



УДК 656.021.2

DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ ПРИЧАЛОВ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Р. Язвенко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В данной статье представлено исследование загруженности причалов морского пассажирского порта Санкт-Петербурга. На основании данных расписания заходов был проведён анализ судов, заходивших в порт в 2019 году, а также загруженности отдельных причалов. По данным 2019 года был проведён анализ порта как системы массового обслуживания по закону Эрланга.

Ключевые слова: морской пассажирский терминал, загруженность причалов, моделирование, система массового обслуживания, закон Эрланга.

Для цитирования:

Язвенко М. Р. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №2(28), ISSN 2077-5687. – СПб.: ГУАП., 2021 – с. 104-113. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.

RESEARCH OF BERTHS UTILIZATION AT SEA PASSENGER PORT ON THE BASIS OF MODELING

M. R. Yazvenko

State University of Aerospace Instrumentation

This article presents an analysis of the berths utilization at the sea passenger port of St. Petersburg. Based on the data from the schedule, an analysis was carried out of the vessels that entered the port in 2019, as well as the load of individual berths. Based on 2019 data, the passenger port was analyzed as a queuing system using Erlang's law.

Key words: sea passenger terminal, ferry transportation, berths load, modeling, queuing system, Erlang's law.

For citation:

Yazvenko M. R. Research of berths utilization at sea passenger port on the basis of modeling // System analysis and logistics.: №2(28), ISSN 2077-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2021 – p. 104-113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.

Введение

Сфера круизных паромных перевозок в последние годы стремительно развивается, и круизы становятся одной из популярнейших форм туризма во всём мире. Санкт-Петербург признан одним из красивейших городов Европы, из-за чего потоки туристов продолжают увеличиваться с каждым сезоном. Поскольку объёмы перевозок будут только расти, исследование потока судов и загруженности порта является актуальным.

Анализ потока судов с 2015 по 2019 год

Пассажирский Порт Санкт-Петербург – первый и единственный в Северо-Западном регионе России специализированный пассажирский порт, расположенный в Санкт-Петербурге на намывных территориях Васильевского острова. Комплекс Порта включает семь причалов для приема океанских лайнеров, три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал [1].

Порт принимает суда на основании расписания, которое составляется на год. Порт может принять суда, прибывающие вне расписания, если это не противоречит расписанию [2].

На официальном сайте порта имеется отдельная страница, на которой представлены расписания судозаходов с 2009 по 2019 год [3]. На данный момент, последние суда прибывали по расписанию в 2019 году, поскольку в 2020 году из-за глобальной пандемии коронавируса порт не принял ни единого судна. В период с 2015 по 2019 год порт посетило 107 различных паромов и



лайнеров, а число заходов судов достигло 1223. В таблицу 1 занесена статистика судозаходов по каждому месяцу, в который осуществлялась навигация в 2015-2019 годах.

Таблица 1 – Статистика судозаходов с 2015 по 2019 год

	2015	2016	2017	2018	2019
Апрель	0	0	0	1	1
Май	35	36	42	47	47
Июнь	54	44	57	63	54
Июль	60	61	68	54	68
Август	54	45	56	65	58
Сентябрь	22	20	21	34	31
Октябрь	4	3	5	7	7
Ноябрь	0	0	0	0	0
Декабрь	1	0	0	0	0
Всего	230	209	249	270	265

Из таблицы сразу виден сезонный характер потока судов с резким увеличением к лету. Каждый год навигация проводится с конца апреля до второй половины октября. Из таблицы можно заметить, что сезонный пик в каждом году приходится на июль, за исключением 2018 года. В 2018 наблюдался спад относительно июня и августа за счёт повышенного количества судов в эти месяцы.

В состав морского терминала входят 7 причалов, предназначенных для швартовки и стоянки круизных и паромных судов. Порт может принимать пассажирские круизные и паромные суда длиной до 340 метров, шириной до 42 метров и осадкой до 8,8 метров. Характеристики причалов указаны в таблице 2, а схема расположения – на рисунке 1 [2].

Таблица 2 – Характеристики причального фронта порта.

