DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914

ANALYTICAL IMPROVEMENT OF THE STATISTICAL EXPERIMENTS METHOD FOR THE PURPOSES OF PORTS DESIGN

A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov

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

The planning of business processes in sea transport is the foundation of transportation companies and technological projects development forecast. The calculations of business processes parameters are mainly complicated by the fact that most of the input values are stochastic ones. This is due to the specifications of technological processes and influence of a wide specter of external environment events (e. g., hydrometeorological and ice conditions) on the one hand, and market conditions (e. g., competition conditions, market agents behavior, exchange rate) on another hand. To provide the necessary level of results reliability, the calculations, that are implemented during research of specifical sea transport operations tasks (such as technological design of seaports), require to pay a great effort in experiments planning. Planning the experiments means the process of choosing the conditions, procedures and methods of experiments running. It also includes the definition of how many experiments should be provided. In other words, the purpose of experiments planning is providing the results maximum precision and reliability with minimum number of experiments. This element of research could take a whole volume in the scientific research. A method for implementing mathematical calculations with stochastic values, which allows you to define the form of the output probability distribution without Monte-Carlo method utilization, is suggested in the paper. It is proved in the paper that the output distribution is close enough to the results, which are calculated with conventional methods. At the same time, when the number of variables is small, the method requires less computational resources.

Keywords: seaport design, transportation system management, simulation modelling, seaport, dry port, terminal warehouse capacity, Monte-Carlo method, computational complexity, experiments planning, statistical research.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Analytical improvement of the statistical experiments method for the purposes of ports design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914.

УДК 656.616

АНАЛИТИЧЕСКОЕ УТОЧНЕНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКИХ ПОРТОВ

А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов

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

В работе исследованы вопросы планирования производственных процессов на водном транспорте, составляющие основу прогнозирования развития транспортных предприятий и технологических проектов во всех элементах транспортной инфраструктуры. Отмечается, что расчеты характеристик как производственных процессов, так и отдельных морских операций, существенно затруднены ввиду того, что используемые исходные и промежуточные данные имеют стохастическую (вероятностную) природу. Это обусловлено, с одной стороны, отраслевыми особенностями технологических процессов и воздействием широкого спектра параметров внешней среды (гидрометеорологические условия, ледовый режим и др.), а с другой — рыночной ситуацией (конкурентной средой, деятельностью контрагентов, курсом валют и т. д.). Для обеспечения необходимой достоверности результатов проводимые модельные исследования отдельных вопросов эксплуатации водного транспорта, в частности технологического проектирования портов и грузовых терминалов, *нуждаются в реализации отдельного этапа исследования, а именно планировании эксперимента. Под этим понимается процесс выбора условий, процедуры и методов проведения опытов (вычислительных циклов), их числа и условий, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Определена основная цель планирования эксперимента как достижение максимальной точности измерений при минимальном количестве проведенных опытов и сохранении статистической достоверности результатов (обоснованию данного этапа исследований посвящена отдельная научная отрасль — планирование экспериментов). Предложен метод выполнения математических операций со случайными величинами, позволяющий получить распределение случайной величины без необходимости использования метода Монте-Карло. Приведено доказательство того, что это распределение является максимально близким к результатам, получаемым с помощью общепринятых методов, но вместе с тем при небольшом количестве параметров требует меньших вычислительных ресурсов.*

Ключевые слова: проектирование морских портов, управление транспортными системами, имитационное моделирование, морской порт, сухой порт, вместимость склада, метод Монте-Карло, сложность вычислений, планирование эксперимента, статистические испытания.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Аналитическое уточнение метода статистических испытаний для исследования морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914.

Введение (Introduction)

В основе методов технологического проектирования морских портов находится расчетно-аналитический подход, при котором определенный набор формул используется для получения из исходных данных промежуточных значений, которые далее вовлекаются в последующие вычисления вплоть до получения требуемых конечных результатов [1], [2]. Подобная процедура принципиально рассчитана на работу с детерминированными значениями всех переменных. В то же время исходные данные в подавляющем большинстве случаев являются результатом статистических исследований существующих объектов и процессов, параметры которых могут варьироваться вокруг средних значений [3]–[5]. К возможным отклонениям приводит также воздействие факторов, которые либо непредсказуемы, либо не находятся под управлением в том или ином проекте. Все это определяет необходимость получения выходных проектных значений так же как случайных величин, т. е. к определению не просто детерминированных числовых значений, но и и возможного «разброса» последних. В свою очередь, это предполагает последовательное использование в формулах, входящих в вычислительные процедуры, случайных величин [6], [7].

