

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812

ANALYSIS OF OPTIMIZATION CONTAINER STACKING STRATEGIES

A. L. Kuznetsov¹, A. D. Semenov², A. Z. Borevich³

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

³ — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

One of the main tasks of operational management of modern container terminal is effective utilization of existing technological resources. The search of possible variants of terminal's activity optimization requires constant analysis of transport process technology and development of technical and technological approaches to increase the effectiveness of resources utilization. One of the possible solutions which are provided by terminals' operational systems is application of different strategies of container stack organization and container selectivity. At the same time the complicated character of input and output container flow makes the effectiveness of these strategies doubtful. It is noted in the paper that the way of container service is different from traditional ones – FIFO and FILO. As far as output container flow is randomly distributed the way of container service can be considered as First In/Random Out. The different strategies which are applied in practice are also considered in the paper and their influence on the productivity of handling equipment is analyzed. The results of these strategies simulation modelling are represented. The results prove that no strategy can provide productivity with theoretical selectivity; any strategy provides slower intensity of operations. At the same time, it is proved that the only optimization strategy which increases the productivity of handling equipment is the way of terminal activity organization where containers can be selected from the stack not on requirement sequence, but in order of its position in a stack.

Keywords: container stack, stacking strategies, container selectivity, handling equipment, simulation modelling, stack organization, optimization, seaport, dry port, operation productivity.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

УДК 656.615

АНАЛИЗ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ СКЛАДИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ

А. Л. Кузнецов¹, А. Д. Семенов², А. З. Борович³

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

³ — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследован один из ключевых вопросов эксплуатации современных контейнерных терминалов, таковой как эффективность использования имеющихся технологических ресурсов. Отмечается, что поиск возможных вариантов оптимизации работы терминала требует постоянного анализа применяемой технологии транспортного процесса и выработки технических и технологических решений, позволяющих увеличить эффективность использования ресурсов. Одним из таких решений, предоставляемых современными терминальными операционными системами, является применение оптимизирующих стратегий

организации штабеля и выборки контейнеров из него. В то же время сложный характер поступления и убытия контейнеров с терминала ставит под сомнение эффективность предлагаемых стратегий, поскольку дисциплина обслуживания контейнерного грузопотока не соответствует общепринятым в логистике *First In/First Out* и *First In/Last Out*: последовательность убытия контейнеров носит случайный характер, в связи с чем дисциплина обработки контейнеров на терминале может быть описана как *First In/Random Out*. В работе также рассмотрены оптимизирующие работу терминала стратегии, анализируется их влияние на количество движений подъемно-транспортного оборудования и производительность операций. Приводятся данные об эффективности стратегий, полученные с помощью имитационного моделирования работы перегрузочного оборудования в штабеле. На основании полученных в исследовании данных доказано, что ни одна из возможных стратегий не может обеспечить уровень производительности операций с теоретической селективностью. Вместе с тем приводятся доказательства того, что единственной оптимизирующей стратегией является такая организация работы терминала, при которой выборка контейнеров осуществляется не в порядке поступления заявок на вывоз, а по трудоемкости выборки их из штабеля.

Ключевые слова: контейнерный штабель, стратегии складирования, селективность контейнеров, перегрузочное оборудование, имитационное моделирование, организация штабеля, оптимизация, морской порт, сухой порт, производительность операций.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Борович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

Введение (Introduction)

Понятие очередей и стеков широко распространено в различных областях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, используемых для изучения процессов обработки данных, событий, грузов и др. [1]–[3]. Если произвольно выделенный объект абстрактной природы получает «заявку» на выполнение некоторой свойственной ему операции, но не в состоянии выполнить ее немедленно, то эта заявка откладывается до появления возможности ее выполнения. Следующая заявка, поступившая объекту, ставится в очередь за предыдущей и т. д. При появлении возможности выполнения операции обслуживается заявка, поступившая раньше всех, т. е. пришедшая первой. Совокупность ожидающих обслуживания заявок, организованная по принципу «первым пришел — первым ушел», называется *очередью*. Такой принцип, или «дисциплина» обслуживания заявок в очереди, носит название FIFO (от англ. First In/First Out) [4]. Классическим примером очереди являются автомобили, заезжающие по выделенным полосам через ворота терминала и «физически» обслуживаемые по принципу «первым пришел — первым ушел».

