

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519

STOCHASTIC METHOD FOR SEA PORT STORAGE CAPACITY CALCULATION

S. S. Valkova

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

Deals with the development and expanding of the analytical calculation method of the assessment of the characteristics of the sea port's cargo storage. The idea of the method is based on the transfer from determined values to stochastic ones. Traditional methods provide the resulting parameters in the form of constants, which explains why the correspondent approach is referred to as "static technique". The static values do not permit to form the perception of the possible range of dispersion of the characteristics around the mean values caused by random fluctuation of the input data for calculation. Accordingly, it does not provide any ways to study the sensitivity of the end results to the inaccuracy and indeterminacy of the primary values. The growth of the demands for the quality of the results of the technologic design procedure translates into the needs to receive all the parameters' assessments not in the form of constant values, but functional dependencies, describing possible methodological variety and stochastic fluctuations of input data. In the first head, this method should be practiced for calculation of the primal basic values which serve as the input for following flow calculation procedure, thus determining all main operational characteristics of the infrastructural object under design. Aiming at this target, in the beginning of the study main cargo operational functions of the sea port are analyzed, which enables to identify the cargo storage as the main element involved in their realizations. Based on this reasoning, the main operational lows govern the sea port's cargo storage operations. These lows take form of differential and integral equations and serve as the main tools in the study of the behavior of the cargo volume stored in the storage facilities of the sea trade port. This study is described in small details in the paper. The discussion of the results allows to conclude that as a result it is possible to obtain not only more accurate mean values, but also to estimate the spread around them

Keywords: sea port, storage, simulation, Monte-Carlo technique.

For citation:

Valkova, Svetlana S. "Stochastic method for sea port storage capacity calculation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

УДК 656:6

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВМЕСТИМОСТИ СКЛАДА МОРСКОГО ПОРТА

С. С. Валькова

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

Описан способ уточнения результатов расчетно-аналитического подхода к оценке параметров грузового склада морского порта, суть которого заключается в замене детерминированных величин случайными. Традиционные методы дают результирующие значения в виде констант, поэтому соответствующий подход в современном проектировании носит название «статического». Статические значения не дают представлений о возможном разбросе изучаемых характеристик при случайных вариациях исходных данных, т. е. не позволяют судить об их чувствительности к неточности и неопределенности входных величин. Ужесточение требований к качеству результатов технологического проектирования в части инструментария расчетных методов выражается в необходимости получать все промежуточные и окончательные значения не в виде констант, а в виде соответствующих функций, оценивающих возможную методическую вариативность расчетов и случайные флуктуации используемых в них данных. В первую очередь такой метод должен быть применен для расчета наиболее важных базовых величин, которые далее вовлекаются в потоковые вычисления технологических расчетов и определяют выходные структурные параметры всего проекта. С этой целью в начале статьи анализируются основные функции,

выполняемые морским портом в отношении обработки проходящих через него грузов, и выявляется ключевая роль грузового склада в их реализации. На основании этого формулируются законы функционирования склада, описываемые соответствующими интегральными, дифференциальными и конечно-разностными уравнениями. Эти уравнения служат основным инструментом исследования динамики поведения объема хранения груза на складе, детально описанным в статье. Обсуждение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в результате можно получать не только более точные средние значения, но и оценивать разброс вокруг них.

Ключевые слова: морские порты, склады, моделирование, методы Монте-Карло.

Для цитирования:

Валькова С. С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

Введение (Introduction)

В современных глобальных транспортно-логистических сетях морские порты играют ключевую роль, во многом определяя основные характеристики их функционирования [1]. Вопросы оптимизации работы морского порта являются предметом многих исследований, основа которых была заложена международным научным сообществом уже давно [2]. В то же время темпы развития индустрии морских перевозок настолько высоки, что технический прогресс опережает развитие фундаментальных исследований в этом направлении.

Появление новых технологий и изменение требований к эксплуатационным характеристикам морских портов заставляет более тщательно изучать все аспекты и составляющие элементы сложной системы, которую образует современный морской терминал [3]. Центральным элементом этой системы является грузовой склад, технологические параметры которого должны соответствовать не только изменяющимся грузопотокам, но и новой роли морских портов в системе товаропродвижения [4]. Данная задача не решается в полной мере с помощью использования существующего инструментария технологического проектирования, поэтому выбранный в качестве объекта исследования метод вероятностно-статистического расчета вместимости склада представляется актуальным.

Методы и материалы

По своему положению в логистической цепи поставок склад морского порта выполняет все или часть базовых функций [3], а именно:

- передача грузопотоков между видами транспорта (функция интерфейса);
- согласование размеров транспортных партий (технологическое хранение);
- сглаживание неравномерности движения транспортных средств (буферная функция);
- коммерческое хранение грузов (складская функция);
- преобразование грузопотоков (логистическая функция).

