УДК 656.615
DOI: 10.37890/jwt.vi70.243

Эффект снижения предельной интенсивности грузовой обработки транспортных средств при увеличении задействованного числа технологических линий

А. А. Фунтусов
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7310-8552
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация. Опыт производственной деятельности морских и речных портов показывает, что интенсивность грузовой обработки судов и других транспортных средств возрастает с увеличением задействованного числа технологических (механизированных) линий отнюдь не линейно: в согласии с универсальным законом убывающей предельной производительности факторов производства каждая дополнительная технологическая линия даёт всё меньший и меньший прирост интенсивности обработки транспортного средства. Несмотря на её важность для планирования грузовых операций, эта закономерность не получила ясного теоретического объяснения в специальной литературе. Настоящая статья представляет попытку автора восполнить этот пробел. В статье предлагается теоретическое объяснение причин снижения предельной интенсивности обработки транспортных средств при увеличении задействованного числа технологических линий. В статье показано, что это может быть объяснено действием двух эффектов: эффекта интерференции (взаимных помех) и конъюнктивного эффекта. Оба эти эффекта обусловливаются тем, что грузовая обработка транспортного средства представляет собой не детерминированный, а случайный (стохастический) процесс. В статье дается количественная и качественная оценка влияния указанных эффектов на интенсивность грузовой обработки транспортных средств в зависимости от задействованного числа технологических линий.

Ключевые слова: морской порт, транспортный терминал, грузовые операции, транспортное средство, технологическая линия, подъёмно-транспортная машина, порядковые статистики, система массового обслуживания, закон убывающей предельной производительности

A theoretical analysis of the phenomenon of diminishing marginal productivity of gangs employed for (un)loading a vehicle

Anatoly A. Funtusov
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7310-8552
Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Abstract. The experience of (un)loading ships and other vehicles in sea ports shows that the rate of (un)loading (i. e. the amount of cargo being (un)loaded (from)onto a vehicle per time unit) does not increase in direct proportion to the number of gangs employed; in accordance with the law of diminishing marginal productivity each additional gang adds less and less to the rate of (un)loading. Despite its importance in operations planning, this phenomenon has not been given careful consideration and clear explanation in the literature related to port operations. This paper attempts to fill this gap by offering a theoretical explanation for why the marginal rate of (un)loading decreases with the addition of each extra gang. This paper suggests two reasons behind the phenomenon: the interference effect, and the conjunction effect. Both of these effects are due to the fact that (un)loading a vehicle is not a deterministic but a stochastic process. Each of the effects is examined in the paper both quantitatively and qualitatively.

Keywords: sea port, transport terminal, cargo handling operations, vehicle, gang, cargo handling equipment, order statistics, queueing system, law of diminishing marginal productivity

Введение

В основе решения многих задач планирования производственной деятельности морских и речных портов лежит вопрос о том, каким образом интенсивность грузовой обработки транспортных средств (судов, ж.-д. вагонов, автомашин) зависит от задействованного числа (концентрации) технологических (механизированных) линий.

На первый взгляд ответ на этот вопрос представляется очевидным: если интенсивность загрузки (разгрузки) транспортного средства (ТС) одной технологической линией (ТЛ) составляет P (тонн за единицу времени), то при одновременном использовании N ТЛ она составит NP (тонн за единицу времени), т. е. интенсивность грузовой обработки ТС должна быть связана с числом задействованных ТЛ простой линейной зависимостью.

Однако при более внимательном рассмотрении этого вопроса обнаруживается, что интенсивность M грузовой обработки ТС изменяется с увеличением концентрации ТЛ отнюдь не линейно, а зависит от N более сложным образом. В общем случае указанная зависимость (без учета подготовительных, заключительных и вспомогательных операций) может быть записана в виде

$$M(N) = NP(1 - k) \tag{1}$$

где N – концентрация ТЛ на обработке ТС, P – производительность одной ТЛ, а $k < 1$ – поправочный коэффициент, величина которого зависит от N.

При $N = 1$ $k = 0$, а при $N \geq 2$ значение коэффициента k будет тем больше, чем больше число N. Вследствие этого с увеличением N каждая дополнительная ТЛ даёт всё меньший и меньший прирост интенсивности M обработки ТС. Другими словами, предельная интенсивность обработки ТС, т. е. разность $M(N + 1) - M(N)$, убывает с ростом N. При грузовой обработке ТС таким образом находит подтверждение универсальный закон убывающей предельной производительности [1] (убывающей отдачи [2]) факторов производства.

Применительно к грузовой обработке морских и речных судов отмеченный факт хорошо известен и описан в специальной литературе, посвященной вопросам проектирования и эксплуатации морских и речных портов (табл. 1). Однако сведения, приводимые в упомянутой литературе, весьма неоднозначны. Так, согласно [3, с. 246], при обработке судна, имеющего четыре трюма (люка), одновременно тремя ТЛ (кранами) коэффициент k будет равен нулю. Однако согласно [4, с. 20] коэффициент k в этом случае должен быть равен 0,05. Согласно [5, с. 50], при обработке судна-контейнеровоза одновременно тремя ТЛ (контейнерными перегружателями) k = 0, тогда как согласно [6, с. 44] коэффициент k должен быть равен 0,2.

Таблица 1

Оценки величины коэффициента k

Источник [3]	Источник [4]	Источник [5]	Источник [6]	k
Морские суда (в зависимости от числа n люков на судне)	Речные суда проекта 507 (4 трюма)	Суда-контейнеровозы на специализированных контейнерных терминалах		
$N < n$	$N \leq 2$	$N \leq 3$	$N = 1$	0,00
$N = n$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 2$	0,05
$N = n + 1$	$N = 4$	$N = 5$	−	0,10
$N = n + 2$	−	$N = 6$	−	0,15
−	$N = 5$	$N > 6$	$N \geq 3$	0,20

Причину столь значительного разброса оценок следует, очевидно, искать в том, что эти оценки были получены эмпирически в разных условиях обработки судов. При этом ни в одном из упомянутых источников эти условия не раскрываются. Поэтому данные табл. 1 и другие подобные оценки, к сожалению, дают очень мало для понимания причин и характера нелинейной зависимости интенсивности грузовой обработки судна от задействованного числа ТЛ.

Не найдя в специальной литературе работ, содержащих какое-либо теоретическое объяснение убывающей предельной интенсивности грузовой обработки ТС, автор предпринял самостоятельное исследование этого вопроса с целью получить более ясное качественное и количественное представление о том, каким образом интенсивность (и, соответственно, продолжительность) грузовой обработки ТС зависит от концентрации ТЛ. В настоящей статье излагаются основные результаты этого исследования.

