

УДК 656.61.053(262.5/.54):004.94

DOI: 10.37890/jwt.vi77.435

## **Применение модели Эрланга для моделирования процесса пограничного контроля судов, следующих через Керчь-Еникальский канал**

**В.В. Святский**

*ORCID: 0009-0009-9094-5385*

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия*

**Аннотация.** Данная статья исследует особенности прохода Керчь-Еникальского канала (КЕК). Керченский пролив является одним из наиболее интенсивно используемых морских путей в Российской Федерации, что приводит к постоянному потоку судов и требует организованного движения.

Пропускная способность Керченского пролива рассчитывалась из статистических данных по количеству судов, которые ежедневно проходят через него. Количество судов, проходящих через Керченский пролив, заметно увеличивается с каждым годом. Увеличение количества судов, проходящих через пролив, создает дополнительные проблемы, связанные с безопасностью плавания и экологической устойчивостью региона. Например, увеличение количества судов может привести к повышению вероятности столкновений и аварий, а также к ухудшению экологической ситуации в районе пролива.

В работе разработан алгоритм, проведен анализ факторов, влияющих на процесс прохода КЕК. В качестве модели используется модель Эрланга. Данная модель позволяет проводить имитационное моделирование процесса таможенного контроля с количественной оценкой данных. Для построения модели была произведена статистическая обработка данных по прохождению таможенного контроля. В результате имитационного моделирования получены следующие результаты:

1. Определена максимальная пропускная способность данного участка контроля;
2. Рассчитан оптимальный состав судов таможенного контроля.

**Ключевые слова:** Керчь-Еникальский канал, системы массового обслуживания, поток Эрланга.

## **The application of Erlang model for process simulation of boundary monitoring of ships proceeding through the Kerch-Yenikalsky Strait**

**Vitalii V. Sviatskii**

*ORCID: 0009-0009-9094-5385*

*Kerch State Maritime Technological University, Russian Federation*

**Abstract.** This article investigates the peculiarities of the Kerch-Yenikalsky Channel (KEC) passage. The Kerch Strait is one of the most intensively used sea routes in the Russian Federation, which results in a constant flow of ships and requires organized traffic.

The Kerch Strait throughput capacity was calculated from statistical data on the number of vessels that pass through it on a daily basis. The number of vessels passing through the Kerch Strait increases noticeably every year.

The increase in the number of vessels passing through the Strait creates additional problems related to safety of navigation and environmental sustainability of the region. For example, an increase in the number of ships can lead to an increased probability of collisions and

accidents, as well as to the deterioration of the environmental situation in the area of the strait.

In this paper, an algorithm is developed and the factors affecting the KEC passage process are analyzed. The Erlang model is used as a model. This model allows to carry out simulation modeling of the process of customs control providing quantitative data. To build the model, statistical processing of data on the passage of customs control was performed. As a result of simulation modeling the following results were obtained:

1. The maximum throughput capacity of a given control section was determined;
2. Calculated the optimal composition of the customs control vessels.

**Keywords:** Kerch-Yenikalsky channel, mass service systems, Erlang flow.

### Введение

Керченский пролив – это узкий проход между Крымом и Таманским полуостровом на востоке Керченского полуострова, который соединяет Азовское и Черное моря. Минимальная ширина Керченского пролива составляет всего 4,5 км. Пролив считается мелководным, наименьшая глубина в центральной части пролива около 3 метров, для обеспечения судоходства построен Керчь-Еникальский канал (КЕК). Ширина канала 120 метров. По каналу могут проходить суда с осадкой до 8 метров [1].

Из-за узкости КЕК, суда в основном движутся в караванах, чтобы обеспечить безопасность прохождения. Организация движения является необходимым условием для обеспечения безопасности прохода судов.