В классической математике не существует каких-либо методов для работы со случайными величинами через связывающие их формулы. По сути, единственным и часто используемым на практике способом обхода этого ограничения *является метод Монте-Карло*, или *метод статистических испытаний*. В то же время этот метод в значительной мере относится к категории эвристик, доказательство адекватности которых обычно не приводится. В частности, при реализации метода Монте-Карло обычно остается нерешенным вопрос: *каков должен быть объем статистических испытаний для получения заданной точности результатов* [8], [9]. Аналитических способов ответа на этот вопрос нет [10]–[11], поэтому в данном исследовании предпринята попытка найти решение этой проблемы, если не в общем, то в достаточно широком для практического использования виде.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть имеем две переменных: $x \in X$ и $y \in Y$, с известными плотностями вероятности $f(x)$ и $f(y)$. Если эти переменные используются в некоторой произвольной функции $z = \Phi(x, y)$, то для построения плотности вероятности величины z обычно используется *метод статистических испытаний* (*метод Монте-Карло*). Суть его состоит в том, что в каждом испытании k тем или иным способом генерируются значения x_k и y_k, подчиняющиеся заданным законам распределения случайных величин $f(x)$ и $f(y)$. Полученные пары значений подставляются в формулу $z = \Phi(x, y)$, что позволяет получить значение функции в отдельном испытании $z_k = \Phi(x_k, y_k)$.

Предполагается, что при достаточно большом количестве испытаний необычные сочетания значений переменных x_k и y_k будут встречаться реже, а типичные сочетания — чаще. Имея статистический ряд значений $\{z_k\}$, можно подсчитать количество их попаданий в стандартные интервалы, тем самым получив оценку плотности распределения искомой величины через частоту наблюдения.

Рассмотрим теперь декартово произведение $XY = \{(x, y) | x \in X, y \in Y\}$. Предположительно совместная вероятность сочетания значений (x, y) составляет величину $f(x, y) = f(x) \cdot f(y)$. При этом для сочетания (x, y) значение функции $z = \Phi(x, y)$. Иными словами, для каждой точки (x, y) имеем два функциональных соотношения: $f(x, y)$ и $\Phi(x, y)$, как это условно показано на рис. 1.

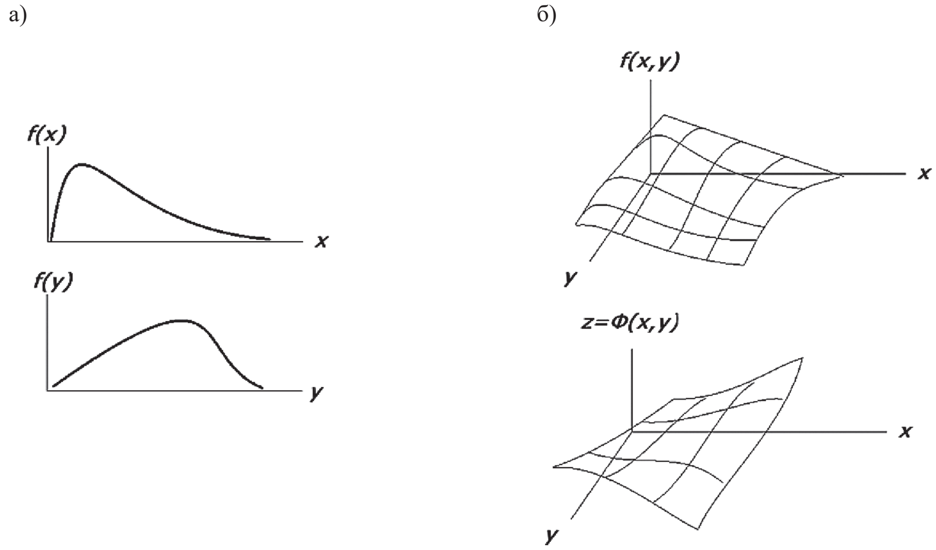

Рис. 1. Построение функции и плотности вероятности значений:
а — функции плотности вероятности случайных величин *x* и *y*;
б — графики функциональных соотношений случайных величин

Значение z_k определяет горизонтальную плоскость в пространстве (x, y, z), а вместе с z_{k-1} они задают слой в нем. Обозначим количество значений, попавших в слой $(k-1,\ k)$, как N_k. Если суммировать плотность распределения всех точек, составляющих множество N_k, то получим оценку вероятности нахождения значения функции $z = \Phi(x, y)$ в интервале $\Delta_к = z_k - z_{k-1}$, что, по сути, совпадает с методом интервалов: N_k представляет собой частоту вероятности.