№ причала	Длина причального фронта, м.	Ширина причала, м.	Высота причала над уровнем воды, м.	Проектная глубина у причала, м.	Принимаемые суда	Период эксплуатации причала
1	375	15	3,2	10,7	Круизные	Летняя навигация
2	218	15	3,2	10,7	Круизные и паромные	Круглогодично
3	269	15	3,2	10,7	Круизные и паромные	Круглогодично
4	271	15	3,2	10,7	Круизные	Летняя навигация
5	270	15	3,2	10,7	Круизные	Летняя навигация
6	288	15	3,2	10,7	Круизные	Летняя навигация
7	375	15	3,2	10,7	Круизные	Летняя навигация

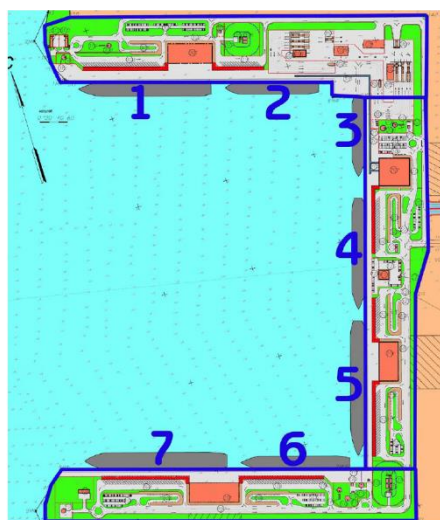


Рис. 1. Схема расположения причалов

Исследование работы порта за 2019 год

В пассажирский порт за 2019 год заходили суда различных типов и размеров: от самых маленьких, длиной до 170 метров, до огромных 330-метровых лайнеров. Несколько посещавших порт лайнеров входят в рейтинг 50 самых больших лайнеров по длине. Это MSC Preziosa, MSC Fantasia, Britannia, Royal Princess, Regal Princess, Norwegian Getaway, Norwegian Breakaway, Celebrity Reflection, Celebrity Eclipse [4]. Помимо этих судов в предыдущие года порт посещали паромы-парусники Wind Surf и Sea Cloud 2, но не в 2019-м. На основе анализа размеров всех судов, заходивших в акваторию порта, можно составить диаграмму распределения их размеров. Сортировка будет производиться в соответствии с нормативными длинами причалов из таблицы 2.

Распределение заходов по размерам

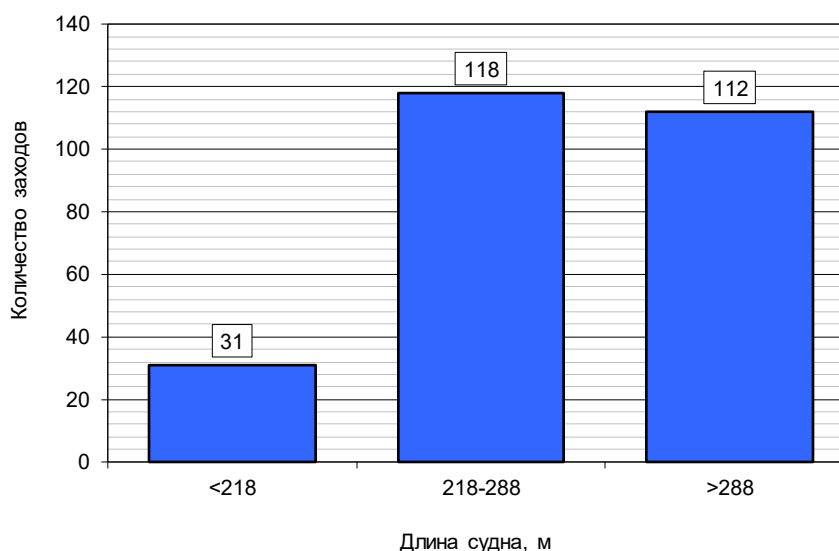


Рис. 2. Распределение судозаходов по размерам судов

Из диаграммы видно, что большинство судов имело длину свыше 218 метров, почти половина из которых – свыше 288 метров. Вследствие этого должна проявляться повышенная нагрузка на 1 и 7 причалы. К тому же, эти причалы расположены ближе всего к морю, что упрощает маневровые



работы. Это подтверждается диаграммой распределения судов по причалам, представленной на рисунке 3. В действительности, крупные суда при занятости 1 и 7 причалов швартуются на 3 и 5, при этом порт жертвует вместительностью 4-го. В такой конфигурации можно разместить в порту наибольшее число крупных лайнеров. Причал под номером 4 крайне редко принимает суда, всего 3 за весь 2019 год.