В статье отдельно рассматриваются два эффекта, действием которых можно объяснить снижение предельной интенсивности обработки ТС с увеличением концентрации ТЛ. Оба эти эффекта обязаны своим происхождением тому обстоятельству, что грузовая обработка ТС представляет собой не детерминированный, а случайный (стохастический) процесс.

Ввиду ограниченности объёма статьи, для простоты и краткости изложения анализ ограничивается только теми случаями, когда погрузка (выгрузка) груза осуществляется по простой технологической схеме (например, «вагон – погрузчик – склад»); при этом ТЛ состоит из подъёмно-транспортных машин (ПТМ) одного типа, которые выполняют все операции с грузом при перегрузке его по данному варианту работ. Очевидно, что в этом случае одна ТЛ с несколькими ПТМ эквивалентна такому же числу ТЛ с одной единственной ПТМ в каждой. Случаи обработки ТС по сложной технологической схеме, когда ТЛ состоит из ПТМ разных типов, выполняющих каждая свою часть операций по перемещению груза (например, «трюм – кран – причал – погрузчик – склад»), требуют отдельного изучения и в статье не рассматриваются.

Эффект интерференции (взаимных помех)

Одной из причин того, что зависимость интенсивности грузовой обработки ТС от концентрации ТЛ носит нелинейный характер, выражаемый формулой (1), является эффект интерференции (взаимных помех). Данный эффект имеет место при пересечении оперативных зон ТЛ в процессе грузовой обработки ТС.

Суть эффекта интерференции можно пояснить на следующем примере, заимствованном из действующего руководства по определению технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов [7]. Помимо его наглядности, данный пример позволяет показать, что эффект интерференции не всегда учитывается при планировании грузовой обработки ТС.

Пусть крытый четырехосный вагон с грузом бумаги в рулонах разгружается с помощью двух электропогрузчиков по технологической схеме «вагон – погрузчик – склад» (в данном случае мы имеем две ТЛ, каждая из которых состоит из одного погрузчика). В соответствии с [8] предполагается, что въезд второго погрузчика в вагон возможен только после выезда первого погрузчика на расстояние не менее 2 (м) от дверного проема вагона. Погрузчики перегружают по одному рулону бумаги за один рабочий цикл.

Согласно [7], продолжительность разгрузки вагона (в часах) при одновременной работе двух погрузчиков (без учета подготовительных и заключительных операций) будет равна

$$t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{в}}}{2P}, \tag{2}$$

где $Q_{\text{в}}$ – количество груза в вагоне (т), а P – среднечасовая производительность погрузчика (т/час), которая определяется по формуле

$$P = q_{\text{ц}}/t_{\text{ц}}, \tag{3}$$

где $q_{\text{ц}}$ – количество груза, перегружаемое погрузчиком за один рабочий цикл (т), а $t_{\text{ц}}$ – средняя продолжительность рабочего цикла погрузчика (выраженная в часах).

Легко видеть, что формула (2) предусматривает линейную зависимость интенсивности разгрузки вагона от числа задействованных ТЛ (погрузчиков). Действительно, согласно (2) интенсивность разгрузки вагона двумя погрузчиками (в тоннах за час) равна

$$M = Q_{\text{в}}/t_{\text{гр}} = 2P$$

Покажем, что в действительности интенсивность разгрузки вагона в рассматриваемом примере будет равна не $2P$, а $2P(1 - k_{int}) < 2P$, согласно формуле (1), в которой коэффициент k будет иметь смысл коэффициента интерференции k_{int}. Соответственно, продолжительность разгрузки вагона (без учета подготовительных и заключительных операций) будет равна

$$t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{в}}}{2P(1 - k_{int})}. \tag{4}$$

Для этого, прежде всего, обратим внимание на то обстоятельство, что продолжительность каждой отдельной операции, выполняемой погрузчиками в процессе разгрузки вагона (захват рулона, передвижение на склад, укладка рулона в штабель и т. д.), является случайной величиной.

Имея в виду это обстоятельство, заметим далее, что вагон и два погрузчика, которые работают одновременно на разгрузке вагона, образуют своеобразную систему массового обслуживания (СМО). В этой системе участок грузового фронта, включающий в себя кузов вагона и прилежащий к двери вагона участок рампы радиусом 2 (м), – назовем этот участок зоной выгрузки, – играет роль канала обслуживания, который принимает и «обслуживает» поток заявок, поступающих попеременно от двух источников – погрузчиков. Въезд погрузчика в зону выгрузки означает поступление заявки на обслуживание, суть которого сводится к тому, что погрузчику предоставляется доступ в вагон для выгрузки очередного рулона бумаги. Если в момент поступления заявки канал обслуживания занят (в зоне выгрузки уже находится другой погрузчик), то заявка становится в очередь у границы зоны выгрузки и ожидает освобождения канала (выезда первого погрузчика из вагона на расстояние не менее 2 (м) от дверного проема).

С точки зрения теории массового обслуживания (ТМО) описанная выше система «два погрузчика – вагон» представляет собой не что иное, как одноканальную замкнутую СМО с двумя источниками заявок [9]. Применив известный математический аппарат ТМО для систем указанного типа, мы можем найти интенсивность и продолжительность разгрузки вагона при одновременной работе двух погрузчиков.

Предположим, что время нахождения погрузчика в зоне выгрузки, т. е. интервал времени с момента въезда погрузчика в зону выгрузки (порожнем) до момента выезда его из зоны выгрузки (с грузом), является случайной величиной, распределенной по показательному закону. Тогда в установившемся стационарном режиме среднее число рулонов бумаги, выгружаемое из вагона за единицу времени (абсолютная пропускная способность системы), будет равно

$$A = \frac{2}{\tau + t}\left(1 - \frac{\rho^2}{1 + 2\rho + 2\rho^2}\right),$$

где τ – средний интервал времени с момента въезда погрузчика в зону выгрузки (порожнем) до момента выезда его из зоны выгрузки (с грузом), t – средний интервал времени с момента выезда погрузчика (с грузом) из зоны выгрузки до момента возвращения погрузчика (порожнем) к границе зоны выгрузки, а $\rho = \tau/t$.

Умножив обе части последнего уравнения на $q_ц$, получим следующее выражение для интенсивности разгрузки вагона двумя погрузчиками (в тоннах за единицу времени):

$$M = \frac{2q_ц}{\tau + t}\left(1 - \frac{\rho^2}{1 + 2\rho + 2\rho^2}\right)$$

Наконец, заметив, что $\tau + t = t_ц$, в соответствии с формулой (3) мы можем переписать последнее выражение в виде

$$M = 2P\left(1 - \frac{\rho^2}{1 + 2\rho + 2\rho^2}\right).$$

Но это есть не что иное, как формула (1), в которой $N = 2$, а

$$k = k_{int} = \rho^2/(1 + 2\rho + 2\rho^2), \qquad (5)$$

что и требовалось показать. При этом оказывается, что коэффициент k_{int} не является некой константой, а зависит от величины ρ, которая определяется по формуле

$$\rho = \tau/t = \tau/(t_ц - \tau) = \varepsilon/(1 - \varepsilon), \qquad (6)$$

где введено обозначение $\varepsilon = \tau/t_ц$.