В то же время единым интегральным параметром, характеризующим работу склада, является объем хранимого в нем в каждый момент груза [5] – [6]. Изменение этого параметра во времени, т. е. то, что называется *поведением* в системном смысле, является совокупным результатом действия всех факторов, относящихся к перечисленным ранее функциям. В этом смысле очевидной становится задача идентификации и оценки степени влияния всех факторов, включенных в соответствующие выполняемым функциям кластеры.

Для решения этой задачи следует отметить, что динамика изменения объема хранимого на любом (обобщенном) складе груза определяется всего лишь двумя процессами: поступлением его на склад и вывозом со склада. По сути, физический объем хранимого груза в момент времени t есть мгновенная разница между количеством завезенного и количеством вывезенного груза к этому моменту времени, т. е.

$$E(t) = I(t) - O(t), \quad (1)$$

где $E(t)$ — объем хранения груза на складе в момент времени t ; $I(t)$ — объем завезенного на склад груза к моменту времени t ; $O(t)$ — объем вывезенного со склада груза к моменту времени t .

Величины, использованные в уравнении для склада (1), отсчитываются от некоторого произвольного момента времени $t = 0$, который характеризует начало деятельности соответствующего объекта. В то же время применение таких абсолютных величин является крайне неудобным и не используется в практике работы морских портов. Вместо этого используются величины относительные, а именно изменения значений объемов за некоторый выбранный интервал времени Δt : год, месяц, смена, час.

Если обозначить как $\Delta e(t)$, $\Delta I(t)$, $\Delta O(t)$ приращения объема хранимого, поступающего и убывающего груза, то соотношение (1) очевидным образом сохранится, преобразуясь в его конечно-разностный аналог:

$$\Delta e(t) = \Delta I(t) - \Delta O(t). \quad (2)$$

Действительно, изменение количества хранимого на терминале груза в сторону увеличения или уменьшения определяется разностью поступившего и убывшего на терминал груза не за весь период $[0, t]$, а за произвольный интервал $\Delta t \in [0, t]$.

Переход от значений $\Delta E(t)$, $\Delta I(t)$, $\Delta O(t)$ к относительным величинам в рассматриваемом случае близок к операции дифференцирования, т. е.

$$\frac{\Delta E(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta I(t)}{\Delta t} - \frac{\Delta O(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

и при $\Delta(t) \rightarrow 0$ действительно им является:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{dI(t)}{dt} - \frac{dO(t)}{dt}. \quad (4)$$

Интерпретация выражений (3) и (4) не вызывает сложности: они означают, что скорость изменения объема складирования $e(t)$ есть разница между скоростями роста $i(t)$, т. е. скоростью поступления груза на склад и скоростью убывания $O(t)$ — скоростью вывоза груза со склада:

$$e(t) = i(t) - O(t). \quad (5)$$

Разница в уравнениях (3) и (5) состоит лишь в том, что в первом случае используются разностные, а во втором — дифференциальные уравнения.

Дифференцированием уравнения (1) получим уравнение (5), которому, как известно, соответствует целое семейство первообразных функций, т. е. уравнений вида

$$E(t) = \int_0^t e(t) dt = \int_0^t i(t) dt - \int_0^t O(t) dt = I(t) - O(t) + C, \quad (6)$$

где C — произвольная константа.

Действительно, разные склады, описываемые одним и тем же уравнением (6), будут демонстрировать одну и ту же динамику изменений, определяемую уравнением (5), но при этом абсолютные значения объемов хранения у них будут отличаться на произвольную постоянную величины C . Это рассуждение демонстрирует существующую методическую проблему: любые измерения, включая результаты, полученные моделированием, представлены величинами $i(t)$ и $O(t)$, в то время как делать выводы необходимо о величине $E(t)$.

В то же время полученный вывод о независимости этой величины от динамики входных и выходных величин позволяет принять решение о том, что именно эта постоянная величина характеризует компоненту склада, не зависящую от неравномерностей и размера транспортных партий, т. е. компоненту объема складирования, отвечающую за внешнее (коммерческое) складирование.

Следующий вывод, который можно сделать на основе сформулированных положений, состоит в том, что колебания объема хранимого на складе груза определяются пространственно-временными различиями величин $i(t)$ и $O(t)$. Под пространственными различиями понимается амплитуда величин, определяемых разбросом физического количества прибывающего и убывающего груза в рассматриваемый дискретный период, под временными — распределение объемов по отдельным дискретам этого периода. Очевидно, что пространственная компонента связана с различными типовыми размерами транспортных партий по видам и их флуктуациями, в то время как временная компонента связана с равномерностью поступления транспортных средств или отклонений от этой равномерности.