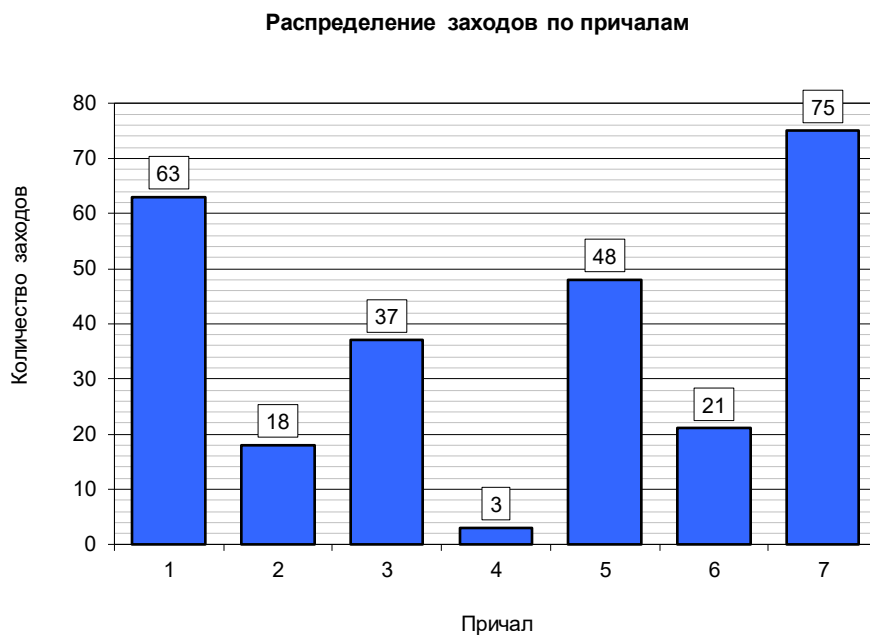


Рис. 3. Распределение судозаходов по причалам

Помимо анализа потока судов важен анализ времени, которое суда проводят на причалах. Поскольку все судовладельцы заранее договариваются с портом о продолжительности своего визита, время не ограничивается длительностью посадки-высадки пассажиров и коммерческими операциями по обслуживанию судна. Поскольку сфера круизных перевозок – это сфера туризма и развлечений, некоторые перевозчики предлагают экскурсии своим пассажирам по городам остановки [5]. Поэтому многие паромы задерживаются на большее время, чем длительность обслуживания. Распределение времени стоянки судов в 2019 году можно свести в диаграмму, представленную на рисунке 4.