В условиях численного примера, приведенного в [7], $\tau \approx 21$ (с), а $t_ц = 63$ (с). Таким образом, $\varepsilon = 21/63 = 1/3$ и, по формуле (6), $\rho = 0,5$. Подставив это значение в формулу (5), найдем, что $k_{int} = 0,1$, и, следовательно, интенсивность разгрузки вагона двумя погрузчиками будет равна $2P(1 – 0,1) = 1,8P$. Соответственно, при $Q_в = 68$ (т) и

P = 31,4 (т/час), по формуле (4), средняя продолжительность $t_{\text{гр}}$ разгрузки вагона (без учета подготовительных и заключительных операций) составит не 65 (мин.), как предлагается считать в [7], а около 72 (мин.), т. е. приблизительно на 11 % больше, – разница незначительная с точки зрения оперативного планирования, но достаточно большая, чтобы принять её во внимание при решении задач среднесрочного и долгосрочного планирования.

Для того чтобы понять, в чем заключается причина указанного эффекта, следует заметить, что рассмотренная замкнутая СМО «два погрузчика – вагон» может находиться в трёх состояниях:

1) оба погрузчика находятся за пределами зоны выгрузки; зона выгрузки свободна;

2) один погрузчик находится в зоне выгрузки, а второй выполняет операции за её пределами (например, в складе);

3) один погрузчик находится в зоне выгрузки, второй погрузчик также готов въехать в вагон за очередным рулоном, но стоит в очереди у границы зоны выгрузки в ожидании выезда первого погрузчика.

В установившемся стационарном режиме система какую-то часть времени будет находиться в каждом из указанных трёх состояний, в том числе и в последнем из них. Это означает, что каждый из двух погрузчиков будет терять часть рабочего времени у границы зоны выгрузки в ожидании выезда из вагона другого погрузчика, теряя при этом часть своей производительности. Величина коэффициента интерференции k_{int} как раз и показывает, какую долю своей производительности будет терять каждый из двух погрузчиков.

В рассмотренном примере оперативные зоны двух ТЛ (погрузчиков) пересекаются в грузовом помещении ТС (в кузове вагона). Однако оперативные зоны ТЛ могут пересекаться и на другом участке грузовых работ. Представим, например, что два погрузчика разгружают не один вагон, а два разных вагона, но при этом складируют груз в одном месте, так что оба погрузчика не могут производить эту операцию одновременно (скажем, из-за узкого технологического проезда в складе или при складировании груза в один ряд штабеля). Другим примером может служить случай, когда погрузчики завозят груз в склад через одни ворота, ширина которых не позволяет безопасно разъехаться двум погрузчикам, так что при встрече у ворот один из погрузчиков должен уступить дорогу. В обоих указанных и подобных им случаях будет наблюдаться тот же самый эффект взаимных помех, который был рассмотрен нами выше.

Переходя от частного примера к общему случаю, с помощью математического аппарата ТМО можно показать, что, если оперативные зоны ТЛ пересекаются *на одном участке* грузовых работ, а продолжительность операций, выполняемых на участке пересечения оперативных зон ТЛ (в рамках одного рабочего цикла), подчиняется показательному закону распределения, то зависимость коэффициента интерференции k_{int} от числа ТЛ (ПТМ), участвующих в обработке ТС, может быть записана в следующем виде:

$$k_{int} = 1 - \frac{1+\rho}{\rho N}\left(1 - \frac{1}{\sum_{i=0}^{N} \frac{\rho^i N!}{(N-i)!}}\right),$$

где ρ определяется по формуле (6); при этом величину τ следует понимать как среднюю продолжительность операций, выполняемых ПТМ на участке пересечения оперативных зон ТЛ (в рамках одного рабочего цикла).

Зависимость коэффициента интерференции k_{int} от числа N при разных значениях ρ изображена графически на рис. 1. Как видно из рисунка, чем больше ТЛ сосредоточено на обработке ТС и чем больше значение ρ, тем сильнее проявляется эффект взаимных помех.

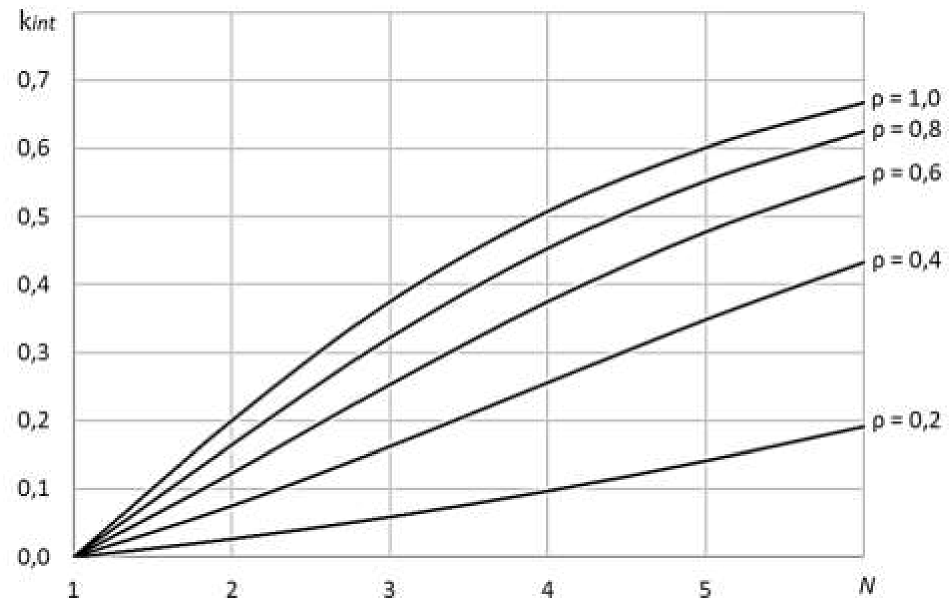

Рис. 1. Зависимость коэффициента интерференции от числа ТЛ, участвующих в обработке ТС, при пересечении оперативных зон ТЛ на одном участке работ

Введем понятие эффективной концентрации ТЛ на обработке ТС, под которой будем понимать величину $N_{эф} = N(1-k)$. Согласно (1) эффективная концентрация ТЛ равна интенсивности обработки ТС при производительности ТЛ, равной единице ($P = 1$).

