

УДК 629.541.4

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г.Х. Нгуен<sup>1</sup>

*Приведено решение задачи функционирования быстроходных пассажирских судов, работающих с прямыми сложными рейсами методом имитационного моделирования.*

*Ключевые слова:* задача функционирования, быстроходные пассажирские суда, прямые сложные рейсы, метод имитационного моделирования.

Одной из важнейших задач теории проектирования быстроходных пассажирских судов (БПС), работающих прямыми сложными рейсами, является оценка их эффективности и надежности. Эти показатели, в свою очередь, определяются путем решения задачи функционирования таких судов. Для того чтобы решить эту задачу необходимо проанализировать работу системы судов. Анализ работы такой системы представляет значительную сложность, так как ее функционирование описывается большим числом параметров, многие из которых носят случайный характер, причем параметры системы сложным образом связаны между собой. Поэтому наиболее подходящим для решения задачи функционирования системы БПС является метод имитационного моделирования [2]. Данное направление научных работ в настоящее время является актуальным и интенсивно развивается.

**Цель работы** – разработка имитационной модели и программы для анализа процесса функционирования системы БПС и определения основных характеристик: среднего времени полного рейса, среднерейсовой скорости, среднего количества перевезенных пассажиров за рейс, среднего числа выполненных рейсов в течение заданного периода времени, вероятности выполнения задач функционирования и вероятности обслуживания пассажиропотока судами.

Предполагается, что система  $n$  судов с одинаковыми характеристиками (главными размерениями, скоростью, пассажироместимостью и др.) совершает рейсы между  $M$  пунктами, нумерующимися в порядке от 1 до  $M$ . При этом возможны следующие схемы работы судов на линии в день:

---

<sup>1</sup> © Нгуен Г. Х., аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев.

✓  $n$  судов совершают последовательно рейсы с интервалом между отходами судов  $t_{int}$  ;

✓  $n_1$  судов совершают последовательно рейсы, начинающиеся от пункта 1 с интервалом между отходами  $t_{int1}$  . В это же время  $n_2$  судов ( $n_2 = n - n_1$ ) совершают последовательно рейсы, начинающиеся от пункта  $M$  с интервалом между отходами  $t_{int2}$ . Такие рейсы условно называются встречными.

Возможны следующие схемы работы судов на линии в течение недели:

- ✓ ежедневно;
- ✓ по определенным дням.

Такая система судов рассматривается как многоканальная система обслуживания без ограничений на время ожидания [1, 3]. Входящий поток требований – пассажиропоток с интенсивностью  $\lambda$  (чел/час) подчиняется закону распределения Пуассона. Число каналов обслуживания – число рейсов; моменты начала обслуживания – время прихода судов в пункт.

Для анализа процесса функционирования такой системы предполагается имитационная модель, общая схема которой представлена на рис. 1.

В течение заданного периода эксплуатации перед выходом судна в рейс проводится проверка на возможность выполнения рейса по гидрометеорологическим условиям. Если шторма нет, то рейс выполняется. Если шторм есть, то судно ждет улучшения погоды. Гидрометеорологические условия задаются режимными распределениями скоростей ветра, высот волн 3 % обеспеченности и продолжительностью штормов по каждому месяцу для района эксплуатации. Например, при эксплуатации в районе 2 Черного моря скорости ветра подчиняются закону распределения Вейбулла с параметрами, представленными в табл. 1 [4].

**Таблица 1**

**Параметры закона распределения средних скоростей ветра**

Месяц	Параметр формы кривой распределения, $\alpha$	Параметр масштаба, $\beta$
Январь	10,130	2,025
Февраль	9,293	1,881
Март	8,521	1,857
Апрель	6,878	1,623
Май	6,114	1,514
Июнь	6,141	1,526
Июль	6,347	1,590
Август	6,451	1,663
Сентябрь	7,287	1,688
Октябрь	8,732	1,844
Ноябрь	9,493	1,874
Декабрь	10,261	1,943