Распределение времени стоянки

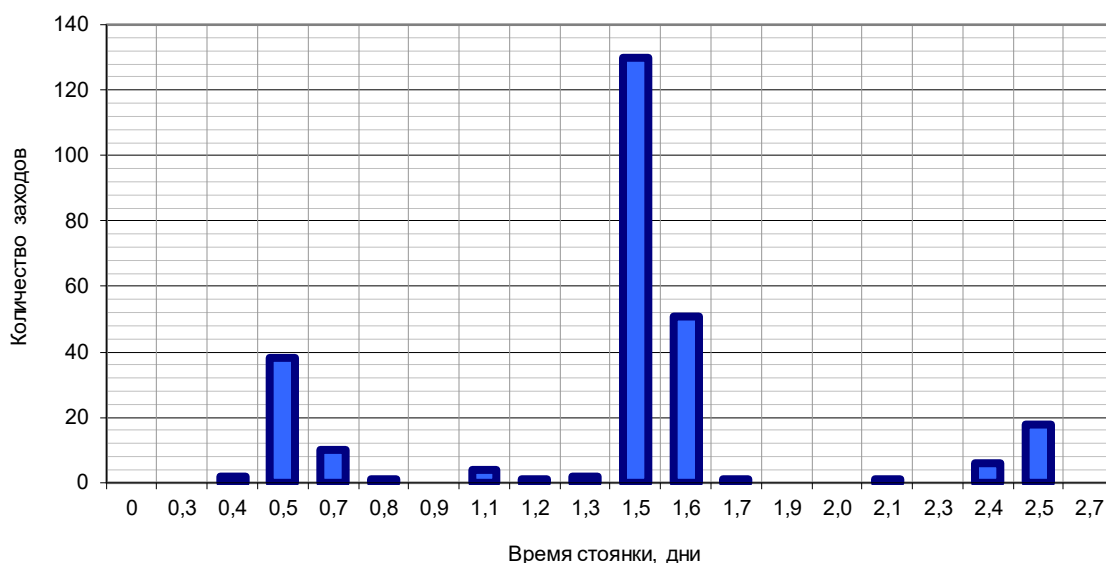


Рис. 4. Распределение времени стоянки судов

Из диаграммы распределения можно отметить, что, как правило, суда проводят в порту или полдня, или полтора дня, или два с половиной. Подавляющее большинство судов обслуживается полтора дня. Расчёт по этим данным даёт среднее время стоянки в 1,36 дня.

На основе данных таблицы 1 и расписания прибытий [3] можно провести моделирование пассажирского порта как системы массового обслуживания и исследовать загруженность по закону Эрланга.

Моделирование работы порта как системы массового обслуживания.

Системы массового обслуживания (СМО) – это такие системы, в которые в случайные моменты времени поступают заявки на обслуживание, при этом поступившие заявки обслуживаются с помощью имеющихся в распоряжении системы каналов обслуживания [6].

Заявкой является определённый запрос, который необходимо обслужить силами и средствами системы. Последовательность поступающих заявок формирует входящий поток. Набор ресурсов, способный обслужить одну заявку, называется каналом системы. Считается, что время обслуживания в сложных системах носит случайный характер, поскольку каналы обслуживают разные заявки за разное время. Оно зависит от свойств и запросов самой заявки, и свойств канала [6].

Считается, что поток судов является простейшим и подчиняется Пуассоновскому распределению [7, 8]. Пуассоновский поток заявок обладает следующими признаками:

1. Стационарность – вероятность появления какого-либо числа заявок на определённом отрезке времени, зависит только от длины этого самого отрезка.
2. Ординарность – в любой момент времени в систему поступает только одна заявка, поскольку вероятность появления более одного события пренебрежимо мала.
3. Отсутствие последействия – все заявки приходят в систему независимо друг от друга.

Пусть λ – среднее число заявок простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени. Тогда вероятность появления k заявок простейшего потока за время t определяется по формуле Пуассона:



$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}.$$

Общая схема многоканальных СМО представлена на рисунке.

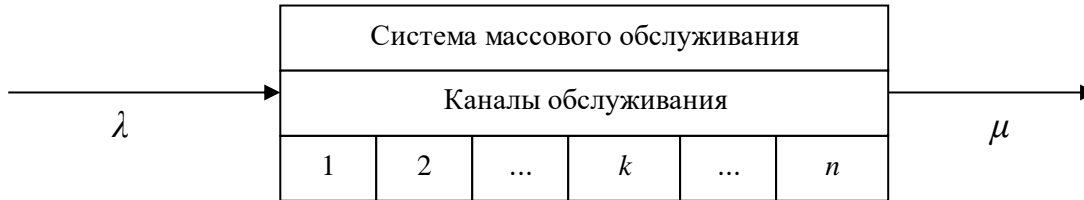


Рис. 5. Общая схема многоканальных СМО

На рисунке: λ – количество заявок, поступающих за единицу времени (плотность входного потока)

$$\lambda = \frac{N}{T}$$

где N – количество заявок, поступившее за время T .