Полагая $k = k_{int}$, в соответствии со сказанным выше, мы можем записать выражение для эффективной концентрации ТЛ в следующем виде:

$$N_{эф} = \frac{1+\rho}{\rho}\left(1 - \frac{1}{\sum_{i=0}^{N} \frac{\rho^i N!}{(N-i)!}}\right). \qquad (k = k_{int})$$

Зависимость $N_{эф}$ от номинального числа ТЛ (ПТМ), участвующих в обработке ТС, изображена графически на рис. 2. Легко видеть из рисунка, что при увеличении числа ТЛ каждая дополнительная ТЛ даёт всё меньший и меньший прирост величины $N_{эф}$

(а, следовательно, – всё меньший и меньший прирост интенсивности обработки ТС), причем величина этого прироста будет тем меньше, чем больше величина ρ.

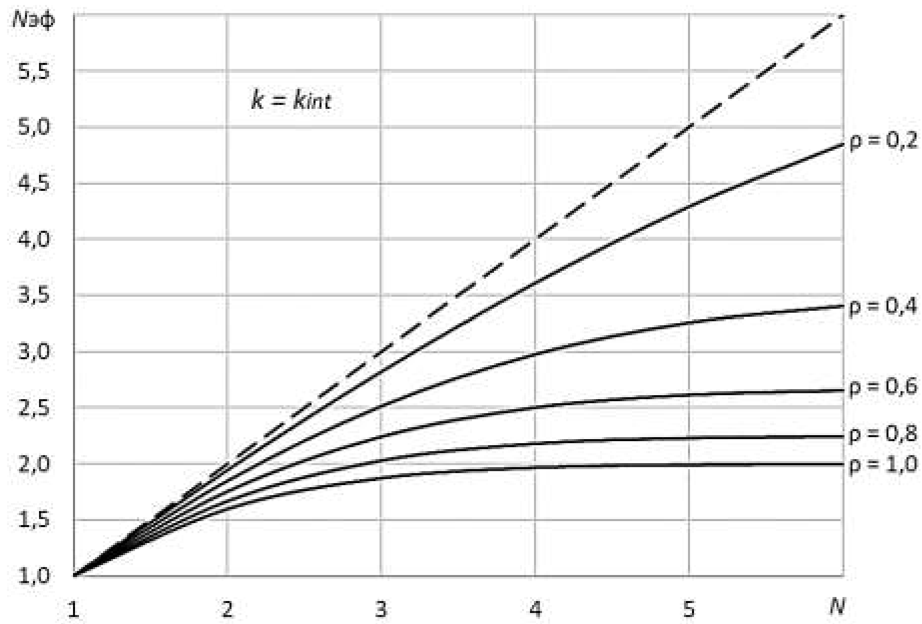

Рис. 2. Зависимость эффективной концентрации ТЛ на обработке ТС от номинального числа ТЛ при пересечении оперативных зон ТЛ на одном участке работ

В пределе, при неограниченном увеличении числа ТЛ, величина $N_{эф}$ стремится к постоянному значению, равному $(1+\rho)/\rho$. Это означает, что, если оперативные зоны ТЛ пересекаются на каком-то участке грузовых работ, то, сколько бы ТЛ мы ни сосредоточили на обработке ТС, интенсивность M его грузовой обработки не превысит величины $M_{max} = P(1+\rho)/\rho$.

Напомним, что приведенные выше формулы для k_{int} и $N_{эф}$ были выведены в предположении, что время работы перегрузочной машины на участке пересечения оперативных зон ТЛ (в рамках одного рабочего цикла) подчиняется показательному закону распределения. Можно показать, что, если указанное время подчиняется какому-либо иному закону распределения (с меньшим коэффициентом вариации), то значения коэффициента k_{int} будут несколько меньше приведенных выше оценок. Иными словами, численные значения коэффициента k_{int}, приведенные на рис. 1, следует рассматривать как предельно максимальные («пессимистические») оценки.

Конъюнктивный эффект

В соответствии со сказанным выше, при обработке ТС одновременно двумя или несколькими ТЛ следует по возможности организовывать грузовые работы таким образом, чтобы оперативные зоны ТЛ (траектории движения самих ПТМ, их стрел или других конструктивных элементов) нигде не пересекались друг с другом.

Однако можно показать, что даже и в этом случае, несмотря на отсутствие эффекта взаимных помех, зависимость интенсивности грузовой обработки ТС от концентрации ТЛ будет носить нелинейный характер, выражаемый формулой (1), в которой коэффициент k будет иметь теперь совершенно иной смысл.

Чтобы продемонстрировать это, вернемся к примеру, который был рассмотрен нами в предыдущем разделе, но на этот раз предположим, что два погрузчика разгружают не один вагон, а группу (подачу) из шести вагонов, поданных одновременно к рампе склада, т. е. в качестве ТС будем рассматривать теперь не отдельный вагон, а группу (подачу) вагонов.

Полагая, что объем работ поровну распределен между ТЛ (по три вагона), оперативные зоны ТЛ (погрузчиков) нигде не пересекаются друг с другом (эффект взаимных помех отсутствует) и погрузчики приступают к разгрузке вагонов одновременно, спросим себя: какова будет средняя продолжительность $t_{\text{гр}}$ грузовой обработки подачи вагонов?

Обратившись с этим вопросом к специальной литературе, в частности к [10], мы получим следующий ответ (без учета подготовительных, заключительных и вспомогательных операций):

$$t_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{п}} Q_{\text{в}}}{NP},$$

где $m_{\text{п}}$ – количество вагонов в подаче, $Q_{\text{в}}$ – количество груза в вагоне, N – число ТЛ (ПТМ), участвующих в обработке подачи вагонов, P – производительность ТЛ (ПТМ).

Покажем, что приведенная выше формула была бы справедлива только в том случае, если бы обработка вагонов представляла собой не стохастический, а строго детерминированный процесс. Однако в действительности это не так, и поэтому в указанную формулу необходимо внести следующую поправку:

$$t_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{п}} Q_{\text{в}}}{NP(1 - k_{con})}, \tag{7}$$

где $k_{con} < 1$ – поправочный коэффициент, величина которого зависит от числа N.