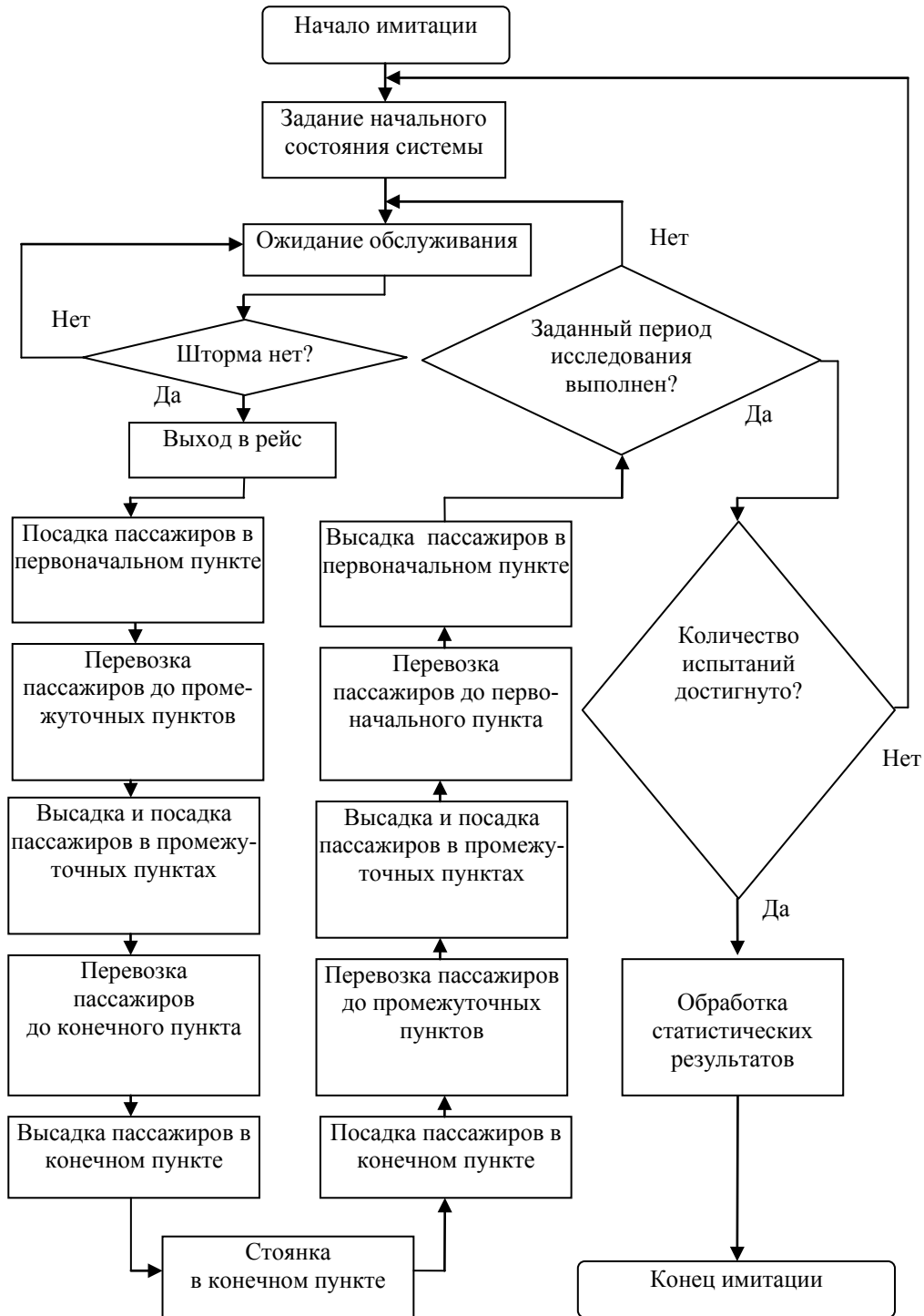


Рис. 1. Схема имитационной модели функционирования системы БПС

Высоты волн 3 % обеспеченности подчиняются логарифмически-нормальному закону распределения с параметрами, указанными в табл.2.

