многих случаях может в соответствии с условиями контрактов быть причиной для выставления санкций. Таким образом, коэффициент использования причальной линии – важнейший, но далеко не единственный показатель работы контейнерного терминала. Кроме того, вычисление этого коэффициента требует большого объема исходных данных, которые не всегда бывают известны. Поэтому в большинстве случаев целесообразно использовать коэффициент загрузки причалов, который при заданной интенсивности обработки судов дает достаточно корректную косвенную оценку коэффициента использования причальной линии.

Большое значение имеет группа показателей, характеризующих среднее время ожидания судна и среднее время пребывания судна в терминале, а также пропорциональные этим показателям средние значения числа судов, находящихся в очереди или в терминале. Указанные показатели характеризуют качество услуг, так как ожидание судов в очереди приводит к существенным потерям для судоходных компаний. Эти потери определяются приведенными эксплуатационными расходами и потерями провозной способности судна.

В результате, несмотря на увеличение грузооборота, излишнее увеличение коэффициента загрузки причалов становится экономически нерентабельным. При этом величина убытков возрастает с увеличением числа судов, простаивающих в ожидании освобождения причалов.

Еще одна группа показателей – экономические показатели, анализ которых выявил, что прибыль терминала наиболее полно отражает его коммерческую деятельность, так как максимальная прибыль возможна только при оптимальном функционировании терминала. Учет всех групп показателей представляет определенные сложности. 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ

В настоящее время широкое распространение получили детерминированные модели переработки грузов. При использовании детерминированных моделей предполагается, что прибытие в порт грузовых судов представляет собой регулярный поток событий, в котором прибытия следуют одно за другим строго по графику через одинаковые промежутки времени. Однако детерминированные модели не отражают специфику функционирования грузовых причалов контейнерных терминалов. В действительности моменты прихода судов в порты представляют собой нерегулярные потоки событий. Это объясняется следующими причинами.

- Для судоходных линий существует график прихода судов. Однако этот график диктуется интересами судоходных компаний. Поэтому величины интервалов между приходами судов существенно отличаются друг от друга.
- Время прихода судов в порт во многих случаях отклоняется от расчетного по многим причинам, которые не предусматриваются графиком. К ним относятся метеорологические условия, задержка в портах переработки грузов, корректировка маршрутов и ряд других причин. При этом указанные отклонения носят, как правило, случайный характер.
- Число судоходных компаний, с которыми заключены контракты, достаточно велико, и графики приходов судов различных компаний накладываются друг на друга.
- Чартерные суда часто меняют время прибытия не только в связи с выше указанными причинами, но и в результате заключения новых договоров на срочную поставку грузов, изменение сроков и пунктов поставки грузов.

Кроме того, необходимо учитывать, что время обработки грузов, зависящее от ряда случайных факторов, также является случайной величиной. В связи с этим процесс переработки грузов в контейнерном терминале происходит нерегулярно, что приводит в одних случаях к образованию очередей судов, а в других – к простою причалов. Поэтому для описания процессов обработки судов на грузовых причалах контейнерных терминалов необходимо пользоваться вероятностными моделями.

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. При этом меняется число судов, находящихся в очереди, и число занятых причалов. Система обработки грузов представляет собой систему дискретного типа с конечным (или счетным в общем случае) множеством состояний. Переход системы из одного состояния в другое происходит в моменты, когда либо новое судно подходит к терминалу, либо освобождается один из причалов. Система содержит счетное множество состояний: E_0, E_1, E_2, …, E_n, где n – число судов, находящихся в системе, т.е. учитываются как суда, находящиеся в очереди, так и суда, которые находятся в обработке. Судно будем называть связанным с контейнерным терминалом, если оно находится либо в очереди, либо в ожидании обработки груза.

Возможные состояния системы обработки грузов будут:

- E_0 – ни один причал не занят;
- E_1 – занят один причал;
- E_i – занято ровно i причалов;
- E_S – заняты все S причалов;
- E_{S+1} – заняты все S причалов. В очереди находится одно судно;
- E_{S+d} – заняты все S причалов. В очереди находится d судов.