Чтобы пояснить смысл коэффициента k_{con} и определить его количественно, обратим внимание на следующие обстоятельства:

1) обработка группы (подачи) вагонов в нашем примере будет завершена только тогда, когда оба погрузчика закончат свою часть работы (обработку своих трех вагонов);

2) время, затрачиваемое погрузчиком на разгрузку вагона, является случайной величиной; поэтому один погрузчик может закончить свою часть работы (обработку своих трех вагонов) несколько раньше или позже, чем другой погрузчик;

3) момент завершения обработки всей подачи вагонов будет определять тот погрузчик, который завершит свою часть работы (обработку своей части вагонов) последним;

4) пусть продолжительность одного рабочего цикла погрузчика является случайной величиной с математическим ожиданием $t_{\text{ц}}$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_{\text{ц}}$, и для разгрузки одного вагона погрузчику требуется выполнить $n_{\text{цв}}$ рабочих циклов; тогда, если $n_{\text{цв}}$ достаточно велико (практически можно считать большим $n_{\text{цв}} > 10$), в силу центральной предельной теоремы теории вероятностей [11], закон распределения продолжительности разгрузки вагона будет близок к нормальному закону с математическим ожиданием $n_{\text{цв}} t_{\text{ц}}$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_{\text{ц}} \sqrt{n_{\text{цв}}}$; соответственно, если переход погрузчика от одного вагона к другому занимает ничтожно малое время по сравнению с продолжительностью разгрузки вагона, продолжительность

разгрузки трёх вагонов будет приближенно распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $3n_{цв}t_{ц}$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_{ц}\sqrt{3n_{цв}}$.

Пользуясь терминологией формальной логики [12], первые три из указанных обстоятельств в совокупности можно назвать эффектом конъюнкции, или конъюнктивным эффектом, а коэффициент k_{con} в формуле (7), который выражает действие этого эффекта, – коэффициентом конъюнктивности.

Перефразируя известную поговорку о скорости каравана верблюдов, суть конъюнктивного эффекта можно коротко выразить, сказав, что интенсивность обработки ТС двумя или несколькими ТЛ определяется по самой «медленной» ТЛ.

С точки зрения теории порядковых статистик, конъюнктивный эффект выражается в том, что средняя продолжительность обработки группы (подачи) вагонов в нашем примере будет равна математическому ожиданию второй порядковой статистики в выборке объема 2 из нормально распределенной генеральной совокупности с математическим ожиданием $3n_{цв}t_{ц}$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_{ц}\sqrt{3n_{цв}}$ [13].

Таким образом, средняя продолжительность обработки вагонов двумя погрузчиками (без учета подготовительных и заключительных операций) будет равна [14]

$$t_{гр}(2) = e_2\sigma_{ц}\sqrt{3n_{цв}} + 3n_{цв}t_{ц} = 3n_{цв}t_{ц}\left(1 + \frac{e_2 v_{ц}}{\sqrt{3n_{цв}}}\right),$$

где e_2 – математическое ожидание наибольшей порядковой статистики в выборке объема 2 из стандартного нормального распределения, а $v_{ц} = \sigma_{ц}/t_{ц}$ – коэффициент вариации продолжительности рабочего цикла погрузчика.

Учитывая, что $n_{цв} = Q_{в}/q_{ц}$ и $q_{ц}/t_{ц} = P$, мы можем переписать последнее выражение в виде

$$t_{гр}(2) = \frac{3Q_{в}}{P}\left(1 + \frac{e_2 v_{ц}}{\sqrt{3n_{цв}}}\right)$$

Наконец, поскольку

$$1 + \frac{e_2 v_{ц}}{\sqrt{3n_{цв}}} = \frac{1}{1 - \dfrac{e_2 v_{ц}}{e_2 v_{ц} + \sqrt{3n_{цв}}}},$$

получим

$$t_{гр}(2) = \frac{3Q_{в}}{P\left(1 - \dfrac{e_2 v_{ц}}{e_2 v_{ц} + \sqrt{3n_{цв}}}\right)}$$

в согласии с формулой (7), если положить в ней, по условию, $m_{п} = 6$, $N = 2$, а коэффициент конъюнктивности

$$k_{con} = \frac{e_2 v_{ц}}{e_2 v_{ц} + \sqrt{3n_{цв}}} = \frac{1}{1 + \dfrac{\sqrt{3n_{цв}}}{e_2 v_{ц}}}.$$

В условиях нашего численного примера в каждом вагоне находится 124 рулона бумаги, и погрузчики выгружают по одному рулону за один рабочий цикл. Поэтому $n_{цв}$ = 124. Пусть коэффициент вариации $v_ц$ продолжительности рабочего цикла погрузчика равен 0,8. Тогда, определив по табл. 2 [15, с. 91], что e_2 = 0,56419, получим k_{con} = 0,023 и, по формуле (7), $t_{гр}(2)$ = 399 (мин.).

Таблица 2

Математическое ожидание наибольших порядковых статистик в выборках из стандартного нормального распределения

Объем выборки (число ТЛ) *N*	e_N
2	0,564190
3	0,846284
4	1,029375
5	1,162964
6	1,267206

Вернемся к нашему примеру и увеличим число ТЛ (погрузчиков) до трёх. Тогда при равном распределении объема работ между ТЛ (по два вагона) средняя продолжительность обработки подачи из шести вагонов будет равна математическому ожиданию третьей порядковой статистики в выборке объема 3 из нормально распределенной генеральной совокупности с математическим ожиданием $2n_{цв}t_ц$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_ц\sqrt{2n_{цв}}$:

$$t_{гр}(3) = e_3\sigma_ц\sqrt{2n_{цв}} + 2n_{цв}t_ц = \frac{2Q_в}{P(1-k_{con})},$$

где e_3 – математическое ожидание наибольшей порядковой статистики в выборке объема 3 из стандартного нормального распределения (табл. 2), а коэффициент конъюнктивности равен

$$k_{con} = \frac{e_3 v_ц}{e_3 v_ц + \sqrt{2n_{цв}}} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{2n_{цв}}}{e_3 v_ц}}.$$

Итак, если объем работ равномерно распределен между ТЛ и оперативные зоны ТЛ нигде не пересекаются друг с другом, зависимость интенсивности грузовой обработки ТС от задействованного числа *N* технологических линий (ПТМ) будет выражаться формулой (1), в которой коэффициент k будет иметь смысл коэффициента конъюнктивности

$$k_{con} = \frac{1}{1 + \frac{\varphi}{e_N\sqrt{N}}}, \quad (8)$$

а эффективная концентрация ТЛ и средняя продолжительность грузовой обработки ТС (без учета подготовительных и заключительных операций) будут определяться следующими выражениями:

$$N_{эф} = \frac{\varphi N}{\varphi + e_N\sqrt{N}}, \quad (9)$$

$$t_{\text{гр}} = e_N \sigma_{\text{ц}} \sqrt{\frac{R_{\text{ц}}}{N}} + \frac{R_{\text{ц}} t_{\text{ц}}}{N} = \frac{Q_{\text{тс}}}{NP(1 - k_{con})}. \quad (10)$$

Здесь e_N – математическое ожидание наибольшей порядковой статистики в выборке объема N из стандартного нормального распределения (табл. 2), $t_{\text{ц}}$ – средняя продолжительность одного рабочего цикла ПТМ, $\sigma_{\text{ц}}$ – среднее квадратическое отклонение продолжительности рабочего цикла ПТМ, $Q_{\text{тс}}$ – количество груза, которое требуется погрузить в ТС (выгрузить из ТС), $R_{\text{ц}} = Q_{\text{тс}}/q_{\text{ц}}$ – общее число рабочих циклов (подъемов), которое необходимо выполнить для полной загрузки или разгрузки ТС, а величина φ определяется по формуле

$$\varphi = \frac{\sqrt{R_{\text{ц}}}}{v_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где $v_{\text{ц}} = \sigma_{\text{ц}}/t_{\text{ц}}$ – коэффициент вариации продолжительности рабочего цикла перегрузочной машины.