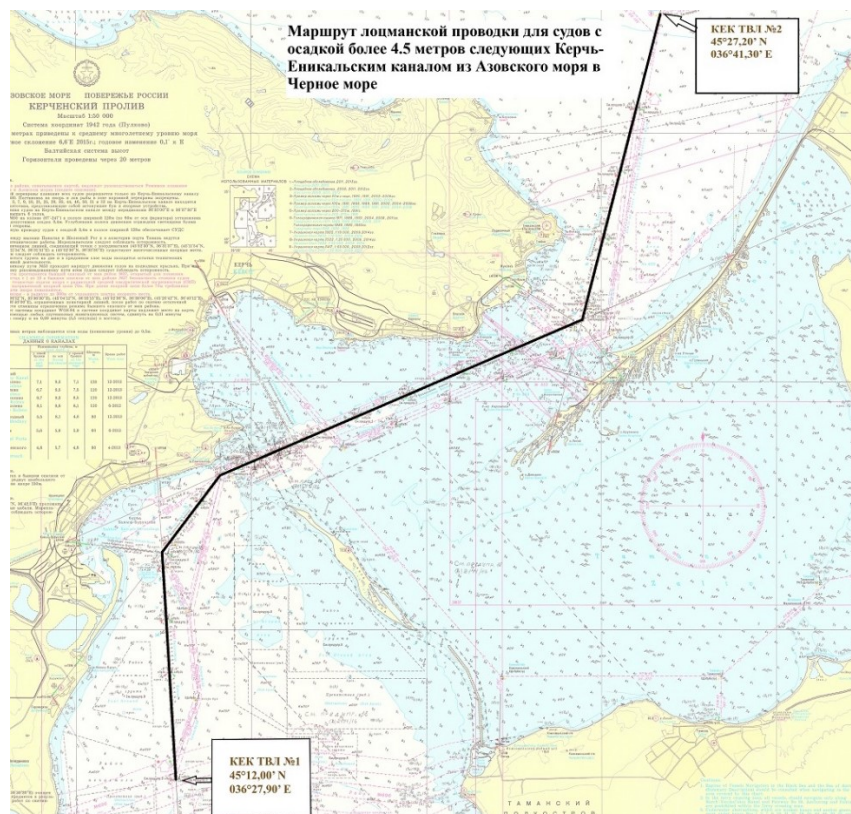


Рис. 1. Керчь-Еникальский канал

Для обеспечения безопасности движения судов в Керченском проливе, создана система управления движением судов (СУДС), которая отслеживает и регулирует движение всех судов, проходящих через пролив [2]. Проход судов через Керченский пролив осуществляется под наблюдением опытных лоцманов, которые знакомы с местными условиями плавания [3]. В Керченском проливе действуют ограничения скорости. Суда с осадкой до 5 метров могут проходить КЕК со скоростью до 12 узлов, а суда с осадкой более 5 со скоростью до 10 узлов, чтобы гарантировать безопасность и избежать возможных аварий [4, 5].

Скорость течения может достигать до 2 узлов, что усложняет прохождение пролива. Ветровые условия могут быть переменчивыми, что также повышает сложность прохождения пролива. В связи с этим, прохождение Керченского пролива требует от судов регулярного обновления навигационных данных и тщательного планирования маршрута.

Керченский пролив является одним из наиболее интенсивно используемых морских путей в Российской Федерации, что приводит к постоянному потоку судов и требует организованного движения.

Количество судов, проходящих через Керченский пролив, заметно увеличивается с каждым годом, в связи с этим актуальной задачей является обеспечение соответствующей пропускной способности канала.

Увеличение количества судов, проходящих через пролив, создает дополнительные проблемы, связанные с безопасностью плавания и экологической устойчивостью региона [6]. Например, увеличение количества судов может привести к повышению вероятности столкновений и аварий, а также к ухудшению экологической ситуации в районе пролива.

Для решения этих проблем необходимо принимать дополнительные меры и продолжать работу по модернизации инфраструктуры пролива.

**Цель исследования:** построить математическую модель потока судов для таможенного контроля на примере Керченского пролива, провести имитационное моделирование, выработать рекомендации по уменьшению времени прохождения таможенного контроля.