В системах массового обслуживания (СМО) с «чистым» (бесконечным) ожиданием обычно предполагается, что число заявок, стоящих в очереди, может быть сколь угодно большим, т.е. СМО имеет бесконечное (хотя и счетное) множество состояний. В реальных условиях число судов в очереди всегда ограничено. Однако для получения аналитических выражений вероятностей отдельных состояний во многих случаях целесообразно считать их число бесконечным.

В любой момент времени указанные $n + 1$ состояний представляют собой полную группу событий, т.е.

$$\sum_n P_n(t) = 1 . \qquad (1)$$

Для определения вероятностных моделей необходимо осуществить математическое описание потоков прихода судов и времени их обработки на грузовых причалах.

Как известно, суммарный поток моментов прибытия судов в порт можно рассматривать как сумму потоков судов, принадлежащих различным компаниям и доставляющих различные грузы.

В то же время известно, что, при взаимном наложении большого числа ординарных стационарных потоков с практически любым последействием поток получается, сколь угодно близким к стационарному пуассоновскому (простейшему) потоку. Будем также считать, что время обработки судна подчиняется показательному закону распределения.

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 во многих случаях представить выражения для вероятностных показателей 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.

Так, 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 En 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 неизвестно 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 неадекватны указанным допущениям.

Поэтому в работе рассматривается централизованная система обработки грузов, управление которой осуществляется администратором терминала. Администратор определяет дисциплину очереди и дисциплину обслуживания, а также производит распределения человеческих и технических ресурсов между отдельными каналами. В случае необходимости, когда очередь судов существенно возрастает, администратор может привлечь дополнительные ресурсы, тем самым существенно увеличивая интенсивность обработки грузов отдельными причалами. Однако во многих случаях, ввиду ограничения фронта перегрузочных работ, результирующая интенсивность системы становится меньше суммарной интенсивности отдельных технических средств. Таким образом, в реальных условиях результирующая интенсивность обработки грузов, как правило, не бывает кратной средней интенсивности обработки μ_0 и в отдельных случаях может превышать величину $S\mu_0$.

Указанные особенности централизованной системы обработки контейнерных грузов требуют, чтобы разрабатываемые вероятностные модели учитывали возможность изменений интенсивности отдельных приборов обслуживания в зависимости от состояния СМО. Однако классическая теория массового обслуживания оперирует постоянными значениями интенсивности отдельных приборов восстановления. Поэтому один из основных научных результатов настоящей работы – 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. 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. Расчетная интенсивность обработки каждым причалом μ_0. Однако результирующая интенсивность процесса может меняться в зависимости от его состоянии. 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. $n \geq S$ предполагается что $r_n = const$ (обычно $r_n = max$). Однако в отдельных случаях интенсивность обработки грузов меняется и при $n > S$. 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:

$$\overline{P}^T(t) = \left[P_0(t), P_1(t), P_2(t).....\right];$$

$$0 \leq P_n(t) \leq 1, \quad n = 0,1,2,3....$$

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:

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

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

Представим вероятности перехода системы из одного состояния в другое следующим образом:

$$\begin{aligned} &E_0 \to E_{\overline{0}}, P_{00} \quad 1-\lambda t; \\ &E_0 \to E_1, P_{01} = \lambda t; \\ &E_1 \to E_0, P_{10} = r_1\mu_0 t. \end{aligned} \tag{3}$$

$$1 \leq n \leq S \begin{cases} E_n \to E_{n\overline{}}\ P_{nn} \quad 1-(\lambda + r_n\mu_0)dt; \\ E_n \to E_{n+1}, \quad P_{n,n+1} = \lambda dt; \\ E_n \to E_{n-1}, \quad P_{n,n-1} = r_n\mu_0 dt; \end{cases} \tag{4}$$

$$n \geq S \begin{cases} E_n \to E_{n\overline{}}\ P_{nn} \quad 1-(\lambda + r_s\mu_0)dt; \\ E_n \to E_{n+1}, \quad P_{n,n+1} = \lambda dt; \quad . \\ E_n \to E_{n-1}, \quad P_{n,n-1} = r_s\mu_0 dt; \end{cases} \tag{5}$$