В случае непрерывных величин $z_0 = \Phi(x, y)$ задает линию пересечения горизонтальной плоскости, расположенной на высоте z_o, с поверхностью $z = \Phi(x, y)$. Спроектированная на плоскость XY эта линия образует криволинейный отрезок, длина и конфигурация которого зависят от величины z, т. е. $L(z)$, как показано на рис. 2.

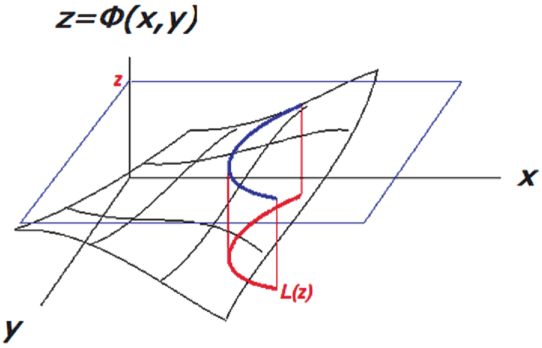

Рис. 2. Линия пересечения поверхности $\Phi(x, y)$ плоскостью z_0

Вероятность получения значения z в таком случае выражается криволинейным интегралом $f(z) = \int\limits_{L(z)} f(x,y)\,dl$. Таким образом, полученная формула определяет аналитическое выражение для плотности вероятности функции случайных переменных.

Обсуждение (Discussion)

В качестве примера для описания алгоритма и соответствующей ему модели выбрана формула расчета требуемого объема склада: $E = V\dfrac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{суд}}}$, в которой V — средняя загрузка судна; $T_{\text{хр}}$ — средний срок хранения; $T_{\text{суд}}$ — средний интервал между судозаходами.

Для наглядности изложения представим вначале функцию $E = \Phi(V, T_{\text{хр}}, T_{\text{суд}})$ зависящей лишь от двух переменных. Для этого предположим, что срок хранения постоянный. Рассмотрим вначале аналитический подход. Итак, имеются две случайных величины: $X = V$ и $Y = T$, определенные своими функциями плотности вероятности (рис. 3).

а) б)

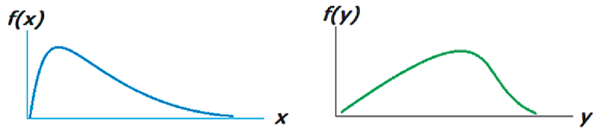

Рис. 3. Плотность вероятности аргументов:
а — $f(x)$; *б* — $f(y)$

Совместная плотность вероятности $f(x,y)$ определена как $f(x)\cdot f(y)$ (рис. 4).

а) б)

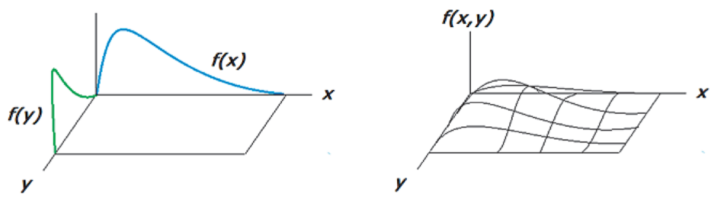

Рис. 4. Совместная плотность вероятности:
а — проекции совместной плотности вероятности;
б — график функции совместной плотности вероятности

Функция случайных аргументов есть $\Phi(x,y) = a\dfrac{V}{T}$. Поверхность, соответствующая этой функции, показана на рис. 5.

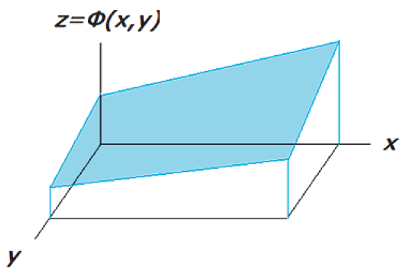

Рис. 5. Поверхность выбранной функции

Выберем произвольное значение e из области значений функции. Тогда выражение $e = \Phi(x,y)$ определит линию, образуемую пересечением горизонтальной плоскости, лежащей на высоте e над VT, и поверхности $\Phi(x,y)$. Очевидно, что это будет прямая линия $e = a\frac{V}{T}$ или $V = \frac{e}{a}T$ (рис. 6).