**Объект исследования:** поток судов при прохождении таможенного контроля.

**Предмет исследования:** параметры потока судов при прохождении таможенного контроля.

**Методы исследования:** анализ, формализация, математическое моделирование.

Рассмотрим, как работает система управления движения судов в Керченском проливе. Для того, чтобы судно могло пройти через пролив, необходимо выполнить несколько условий.

Подача заявки на проход пролива за 72 часа.

В настоящее время перед проходом КЕК все суда должны пройти пограничный досмотр. Судно не рассматривается на включение в караван до тех пор, пока не поступит информация от органов контроля о наличии свободной практики для этого судна. Досмотр проводится как при движении с юга, так и с севера.

Подача заявки на проход и обслуживание судна, а также на услуги лоцмана. Заявка должна содержать информацию о судне, грузе и планируемом времени прохода.

Наличие судна в план-графике движения по проливу. План-график издается три раза в сутки: на 15:00 - основной, на 09:00 и 21:00 - корректировки.

Судно выходит на связь за 2 часа до подхода к входу в пролив. Оператор СУДС проверяет наличие заявки, включение судна в план-график и принимает подходящую информацию. Если оба условия выполнены, после рассмотрения заявки и проверки соответствия судна всем требованиям безопасности, капитану выдается разрешение на проход через пролив и судно становится в очередь по времени подхода. Однако даже

после получения разрешения, суда могут быть ограничены в своей способности проходить через пролив в зависимости от погодных условий и других факторов.

Для судов, идущих с севера для перегрузки груза на накопитель в Таманский рейдовый перегрузочный район, есть дополнительное условие - наличие свободного борта накопителя. Если накопитель не принимает, то судно остается ожидать борта накопителя на севере, чтобы не занимать место на якорной стоянке на юге пролива.

Если все заявки поданы, подтверждены, то оператор СУДС составляет караван из судов, на которые не наложены ограничения на проход, руководствуясь временем подхода и правилами приоритета из п. 63 «Обязательных постановлений в морском порту Керчь».

В соответствии с указанными приоритетами, суда разделяются на группы и организуется их движение в караванах с учетом скорости и времени подхода к ориентирам.

Первоочередные суда - аварийные, занятые прокладкой подводных кабелей или трубопроводов, а также суда, оказывающие помощь или имеющие на борту больных. Далее следуют суда, проводящие работы по обслуживанию плавучих средств навигационного оборудования в Керченском проливе и Керченской переправе, а затем - пассажирские суда и паромы, суда со скоропортящимися грузами, суда с опасными грузами (за исключением некоторых подклассов) и суда длиной более 160 метров.

Количество судов в караване зависит от количества лоцманов и судов, которые имеют право плавания без лоцмана и готовы к проходу (обычно это от 1 до 5 судов за караван). Количество лоцманов может достигать 16-18 человек в зависимости от вахты, а с каждой стороны пролива работают по 2 катера.

Катера могут работать как одновременно, так и по очереди. Лоцманские катера с северной стороны проходят досмотр в порту Кавказ. Южные катера проходят досмотр непосредственно в порту Камыш-бурун.

Суда в караване распределяют по скорости, при этом на противоположной стороне Керченского пролива караван формируется таким же способом. Кроме того, для оптимизации организации движения судам выдается время подхода к ориентирам с интервалом 5 минут.

Таким образом, организована процедура движения судов в Керченском проливе, учитывающая приоритеты, скорость и количество судов в караване, а также количество и расположение лоцманов, все это отображено на схеме (рис. 2).