Тогда стохастическую матрицу переходов можно представить в виде матрицы:

$$\left[\begin{array}{ccccc} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 & \cdots \\ 1-\lambda dt & \lambda dt & 0 & 0 & \cdots \\ \mu_0 & 1-(\lambda+r_1\mu_0)dt & \lambda dt & 0 & \cdots \\ 0 & r_2\mu_0 dt & 1-(\lambda+r_2\mu_0)dt & \lambda dt & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \end{array}\right.$$

$$\left.\begin{array}{cccc} \cdots & E_{s-1} & E_s & E_{s+1} \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & -(\lambda+r_{s-1}\mu_0) & \lambda & 0 \\ \cdots & r_n\mu_s & -(\lambda+r_s\mu_0) & \lambda \\ \cdots & 0 & r_s\mu_s & -(\lambda+r_3\mu_0) \end{array}\right]. \tag{6}$$

Матрица (7):

$$\left[\begin{array}{ccccc} E_0 & E_0 & E_0 & E_0 & \cdots \\ -\lambda & \lambda & 0 & 0 & \cdots \\ \mu_0 & -(\lambda+r_1\mu_0) & \lambda & 0 & \cdots \\ 0 & r_2\mu_0 & -(\lambda+r_1\mu_0) & \lambda & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \end{array}\right.$$

$$\left.\begin{array}{cccc} \cdots & E_{s-1} & E_s & E_{s+1} \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & -(\lambda+r_{s-1}\mu_0) & \lambda & 0 \\ \cdots & r_n\mu_s & -(\lambda+r_s\mu_0) & \lambda \\ \cdots & 0 & r_s\mu_0 & -(\lambda+r_3\mu_0) \end{array}\right]. \tag{7}$$

Строкам матрицы соответствует состояние $En(t)$, а столбцам $En + 1(t)$. Осуществив операцию транспонирования над левой и правой частями выражения (7), получим:

$$\vec{P}(t+dt) = J^T(t)\ \vec{P}(t), \qquad (8)$$

где $J^T(t)$ – матрица, транспонированная к матрице переходов $J(t)$;

$\vec{P}(t)$ – вектор столбец вероятностей размерностей $n * 1$.

Представим (7) в виде:

$$\vec{P}(t+dt)\ \left[J^T(t) - E_n\right]\ \vec{P}(t) + \vec{P}(t). \qquad (9)$$

Перенесем $\overline{P}(t)$ в левую часть, тогда

$$\vec{P}(t+dt) - \vec{P}(t)\ \left[J^T(t) - E_n\right]\ \vec{P}(t). \qquad (10)$$

Разделив левую и правую части (10) на dt, получим:

$$\vec{P}'(t) = R\vec{P}(t), \qquad (11)$$

где $R = \frac{1}{dt}\left[J^T(t) - E_n\right]$ – матрица, которая имеет вид (12).

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

$$\begin{bmatrix} \overline{P}'(t) \\ I_{1\times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ I_{1\times(m+1)} \end{bmatrix} * \overline{P}(t) = \begin{bmatrix} RP(t) \\ \sum\limits_{n=0}^{m} P(t) \end{bmatrix}, \qquad (12)$$

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

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

$$P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + r_1\mu_0\ P_1(t); \qquad (13)$$

$$P_n'(t) = -\lambda P_{n-1}(t) + (\lambda + r_1\mu_0)P_n(t) + $$
$$+ r_{n+1}\mu_0\ P_{n+1}(t)\quad n = 1.2.3.....$$

Будем считать, что процесс обработки грузов является марковским случайным эргодическим, то есть по истечении 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 $t = 0$ и не зависит от самого промежутка времени. Такое допущение возможно, т.к. все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, являются простейшими, т.е. все элементы матрицы R являются постоянными величинами.