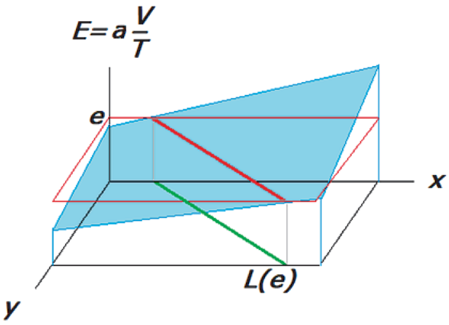

Рис. 6. Пересечение плоскости и поверхности функции

Проекция линии пересечения на плоскость VT формирует линию, интегрирование по которой позволит получить вероятность получения значения e. Соответствующее выражение

$$P(e) = \int_{L(e)} a\frac{V}{T} f(x) f(y) dl.$$

Очевидно, что в реальных случаях использование полученной аналитической зависимости становится маловероятным. В то же время в практических приложениях как правило используются не непрерывные интегральные функции и плотности распределения вероятности, а статистические ряды, т. е. *дискретные случайные величины*. Для этих величин описанные ранее вычисления оказываются весьма просты. Здесь приведено краткое описание структуры вычислительной модели, разработанной для изучения предлагаемого метода.

Продолжим рассмотрение выбранного примера в дискретной числовой форме. Для конкретности выберем постоянную величину срока хранения $T_{\text{хр}}$, равной 7 сут или 168 ч, т. е. $E = \Phi(V, 168, T_{\text{суд}}) = \Phi(V, T_{\text{суд}})$. Пусть вместимость судна меняется от 50 до 77 тыс. т, интервал судозахода — 20–29 ч. Значения плотности вероятности величин V и $T_{\text{суд}}$, соответствующие функции совместной плотности распределения $f(V, T_{\text{суд}})$ и $\Phi(V, T_{\text{суд}})$ для этого примера, приведены в таблице на рис. 7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
V	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77			
f(V)	1	5	10	15	19	19	15	10	5	1		Tсуд	f(Txp)
f(V,Txp)	0,0001	0,0005	0,001	0,0015	0,0019	0,0019	0,0015	0,001	0,0005	0,0001	1	20	1
	0,001	0,005	0,01	0,015	0,019	0,019	0,015	0,01	0,005	0,001	10	21	2
	0,0021	0,0105	0,021	0,0315	0,0399	0,0399	0,0315	0,021	0,0105	0,0021	21	22	3
	0,0008	0,004	0,008	0,012	0,0152	0,0152	0,012	0,008	0,004	0,0008	8	23	4
	0,001	0,005	0,01	0,015	0,019	0,019	0,015	0,01	0,005	0,001	10	24	5
	0,0009	0,0045	0,009	0,0135	0,0171	0,0171	0,0135	0,009	0,0045	0,0009	9	25	6
	0,001	0,005	0,01	0,015	0,019	0,019	0,015	0,01	0,005	0,001	10	26	7
	0,002	0,01	0,02	0,03	0,038	0,038	0,03	0,02	0,01	0,002	20	27	8
	0,001	0,005	0,01	0,015	0,019	0,019	0,015	0,01	0,005	0,001	10	28	9
	0,0001	0,0005	0,001	0,0015	0,0019	0,0019	0,0015	0,001	0,0005	0,0001	1	29	10
											1		
Φ(V,Txp)	420 000	445 200	470 400	495 600	520 800	546 000	571 200	596 400	621 600	646 800			
	400 000	424 000	448 000	472 000	496 000	520 000	544 000	568 000	592 000	616 000			
	381 818	404 727	427 636	450 545	473 455	496 364	519 273	542 182	565 091	588 000			
	365 217	387 130	409 043	430 957	452 870	474 783	496 696	518 609	540 522	562 435			
	350 000	371 000	392 000	413 000	434 000	455 000	476 000	497 000	518 000	539 000			
	336 000	356 160	376 320	396 480	416 640	436 800	456 960	477 120	497 280	517 440			
	323 077	342 462	361 846	381 231	400 615	420 000	439 385	458 769	478 154	497 538			
	311 111	329 778	348 444	367 111	385 778	404 444	423 111	441 778	460 444	479 111			
	300 000	318 000	336 000	354 000	372 000	390 000	408 000	426 000	444 000	462 000			
	289 655	307 034	324 414	341 793	359 172	376 552	393 931	411 310	428 690	446 069			

Рис. 7. Распределения и расчетные функции

На рис. 8 плотности распределения представлены в графической форме. Из данных, приведенных на этом рисунке, видно, что значения $\Phi\left(V, T_{\text{суд}}\right)$ находятся в диапазоне 289 655–646 800 т.