Пусть груз, составляющий некоторую произвольную партию n объема V_n , хранится на складе неравномерно: часть партии α_1 хранится в течение времени T_1 , часть партии α_2 хранится в течение времени T_2 и т. д. Хранение на складе партии объемом V_n требует, таким образом, определенное число место-суток, которое назовем *работой склада по хранению партии*:

$$a_n = \sum_{i=1}^I V_n \alpha_i T_i = V_n \sum_{i=1}^I \alpha_i T_i. \quad (7)$$

Величина $\sum_{i=1}^I \alpha_i T_i$ представляет собой средневзвешенное значение длительности хранения отдельных частей грузовой партии, или средний срок хранения груза на складе:

$$T_n = \sum_{i=1}^I \alpha_i T_i. \quad (8)$$

Иными словами, средний срок хранения груза в партии V_n представляет собой такой временной интервал, который при хранении постоянного объема V_n осуществляет ту же складскую работу, что и при неравномерном хранении, или

$$a_n = V_n \sum_{i=1}^I \alpha_i T_i = V_n T_n. \quad (9)$$

Общий объем работы склада при хранении всех партий V_n , $1, \dots, N$ есть

$$A = \sum_{n=1}^N a_n = \sum_{n=1}^N V_n T_n. \quad (10)$$

Среднее значение объема хранения груза E есть величина, которая за время T дает то же значение объема работы склада, т. е.

$$ET = A. \quad (11)$$

Если рассматриваемый период T составляет год, т. е. $T = 365$ сут, все партии равны между собой: $V_n = V$, и средний срок хранения T_n для всех партий одинаков: $T_n = T_{\text{xp}}$, то имеем

$$E \cdot 365 = \sum_{n=1}^N V_n T_n = NV_n T_n \quad (12)$$

или

$$E = \frac{NVT}{365}. \quad (13)$$

Величина $NV = Q_T$ есть объем груза, проходящего через склад за период $T = 365$ сут, откуда имеем

$$E = \frac{NVT_{\text{xp}}}{365} = \frac{Q_{\text{год}} T_{\text{xp}}}{365}. \quad (14)$$

С другой стороны, величина $T_{\text{инт}} = \frac{T}{N} = \frac{365}{N}$ есть средний интервал между поступлениями грузовых партий на склад, откуда имеем

$$E = \frac{NVT_{\text{хр}}}{365} = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}}. \quad (15)$$

Обе выведенные формулы (14), (15) допускают различную интерпретацию. Формула (14) может быть переписана в виде

$$Q_{\text{год}} = E \frac{365}{T_{\text{хр}}}. \quad (16)$$

Величина $\frac{365}{T_{\text{хр}}}$ в логистике известна как «оборачиваемость склада», она показывает сколько раз склад полностью возобновляет свое содержимое за рассматриваемый период времени (в данном случае за год). Умножение среднего объема хранения склада E на этот показатель дает грузопоток за этот период $Q_{\text{год}}$.

Не менее очевидна интерпретация второй полученной формулы (15): величина $\frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}}$ показывает, сколько партий в среднем прибывает на склад за время хранения одной партии, т. е. сколько партий должно одновременно находиться на складе. Умножив это число на объем партии V , получим среднюю величину объема единовременного хранения E .

Итак, совпадение значений полученных соотношений (8) и (10) при внесении в них упрощающих предположений (12) с известными и используемыми в расчетно-аналитических методах формулами (15) и (16) подтверждает корректность сделанного вывода. В то же время зависимости соотношений (8) и (10) для целей, поставленных в настоящем исследовании, оказываются намного более продуктивными. В частности, введенные понятия (*срок хранения груза на складе и интервал его поступления*) позволяют объективно разграничить *технологическое хранение*, необходимое для согласования равномерной интенсивности обработки в порту смежного транспорта и пиковой обработки морских судов, и *внешнее коммерческое хранение*.

Обоснование этого заключается в следующем. Партии прибывают на склад морского порта или убывают со склада с интервалом $T_{\text{инт}}$. Если партия не хранится на складе сверх того времени, которое необходимо только для обслуживания судна в порту, то она должна целиком формироваться или расформировываться в течение этого интервала времени. При равномерном поступлении на терминал смежного наземного транспорта интенсивность накопления или убытия груза на складе постоянна, а сам объем линейно возрастает от 0 до V или убывает от V до 0 по треугольному закону. Следовательно, доля технологического хранения в среднем сроке $T_{\text{хр}}$ составляет $\frac{T_{\text{инт}}}{2}$. Таким образом, период времени, превышающий эту величину, т. е. $T_{\text{хр}} - \frac{T_{\text{инт}}}{2}$, строго говоря, является дополнительным хранением.

Результаты (Results)

Целью оценки требований к объему единовременного хранения, как отмечалось ранее, является проактивное развитие инфраструктурных мощностей, которое требует не только значительных средств, но и длительного периода времени. При этом желательно получать не просто оценки возможных максимальных и близких к ним значений, но и распределение частот их наблюдения. Полученные ранее оценки средних значений не позволяют этого сделать, что подтверждают следующие рассуждения. Пусть, например, склад морского порта готовит к отправке судовую партию, график формирования которой показан на рис. 1.

Если эта партия является единственной в году, то среднее значение загрузки склада в этом случае составляет значение $E = \frac{NVT_{\text{хр}}}{365} = \frac{VT_{\text{хр}}}{365}$ (эквивалентное хранение 1/365 доли от работы $VT_{\text{хр}}$ по хранению одной партии).