Другим возможным принципом обслуживания заявок, которые не могут быть выполнены немедленно, является дисциплина FILO (от англ. First In/Last Out). В данном случае вновь прибывшая заявка становится как бы «верхней в стопке», и при появлении возможности выполняется первая. Совокупность ожидающих обслуживания заявок, организованная по принципу «первым пришел — последним ушел», называется *стеком*. Складирование контейнеров на площадке хранения терминала один над другим является примером стека: первым может быть выбран контейнер, который прибыл последним.

Основными функциями контейнерного терминала как логистического объекта являются: прием контейнеров, хранение их в течение определенного времени и выдача на смежный транспорт. Немедленное выполнение заявки на прием контейнера и его выдачу, т. е. известный и желаемый «прямой вариант» обработки заявки на операцию, в подавляющем большинстве случаев, оказывается невозможным, поскольку контейнеры, представляющие собой единичные «материальные» заявки на выполнение операций терминала, образуют совокупность ожидающих обслуживания заявок, или контейнерный штабель.

Два рассмотренных ранее фундаментальных способа организации выбора ожидающих обслуживания заявок: FIFO и FILO, являются универсальными для многих научных областей. В при-

кладных сферах к ним могут добавляться более специальные способы организации, например, известный в логистике *принцип FEFO*, когда товары с минимальным остаточным сроком годности отгружаются в первую очередь (First Expire, First Out).

На контейнерном терминале, в большинстве случаев, действует еще один специальный принцип, так называемый *FIRO* (First In / Random Out), когда поступившие на терминал контейнеры выбираются для вывоза в случайном для терминала порядке. В то же время в большинстве случаев «физическая» организация любой специальной дисциплины обслуживания сводится к базовым схемам FIFO и FILO: это либо классическая очередь со входом для прибывающих и выходом для убывающих заявок, либо классический стек, в котором вновь прибывшая заявка «проталкивает» вниз все предыдущие, занимая место на входе для выбора при появлении возможности обработки. Выборка из середины очереди или стека произвольной заявки возможна лишь за счет повторения нескольких классических операций по схеме FIFO или FILO, выполняемых до тех пор, пока на выходе не появится нужная. При этом заявки, высвобождаемые в ходе выборки заданной, не считаются выполненными и должны помещаться в ту же группу ожидающих обслуживания заявок. В случае стека для этого требуется наличие как минимум еще одного стека, в случае очереди необходимо организовать еще одну очередь или «заикнуть» ее, помещая выходные задачи на вход.

Поскольку терминал, на который контейнеры поступают в случайном порядке, неизвестном и неконтролируемом оператором терминала, выбираются к исполнению также случайно, процедура их обработки требует детального изучения дисциплины обслуживания *FIRO*, а также методов, применяемых на терминалах для снижения влияния данной «дисциплины».

Методы и материалы (Methods and Materials)

Контейнеры прибывают на терминал в виде некоторой случайной последовательности: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$. Поскольку вывоз по прямому варианту через терминал не выполняется, поступающие контейнеры образуют совокупность ожидающих вывоза заявок. Покидают терминал контейнеры в виде другой случайной последовательности: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$, которая не совпадет ни с входной: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$, ни с обратной последовательностью: $\alpha_i, \alpha_{i-1}, \dots, \alpha_1$. Как следствие, к операциям обработки терминала не могут быть в чистом виде применены ни дисциплина FIFO, ни дисциплина FILO.

Вывоз с терминала очередного контейнера β_j требует его выборки из совокупности ожидающих вывоза заявок. Для экономии места на терминале контейнеры складывают один над другим, образуя классический стек: последний помещенный в него контейнер выбирается первым [5]. Если контейнеры складываются в один ярус, то стек имеет «глубину», равную единице — помещенный в него контейнер выбирается за одну операцию, называемую «движением». Если контейнеры складываются один над другим в штабель с высотой H ярусов, то «глубина стека» составляет H . Если из такого стека необходимо выбрать верхний контейнер, то потребуется одно движение, если нужный контейнер второй сверху — два движения. Нижний контейнер требует для выборки из стека H движений. Отсюда в среднем при полностью случайном характере выборки контейнеров трудоемкость выборки контейнера из стека, измеренная в количестве движений, составляет величину $N = \frac{H+1}{2}$ [6].