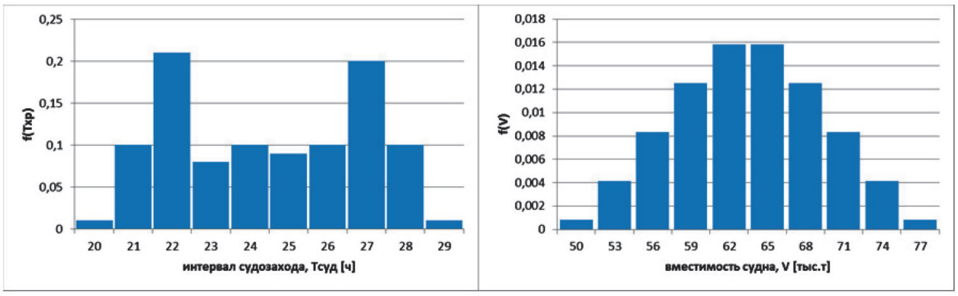

Рис. 8. Графики плотности распределения переменных

Разбив этот диапазон на десять интервалов («статистических карманов») длиной $\dfrac{646800-289655}{10}=35714$ каждый, можно по предлагаемой методике подсчитать суммарную вероятность попадающих в каждый из этих интервалов значений (рис. 9).

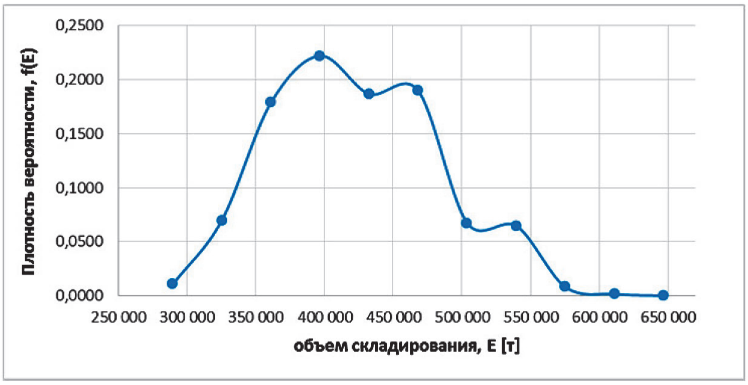

Рис. 9. Рассчитанная вероятность требуемого объема складирования

Необходимо отметить, что наблюдаемая на этом рисунке бимодальность плотности распределения является проявлением того же свойства плотности распределения величины интервала судозаходов.

Результаты (Results)

Для анализа влияния на конечные формы распределения исходных величин в исследовательской модели был реализован выбор некоторых типовых и добавление произвольных функций (рис. 10).

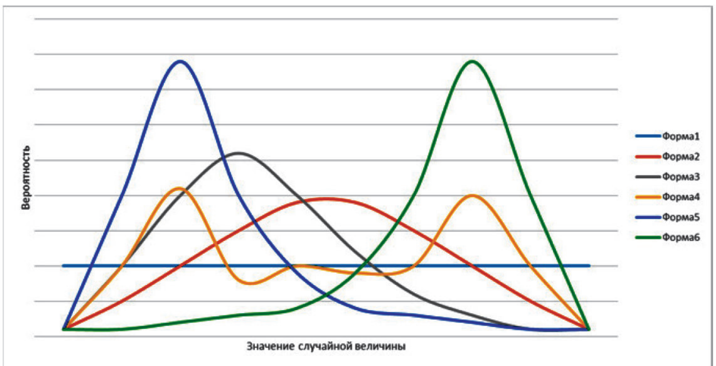

Рис. 10. Типовые формы распределения вероятности

Кроме того, для установления адекватности предлагаемого метода и созданной на его основе модели параллельно выполнялась генерация случайных значений по выбранным распределениям для вычислений по традиционному методу Монте-Карло. Примеры соответствующих расчетов для нескольких выборок, объемом 1000 испытаний каждая приведены на рис. 11.