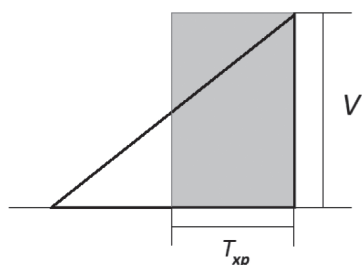


Рис. 1. Эпюра простейшей единичной партии

Если через склад проходят грузовые партии с интервалом поступления $T_{\text{инт}} = 2T_{\text{хр}}$, то динамика изменения объема хранения будет такова, как показано на рис. 2. Как следует из этого рисунка и формулы (15), средний объем запаса на склад составит величину $E = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} = \frac{V}{2}$.

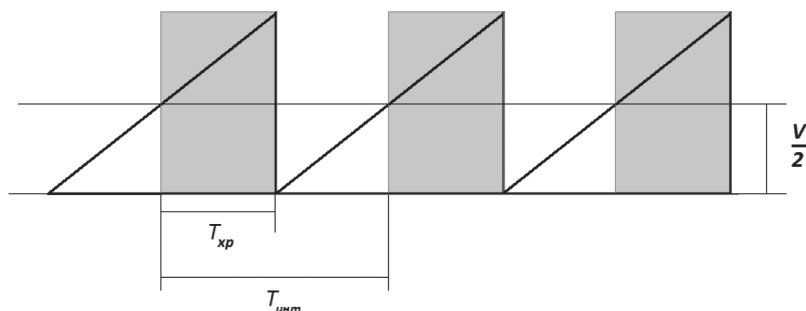


Рис. 2. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} = 2T_{\text{хр}}$

Если уменьшить интервал между поступлением партий до значения граничного $T_{\text{инт}} = T_{\text{хр}}$, то средний объем хранения на складе составит $E = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} = V$, как это показано на рис. 3.

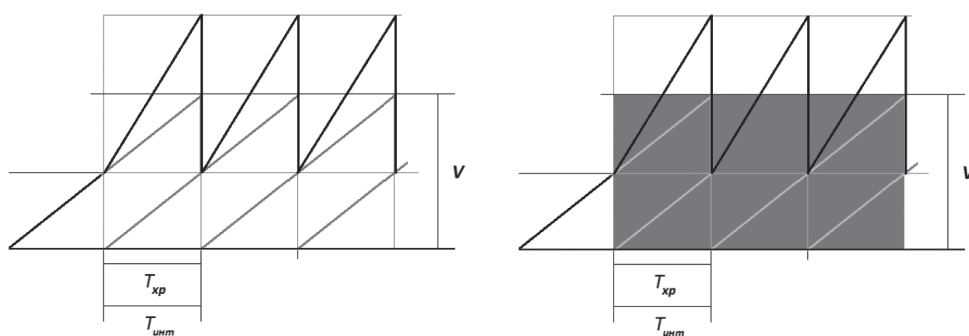


Рис. 3. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} = T_{\text{хр}}$:
а — треугольная форма партии; б — прямоугольная форма партии

Дальнейшее снижение интервала прибытия партий для рассматриваемых в данном случае единичных партий вида, показанного на рис. 1, будет приводить лишь к повышению среднего уровня объема хранения, который определяется формулами (14) или (15), причем амплитуда колебаний треугольной формы вокруг этого среднего значения будет оставаться постоянной и равной $\frac{V}{2}$ (рис. 4).

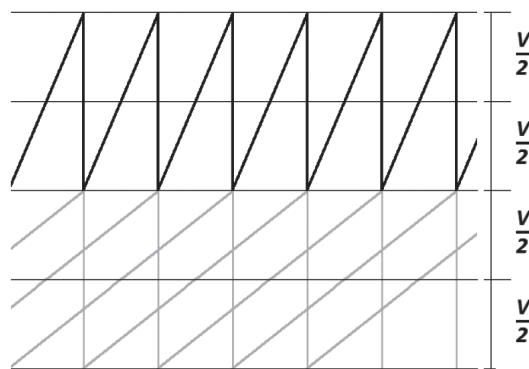


Рис. 4. Изменение объема складирования при $T_{\text{инт}} < T_{\text{хр}}$

Таким образом, для случаев простейшего треугольного закона формирования партий (1), регулярного интервала их поступления (2) и равенства их объема (3) максимальный объем хранения может быть получен добавлением к среднему значению величины указанной амплитуды, т. е.

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2}. \quad (17)$$

Для рассматриваемого случая треугольного закона формирования партий время хранения является половиной времени формирования партии (времени от начала поступления груза данной партии до убытия ее со склада), т. е. $T_{\text{хр}} = 2T_{\text{форм}}$. В принятых обозначениях формула (17) может быть записана более компактно:

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{VT_{\text{форм}}}{2T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{T_{\text{форм}}}{T_{\text{инт}}} + 1 \right). \quad (18)$$

Именно такой вид формулы предлагается в нормах технологического проектирования морских портов [7] – [8]. В то же время на форму результирующей кривой оказывают более существенное влияние другие факторы из числа идентифицированных ранее.