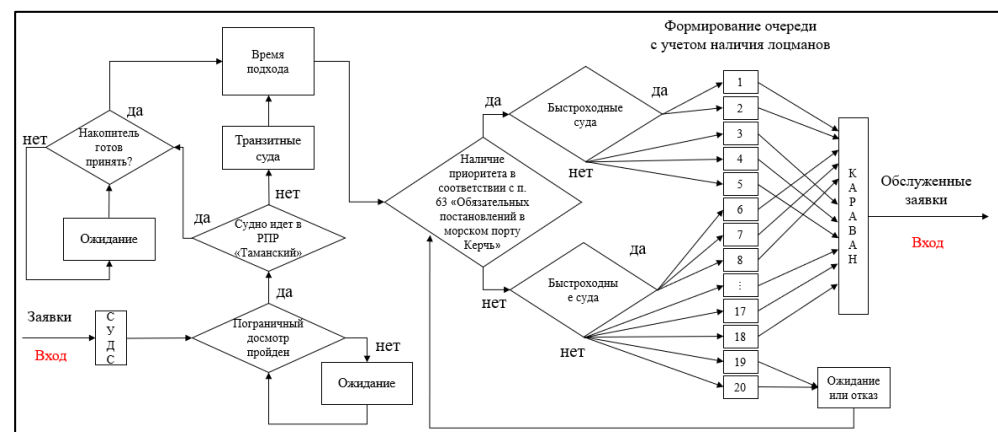


Рис. 2. Схема обслуживания судов в Керченском проливе с лоцманской проводкой

Процедура движения судов в Керченском проливе может быть рассмотрена с точки зрения теории массового обслуживания, которая изучает процессы, связанные с обслуживанием потока заявок или требований, поступающих на обработку в систему.

Рассмотрим элементы теории массового обслуживания, которые применяются в данном случае.

Поток событий представляет собой последовательность схожих событий, которые происходят в случайные моменты времени, следующие одно за другим. В данном контексте, это заявки, поступающие от судов, на проход через Керченский пролив [7].

Интенсивность потока  $\lambda$  — это среднее число событий в единицу времени. Интенсивность потока можно рассчитать экспериментально по формуле:

$$\lambda = N/T_n, \quad (1)$$

где  $N$  — число событий, произошедших за время наблюдения  $T_n$ .

Интенсивность потока представляет собой математическое ожидание количества событий, происходящих в единицу времени. Она характеризует среднюю скорость поступления событий в потоке.

Дисперсия, с другой стороны, показывает разброс во времени между событиями относительно математического ожидания. Большая дисперсия указывает на большой разброс временных интервалов между событиями, тогда как маленькая дисперсия указывает на более стабильный поток событий.

Если вероятность одновременного появления двух или более событий равна нулю, то такой поток событий называется ординарным или независимым. Это означает, что появление одного события не влияет на возникновение другого события в потоке [8].

Поток стационарный потому, что вероятностные характеристики не зависят от времени. Вероятность появления случайного события не зависит от момента совершения предыдущих событий поэтому поток без последствия. Отсутствие последствий означает, что заявки в систему поступают независимо друг от друга.

В нашем случае поток одновременно стационарен, ординарен и не имеет последствий это Пуассоновский поток (простейший).

Процесс прохода Керчь-Еникальского канала достаточно сложный для имитационного моделирования, поэтому при создании имитационной модели принято решение разбить алгоритм на несколько частей.

### **Результаты исследования**

По статистическим данным определены параметры для имитационного моделирования поступления заявок на пограничный досмотр. В частности, определен закон распределения процесса поступления заявок, который как видим из гистограммы (рис. 3) является Пуассоновским. Для оценки согласия статистических данных был использован критерий согласия Пирсона при уровне значимости  $P=0,9$ .