а) б) в)

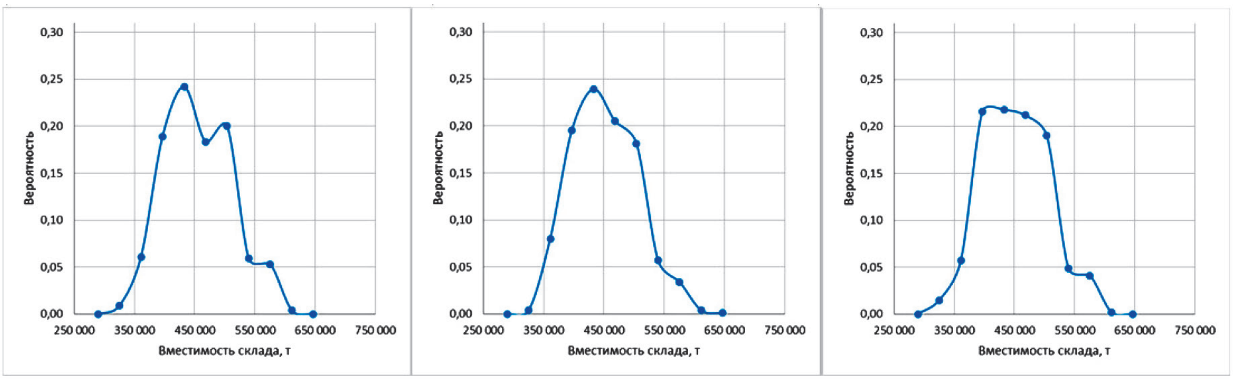

Рис. 11. Примеры результатов расчетов традиционным методом Монте-Карло:
а — эксперимент № 1; *б* — эксперимент № 2; *в* — эксперимент № 3

Как видно из приведенных на рисунке примеров, указанные объемы выборок сохраняют достаточно большую изменчивость получаемых результатов. Эта изменчивость сохраняется также при кратном увеличении числа испытаний. Лишь при объеме эксперимента около 10 000 испытаний полученная кривая начинает стабилизироваться и приближаться к кривой, полученной предлагаемым методом (рис. 12).

а) б)

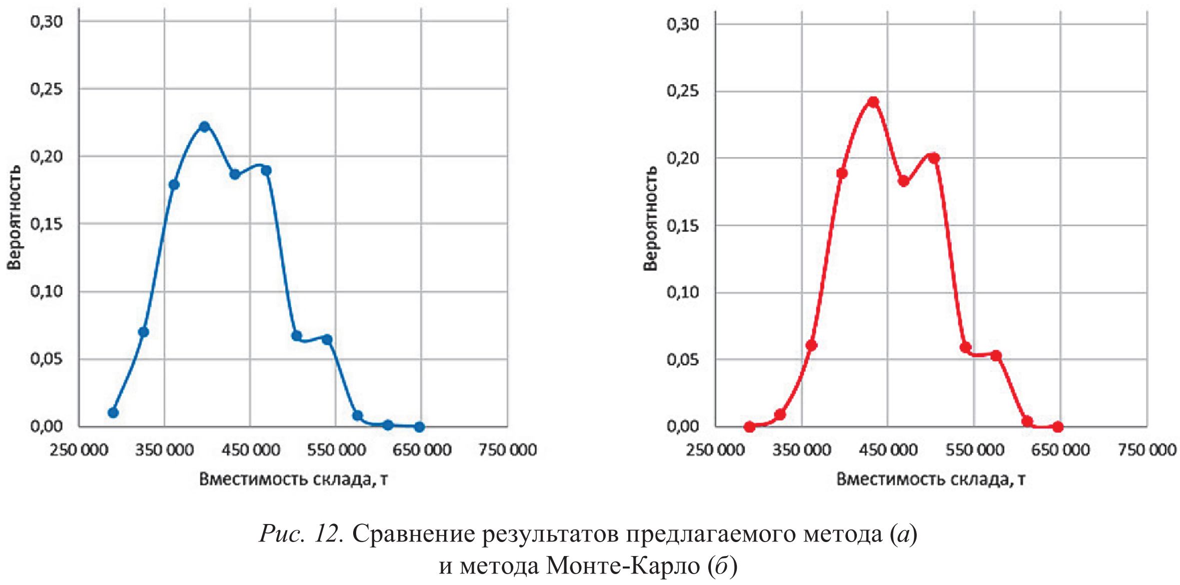

Рис. 12. Сравнение результатов предлагаемого метода (*а*)
и метода Монте-Карло (*б*)

Близость кривых на этом рисунке подтверждает вывод об адекватности предлагаемого метода. На рис. 13 показаны результаты расчета вероятности требуемого объема складирования для функции трех переменных: $E = \Phi\left(V, T_{\text{хр}}, T_{\text{суд}}\right)$, где $T_{\text{хр}}$ меняется в диапазоне 150–186 ч. Как видно, форма получаемой кривой в случае трех переменных в меньшей степени зависит от форм распределения входящих переменных, даже самых редких. Можно предположить, что этот факт является косвенным следствием *центральной предельной теоремы*.