Если при том же среднем периоде поступления партий груза на склад их отдельные значения подвержены флуктуациям, как это показано на рис. 5, а, то накопление груза будет иметь свои сгущения и разрежения относительно равномерного характера (см. рис. 5, б и в).

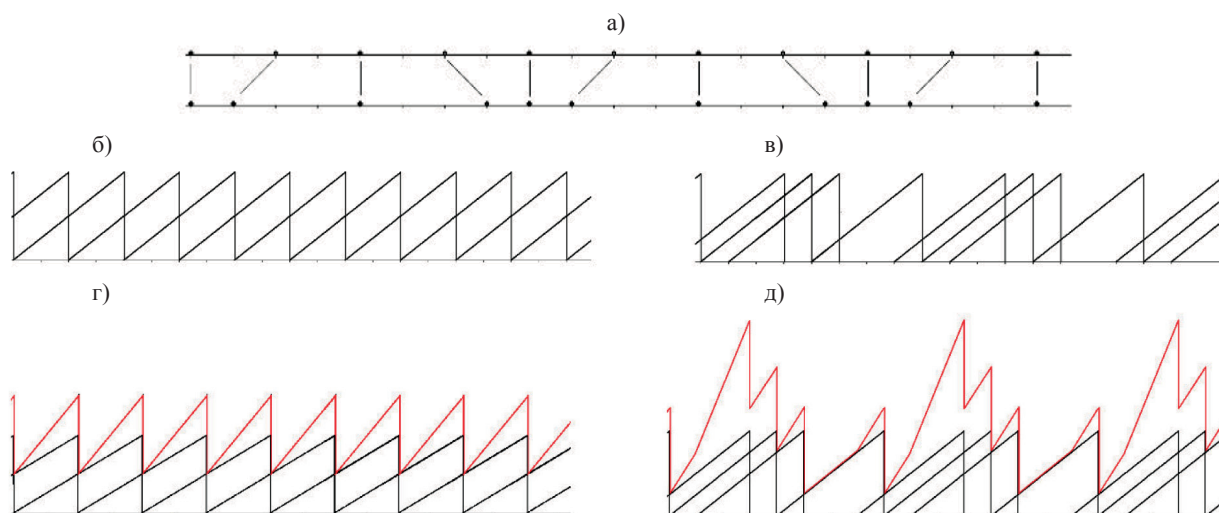


Рис. 5. Динамика изменения объема хранения при колебаниях интервала поступления:
а — изменение регулярных и иррегулярных поступлений; б — эпюра для регулярного интервала поступления; в — эпюра для иррегулярного интервала поступления; г — суммарный объем хранения склада для регулярного интервала поступления; д — суммарный объем хранения склада для иррегулярного интервала поступления

При сохранении тех же средних значений результирующий график объема хранения будет показывать намного более высокую динамику (см. рис. 5, *з* и *д*). Аналогичный эффект будут иметь колебания размера партий вокруг среднего значения (рис. 6).

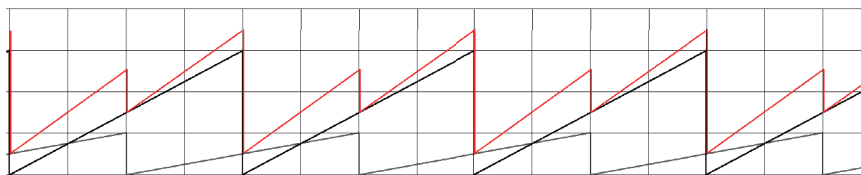


Рис. 6. Динамика изменения объема хранения при колебаниях размера партий

В соответствии с нормами технологического проектирования, расчет максимального размера склада выполняется добавлением половины размера партий, как это сделано в формуле (14), не учитывая ни действия указанных факторов по отдельности, ни их возможного совместного влияния.

В то же время, как показывают рассмотренные примеры, это влияние может быть весьма значительным и во много раз превышающим предлагаемую поправку. При этом рассмотренные примеры показывают неравномерные, но регулярные колебания значений, приводящие к появлению таких же регулярных «биений» в графиках изменения результирующих функций (см. рис. 5 и 6). Очевидно, что произвольные флуктуации значений будут приводить к иному характеру поведения результирующей функции. Задача оценки максимальных значений, решение которой требует планирования физических размеров склада как инфраструктурного элемента, предполагает использование иных методов.

Обсуждение (Discussion)

Как было установлено ранее, уравнения (14) и (15) представляют собой тождество, которое справедливо лишь для детерминированных значений входящих в эти формулы переменных. Если величины в правых частях уравнения являются случайными величинами, то случайной величиной является и выражаемое через них значение. Однако в правой части уравнения (14) находятся лишь две величины, а именно $\frac{Q_{\text{год}} T_{\text{хр}}}{365}$, в правой части уравнения (15) — три, а именно $\frac{VT_{\text{хр}}}{T_{\text{инт}}}$.