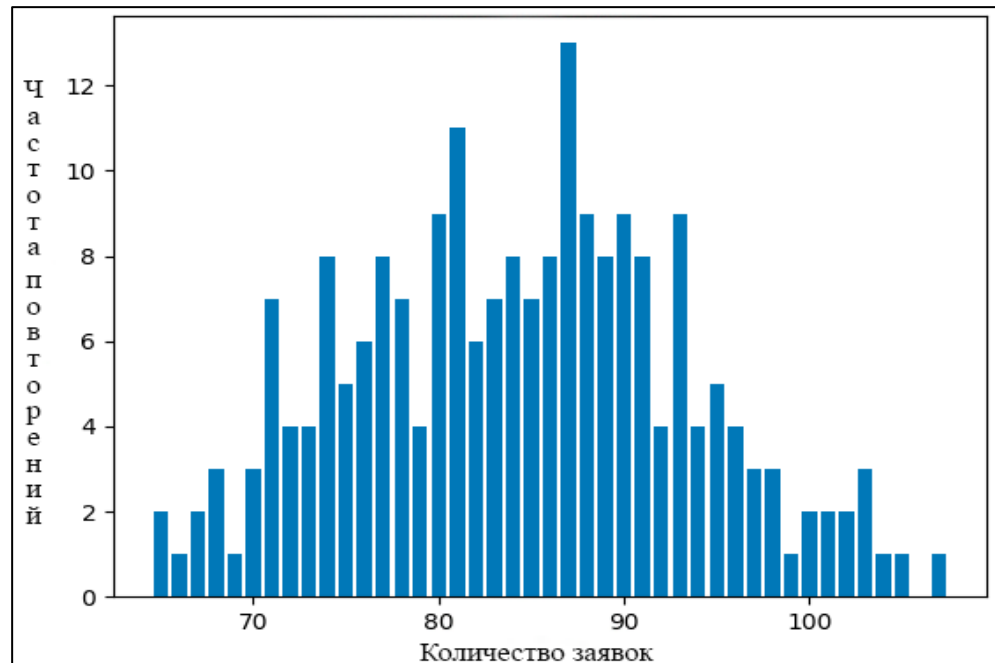


Рис. 3. Гистограмма поступления заявок

Для наглядности смоделируем проход судов за три месяца. В результате моделирования построен график поступления заявок (рис. 4).



Рис. 4. График поступления заявок «Пуассоновский поток»

При составлении графика было решено выделять каждый месяц отдельной линией. Это позволяет избежать перегрузки графика и обеспечивает его лучшую читаемость, особенно на участках, где не требуется использование функции приближения.

На графике разными цветами отображены поступающие заявки за 3 месяца, а также среднее число заявок отмечено красной линией. Минимальное количество заявок – 46, а максимальное – 90 заявок в сутки. Среднее количество заявок – 67. Такой разброс обусловлен тем, что в штормовых условиях проход по Керченскому проливу запрещен, и соответственно суда ожидают улучшения гидрометеорологических условий. Как только погодные условия улучшаются, лоцмана проводят караван, но так как количество лоцманов ограничено, то в очереди суда остаются. Если внимательно посмотреть на график, то можно заметить, что чаще всего перед днями с пиковыми значениями идет снижение количества заявок, как раз за счет неблагоприятных погодных условий. Зная среднее количество судов, проходящих пролив за день, мы можем определить сколько судов остается в очереди. Формирования очереди представлено на графике (рис.5).

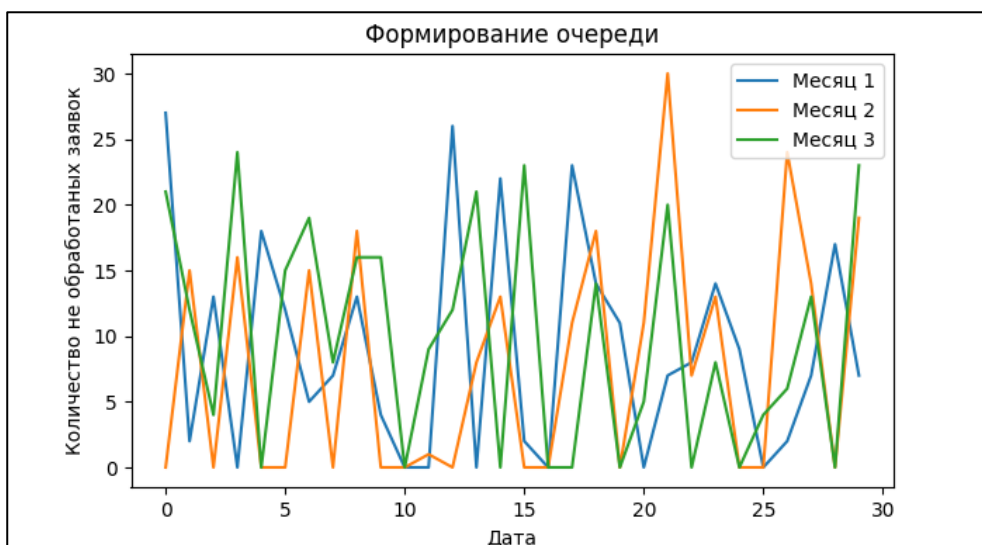


Рис. 5. Формирования очереди «Пуассоновский поток»