Разместить все контейнеры, находящиеся на терминале в ожидании вывоза, в единый стек невозможно ввиду технических и операционных ограничений: верхние контейнеры будут оказывать разрушающую нагрузку на нижние, выборка контейнеров будет требовать слишком много дополнительных движений. Поэтому контейнеры хранят в виде множества ограниченных по высоте отдельных стеков, образующих штабели склада открытого хранения. Если в штабелях будет выполнено условие монотонного убывания индексов последовательности вывоза хранимых контейнеров с высотой яруса, т. е. контейнер β_l с меньшим индексом будет находиться над контейнерами с большим индексом: β_k ($l < k$), то выборка каждого контейнера будет выполняться за одно движение. Если эти соотношения не выполняются, и в стеке наблюдается инверсия

индексов последовательности вывоза, то возникает необходимость обеспечения доступа к нужному контейнеру. В этом случае из стека последовательно выбираются все контейнеры, находящиеся выше него. Эти «выбранные, но невыполненные» заявки из стека, как отмечалось ранее, должны быть помещены в другие стеки. Желательно, чтобы при этих перемещениях сохранялось условие монотонности индексов вывоза, но обеспечить это практически невозможно: как отмечалось ранее, последовательность $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ является случайной, ее будущая часть формируется после момента принятия данного решения. Как следствие, наиболее рациональным решением является перемещение блокирующих доступ контейнеров в стеки с минимальным заполнением.

С учетом ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что в указанных условиях никакой оптимизации, имеющей целью уменьшение числа движений, необходимых для обработки проходящего через терминал грузопотока, предложить невозможно. Трудоемкость выборки контейнера определяется размером единичного стека, размещение в котором не позволяет определить последовательность вывоза контейнеров с терминала. Оптимизационные методы и алгоритмы, используемые в практике работы контейнерных терминалов, безусловно, существуют, но они направлены не на уменьшение трудоемкости выборки контейнеров, а на эффективность обработки транспортных средств. В свою очередь, дополнительные движения повышают требования к количеству подъемно-транспортного оборудования. Как правило, при организации структуры штабеля контейнерного терминала и управления операциями в нем используются те или иные методики, в большинстве случаев имеющие характер *эвристик*. Они предписываются к выполнению оперативным управленческим персоналом, а иногда даже встраиваются в программное обеспечение терминальной операционной системы (ТОС), приобретая тем самым черты не подлежащей обсуждению оптимизационной стратегии [7]–[9].

В то же время ТОС — это совокупность программных средств, реализующих придуманные человеком методы и стратегии укладки ящиков в прямоугольный штабель. Рассмотрим наиболее часто используемые решения, которые обычно относят к средствам оптимизации: престакинг, постстакинг, распределение секций по видам транспорта, распределение по клиентам.

Престакинг. Престакингом называется предварительное размещение контейнеров, составляющих отгружаемую партию в отдельном штабеле (стеке), обычно находящемся поблизости от места обработки транспортного средства. Теоретически точное знание плана погрузки дает возможность сформировать в стеке структуру штабеля, позволяющую погрузить каждый контейнер из него на транспортное средство за одно движение. Таким образом, процедура погрузки транспортного средства является в этом случае оптимальной, при которой каждое движение является производительным, что и обеспечивает обработку транспортного средства в течение минимального времени.

С учетом введенных терминов и обозначений престакинг предполагает, что в том или ином виде формируется часть выходной последовательности: $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$, которая соответствует плану погрузки их на транспортное средство вместимостью $K > 0$: судно, баржа, контейнерный поезд, секция поезда, автопоезд. Очевидно, что формирование очереди в прямом порядке: $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$ или стека в инверсном порядке: $\beta_{k+K}, \dots, \beta_{k+1}, \beta_k$ позволит выполнить погрузку транспортного средства без дополнительных операций: каждый контейнер будет требовать только одного перемещения, которое в данном случае будет являться производительным.