**Таблица 2**  
**Параметры закона распределения высот волн 3 % обеспеченности**

Месяц	Математическое ожидание, М	Среднеквадратическое отклонение, δ
Январь	1,301	0,912
Февраль	1,269	0,925
Март	1,191	0,862
Апрель	1,023	0,691
Май	0,973	0,669
Июнь	0,917	0,595
Июль	0,951	0,619
Август	0,967	0,628
Сентябрь	1,015	0,671
Октябрь	1,231	0,898
Ноябрь	1,313	0,951
Декабрь	1,496	1,213

Продолжительность шторма подчиняется нормальному закону распределения с параметрами, определяющимися в зависимости от скорости ветра  $x$  по формулам, представленным в табл. 3.

Количество перевезенных пассажиров за  $j$ -й рейс в день определяется по выражению:

$$N_j^{pas} = \sum_{i=1}^{M-1} N_{i,j}^{pas} + \sum_{i'=2}^M N_{i',j}^{pas'}$$

где  $N_{i,j}^{pas}$ ,  $N_{i',j}^{pas'}$  – соответственно количеству вошедших пассажиров в  $i$ -ом пункте в прямом направлении и  $i'$ -ом пункте в обратном направлении.

Значение  $N_{i,j}^{pas}$  для  $j$ -го рейса определяется по выражению:

$$N_{i,j}^{pas} = \min(N_{i-1,j}^{free} + N_{i,j}^{out}; N_{i,j-1}^{wait} + N_{i,j}),$$

где  $N_{i-1,j}^{free}$  – число свободных мест на судне в моменте выхода судна от  $(i-1)$ -го пункта;  $N_{i,j}^{out}$  – количество вышедших пассажиров в  $i$ -ом пункте под-

чиняється закону розподілення Пуассона;  $N_{i,j-1}^{wait}$  – кількість пасажирів в череді, очікують наступний рейс ( $j$  -ий рейс) в моменті вихода судна ( $j - 1$ )-го рейса від  $i$ -го пункту;  $N_{i,j}$  – кількість поступаючих пасажирів в  $i$ -ий пункт від моменту вихода судна ( $j - 1$ )-го рейса від  $i$ -го пункту до моменту приходу судна  $j$ -го рейса до цього пункту або кількість поступаючих пасажирів в  $i$ -ий пункт в час очікування  $t_{i,j}^{wait}$ . Значення  $N_{i,j}$  визначається в залежності від часу очікування і інтенсивності пасажиропотоку  $\lambda$  по формулі:

$$N_{i,j} = t_{i,j}^{wait} \cdot \lambda.$$

Таблиця 3

**Формули, визначають параметри  
закону розподілення продовжителі штурма**

Місяць	Математичне очікування, М	Середньоквадратичне відхилення, $\delta$
Январь	$M = 21,880x^{-1,45}$	$\delta = 38,25x^{-1,88}$
Февраль	$M = 15,450x^{-1,33}$	$\delta = 31,54x^{-1,84}$
Март	$M = 12,540x^{-1,25}$	$\delta = 17,77x^{-1,54}$
Апрель	$M = 4,826x^{-0,85}$	$\delta = 7,307x^{-1,28}$
Май	$M = 3,127x^{-0,82}$	$\delta = 5,537x^{-1,27}$
Июнь	$M = 4,599x^{-0,93}$	$\delta = 7,307x^{-1,28}$
Июль	$M = 5,581x^{-1,06}$	$\delta = 8,534x^{-1,42}$
Август	$M = 7,236x^{-1,24}$	$\delta = 6,968x^{-1,35}$
Сентябрь	$M = 4,860x^{-1,03}$	$\delta = 6,968x^{-1,35}$
Октябрь	$M = 8,000x^{-1,04}$	$\delta = 15,65x^{-1,50}$
Ноябрь	$M = 11,810x^{-1,06}$	$\delta = 20,61x^{-1,47}$
Декабрь	$M = 18,050x^{-1,26}$	$\delta = 44,01x^{-1,84}$

Знаючи  $N_{i,j}^{pas}$ , не складно визначити кількість пасажирів в череді, очікують наступний рейс ( $(j+1)$  -ий рейс) в моменті вихода судна від