Следовательно, определяемая этими уравнениями новая случайная величина E может иметь иной статистический характер, и в этом случае уравнения (14) и (15) перестают быть тождественными.

Более того, поскольку случайные величины задаются своими законами распределения, а именно интегральной функцией или плотностью этого распределения, в алгебраические действия эти величины вовлекаться не могут. Традиционным инженерным решением данной проблемы является использование в уравнениях подобного типа значений математического ожидания соответствующих переменных, которые подставляются в уравнения типа (14) и (15). Однако при такой замене невозможно сделать вывод о распределении полученной случайной величины вокруг полученного значения, т. е. случайная величина необратимо подменяется детерминированным значением.

Иными словами, при инженерных расчетах уравнение (15) по умолчанию интерпретируется как $M[E] = \frac{[V] \cdot [T_{\text{хр}}]}{[T_{\text{инт}}]}$. Математические ожидания исходных величин в правых частях уравнений,

определяемые сбором статистических материалов, могут быть получены из справочных материалов или выбираются произвольным образом. Но здесь скрывается еще одна методическая проблема. Если даже известна произвольная случайная величина X , то математическое ожидание ее обратной величины $\frac{1}{X}$, т. е. $M\left[\frac{1}{X}\right]$, вовсе не есть $M\left[\frac{1}{X}\right]$, поскольку величина $\frac{1}{X}$ является иной

случайной величиной. Как следствие, использование арифметической операции деления в уравнении $\frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}}$ будет приводить к погрешности оценки искомого значения даже при известном значении $M[T_{\text{инт}}]$.

Таким образом, использование традиционных методов расчета по рекомендуемым нормами формулам (14) и (15) имеет методическую погрешность в расчете предполагаемого центрального значения, не позволяя судить о характере случайных разбросов оцениваемой величины вокруг этого значения. Если, к примеру, в 10 случаях некоторых испытаний будет наблюдаться значение некоторой величины 50, и в 10 случаях — 950, то средним значением будет 500, т. е. величина, равноудаленная от реально наблюдаемых величин.

Предположим, что поставлена задача оценить требуемый размер склада для потока партий, имеющих одинаковый размер $V = 1000$ и характеризующихся одинаковым сроком хранения $T_{\text{xp}} = 10$ сут и одинаковым интервалом поступления $T_{\text{инт}} = 5$ сут. Формула $E = \frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}}$ для выбранного примера дает значение $E = 1000 \cdot \frac{10}{5} = 2000$.

Пусть теперь интервал поступления партий $T_{\text{инт}}$ является случайной величиной, среднее значение которой составляет те же 5 сут. Объем хранения на складе E также будет являться случайной величиной, конкретные значения которой будут, как представляется, колебаться вокруг значения $E = 2000$. Рассмотрим это на числовых примерах.

Пример 1. Интервалы между поступлением партий составляют значения 2, 3, 5, 10. Средний интервал составляет величину $\frac{2+3+5+10}{4} = 5$. Расчет размера склада для каждого интервала по приведенной выше формуле дает значения 5000, 3333, 2000, 1000. Среднее значение склада в этом случае составит величину $\frac{5000+3333+2000+1000}{4} = 2833$, что значительно отличается от ожидаемых 2000.

Пример 2. Интервалы поступления составляют значения 1, 2, 8, 9. В среднем интервал составляет ту же величину $\frac{1+2+8+9}{4} = 5$. Расчет размера склада дает значения 10000, 5000, 1250, 1111. Среднее значение склада в этом случае составит величину $\frac{10000+5000+1250+1111}{4} = 4340$. Полученное значение более чем в два раза выше ожидаемого.

Как видно из этих примеров, одни и те же средние значения всех величин при разных разбросах только одной из них приводят к результатам, значительно отличающимся от расчетов по классической формуле.

В проведенных рассуждениях предполагалось, что $M\left[\frac{1}{T_{\text{инт}}}\right] = \frac{1}{M[T_{\text{инт}}]}$. В действительности, $\frac{1}{T_{\text{инт}}}$ есть новая случайная величина, значения которой составляют $\frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}, \dots, \frac{1}{T_N}$. Ее среднее

значение (математическое ожидание) есть величина $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N}$, вовсе не равная значению

$\frac{1}{\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N}{N}} = \frac{N}{T_1 + T_2 + \dots + T_N}$. Действительно, значения математического ожидания $\frac{1}{T_{\text{инт}}}$ в примерах

1 и 2 есть $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N} = \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10}}{4} = 0,28$ и $\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_N}}{N} = \frac{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9}}{4} = 0,43$,

что при умножении на $VT_{\text{xp}} = 10000$ дает те же результаты, что и в приведенных примерах 1 и 2, что снимает кажущееся противоречие.