В то же время формирование последовательности выдачи на транспортное средство $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$ или $\beta_{k+K}, \dots, \beta_{k+1}, \beta_k$ остается таким же случайным процессом, поэтому для него справедливы все рассуждения, приведенные ранее. Иными словами, формирование предварительного множества контейнеров, ожидающих погрузки на транспортное средство, в среднем потребует того же количества движений, что и прямая погрузка на него. При этом перемещение контейнеров из предварительного множества (очереди или стека) потребует еще K дополнительных движений, откуда следует, что технологически престакинг не снижает, а, наоборот, увеличивает количество движений, необходимых для вывоза контейнерного потока с терминала. В этом случае оптимизируется не общее количество движений по перемещению контейнера на терминале, а время погрузки транспортного средства. В течение этого времени должно быть выполнено лишь K произво-

дительных движений, которые были охарактеризованы ранее как дополнительные, а остальные могут выполняться в более удобное с операционной точки зрения время работы. Действительно, технология престакинга является эффективным средством минимизации времени погрузки транспортных средств на терминале, но является крайне чувствительной к изменениям планов погрузки, поскольку дополнительные непроизводительные движения в промежуточном стеке могут увеличить общее их число до пределов, которые сделают эффективность незначительной.

Постстакинг. Симметричным решением является постстакинг, когда контейнеры выгружаются с транспортного средства в расположенный поблизости промежуточный стек и позже развозятся в адресные позиции основного штабеля. При этом в основном снижаются требования к количеству средств горизонтальной транспортировки и синхронизации операций выгрузки, поскольку непосредственно размещение контейнеров в штабель постстакинга не требует селективности. Дальнейшая выборка контейнеров из этого вновь сформированного промежуточного штабеля требует как минимум одного дополнительного движения на каждый контейнер.

Распределение секций по видам транспорта. Данная стратегия может рассматриваться как «слабый вариант престакинга». Она предполагает, что часть контейнеров из вновь прибывшей партии сразу помещается в отдельный штабель, расположенный поблизости к путям, обслуживающим тот вид транспорта, на котором контейнер покинет терминал. Считается, что эта стратегия наиболее эффективна тогда, когда интервалы поступления морских судов близки к интервалам прибытия железнодорожных составов. Однако и в этом случае макет поезда (функциональный аналог каргоплана судна) обычно становится известен после формирования штабеля, исключая необходимость перемещения контейнеров. При этом место проведения дополнительной работы по перестановке контейнеров (в произвольном стеке или в специально выделенном) с точки зрения трудоемкости непринципиально.

Распределение по клиентам. Если состав клиентов однороден, то никакой разницы в том, организованы ли штабели по клиентам или нет, для операционного планирования терминала нет. Возможно, хранение контейнеров одних цветов выглядит более привлекательным с эстетической точки зрения и удобным для управления контейнерами со стороны самих клиентов, имеющих обзоримый и компактный сегменты штабеля. В общем случае это не дает никакой операционной выгоды оператору контейнерного терминала, вызывая при этом потенциальную неэффективность использования складского пространства и рост общего транспортного расстояния.

Наиболее эффективным средством частичной (локальной) оптимизации является предельный случай, когда выдача контейнеров, входящих в суточное задание, осуществляется не в порядке поступления за ними транспортных средств клиента, а в порядке, определяемом минимальной трудоемкостью самой выборки. Иными словами, первым из штабеля на прибывшее транспортное средство выдается контейнер суточного задания, который находится ближе всего к поверхности штабеля, т. е. обладает максимальной селективностью. Его выборка в общем случае может изменить структуру штабеля, заблокировав ранее доступные контейнеры суточного задания. Поиск следующего «кандидата на выдачу» должен осуществляться каждый раз после обслуживания очередного транспортного средства. Очевидно, что такой гипотетический и идеализированный порядок выборки контейнеров является оптимальным с точки зрения структуры штабеля, т. е. «терминального оператора». Любая иная стратегия будет лишь приближаться к этому идеализированному варианту, который тем самым может являться оценкой «сверху» реальных операционных стратегий, претендующих на оптимизационные свойства.