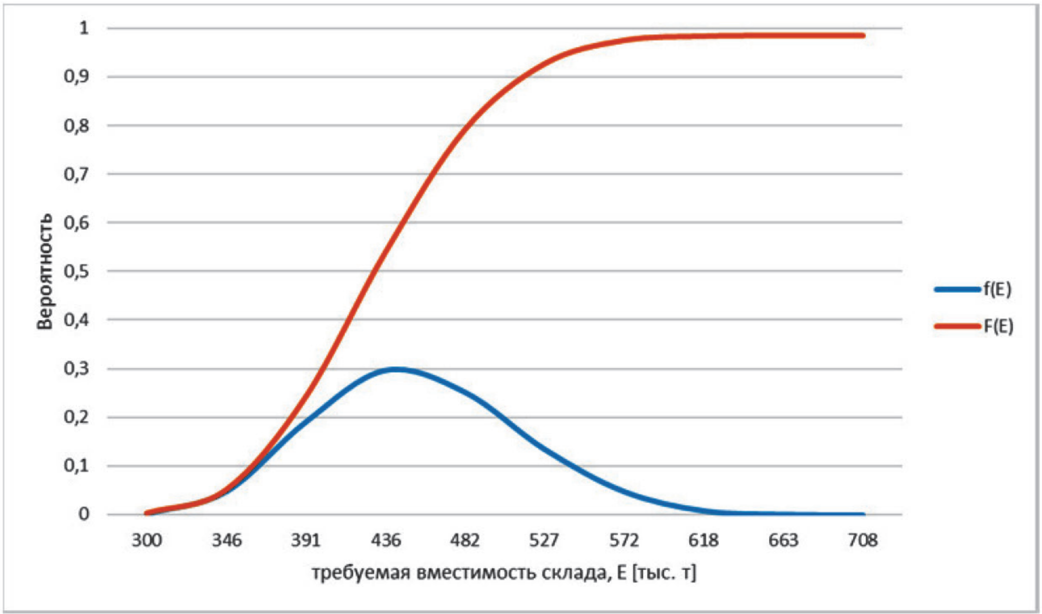

Рис. 13. Распределение вероятности объема складирования

Указанная инвариантность особенно характерна не для плотности вероятности, а для ее интегральной характеристики. В расчетных задачах, связанных с технологическим проектированием морских портов, именно эта зависимость является наиболее важной, поскольку по своей сути является вероятностью того, что оцениваемого ресурса будет достаточно при случайных флуктуациях параметров. Действительно, интегральная функция распределения случайной величины X по определению есть вероятность события $X < x$, где x — некоторая текущая переменная соответствующей размерности, т. е. $F(x) = P(X < x)$.

Выводы (Conclusions)

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложен аналитический метод вывода плотности вероятности для функциональных зависимостей, в качестве аргументов использующих случайные величины с произвольными законами распределения.

2. Несмотря на методическую сложность использования для непрерывных величин метод оказывается эффективным для дискретных величин, которые чаще всего встречаются в практике проектирования морских портов.

3. Вычислительная сложность предложенного метода является низкой при малом количестве случайных аргументов, при этом получаемые результаты являются точными и не связаны с какими-либо требованиями репрезентативности.

4. С ростом числа аргументов N вычислительная сложность метода растет, поскольку связана с ростом размерности зависимостью $O(X^N)$. В то же время даже при любых N окончание работы алгоритма дает точные результаты и по-прежнему не зависит от числа испытаний.

5. Адекватность метода доказана математическим построением и совпадением результатов его работы с поддающимися сравнению результатами стандартного метода статистических испытаний.

6. Метод может быть рекомендован для практического использования в качестве альтернативного классическому методу Монте-Карло при умеренном числе переменных в исследуемой функциональной зависимости.