Приведенные выше формулы, напомним, будут справедливы при условии, что отношение $R_{\text{ц}}/N$ (т. е. число рабочих циклов (подъемов), приходящееся на одну ТЛ) достаточно велико для того, чтобы время работы каждой ТЛ на обработке ТС можно было считать приближенно распределенным по нормальному закону.

Зависимость коэффициента конъюнктивности k_{con} от числа ТЛ, участвующих в обработке ТС, при разных значениях φ изображена графически на рис. 3.

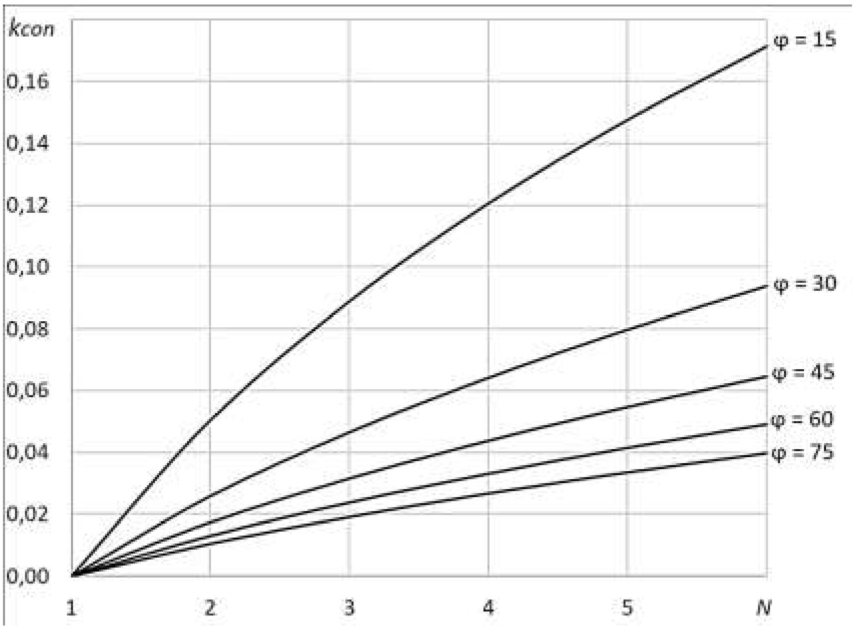

Рис. 3. Зависимость коэффициента конъюнктивности от числа ТЛ, участвующих в обработке ТС (оперативные зоны ТЛ не пересекаются друг с другом)

Как видно из рисунка, при любом N коэффициент конъюнктивности будет тем больше, чем меньше величина φ. Согласно (11), это означает, что конъюнктивный эффект будет проявляться тем сильнее, чем больший коэффициент вариации $v_{\text{ц}}$ продолжительности рабочего цикла имеют ПТМ в ходе обработки ТС. Другими словами, коэффициент k_{con} будет тем больше, чем более случайной, непостоянной величиной является продолжительность рабочего цикла при обработке ТС. Подставив формулу (11) в формулу (8), легко видеть, что при $v_ц = 0$, т. е. при строго постоянной, неслучайной продолжительности рабочего цикла, коэффициент конъюнктивности обращается в ноль. Однако очевидно, что в действительности это практически невыполнимо, так как даже в случае полной автоматизации, когда перегрузочной машиной управляет не человек, а компьютер, величина $v_ц$ и, соответственно, коэффициент k_{con} не могут быть полностью сведены к нулю.

Другой величиной, которая существенно влияет на коэффициент конъюнктивности, является величина $R_ц$. Чем больше эта величина, тем меньше, согласно (8) и (11), будет величина k_{con}. Отсюда следует, что при прочих равных условиях эффект конъюнктивности будет проявляться сильнее при обработке небольших ТС (малой грузоподъемности).

Нетрудно убедиться в том, что, согласно (9), при любом значении φ величина $N_{эф}$ возрастает с увеличением числа ТЛ таким образом, что каждая дополнительная ТЛ даёт всё меньший и меньший прирост интенсивности обработки ТС.

Кумулятивное действие конъюнктивного эффекта при многоэтапной обработке ТС

В примере, рассмотренном в предыдущем разделе, ТЛ (погрузчики), задействованные на обработке ТС, работают независимо друг от друга в непрерывном, безостановочном режиме. Однако весьма часто процесс обработки ТС разбивается на несколько этапов с прерыванием работы всех ТЛ в промежутках между этапами для «перенастройки» производственного процесса (для перестановки ТЛ между трюмами, для передвижки вагонов вдоль грузового фронта и т. п.).

При такой организации грузовых работ влияние конъюнктивного эффекта на продолжительность (и, соответственно, интенсивность) обработки ТС усиливается с каждым новым этапом обработки. Чтобы продемонстрировать это, рассмотрим условный пример, изображенный на рис. 4.

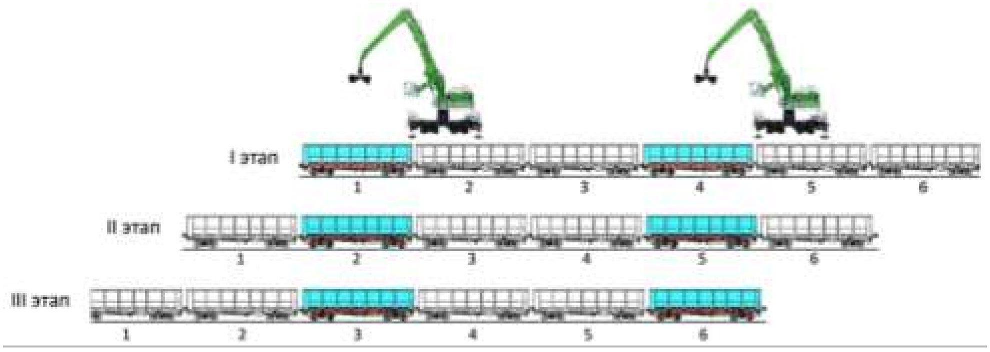

Рис. 4. Пример многоэтапного процесса обработки ТС двумя ТЛ (перегрузочными машинами)

В указанном примере процесс обработки ТС (группы (подачи) из шести вагонов) разбивается на три этапа. На первом этапе две ТЛ (два перегружателя), работая параллельно, разгружают вагоны с номерами 1 и 4. После этого производится передвижка вагонов, и на втором этапе разгружаются вагоны с номерами 2 и 5. Наконец, после еще одной передвижки вагонов на третьем этапе разгружаются вагоны с номерами 3 и 6.