Рассмотрим вновь единичную выборку контейнеров из штабеля. Пусть имеется E контейнеров, которые хранятся на площади в w слотов, образуя штабель высотой $H = \frac{E}{w}$ ярусов. Если произвольный контейнер находится в верхнем ярусе, то его выборка требует одного движения, если во втором верхнем ярусе — два движения (перемещение блокирующего и выборка целевого), контейнер в нижнем ярусе выбирается за H движений. Если вероятность нахождения целевого контейнера в каждой ячейке штабеля одинакова, то вероятность любого числа движений при вы-

борке тоже одинакова и составляет величину $p = \frac{1}{H}$. Математическое ожидание числа движений в этом случае составит $M[N] = 1p + 2p + \dots + Hp = \frac{1}{H}(1 + 2 + \dots + H) = \frac{1}{H} \frac{(H+1)H}{2} = \frac{H+1}{2}$.

Данная зависимость была ранее получена проще, с помощью рассуждений о том, что верхний контейнер выбирается за одно движение, нижний — за H движений, откуда в среднем (при равной вероятности) было получено $\frac{H+1}{2}$ движений. Тем не менее указанный подход необходим для пояснения решения следующей задачи — оценки эффективности множественной выборки контейнеров из штабеля. Пусть, по-прежнему, имеется E контейнеров, хранимых на площади в w слотов, образующих штабель высотой $H = \frac{E}{w}$ ярусов. Пусть имеется $K < w$ контейнеров, из которых следует выбрать любой, располагающийся выше остальных в штабеле. Выборка будет осуществляться за одно движение тогда, когда в верхнем ярусе будет находиться хотя бы один целевой контейнер из списка K . Два движения потребуется тогда, когда в верхнем ярусе не будет ни одного контейнера из списка K , а во втором — хотя бы один контейнер из списка K . Три движения потребуется тогда, когда в верхнем и следующем ярусе не останется ни одного контейнера из списка K , а в третьем останется хотя бы один контейнер из списка K . Максимальное количество движений H потребуется в случае, когда все K контейнеров будут располагаться в нижнем ярусе. Необходимо определить значение математического ожидания числа движений и распределения числа движений по выборке контейнеров. Данную задачу можно решить с помощью методов классической теории вероятности. Для этого рассмотрим штабель размером $E = wH$ (рис. 1).

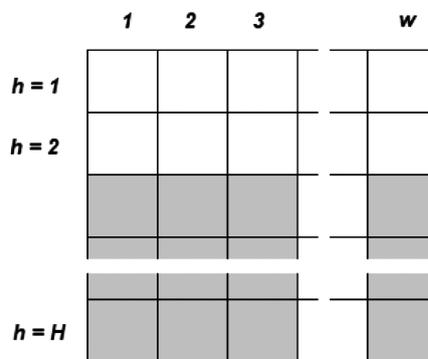


Рис. 1. Параметры штабеля контейнеров

Найдем вероятность события A_h , состоящего в том, что в верхних h ярусах штабеля шириной w не содержится ни одного контейнера из целевого списка размером K . Осуществиться это событие может C_{E-K}^{wh} различными способами. Всего существует C_E^{wh} способов заполнить верхний сегмент, откуда вероятность отсутствия в верхних h ярусах штабеля целевых контейнеров составляет $P(A_h) = \frac{C_{E-K}^{wh}}{C_E^{wh}}$ [10]. Вероятность противоположного события $\overline{A_h}$, т. е. наличия в верхних h ярусах штабеля хотя бы одного целевого контейнера, составляет $P_h = P(\overline{A_h}) = 1 - P(A_h) = 1 - \frac{C_{E-K}^{wh}}{C_E^{wh}}$.

Тогда вероятность P_1 имеется вероятность нахождения в верхнем ярусе $h = 1$ хотя бы одного целевого контейнера $p_1 = P_1$, вероятность P_2 — вероятность нахождения в ярусах $h = 1$ и $h = 2$ хотя бы одного целевого контейнера, откуда вероятность нахождения во втором сверху ярусе $h = 2$ хотя бы одного целевого контейнера составляет $p_2 = P_2 - P_1$.