Режим работы контейнерного терминала, при котором вероятности Pn нахождения системы в состояние n не зависят от времени, называется стационарным режимом. Характеристики этого режима зависят не от того, в каком состоянии контейнерный терминал находился в начальный момент времени, а от принятой дисциплины обработки грузов, т.е. от распределения ресурсов контейнерного терминала. Для определения значений вероятностей отдельных состояний в стационарных режимах необходимо приравнять к нулю значения производных состояний, т.е. левых частей системы уравнений (13), а также перенести в каждом уравнении одно из слагаемых в левую часть. В результате получим:

$$r_1\mu_0\ P_1 = \lambda P_0;$$

$$r_2\mu_0\ P_2 = (\lambda + r_1\mu_0)P_1 - \lambda P_0; \qquad (14)$$

$$r_3\mu_0\ P_3 = (\lambda + r_2\mu_0)P_2 - \lambda P_1;$$

$$r_n\mu_0\ P_n = (\lambda + r_{n-1}\mu_0)P_{n-1} - \lambda P_{n-1}.$$

Введем обозначение $\psi = \frac{\lambda}{\mu_0}$ и назовем ее приведенной плотностью потока прихода судов. Тогда, решив систему уравнений (14), получим следующее выражение соотношений между стационарными значениями вероятностей отдельных состояний:

$$P_1 = \frac{1}{r_1}\psi P_0;$$

$$P_2 = \frac{1}{r_2}\psi P_1 = \frac{1}{r_1 r_2}\psi^2 P_0; \qquad (15)$$

$$P_3 = \frac{1}{r_3}\psi P_2 = \frac{1}{r_2 r_3}\psi^3 P_0;$$

$$P_n = \frac{1}{r_n}\psi P_{n-1} = \frac{1}{\prod\limits_{i=1}^{n} r_i}\psi^n P_0.$$

Используя выражение (1), получим нормировочное условие:

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{D}\frac{1}{\prod\limits_{i=0}^{n} r_i}\psi^n\right] = 1, \qquad (16)$$

где r_0 берется равным 1.

Нормировочное условие можно записать следующим образом:

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{S-1}\frac{\psi^S}{\prod\limits_{n=1}^{S} r_n} + \frac{\psi^S}{\prod\limits_{n=1}^{S-1} r_n}\sum_{d=0}^{\infty}\left(\frac{\psi}{r_{max}}\right)^d\right] = 1, \qquad (17)$$

где

$d = n - S$;

S – число судов, находящихся в очереди.

Определим среднее число судов, находящихся в очереди:

$$\overline{d} = \sum_{n=S+1}^{\infty}(n-S)P_n = \sum_{d=1}^{\infty} dP_{S+d} = P_S\sum_{d=1}^{\infty} d\left(\frac{\psi}{r_{max}}\right)^d, \qquad (18)$$

где

$$P_S = P_0\frac{\psi^S}{\prod\limits_{i-1}^{S} r_i}. \qquad (19)$$

Известно, что:

$$\sum_{d=1}^{\infty} d\left(\frac{\psi}{r_{max}}\right)^d = \frac{\frac{\psi}{r_{max}}}{\left(1 - \frac{\psi}{r_{max}}\right)^2}. \qquad (20)$$

Подставив (19) и (20) в (18), получим выражение для среднего числа судов, находящихся в очереди:

$$\overline{d} = P_0\frac{\psi^S}{\prod\limits_{i=1}^{S} r_i}\frac{\frac{\psi}{r_{max}}}{\left(1 - \frac{\psi}{r_{max}}\right)^2} = P_0\frac{\psi^{S+1}}{\prod\limits_{i=1}^{S-1} r_i(r_{max} - \psi)^2}. \qquad (21)$$

Определим среднее число судов, находящихся в терминале:

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=0}^{S} nP_n + \sum_{n=S+1}^{\infty} nP_n . \qquad (22)$$

Рассмотрим второе слагаемое:

$$\sum_{n=S+1}^{\infty} nP_n = \bar{d} + \sum_{n=S+1}^{\infty} SP_n = \bar{d} + S(1 - \sum_{n=0}^{S} P_n) . \qquad (23)$$

Тогда среднее общее число судов в терминале:

$$\bar{n} = \bar{d} + S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} p_0 . \qquad (24)$$

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

$$\bar{n} = \bar{n}_{обр} + \bar{d} . \qquad (25)$$

Соответственно, среднее число судов, находящихся в обработке:

$$\bar{n}_{обр} = S - \sum_{n=0}^{S} (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} P_0 . \qquad (26)$$

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

Среднее время задержки судна в ожидании процесса обработки из-за занятых причалов:

$$\bar{T}_{ож} = \frac{\bar{d}}{\lambda} = \frac{P_0}{\lambda} \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{max} - \psi)^2} . \qquad (27)$$

Среднее общее время пребывания судна в терминале:

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

$$= \bar{T}_{ож} + \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)P_n\right] . \qquad (28)$$

Соответственно среднее время обработки одного судна:

$$\bar{T}_{обр} = \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)P_n\right] . \qquad (29)$$

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

$$\bar{\tau}_{ож} = \bar{T}_{ож}\mu = \frac{\bar{d}}{\psi} ;$$

$$\bar{\tau}_{\Sigma} = \bar{T}_{\Sigma}\mu = \frac{\overline{d_{\Sigma}}}{\psi} . \qquad (30)$$

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

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. Будем рассматривать навигационный период (несколько месяцев или год) в течение которого суммарная интенсивность суммарного потока прихода судов в порт λ в первом приближении может считаться постоянным. Будем также рассматривать процесс с бесконечным ожиданием и считать, что контейнеровместимость судов примерно одинакова, то есть каждое судно перевозит определённое число контейнеров одного типа. Обработка грузов осуществляется с интенсивностью μ_0. 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:

$$Э_0 = C_0\lambda = C_0'\psi , \qquad (31)$$

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 ед. 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:

$$Э_1 = C_1\bar{d} = C_1\psi\overline{\tau_{ож}} , \qquad (32)$$

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:

$$Э_{1\Sigma} = C_1\psi(\overline{\tau_{\Sigma}} - \overline{\tau_{н.обр}}) , \qquad (33)$$

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

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

Тогда выражение (32) можно представить в виде:

$$Э_1 = C_1(d - \psi) . \qquad (34)$$

Можно легко показать, что при отсутствии взаимопомощи затраты, определяемые по выражениям (32) и (33), 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, разница 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:

$$Э_2 = C_2 + C_2(1-\varphi)\mu SK_{пр} , \qquad (35)$$

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;

$\varphi = \dfrac{\psi}{S}$ – коэффициент загрузки причалов.

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

Выражение (35) удобно представить в виде:

$$Э_2 = C_2'\psi = C_2'\psi(1-K_{пр}) + C_2'SK_{пр}, \quad (36)$$

где $C_2' = C_2\mu$.

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

$$Э_3 = C_3S, \quad (37)$$

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

Соответственно суммарные приведенные затраты:

$$Э_\Sigma = Э_1 + Э_2 + Э_3. \quad (38)$$

Если при определении первой составляющей затрат использовать выражение (32), то выражение для прибыли терминала в единицу времени примет следующий вид:

$$Э_п = C_0'\psi S - C_1\psi S\tau_{ож} - C_2'\psi S(1-K_{пр}) - C_2'SK_{пр} - C_3S =$$
$$= C_0''\psi S - C_1\psi S\tau_{ож} - C_2''S, \quad (39)$$

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

Рассмотрим два крайних случая значений коэффициента простоя.