Заметим, что ТЛ могут начинать следующий этап обработки вагонов только одновременно. В этом смысле имеет место строгая координация работы ТЛ.

Обозначим через S число этапов, на которое разбивается процесс обработки ТС. Тогда, если продолжительность вспомогательных операций в рамках каждого отдельного этапа пренебрежимо мала по сравнению с продолжительностью самого этапа, согласно изложенному в предыдущем разделе, средняя продолжительность одного этапа обработки вагонов в нашем примере может быть найдена по формуле

$$t_{\text{эт}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{NPS(1 - k^s_{con})}, \tag{12}$$

при N = 2, S = 3 и

$$k^s_{con} = \frac{1}{1 + \frac{\varphi_s}{e_N\sqrt{N}}},$$

где

$$\varphi_s = \frac{1}{v_{\text{ц}}}\sqrt{\frac{R_{\text{ц}}}{S}}.$$

Средняя продолжительность обработки всей подачи вагонов (без учета подготовительных и заключительных операций) будет равна

$$t_{\text{гр}} = St_{\text{эт}} + (S-1)t_{\text{пер}} = St_{\text{эт}}\left(1 + \frac{(S-1)t_{\text{пер}}}{St_{\text{эт}}}\right),$$

где $t_{\text{пер}}$ – средняя продолжительность технологического перерыва между двумя последовательными этапами обработки ТС (в нашем примере она равна среднему времени, которое затрачивается на одну передвижку вагонов).

Подставив формулу (12) в последнее выражение и введя обозначение $\vartheta = t_{\text{пер}}/t_{\text{эт}}$, получим

$$t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{тс}}\left(1 + \vartheta\frac{(S-1)}{S}\right)}{NP(1 - k^s_{con})}.$$

Наконец, после несложных преобразований мы можем написать:

$$t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{NP(1 - k^s_{con})(1 - k_s)}. \tag{13}$$

Здесь k^s_{con} – коэффициент конъюнктивности на одном этапе обработки ТС, а величина k_s определяется по формуле

$$k_s = \frac{\vartheta(S-1)}{S + \vartheta(S-1)}.$$

Величина k_s будет тем больше, чем большее число S этапов имеет процесс обработки ТС и чем больше относительная продолжительность ϑ перерывов между этапами, а при S, равном 1, k_s обращается в ноль. Поэтому эту величину можно назвать коэффициентом прерывности обработки ТС.

Таким образом, мы приходим к выводу, что при многоэтапной обработке ТС со строгой координацией работы ТЛ на продолжительность обработки ТС оказывают влияние два эффекта: 1) конъюнктивный эффект на каждом этапе обработки и 2) эффект прерывания работы ТЛ при переходе от одного этапа к другому. Действие первого эффекта выражается коэффициентом k^s_{con}, а действие второго эффекта – коэффициентом k_s.

Рассматривая оба указанных эффекта в совокупности как кумулятивный конъюнктивный эффект, мы можем переписать выражение (13) в следующем виде:

$$t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{NP(1 - k^{cum}_{con})},$$

где k^{cum}_{con} – кумулятивный коэффициент конъюнктивности, определяемый по формуле

$$k^{cum}_{con} = k^s_{con} + k_s - k^s_{con} k_s. \tag{14}$$

Соответственно, интенсивность грузовой обработки ТС будет равна

$$M = Q_{\text{тс}}/t_{\text{гр}} = NP(1 - k^{cum}_{con})$$

в полном согласии с формулой (1) при $k = k^{cum}_{con}$.

Заметим, что случай S = 1 соответствует тому, что ТЛ, участвующие в обработке ТС, работают в непрерывном, безостановочном режиме независимо друг от друга. Нетрудно убедиться, что в этом случае $k^{cum}_{con} = k_{con}$, т. е. мы получаем простой конъюнктивный эффект, рассмотренный нами в предыдущем разделе.

Из полученных нами формул следует, что при многоэтапной обработке ТС со строгой координацией работы ТЛ (т. е. при $S \geq 2$) интенсивность обработки ТС при любом заданном N будет всегда ниже, чем при S = 1, причем тем ниже, чем больше S. Согласно (14), это обусловливается не только ростом коэффициента прерывности k_s, но и тем, что коэффициент конъюнктивности k^s_{con} возрастает с каждым новым этапом обработки ТС. Отсюда следует заключить, что при организации грузовой обработки ТС следует по возможности разбивать процесс обработки на минимальное количество этапов, если при этом все ТЛ должны начинать каждый этап одновременно.

Заключение

В основе решения многих задач планирования производственной деятельности морских и речных портов лежит вопрос о том, каким образом интенсивность грузовой обработки транспортных средств (судов, ж.-д. вагонов, автомашин) зависит от задействованного числа (концентрации) технологических (механизированных) линий (ТЛ).

Опыт показывает, что указанная зависимость отнюдь не линейна, как может показаться на первый взгляд, а носит более сложный характер. В согласии с универсальным законом убывающей предельной производительности факторов производства предельная интенсивность обработки ТС (т. е. прирост интенсивности обработки при добавлении одной дополнительной ТЛ) убывает с увеличением задействованного числа ТЛ. Другими словами, каждая дополнительная ТЛ даёт всё меньший и меньший прирост интенсивности обработки ТС.

Не найдя удовлетворительного теоретического объяснения в специальной литературе, в настоящей статье автор предпринял самостоятельную попытку выяснить причины указанной закономерности.

Исследование приводит к выводу, что снижение предельной интенсивности обработки ТС с увеличением концентрации ТЛ может быть обусловлено действием двух эффектов: 1) эффекта интерференции (взаимных помех) и 2) эффекта конъюнктивности. Оба эффекта обязаны своим происхождением тому обстоятельству, что грузовая обработка ТС представляет собой не детерминированный, а случайный (стохастический) процесс. В статье было дано подробное объяснение каждого из эффектов.