$i$  -го пункта  $N_{i,j}^{wait}$  и число свободных мест на судне в моменте выхода судна от этого пункта  $N_{i,j}^{free}$  по формулам:

$$N_{i,j}^{free} = \max(N_{i-1,j}^{free} + N_{i,j}^{out} - N_{i,j-1}^{wait} - N_{i,j}; 0);$$

$$N_{i,j}^{wait} = \max(N_{i,j-1}^{wait} + N_{i,j} - N_{i-1,j}^{free} - N_{i,j}^{out}; 0).$$

Если  $i=1$ , то

$$N_{1,j}^{pas} = \min(N^{capa}; N_{1,j-1}^{wait} + N_{1,j});$$

$$N_{1,j}^{free} = \max(N^{capa} - N_{1,j-1}^{wait} - N_{1,j}; 0);$$

$$N_{1,j}^{wait} = \max(N_{i-1,j}^{free} + N_{i,j}^{out} - N^{capa}; 0),$$

где  $N^{capa}$  – пассажировместимость судна.

Количество вошедших пассажиров в  $i$ -ом пункте в обратном направлении  $N_{i,j}^{pas'}$  определяется аналогично.

Продолжительность рейса судов  $t_{trip}$  рассчитывается по выражению:

$$t_{trip} = t_{run} + t_{stop} + t_{mane},$$

где  $t_{run}$  – ходовое время, час;  $t_{stop}$  – стояночное время, час;  $t_{mane}$  – время маневра, час.

Ходовое время судна за рейс определяется по формуле:

$$t_{run} = \frac{2}{v} \sum_{i=1}^{M-1} S_i,$$

где  $S_i$  – расстояние между пунктами  $i$  и  $(i+1)$ , миль;  $\bar{v}$  – средняя скорость хода судна с учетом ее падения на волнении для данного рейса, уз. (определяется в зависимости от скорости судна на тихой воде, высоты волны 3 % обеспеченности и главных размерений судна).

Стояночное время судна рассчитывается путем суммирования времени посадки, высадки пассажиров и стояночного времени в конечном пункте за рейс

$$t_{stop} = \sum_{i=1}^M \frac{Q_i}{A_{fit}} + t_{term},$$

где  $Q_i$  – количество вошедших и вышедших пассажиров в  $i$ -ом пункте, пасс.;  $A_{fit}$  – норма посадки и высадки пассажиров, чел/час;  $t_{term}$  – стояноч-

ное время в конечном пункте подчиняется равномерному закону распределения.

Распределение времени маневра  $t_{mane}$  соответствует нормальному закону распределения.

Поэтому продолжительность рейса судов  $t_{trip}$  определяется по выражению:

$$t_{trip} = \frac{2}{v} \sum_{i=1}^{M-1} S_i + \sum_{i=1}^M \frac{Q_i}{A_{fit}} + t_{term} + t_{mane}$$

Число выполненных рейсов в течение заданного периода исследования:

$$N_{tripPeriod} = N_{tripDay} N_{DayRun},$$

где  $N_{tripDay}$  – количество выполненных рейсов в день;  $N_{DayRun}$  – количество дней в которых судна выполняли рейсы зависит от погодных условий и режима работы судов в недели.

Значение  $N_{tripDay}$  зависит от режима работы судов в день.

Если  $n$  судов совершают последовательные рейсы с интервалом  $t_{int}$  между отходами судов от момента  $t_{start}$  к моменту  $t_{finish}$ , то моменты отхода судов от первоначального пункта являются:

$$t_{start}, t_{start} + t_{int}, t_{start} + 2 t_{int}, \dots, t_{start} + (N_{tripDay} - 1) t_{int}.$$

Тогда выполняется следующее условие:

$$t_{start} + (N_{tripDay} - 1) t_{int} + t_{trip} \leq t_{finish}$$

Величина  $N_{tripDay}$  является целым числом, поэтому ее значение определяется по формуле

$$N_{tripDay} = \text{Trunc}[(t_{finish} - t_{start} - t_{trip})/t_{int}] + 1,$$

здесь функция  $\text{Trunc}[x]$  определяет целую часть числа  $x$ .