Если $K_{пр} = 1$, то есть при простое затраты остаются такими же, то $C_0'' = C_0'$, а $C_2'' = C_2' + C_3$, то вторая составляющая затрат зависит только от числа причалов и не зависит от интенсивности входного потока судов.

Если $K_{пр} = 0$, то есть простаивающую технику перебрасывают на другие работы в терминале, то вторая составляющая затрат будет пропорциональна интенсивности входного потока судов λ. На основе выражения для прибыли (39) могут быть сформулированы и решены различные задачи оптимизации процессов обработки на основе экономических критериев.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ПРИЧАЛОВ

При решении этой задачи предполагается, что известен поток прихода судов за заданный период λ и интенсивность обработки грузов μ_0, а следовательно, и приведенная плотность потока ψ. Так как доход терминала за единицу времени, определяемый из выражения (31), зависит только от величины ψ, то максимуму прибыли в этом случае будет соответствовать минимум затрат. Кроме того, можно отбросить третье слагаемое выражения (39), так как оно зависит от ψ и $K_{пр}$ и не зависит от числа причалов. Тогда критерий минимума затрат можно представить следующим образом:

$$C_1d(\psi,S) + C_3'S \to min; \quad (40)$$

где

$$C_3' = C_2'K_{пр} + C_3. \quad (41)$$

Ввиду того что возможны различные значения C_1' и C_3', для большей общности разделим приведенные затраты на C_1'. Тогда критерий минимума относительно приведенных затрат будет определяться выражением:

$$\overline{d}(\psi,S) + \frac{C_3'}{C_1'}S \to min. \quad (42)$$

Произведем расчет относительных приведенных затрат для различных сочетаний значений ψ, $\dfrac{C'_3}{C'_1}$ и S на основе выражения (42) с учетом частичной взаимопомощи. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЕЛ ПРИЧАЛОВ

$\dfrac{C'_3}{C'_1}$	S и φ	ψ						
		1,5	2	3	4	5	6	7
0,05	S	4	5	7	8	8	8	8
	φ	0,375	0,4	0,428571	0,5	0,625	0,75	0,875
0,1	S	4	4	6	7	8	8	8
	φ	0,375	0,5	0,5	0,571429	0,625	0,75	0,875
0,2	S	3	4	5	7	8	8	8
	φ	0,5	0,5	0,6	0,571429	0,625	0,75	0,875
0,3	S	3	4	5	7	8	8	8
	φ	0,5	0,5	0,6	0,571429	0,625	0,75	0,875
0,4	S	3	4	5	6	8	8	8
	φ	0,5	0,5	0,6	0,666667	0,625	0,75	0,875
0,5	S	3	4	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,5	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875
0,6	S	3	4	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,5	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875
0,7	S	3	3	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,666667	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875
0,8	S	3	3	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,666667	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875
0,9	S	3	3	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,666667	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875
1	S	3	3	5	6	7	8	8
	φ	0,5	0,666667	0,6	0,666667	0,714286	0,75	0,875

Из табл. 1 видно, что с увеличением приведенной плотности потока ψ и с уменьшением соотношения $\dfrac{C'_3}{C'_1}$ оптимальное число причалов возрастает.

Аналогичные результаты получаются при выборе числа причалов для процессов переработки грузов без взаимопомощи.

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 (39). Однако третье слагаемое в правой части (38) и часть второго слагаемого не зависят от приведенной плотности ψ, а остаются постоянными. 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:

$$Э'_п = \frac{C''_0}{C'_1}\varphi S - d(\varphi, S),\ C''_0 = C'_0 - C'_2(1 - K_{пр}). \qquad (43)$$

Зависимости $Э'_п$ от коэффициента загрузки φ при различных значениях $\frac{C''_0}{C_1}$ представляют собой унимодальные функции с сильным максимумом, который соответствует оптимальному значению φ. В табл. 2 и 3 приведены оптимальные значения φ для различных S, исходя из максимума прибыли, без учета (см. табл. 2) и с учетом (см. табл. 3) взаимопомощи. 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 $\frac{C''_0}{C_1}$ меняется в пределах от 0,65 до 0,88. В большинстве практических случаях $\frac{C''_0}{C_1}$ можно считать большим пяти. Тогда нижний предел оптимального значения φ становится равным 0,76.