На графике формирования очереди мы видим, что присутствуют дни, когда очередей нет, а также дни, в которых очередь достигает отметки в 30 судов. На скопления судов в очередь влияют не только гидрометеорологические факторы, но ожидание прохождения пограничного контроля. При прохождении таможенного контроля используется 2-х канальная система, то есть суда проверяются как с юга, так и с севера канала.

Подобные графики могут быть сильно перегружены информацией, в данном примере проведено имитационное моделирование всего за 3 месяца, а если проводить моделирование за длительный период, то график получится сильно прогружен и что-то разобрать в нем будет проблематично. Чтобы избежать подобных проблем полученные данные можно преобразовать в Поток Эрланга [8].

Поток Эрланга  $k$ -го порядка — это поток случайных событий, получающийся, если в простейшем случайном потоке сохранить каждое  $k$ -е событие, а остальные отбросить [9].

Просеивание событий начинает приводить к тому, что между точками появляется последствие, детерминация, которая возрастает с увеличением значения  $k$ . С увеличением  $k$  точки ложатся на ось времени все более равномерно, разброс их уменьшается, регулярность увеличивается. Для примера построим график

поступления заявок потоком Эрланга 2-го порядка (рис. 6) – поток без последствия [10].

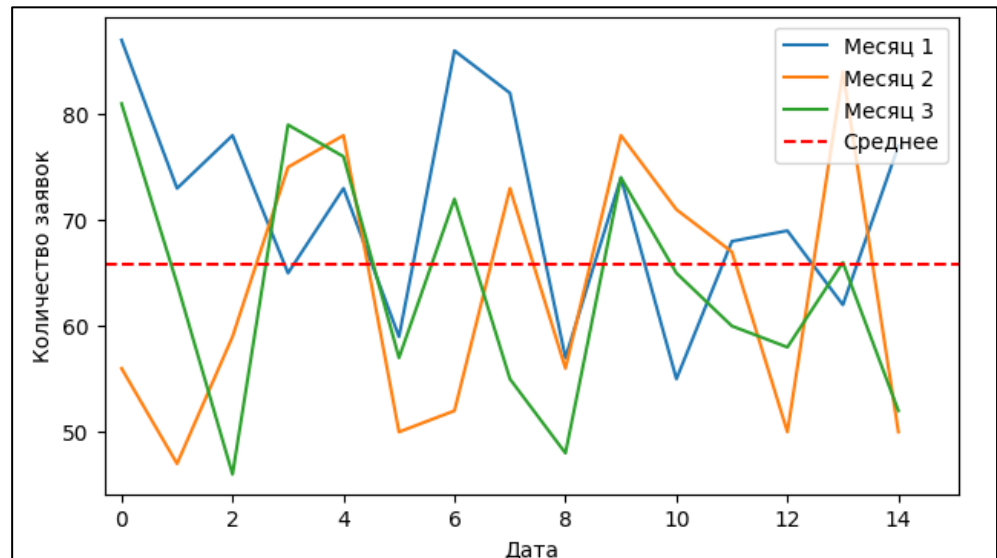


Рис. 6. График поступления заявок «Поток Эрланга 2-го порядка»