Исследование показывает, что в общем случае зависимость интенсивности $M(N)$ грузовой обработки ТС от концентрации ТЛ (без учета подготовительных, заключительных и вспомогательных операций) может быть записана в виде

$$M(N) = NP(1-k),$$

где N – число ТЛ, участвующих в обработке ТС, P – производительность ТЛ, а $k < 1$ – коэффициент, величина которого возрастает с увеличением N.

В статье было показано, что коэффициент k в приведенной выше формуле имеет смысл коэффициента интерференции k_{int} или коэффициента конъюнктивности k_{con} в зависимости от того, какой из эффектов имеет место при обработке ТС, а в случае многоэтапной обработки ТС с координацией работы ТЛ коэффициент k следует интерпретировать как кумулятивный коэффициент конъюнктивности k_{con}^{cum}.

С помощью математического аппарата теории массового обслуживания и теории порядковых статистик в статье были выведены формулы для определения коэффициентов k_{int}, k_{con} и k_{con}^{cum} в зависимости от числа ТЛ, участвующих в обработке ТС. На основании полученных формул были даны численные оценки коэффициентов и было показано, что их величина возрастает с увеличением N таким образом, что каждая дополнительная ТЛ даёт всё меньший и меньший прирост интенсивности обработки ТС.

Поскольку грузовая обработка ТС представляет собой не детерминированный, а стохастический процесс, все выводы и оценки, полученные в статье, справедливы только при массовой обработке большого числа ТС, т. е. могут иметь значение прежде всего при среднесрочном и долгосрочном планировании производственной деятельности портов и других транспортных терминалов.

Список литературы

1. Пиндайк Р., Рабинфельд Д. Микроэкономика. / Пер. с англ. –СПб.: Питер, 2002.–608 с.
2. Макконнелл К. Р., Брю С. Л. Экономикс: принципы, проблемы и политика: Пер. с 14-го англ. изд. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 972 с.
3. Ветренко Л. Д., Ананьина В. З., Степанец А. В. Организация и технология перегрузочных процессов в морских портах. – М.: Транспорт, 1989. – 270 с.
4. Руководство по проектированию речных портов. Минречфлот РСФСР – М.: Транспорт, 1985. – 143 с.
5. Нормы технологического проектирования морских портов. Свод правил. СП 350.1326000.2018. – М.: Минтранс России, Стандартинформ, 2018. – 217 с.
6. Port Engineering. Planning, Construction, Maintenance, and Security. Edited by Gregory P. Tsinker. John Wiley & Sons, Inc. 2004. 881 p.
7. Приказ МПС РФ от 10.11.2003 г. № 70 «О методике по разработке и определению технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов».
8. Инструкция по типовым способам и приемам погрузочно-разгрузочных работ при загрузке-разгрузке крытых вагонов. РД 31.41.07-82. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1983. – 84 с.
9. Лабскер Л. Г., Бабешко Л. О. Теория массового обслуживания в экономической сфере. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. – 319 с.
10. Приказ МПС РФ от 29.09.2003 г. № 67 «Об утверждении Порядка разработки и определения технологических сроков оборота вагонов и технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов».
11. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

12. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. / Пер. с англ. – М.: Наука, 1971. – 320 с.
13. David H. A., Nagaraja H. N. Order statistics. Third edition. A John Wiley & Sons, Inc. 2003. 458 p.
14. Боярский Э. А. Порядковые статистики. – М.: Статистика, 1972. – 120 с.
15. Arnold, B. C., Balakrishnan, N., Nagaraja, H. N. A First Course in Order Statistics. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2008. 279 p.

References

1. Pindyck R., Rubinfeld D. Microeconomics. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p. (in Russ.)
2. 2. McConnell C. R., Brue S. L. Economics: Principles, Problems, and Policies. Moscow, INFRA-M Publ., 2003. 972 p. (in Russ.)
3. Vetrenko L. D., Anan'ina V. Z., Stepanets A. V. Organizatsiya i tekhnologiya peregruzochnykh protsessov v morskikh portakh [Organization and technology of cargo handling operations in sea ports]. Moscow, Transport Publ., 1989. 270 p. (in Russ.)
4. Rukovodstvo po proektirovaniyu rechnykh portov [The Guidelines for the design of river ports]. Moscow, Transport Publ., 1985. 143 p. (in Russ.)
5. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov. Svod pravil. SP 350.1326000.2018. [The Guidelines for the technological design of sea ports. Rule book No. СП 350.1326000.2018]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 217 p. (in Russ.)
6. Port Engineering. Planning, Construction, Maintenance, and Security. Edited by Gregory P. Tsinker. John Wiley & Sons, Inc. 2004. 881 p.
7. O metodike po razrabotke i opredeleniyu tekhnologicheskikh norm pogruzki gruzov v vagony i vygruzki gruzov iz vagonov [The guidelines for the calculation of the standard amount of time allowed for (un)loading of cargo (from)into railroad cars]. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 70 dated 10.11.2003. (in Russ.)
8. Instruktsiya po tipovym sposobam i priemam pogruzochno-razgruzochnykh rabot pri zagruz-ke-razgruzke krytykh vagonov. RD 31.41.07-82 [Manual on loading and unloading of railroad boxcars. Guidance document No. РД 31.41.07-82]. Moscow. Mortekhinformreklama Publ. 1983. 84 p. (in Russ.)
9. Labsker L. G., Babeshko L. O. Teoriya massovogo obsluzhivaniya v ehkonomicheskoi sfere [Queieing theory with applications]. Moscow, YUNITI Publ., 1998. 319 p. (in Russ.)
10. Ob utverzhdenii Poryadka razrabotki i opredeleniya tekhnologicheskikh srokov oborota vagonov i tekhnologicheskikh norm pogruzki gruzov v vagony i vygruzki gruzov iz vagonov [The guidelines for the determination of the standard turnaround time of railroad cars at railroad terminals]. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 67 dated 29.09.2003. (in Russ.)
11. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya [Probability theory with applications in engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 480 p. (in Russ.)
12. Mendelson E. Introduction to mathematical logic. Moscow, Nauka Publ. 1971. 320 p. (in Russ.)
13. David H. A., Nagaraja H. N. Order statistics. Third edition. John Wiley & Sons, Inc. 2003. 458 p.
14. Boyarskii EH. A. Poryadkovye statistiki [Order statistics]. Moscow, Statistika Publ., 1972. 120 p. (in Russ.)
15. Arnold, B. C., Balakrishnan, N., Nagaraja, H. N. A First Course in Order Statistics. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2008. 279 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фунтусов Анатолий Анатольевич,
к. т. н.,доцент кафедры управления морским транспортом, Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: ilim81@yandex.ru

Anatoly A. Funtusov,
Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Maritime Management Department, Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,e-mail: ilim81@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; опубликована онлайн 21.03.2022.
Received 14.02.2022; published online 21.03.2022.