Таблица 2

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ ПРИЧАЛОВ БЕЗ УЧЕТА ВЗАИМОПОМОЩИ

$\frac{C''_0}{C_1}$	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

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 $\frac{C''_0}{C_1}$.

На основе этого соотношения и известного числа причалов S определяется оптимальное значение коэффициента загрузки причалов φ. Далее легко определяется оптимальная приведённая 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.

Таблица 3

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ ПРИЧАЛОВ С УЧЕТОМ ЧАСТИЧНОЙ ВЗАИМОПОМОЩИ

$\frac{C''_0}{C_1}$	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

Литература

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
2. Кузин Л.Т. Основы кибернетики: В 2 т. Т. 2. – М.: Энергия, 1979. – 584 с.
3. Русинов И.А. Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированном терминале. – СПб:. СПбИИ РАН, 2005. – 168 с.

Русинов Игорь Александрович

Рецензия

В течение последних лет во всем мире наблюдается устойчивая тенденция роста морских контейнерных перевозок. Отсюда возникает проблема создания современной технологической схемы переработки контейнерных грузов. Поэтому тематика статьи, посвященная оптимизации переработки грузов, является актуальной и представляет как теоретический, так и практический интерес.

Впервые идею о применении аппарата массового обслуживания для моделирования процессов переработки грузов выдвинул еще академик АНУССР Б.В. Гнеденко. Однако указанные идеи не нашли практического применения, так как традиционный аппарат массового обслуживания неадекватно описывает процессы переработки грузов. Поэтому несомненным научным результатом автора является возможность учета изменения интенсивности обработки грузов в зависимости от состояния процесса массового обслуживания. Такой подход позволяет моделировать специфические ситуации, когда в отдельных нежелательных состояниях процесса возникает необходимость подключения дополнительных ресурсов. На основе разработанных моделей определяются аналитические выражения для показателей качества процессов переработки грузов в стационарных режимах. Несомненный интерес представляют сформулированные технико-экономические критерии, при формулировании которых автор связал экономические показатели (прибыль, затраты) с показателями качества переработки грузов (среднее число судов в очереди, среднее время ожидания судна в очереди, приведенная плотность, интенсивности прихода судов в порт). Такой подход позволяет решать оптимизационные задачи, в частности связанные с определением оптимального числа причалов и оптимальной загрузкой причалов, исходя из технико-экономических критериев. Решение этих задач в процессе проектирования и эксплуатации контейнерных терминалов, позволяет существенно повысить эффективность их использования.

Считаю полезным и целесообразным публикацию рецензируемой работы в журнале «Аудит и финансовый анализ».

Зубарев Ю.Я. д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций

3. FINANCIAL ANALYSIS

3.1. OPTIMIZING METHODS OF PROCESSING CONTAINERIZED CARGO ON THE BASIS OF VARIOUS TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC CRITERIA

I.A. Rusinov, Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Department: «Economy and Bases of Management»

State Maritime Academy named after Admiral Makarov

A task of optimal processing of containerised cargo using the facility of mass service is currently being formalised. Several analytical models simulating processes in stationary regime allow to link the qualitative indicators with economic indicators. A number of solutions to problems such as selecting an optimal number of berths and determine an optimal production program for a container terminal are being introduced.

Literature

1. B.V. Gnedenko, Irina Kovalenko «Introduction to the theory of queuing» M., Science, 1987, 336 p.
2. L.T. Kuzin «Fundamentals of Cybernetics,» Book 2, M., Energy, 1979, 584 p.
3. I.A. Rusinov «The processing and storage of refrigerated cargo on a specialized terminal», SPB, SPbII Russian Academy of Sciences, 2005. 168 p.