Если к точности расчетных значений не предъявляются особых требований и с методической погрешностью можно мириться, то подобный подход может быть использован [9] – [13]. В инженерной практике результаты получают расчетно-аналитическими методами этого класса в попытке избежать всевозможных ошибок и отклонений путем умножения на некоторый коэффициент запаса $K > 1$, который в различных дисциплинах, предметах, объектах и формулах называют по-разному, но который, по сути, является *коэффициентом незнания*. В тех случаях, когда требуется более адекватное суждение о случайном поведении оцениваемой величины, в науке используют иной подход, в основе которого лежит метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло.

Идея метода Монте-Карло состоит в последовательной генерации значений наборов случайных величин, входящих в исследуемую зависимость, например, выраженную формулой (15). Полученная комбинация значений используется для вычисления одиночного значения функции по этой формуле, которое является результатом данного «статистического испытания». Многократное повторение таких испытаний позволяет получить массив значений этой случайной величины, статистическая обработка которого дает значение интегральной функции распределения, т. е. полностью описывает данную случайную величину.

Основным исполнительным механизмом метода Монте-Карло является генерация значений случайной величины по заданному закону ее распределения, что обычно выполняется с помощью метода обратной функции [14]. Функция распределения F случайной величины X есть вероятность того, что $X < x$, т. е. функция вида $F(x) = P(X < x)$. Областью определения функции F являются значения случайной величины, областью значений — интервал $[0,1]$, областью определения обратной F^{-1} — интервал $[0,1]$, областью значений — вероятные значения случайной величины. Если генерировать равномерно распределенные на интервале $[0,1]$ случайные числа, то значения F^{-1} будут группироваться плотнее там, где крутизна этой кривой выше, т. е. вероятность появления значений будет выше там, где выше плотность функции F , т. е. в статистическом смысле будет соответствовать заданному распределению случайной величины.

Ранее изложенное показано на рис. 7, где представлены интегральные функции распределения случайных величин: объема партии, срока хранения и интервала поступления партий, специально заданных в различном виде — как непрерывные и дискретные случайные величины.

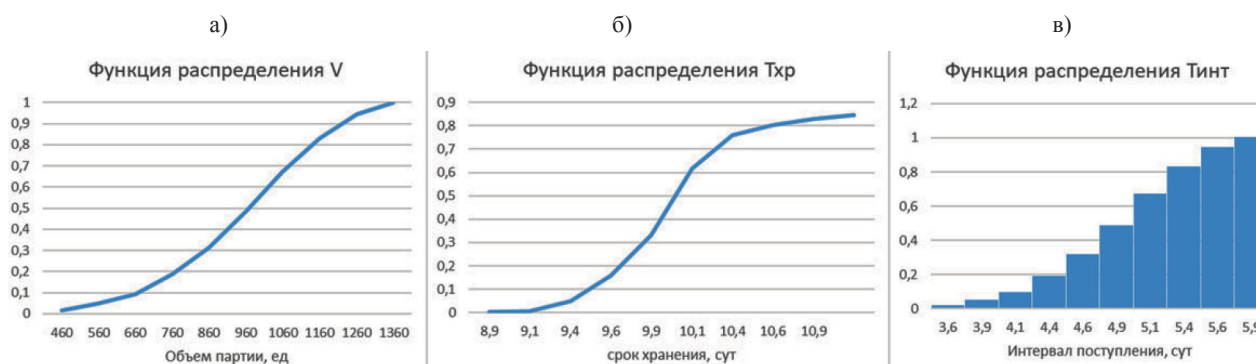


Рис. 7. Функции распределения исходных расчетных величин:
а — объема партии; б — срока хранения; в — интервала поступления

В таблице приведен пример массива статистических испытаний — сгенерированные значения исходных значений и вычисленные в каждом статистическом испытании значения объема хранения на складе E :

$N_{\text{исп}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V	960	760	860	760	960	960	560	1060	1260	560	760	1060	760	1160	460	960	1260
$T_{\text{хр}}$	9,4	9,9	9,9	11,1	10,1	9,9	9,6	11,1	9,4	9,6	11,1	9,9	10,1	9,9	9,6	9,1	11,1
$T_{\text{инт}}$	4,6	3,6	4,6	4,9	4,9	4,9	4,9	4,4	4,1	5,1	4,9	4,6	5,6	5,4	5,6	4,9	3,9
E	1945,9	2070,3	1836,2	1734,4	1993,8	1944,6	1105,6	2695,4	2863,6	1051,7	1734,4	2263,2	1368,0	2131,2	787,1	1796,9	3617,4

На рис. 8 для данного примера приведен результат статистической обработки массива значений — гистограмма плотности распределения вероятности значений объема хранения на складе E .



Рис. 8. Гистограмма плотности распределения объема хранения груза на складе

Математические ожидания объема партии, срока хранения и интервала прибытия партий для примера на рис. 7 составляют, соответственно: $M[V] = 1000$, $M[T_{\text{хр}}] = 10$ сут и $M[T_{\text{инт}}] = 5$ сут, т. е. совпадают с данными рассмотренных выше примеров.