7. При использовании предложенного метода не требуется проводить исследования достоверности (достаточной репрезентативности количества испытаний).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Купцов Н. В.* Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала / Н. В. Купцов, А. Л. Кузнецов, А. В. Шатилин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

2. *Купцов Н. В.* Исследование актуальных размерений балкеров для технологического проектирования морских портов / Н. В. Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

3. *Rusca F.* Simulation model for maritime container terminal / F. Rusca, M. Popa, E. Rosca, A. Rusca // Transport Problems. — 2018. — Vol. 13. — No. 4. — Pp. 47–54. DOI: 10.20858/tp.2018.13.4.5

4. *Legato P.* A simulation model for designing straddle carrier-based container terminals / P. Legato, R. M. Mazza // 2017 Winter Simulation Conference (WSC). — IEEE, 2017. — Pp. 3138–3149. DOI: 10.1109/WSC.2017.8248033

5. *Ansorena I. L.* A simulation model of container terminals. The Port of Valencia case study / I. L. Ansorena, V. N. Valdecantos // International Journal of Industrial and Systems Engineering. — 2021. — Vol. 37. — Is. 1. — Pp. 15–26. DOI: 10.1504/IJISE.2021.112473.

6. *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.

7. *Спасский Я. Б.* Актуальные задачи автоматизации проектирования распределенных человеко-машинных систем на примере портовых терминалов / Я. Б. Спасский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2012. — № 5 (157). — С. 85–88.

8. *Лапач С. Н.* Планирование в пассивном эксперименте / С. Н. Лапач // Математические машины и системы. — 2013. — № 4. — С. 156–160.

9. *Босов А. А.* Математическое моделирование планирования экспериментов / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. — 2008. — № 25. — С. 118–121.

10. *Карев М. Н.* Планирование эксперимента в задачах управления / М. Н. Карев, А. М. Данилов // Вестник магистратуры. — 2014. — № 7–1 (34). — С. 18–21.

11. *Ковель А. А.* Прогностический потенциал математического планирования эксперимента / А. А. Ковель // Космические аппараты и технологии. — 2019. — Т. 3. — № 2 (28). — С. 87–93. DOI: 10.26732/2618-7957-2019-2-87-93.

REFERENCES

1. Kuptsov, Nikolay V., Aleksandr L. Kuznetsov, and Andrey V. Shatilin. “Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

2. Kuptsov, Nikolay V. “Research of bulk carriers actual dimensions for the port planning purposes (technological solutions of marine terminals).” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

3. Rusca, Florin, M. Popa, E. Rosca, and A. Rusca. “Simulation model for maritime container terminal.” *Transport Problems* 13.4 (2018): 47–54.

4. Legato, Pasquale, and Rina Mary Mazza. “A simulation model for designing straddle carrier-based container terminals.” *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2017. 3138–3149. DOI: 10.1109/WSC.2017.8248033.

5. Ansorena, Iñigo L., and Vicente Negro Valdecantos. “A simulation model of container terminals. The Port of Valencia case study.” *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 37.1 (2021): 15–26. DOI: 10.1504/IJISE.2021.112473.

6. 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.

7. Spassky, Ya. B. “Essential problems of automation for technological designof complicated distributed man-machine systems — evidence from port terminals.” *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems* 5(157) (2012): 85–88.

8. Lapach, S. N. “Planirovanie v passivnom eksperimente.” *Matematicheskie mashiny i sistemy* 4 (2013): 156–160.

9. Bosov A. A., and V. V. Artemchuk. “Mathematical modeling of experiments planning.” *Visnik Dnipropetrovs’kogo natsional’nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana* 25 (2008): 118–121.

10. Karev, M. N., and A. M. Danilov. “Planirovanie eksperimenta v zadachakh upravleniya.” *Vestnik magistratury* 7–1(34) (2014): 18–21.

11. Kovel, A. A. “Prognostic potential of mathematical experiment planning.” *Spacecrafts & Technologies* 3.2(28) (2019): 87–93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
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*	**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*, *kuznetsoval@gumrf.ru*
Кириченко Александр Викторович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *kirichenkoav@gumrf.ru*	**Kirichenko, Aleksandr V.** — 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: *kirichenkoav@gumrf.ru*
Семенов Антон Денисович — аспирант *Научный руководитель*: Кузнецов Александр Львович ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *asemyonov054@gmail.com*, *kaf_pgt@gumrf.ru*	**Semenov, Anton D.** — Postgraduate *Supervisor*: Kuznetsov, Aleksandr L. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *asemyonov054@gmail.com*, *kaf_pgt@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2022 г.
Received: November 17 2022.