Результаты (Results)

В общем случае вероятность нахождения в ярусе h целевого контейнера определяется рекурсивным выражением $p_h = P_h - P_{h-1}$. Совокупность событий $p_h, h = 1, H$ составляет искомую вероятность найти первый верхний контейнер из списка K в отсчитываемом сверху ярусе h . В таблице представлен пример расчета вероятностей p_h для штабеля размером $E = 150$ и шириной w при различных величинах целевого списка K .

Вероятность нахождения целевого контейнера в ярусе h

Ярус h	Количество целевых контейнеров K				
	1	2	3	4	5
1	0,17	0,31	0,42	0,52	0,60
2	0,17	0,25	0,28	0,28	0,27
3	0,17	0,19	0,17	0,13	0,10
4	0,17	0,14	0,09	0,05	0,03
5	0,17	0,08	0,03	0,01	0,00
6	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00
$M[N]$	3,5	2,52	2,03	1,75	1,56

Математическое ожидание числа движений для каждого варианта значения K , определяемое выражением $M[N] = 1p + 2p + \dots + Hp$, приведено в нижней строчке таблицы. На рис. 2 те же данные представлены в виде семейства графиков.

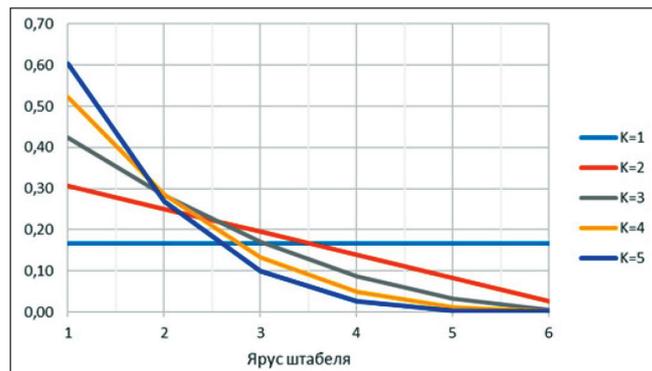


Рис. 2. Вероятность нахождения целевого контейнера в ярусе h

При $K = 1$ выполняется единичная выборка, совпадающая с полученными ранее результатами. С ростом числа целевых контейнеров требуемое число движений значительно уменьшается, что показано на рис. 3.

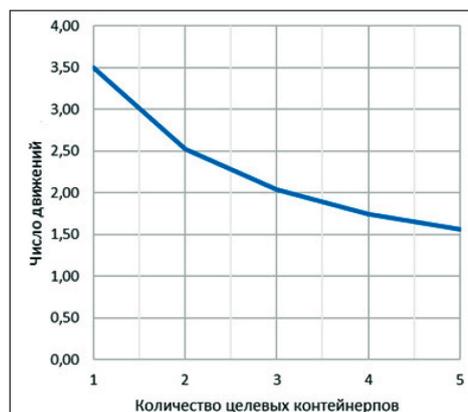


Рис. 3. Снижение числа движений с размером целевого списка

Полученные результаты показывают, что множественная выборка действительно является единственной эффективной операционной стратегией для организации работы в штабеле контейнерного терминала: если с клиентом удастся договориться о подобной практике, имеющей название «множественные визиты», то трудоемкость выборки из штабеля может быть значительно уменьшена. Как правило, подобная возможность имеется при работе с терминалами-сателлитами морского порта, крупными сетевыми компаниями, производителями автомобилей и др.

Обсуждение (Discussion)

Более полную картину позволило получить имитационное моделирование работы терминала по описанным ранее стратегиям. На рис. 4 представлены результаты моделирования двух крайних стратегий выборки: с оптимизацией (выборка самых доступных контейнеров суточного задания) и без оптимизации (выборка контейнеров по требованию). В значения селективности внесено одно движение для каждого контейнера, связанное с его постановкой в штабель.