Как видно из рис. 8, значения E действительно располагаются в районе 2000 единиц, т. е. совпадают с ожидаемыми, полученными в расчетном примере. В то же время точное среднее значение, подсчитанное по массиву статистических испытаний, составляет детерминированную величину, равную 1900, а кривая на рис. 8 позволяет судить о возможных отклонениях и их вероятности, что дает возможность принимать более обоснованные инженерные и предпринимательские решения.

Выводы (Summary)

1. Динамика изменения объема хранения на грузовом складе морского порта полностью определяется интенсивностью мгновенного поступления и убытия груза, что описывается дифференциальным или конечно-разностным уравнением.
2. Способ определения динамики изменения объема хранения позволяет получить соответствующую зависимость с точностью до произвольной постоянной величины, которая математически определяется начальными условиями, а фактически отражает коммерческую компоненту хранения груза на складе.
3. Средние значения объема хранения при детерминированных исходных данных определяются несколькими инвариантными алгебраическими соотношениями.
4. Максимальные значения объема хранения в случае детерминированных величин могут быть учтены аналитическими поправками, зависящими от параметров формирования и расформирования грузовых партий.
5. При рассмотрении всех значений как случайных величин эти поправки становятся мало-значимыми, а сами математические методы утрачивают свою применимость.
6. Возможным решением является использование методов статистических испытаний, которые позволяют получать не только более точные средние значения, но и оценивать разброс вокруг них.

Заключение (Conclusion)

Ужесточение конкуренции на рынке транспортных услуг наблюдается на всех уровнях (от международного до корпоративного) и во всех сегментах (от транспортировки сырья до готовой продукции). Как следствие, в последние десятилетия кардинальным образом изменились требования к характеристикам и параметрам основных элементов инфраструктурной инфраструктуры. В полной мере это относится к морским портам, проектирование которых регламентируется нор-

мами, созданными в прошлом веке. Использование новых методов, уточняющих и развивающих привычный инструментарий технологического проектирования, позволяет достичь качественно нового уровня технико-экономических показателей работы транспортной системы государства. Примером такого инструмента, эффективность которого доказана экспериментальными исследованиями, является описанный в данном исследовании вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thorensen C. A. *Port designer's handbook* / C.A. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
2. UNCTAD Monographs on Port Management. Monograph № 9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management. — March 1991.
3. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. Current issues in shipping, ports and logistics / T. Notteboom (ed.). — Asp/Vubpress/Upa, 2011. — 608 p.
5. Елисеева А. С. Принципы организации грузового терминала / А. С. Елисеева. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. — 329 с.
6. Маликов О. Б. Склады и грузовые терминалы / О. Б. Маликов. — М.: АСТ, 2005. — 560 с.
7. РД 31.3.05-97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М., 1998.
8. Кузнецов А. Л. О несовершенстве нормативной базы технологического проектирования морских портов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // Морские порты. — 2017. — № 6. — С. 18–22.
9. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. Михаэль Д. Складская логистика. Новые пути системного планирования / Д. Михаэль; пер. с нем.; под ред. Г. П. Манжосова. — М: КИА центр, 2004. — 136 с.
11. International Handbook of Maritime Economics / K. Cullinane (ed.). — Edward Elgar Publishing, 2011. — 520 p.
12. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport. White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System. — Publications Office of the European Union, 2011.
13. Памбучхиянц В. К. Организация, технология и проектирование торговых предприятий / В. К. Памбучхиянц. — М.: ИВЦ «Маркетинг», 1999. — 320 с.
14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 813 с.

REFERENCES

1. Thorensen, C.A. *Port designer's handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
2. UNCTAD Monographs on Port Management. Monograph № 9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management. March 1991.
3. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. Notteboom, Theo, ed. *Current issues in shipping, ports and logistics*. Asp/Vubpress/Upa, 2011.
5. Eliseeva, A.S. *Printsipy organizatsii gruzovogo terminala*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2003.
6. Malikov, O.B. *Sklady i gruzovye terminaly*. M.: AST, 2005.

7. Russian Federation. Guidance Document RD 31.3.05-97. Engineering Design Standards for Seaports. M., 1998.
8. Kuznetsov, A.L., and V.A. Pogodin. "O nesovershenstve normativnoi bazy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov." *Morskie porty* 6 (2017): 18–22.
9. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. "The development of the functional model for the "dry port" type container terminal and principles of its use in the technologic design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. Mikhael', D. *Skladskaya logistika. Novye puti sistemnogo planirovaniya*. Edited by G.P. Manzhosov. M: KIA tsentr, 2004.
11. Cullinane, Kevin, ed. *International handbook of maritime economics*. Edward Elgar Publishing, 2011.
12. European Comission. Directorate-General for Mobility and Transport. *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System*. Publications Office of the European Union, 2011.
13. Pambukhchiyants, V. K. *Organizatsiya, tekhnologiya i proektirovanie torgovykh predpriyatii*. M.: IVTs «Marketing», 1999.
14. Kobzar', A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. M.: FIZMATLIT, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Валькова Светлана Сергеевна — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valkova, Svetlana S. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.
Received: May 15, 2018.*