В состоянии системы S_0 все каналы обслуживания свободны. В состояниях S_k (где k от 1 до n) обслуживанием заявок заняты k каналов, но не все n каналов. Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно под воздействием входящего потока заявок, интенсивность которого λ . Отказ в обслуживании будет наступать в случае занятости всех каналов. Состояние системы обслуживания при неравномерном потоке будет описываться формулой Эрланга следующего вида [7]:

$$P_k = \frac{\frac{1}{K!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^K}{1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1}{2!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n} \quad (1)$$

В формуле: P_k – это вероятности занятости k каналов обслуживания. Вероятность, что все каналы будут свободны – P_0 . Вероятность, что все каналы заняты – P_n .

Отказ наступает, когда заняты все n мест в системе, т.е. система находится в состоянии S_n :

$$P_{отк} = P_n.$$

Среднее количество занятых каналов определяется по формуле:

$$\bar{n} = \sum p_k K. \quad (2)$$

Коэффициент загрузки каналов:



$$K = \frac{\bar{n}}{n}. \quad (3)$$

Результаты моделирования

Пассажирский порт Санкт-Петербурга можно рассматривать как 7-канальную СМО. Моделирование и анализ будут проводиться индивидуально для каждого месяца навигации, поскольку интенсивность потока судов меняется каждый месяц. Анализ проводится по данным за 2019 год.

Пример расчёта по данным за июль:

Плотность входного потока: $\lambda = 68$ судов в месяц = 2,91 судов в сутки.

Среднее время стоянки судов в июле составило 1,45 суток.

Плотность выходного потока: $\mu = \frac{1}{1,45} = 0,69$.

Вероятности состояний системы считаются по формуле (1) и сводятся в таблицу:

Количество причалов	0	1	2	3	4	5	6	7
Вероятности	0.04	0.14	0.21	0.23	0.18	0.11	0.06	0.027

Определение среднего количества занятых причалов по формуле (2):

$$\bar{n} = 0.04 \cdot 0 + 0.14 \cdot 1 + 0.21 \cdot 2 + 0.23 \cdot 3 + 0.18 \cdot 4 + 0.11 \cdot 5 + 0.06 \cdot 6 + 0.03 \cdot 7 = 3.09$$

Коэффициент загрузки причалов по формуле (3):

$$K = \frac{3.09}{7} \cdot 100\% = 44\%.$$

Аналогичным образом проводятся расчёты для остальных месяцев. Результаты проведённых расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Вероятности занятости причалов по данным 2019 года

Месяц	Вероятности занятости определённого числа причалов								Коэффициент загрузки	
	Количество причалов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	\bar{n}	K
Апрель	0.60	0.31	0.08	0.01	0.002	0.0002	0.00002	0.000001	0.51	0.073
Май	0.13	0.26	0.27	0.19	0.10	0.04	0.01	0.0004	2.05	0.29
Июнь	0.09	0.22	0.26	0.21	0.13	0.06	0.02	0.01	2.38	0.34
Июль	0.04	0.14	0.21	0.23	0.18	0.11	0.06	0.027	3.09	0.44
Август	0.09	0.22	0.26	0.21	0.13	0.06	0.02	0.01	2.39	0.34
Сентябрь	0.26	0.35	0.24	0.11	0.04	0.01	0.002	0.0004	1.35	0.19
Октябрь	0.67	0.27	0.05	0.01	0.0007	0.0001	0.000004	0.0000000	0.4	0.06

Распределение вероятностей состояний порта сводится в диаграмму, представленную на рисунке 6.