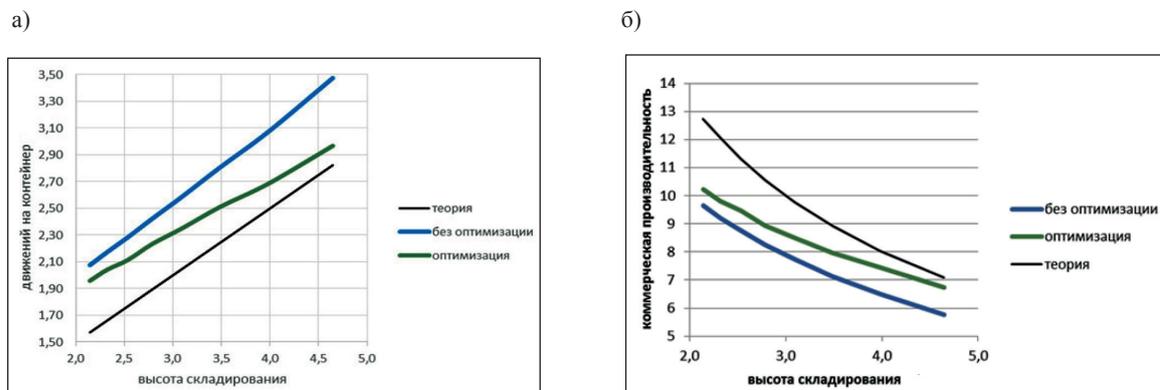


Рис. 4. Сравнение количества движений (а) и коммерческой производительности (б) при различных стратегиях

Полученные результаты заставляют сделать вывод о том, что любые заложенные в ТОС методы оптимизации не следует переоценивать: они могут лишь приблизить селективность к комбинаторной. С учетом ранее изложенного можно предположить, что в различных условиях работы, а также с применением различных операционных стратегий коммерческая производительность оборудования будет находиться в пределах зоны, представленной на рис. 5.

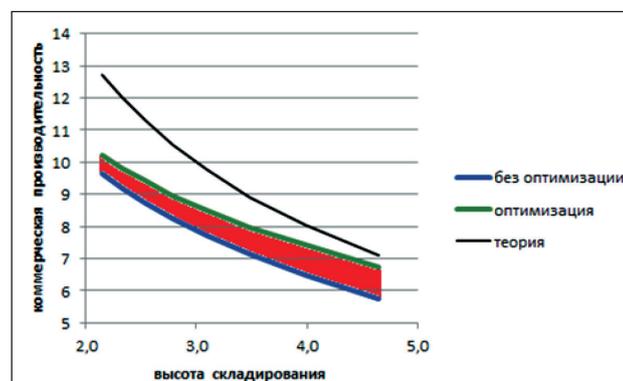


Рис. 5. Зона коммерческой производительности оборудования

Применив полученные данные для грубой оценки оборудования, необходимого для работы контейнерного терминала, получим следующие результаты. Если, например, в течение каждых трех суток на терминал приходит судно вместимостью 1500 контейнеров (около 3 тыс. TEU), выгружая и загружая $1500 + 1500 = 3000$ контейнеров, то годовой грузопоток терминала состав-

ляет 365 тыс. контейнеров (700 тыс. TEU). Следовательно, через склад терминала проходит в среднем 1000 контейнеров в сутки, или $1000/20 = 50$ контейнеров в час. Если на терминале используются складские перегружатели с эксплуатационной производительностью 20 движений в час, а высота складирования составляет четыре яруса, то коммерческая производительность каждой машины составит около четырех движений в час. Соответственно для обслуживания этого грузопотока потребуется 13 складских перегружателей. Таким образом, полученные с помощью имитационного моделирования значения, использованные для расчетно-аналитических оценок, совпадают с практическими данными статистики контейнерных терминалов.

Выводы (Summary)