Если  $n$  судов совершают встречные рейсы, то

$$N_{tripDay} = N_{tripDay1} + N_{tripDay2},$$

где  $N_{tripDay1}$  – число выполненных рейсов  $n_1$  судами, начинающихся от пункта 1;  $N_{tripDay2}$  – число выполненных рейсов  $n_2$  судами, начинающихся от пункта  $M$ . Значения этих величин определяются по выражениям:

$$N_{tripDay1} = \text{Trunc}[(t_{finish} - t_{start} - t_{trip})/t_{int1}] + 1;$$

$$N_{tripDay2} = \text{Trunc}[(t_{finish} - t_{start} - t_{trip}) / t_{int2}] + 1.$$

Определение среднего времени полного рейса  $t_{trip}$ , среднего количества перевезенных пассажиров за рейс  $\bar{N}_{pas}$ , среднего числа выполненных рейсов в течение заданного периода исследования  $\bar{N}_{trip}$  осуществляется методом Монте-Карло [5] следующим образом: период исследования повторяется  $N_{period}$  раз, тогда  $\bar{t}_{trip}$ ,  $\bar{N}_{pas}$  и  $\bar{N}_{trip}$  рассчитываются по формулам:

$$\bar{t}_{trip} = \frac{1}{N_3 N_2} \sum_{N_3} \sum_{N_2} \sum_{N_1} t_{trip}, \quad \bar{N}_{pas} = \frac{1}{N_3 N_2 N_1} \sum_{N_3} \sum_{N_2} \sum_{N_1} N_{pas},$$

$$\bar{N}_{trip} = \frac{1}{N_3} \sum_{N_3} N_{tripPeriod},$$

где  $N_1 = N_{tripDay}$ ;  $N_2 = N_{DayRun}$ ;  $N_3 = N_{period}$ ;  $N_{pas}$  – количество перевезенных пассажиров за рейс.

Вероятность выполнения задач функционирования судов определяется по формуле:

$$p_1 = \frac{N_{DayRun}}{N_{DayPeriod}},$$

где  $N_{DayPeriod}$  – количество рабочих дней по расписанию за этот периода.

Вероятность обслуживания пассажиропотока судами:

$$p_2 = \frac{N_{PasService}}{N_{PasTraffic}},$$

где  $N_{PasService}$  – количество перевезенных пассажиров в течение заданного периода исследования;  $N_{PasTraffic}$  – количество пассажиров, ожидающих на обслуживание.

Рассмотрим пример определения этих значений модулем “ModelFunctioningHSPV”, созданным автором в среде программирования Delphi 7.0. В примере два пассажирски судна ежедневно совершают последовательные рейсы на линии: Ялта - Гурзуф - Алушта - Рыбачье – Судак в районе 2 Черного моря в период с 23-го июня по 31-ое августа 2012 г. Исходные данные задачи представлены на рис. 2 и рис. 3.



The screenshot shows the 'Начальные исходные данные' (Initial data) tab of the HSPV software. It contains several input fields and checkboxes:

- Период исследования (Research period):**
  - С (Start): 23.06.2012
  - ПО (End): 31.08.2012
- Время работы судов в день (Ship working hours per day):**
  - С (Start): 9:30:00
  - ПО (End): 19:00:00
- Характеристики судна (Ship characteristics):**
  - Количество судов (Number of ships): 2
  - Длина судна по КВЛ, м (Ship length): 23,1
  - Ширина судна по КВЛ, м (Ship width): 5,6
  - Осадка судна, м (Ship draft): 0,95
  - Высота борта судна, м (Ship deck height): 2,40
  - Скор. судна на тихой воде, уз (Ship speed): 27,0
  - Мощность ГД, кВт (Engine power): 1700
  - Водоизмещение, т (Displacement): 53
  - Пассажировместимость, чел (Passenger capacity): 120
- Режим работы судов в неделю (Ship working mode per week):**
  - Ежедневно (Daily)
  - По определенным дням (By specific days)
- Режим работы судов в день (Ship working mode per day):**
  - Последовательными рейсами (Sequential routes)
  - Встречными рейсами (Meeting routes)
- Интер. отходов, час (Interval of departures, hours):** 3
- Число судов в пункте 1 (Number of ships in point 1):** [dropdown]
- Число судов в пункте М (Number of ships in point M):** [dropdown]
- Интер. отходов в пунк. 1, час (Interval of departures in point 1, hours):** [input]
- Интер. отходов в пунк. М, час (Interval of departures in point M, hours):** [input]
- Число периодов исслед. (Number of research periods):** 1000

Buttons at the bottom: Умолчание (Default), Сброс (Reset), Расчет (Calculate), ОК (OK), Отмена (Cancel).