Вероятности занятости причалов по месяцам

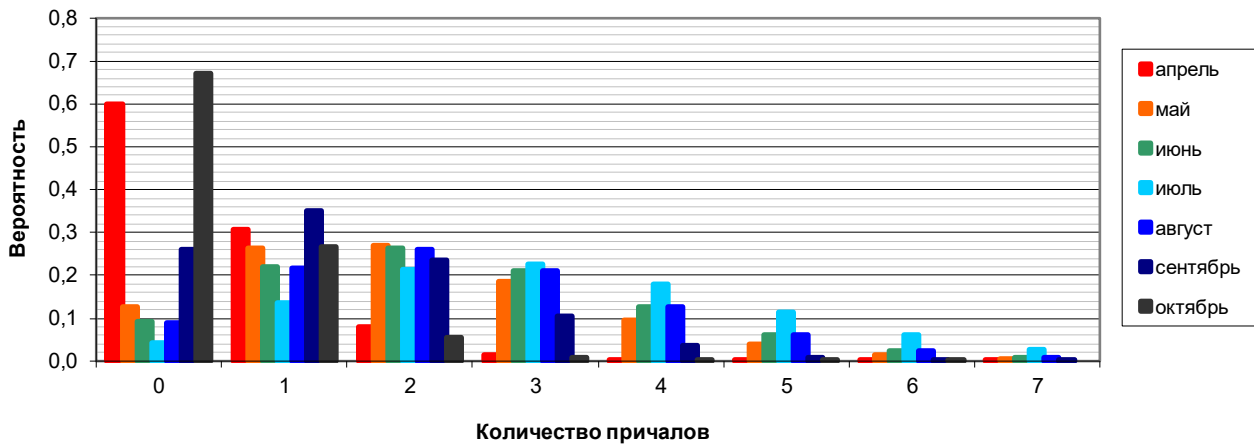


Рис. 6. Вероятности занятости причалов по месяцам

Вероятность отказа в обслуживании – это вероятность занятости всех 7-ми причалов. Их значения в процентах по месяцам указаны на рисунке 7.

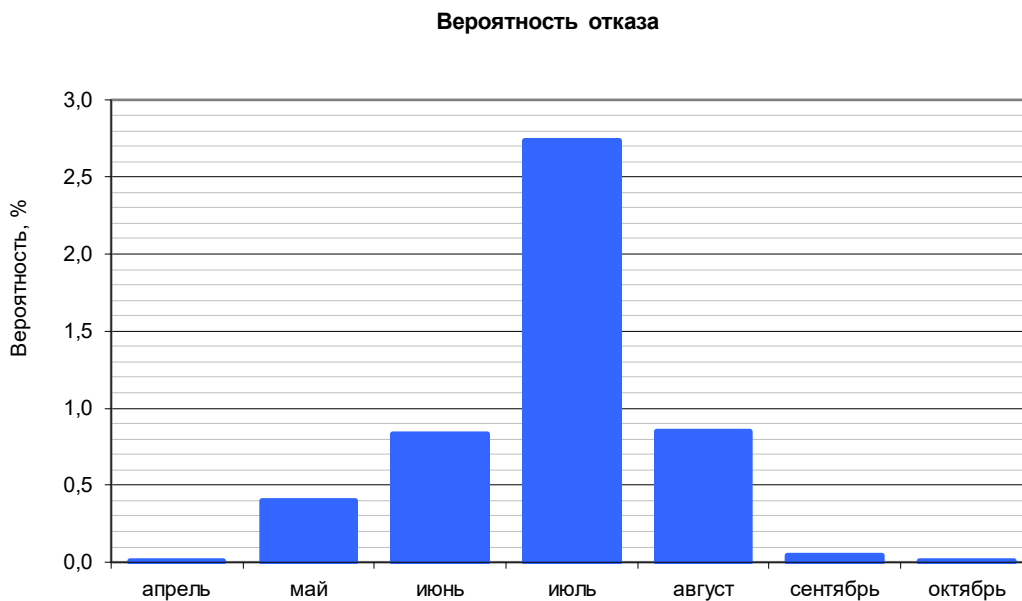


Рис. 7. Вероятность отказа в каждом месяце 2019 года

Коэффициент загрузки порта – это отношение среднего числа занятых причалов к общему. Загруженность порта в процентах за каждый месяц указана на рисунке 8.