1. Контейнеры, прибывающие на терминал и убывающие с него, не подвержены ни одной из известных в логистике дисциплин обслуживания очередей (FIFO, FILO, FELO).
2. Последовательность убытия контейнеров с терминала имеет случайный характер, в связи с чем дисциплина обработки контейнеров может быть названа First In/Random Out (FIRO).
3. Оптимизационные стратегии организации выборки из штабеля, предлагаемые современными терминальными операционными системами, позволяют сократить только время обработки транспортных средств, увеличивая нагрузку и, как следствие, потребность в технологическом оборудовании терминала.
4. Единственной возможной оптимизирующей стратегией, сохраняющей необходимое количество ресурсов, является такая организация работы с клиентом, при которой выдача контейнеров, входящих в суточное задание, осуществляется не в порядке поступления за ними транспортных средств клиента, а в порядке, определяемом минимальной трудоемкостью самой выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shortle J. F.* Fundamentals of queueing theory / J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, C. M. Harris. — 5th Edition. — John Wiley & Sons, 2018. — 576 p. DOI: 10.1002/9781119453765
2. *Christopher M.* Logistics & supply chain management / M. Christopher. — 5th Edition. — Pearson UK, 2016. — 328 p.
3. Handbook of big data technologies / A.Y. Zomaya, S. Sakr, eds. — Berlin: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-49340-4
4. *Suchánek P.* Modelling of the Logistic Supplier-Consumer Behavior / P. Suchánek, R. Bucki // KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-319-59394-4_21
5. *Кузнецов А. Л.* Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
6. *Кириченко А. В.* Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко, [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 310 с.
7. *Cordeau J. F.* Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal / J. F. Cordeau, P. Legato, R. M. Mazza, R. Trunfio // Computers & Operations Research. — 2015. — Vol. 53. — Pp. 81–95. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.001.
8. *Euchi J.* Ant Colony Optimization for Solving the Container Stacking Problem: Case of Le Havre (France) Seaport Terminal / J. Euchi, R. Moussi, F. Ndiaye, A. Yassine // International Journal of Applied Logistics (IJAL). — 2016. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 81–101. DOI: 10.4018/IJAL.2016070104.
9. *Ji M.* Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals / M. Ji, W. Guo, H. Zhu, Y. Yang // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2015. — Vol. 80. — Pp. 1–19. DOI:10.1016/j.tre.2015.05.004.
10. *Gnedenko B. V.* Theory of probability / B. V. Gnedenko. — Routledge, 2018. — 520 p. DOI: 10.1201/9780203718964.

REFERENCES

1. Shortle, John F., James M. Thompson, Donald Gross, and Carl M. Harris. *Fundamentals of queueing theory*. 5th Edition. John Wiley & Sons, 2018. DOI: 10.1002/9781119453765
2. Christopher, M. *Logistics & supply chain management*. 5th Edition. Pearson UK, 2016.
3. Zomaya, Albert Y., and Sherif Sakr, eds. *Handbook of big data technologies*. Berlin: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-49340-4
4. Suchánek, Petr, and Robert Bucki. “Modelling of the Logistic Supplier-Consumer Behavior.” *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*. Springer, Cham, 2017. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-319-59394-4_21
5. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. “The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429
6. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznetsov, A. A. Davydenko, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Morskaya konteynernaya transportno-tehnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
7. Cordeau, Jean-François, Pasquale Legato, Rina Mary Mazza, and Roberto Trunfio. “Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal.” *Computers & Operations Research* 53 (2015): 81–95. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.001
8. Euch, Jalel, Riadh Moussi, Fatma Ndiaye, and Adnan Yassine. “Ant Colony Optimization for Solving the Container Stacking Problem: Case of Le Havre (France) Seaport Terminal.” *International Journal of Applied Logistics (IJAL)* 6.2 (2016): 81–101. DOI: 10.4018/IJAL.2016070104.
9. Ji, Mingjun, Wenwen Guo, Huiling Zhu, and Yongzhi Yang. “Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 80 (2015): 1–19. DOI:10.1016/j.tre.2015.05.004.
10. Gnedenko, B. V. *Theory of probability*. Routledge, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Семенов Антон Денисович — диспетчер ООО «Логистический парк «Янино» Российская Федерация, Ленинградская область, Всеволожский район, д. Янино-1, Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1 e-mail: asemyonov054@gmail.com

Боревич Альберт Зенонович — кандидат физико-математических наук, доцент Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, Российская федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Semenov, Anton D. — Dispatcher Yanino Logistics Park LLC Vsevolzhsky District, Yanino-1 village, Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1, Leningrad Region, Russian Federation e-mail: asemyonov054@gmail.com

Borevich, Albert Z. — PhD, associate professor Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2019 г.
Received: September 19, 2019.