Рис. 2. Начальные условия задачи

The screenshot shows the 'Характеристики пунктов' (Point characteristics) tab of the HSPV software. It contains several input fields and checkboxes:

- Количество пунктов (Number of points):** 5
- Название пунктов (Point names):**
  - Пункт 1: Ялта
  - Пункт 2: Гурзуф
  - Пункт 3: Алешта
  - Пункт 4: Рыбачье
  - Пункт 5: Судак
  - Пункт 6: [input]
  - Пункт 7: [input]
  - Пункт 8: [input]
  - Пункт 9: [input]
  - Пункт 10: [input]
  - Пункт 11: [input]
  - Пункт 12: [input]
  - Пункт 13: [input]
  - Пункт 14: [input]
  - Пункт 15: [input]
- Расстояние между пунктами (Distance between points):**
  - $S_i$  - Расстояние между пунктами №  $i$  и  $(i+1)$ , миль
  - S1: 6,9; S2: 11,4; S3: 10,0; S4: 17,4; S5: [input]; S6: [input]; S7: [input]; S8: [input]; S9: [input]; S10: [input]; S11: [input]; S12: [input]; S13: [input]; S14: [input]; S15: [input]
- Распределение пассажиропотока, чел/час (Passenger flow distribution, persons/hour):** [input] >>
- Распределение количества вышедших пассажиров, чел (Number of passengers leaving distribution, persons):** [input] >>
- Норма посадки и высадки пассажиров, чел/час (Passenger boarding and disembarking norm, persons/hour):** 600
- Распределение времени маневра, час (Maneuver time distribution, hours):** [input] >>
- Распределение стояночного времени в конеч. пункте, час (Waiting time distribution in final point, hours):** [input] >>

Buttons at the bottom: Умолчание (Default), Сброс (Reset), Расчет (Calculate), ОК (OK), Отмена (Cancel).

Рис. 3. Исходные данные о маршруте и пассажиропотоке

В результате имитационного моделирования системы судов были получены следующие результаты: среднее время полного рейса – 5,96 час.; среднерейсовая скорость – 23,626 уз.; коэффициент, учитывающий потери скорости судна на волнение – 0,875; среднее количество перевезенных пассажиров за рейс – 388 чел.; провозоспособность судов – 51216 чел.; среднее число выполненных рейсов в течение заданного периода исследования – 132 рейсов; среднее число выполненных рейсов в день – 2 рейса/день; вероятность выполнения задачи функционирования – 0,962; вероятность обслуживания пассажиропотока судами – 0,633; вероятность отказа обслуживания пассажиропотока – 0,367;

### **Выводы**

1. Разработаны имитационная модель и программа для анализа процесса функционирования системы БПС и определения среднего времени полного рейса, среднерейсовой скорости, среднего количества перевезенных пассажиров за рейс, среднего числа выполненных рейсов в течение заданного периода времени, вероятности выполнения задач функционирования, вероятности обслуживания пассажиропотока судами.
2. Результаты данной статьи могут быть использованы в судоходной компании при оценке экономической эффективности системы БПС, определении пассажироместимости, скорости хода, количества судов для определенной линии, определении их режимы работы, а также при решении задачи выбора оптимальных элементов БПС.

### *СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – Москва, 1968. – 355 с.
2. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. – СПб.: Питер, 2004. – 847 с.
3. Клейрок. Л. Вычислительные системы с очередями.– М.: Мир, 1979. – 600 с.
4. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. – СПб., 2006. – 357 с.
5. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – Москва, 1973. – 313 с.

Рукопись поступила в редакцию 10.05.2013 г.