Загруженность порта по месяцам

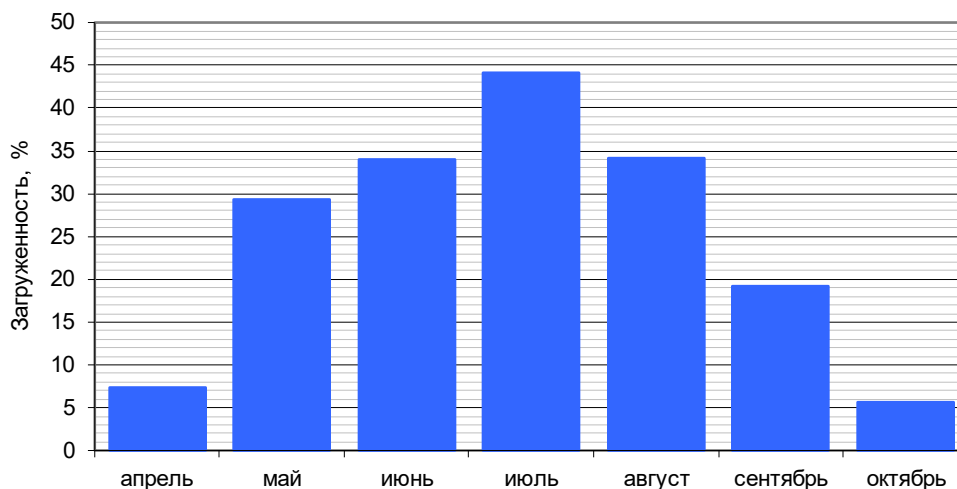


Рис. 8. Загрузка причалов порта в каждом месяце

Исходя из полученных данных, при неравномерном потоке судов максимальная загруженность причалов достигается при месячной интенсивности как в июле 2019. Максимальная загрузка составляет 44%. Вероятность того, что все причалы будут заняты и начнёт образовываться задержка в обслуживании прибывающих составляет 2,7%, что не очень много. Загрузка порта в остальные летние месяцы не превышает 35%, а осенью за счёт спада спроса не превышает и 20%. Из этого можно сделать вывод, что порт способен справиться с возможным повышением месячных интенсивностей движения как минимум до уровня июля 2019.

Заключение

Как было сказано, расписание движения составляется заранее и на всю навигацию, что делает поток судов равномерным и сбалансированным. При такой организации приёма судов порт может быть переполнен только из-за сбоев в расписании вследствие форс-мажоров. Однако порт может принимать и суда вне расписания, если есть свободные места. И поток судов, идущих вне расписания, может превысить вместимость порта, из-за чего данные суда будут или вынуждены ждать или откажутся от обслуживания в порту. В реальности, необходим баланс между пропускной способностью порта и возможным объёмом издержек. При тех объёмах поступающих судов, которые наблюдаются сейчас, порт работает эффективно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общая информация - Пассажирский порт Санкт-Петербург Морской фасад [Электронный ресурс]. – URL: https://www.portspb.ru/O_porte/about (дата обращения 10.05.2021).
2. Правила приема и обслуживания судов Открытым акционерным обществом «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад». СПб.: 2009. 13 с.
3. Расписание - Пассажирский порт Санкт-Петербург Морской фасад [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.portspb.ru/Raspisanie> (дата обращения 6.11.2020).
4. World's Top-50 Largest Cruise Ships | CruiseMapper [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cruisemapper.com/wiki/763-list-of-largest-cruise-ships-in-the-world> (дата обращения 4.05.2021).
5. MSC Cruises. Во время круиза. – URL: <http://msccruises.ru/info/vo-vremya-kruiza/> (дата обращения 9.05.2021).



6. Теория массового обслуживания. Методические указания, учебная программа и задания для контрольных работ № 1, 2 для студентов заочной формы обучения специальности 071900 “Информационные системы в технике и технологиях”. - Самара: СамГАПС, 2002.- 38с.
7. Фролов А. С. Организация, планирование и технология перегрузочных работ в морских портах: учебник для высш. учеб. завед. ММФ / А. С. Фролов, П. В. Кузьмин, А. В. Степанец. — М.: Транспорт, 1979. — 408 с.
8. Майоров, Н.Н. Моделирование транспортных процессов: учеб. пособие / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. – СПб.: ГУАП, 2011. – 164 с.: ил.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Язвенко Максим Романович –

бакалавр кафедры системного анализа и логистики

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: maksim-yazvenko@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yazvenko Maksim Romanovich –

bachelor of the system analysis and logistics department

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: maksim-yazvenko@ya.ru