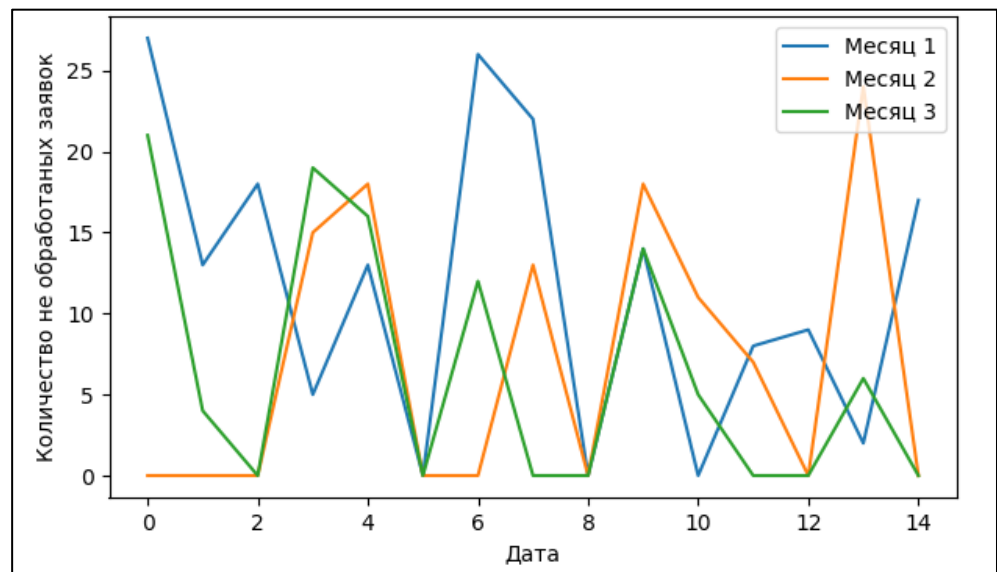


Рис. 7. Формирования очереди «Пуассоновский поток»

На графиках мы видим аналогичную ситуацию как на графике с Пуассоновским потоком, но с таким графиком уже намного проще работать. Различия, конечно, есть, но они минимальные, так что при моделировании на более долгие промежутки времени, на 6-12 месяцев можно использовать Поток Эрланга 3-го и 4-го порядка.



### **Заключение**

В результате проведенных исследований была разработана математическая модель процесса таможенного контроля при прохождении Керчь-Еникальского канала.

В результате имитационного моделирования была получена количественная оценка текущей системы таможенного контроля. Результаты имитационного моделирования и реальные статистические данные хорошо согласуются.

В результате можно сказать, что максимальная очередь в пиковые периоды составляет 30 судов, что увеличивает время прохождения канала в среднем до 35 часов. Для оптимизации процесса таможенного контроля рекомендуется 4-х канальная система с максимальной очередью до 15 судов, что может снизить время прохождения канала до 12 часов. Для этой цели предполагается увеличение таможенных катеров в 2 раза и как следствие увеличение общей численности экипажей. Безусловно это повлечет дополнительные финансовые издержки, но снижение времени простоя судов в 2,5 раза увеличит судопоток и таким образом повысит доход канального сбора. Ко всему прочему данная не сложная реорганизация увеличит товарооборот с другими странами и регионами Российской Федерации.

### **Список литературы**

1. Ивановский, А. Н. Оценка безопасной ширины полосы движения судна при прохождении через Керчь-Еникальский канал / А. Н. Ивановский, Н. В. Ивановский // Молодой ученый. – 2019. – № 28(266). – С. 39-41.
2. Бабурин В. А. Организационно-правовые аспекты совершенствования обслуживания судов в портах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2009. №3 (3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-pravovye-aspekty-sovershenstvovaniya-obslyuzhivaniya-sudov-v-portah> (дата обращения: 14.05.2023).
3. Кириченко, С. В. Интроспективный анализ энергетического потенциала ветровых условий Керченского полуострова / С. В. Кириченко // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2019. – № 1. – С. 31-37.
4. Горячев, И. С. Расчет вероятности посадки судна на мель при проходе стесненных акваторий на примере Керченского пролива / И. С. Горячев, В. В. Святский, Н. В. Ивановский // Теория и практика обеспечения навигационной безопасности на морских путях и в районах промысла : Материалы I Национальной научно-практической конференции, Керчь, 11–12 июня 2021 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2021. – С. 87-94.
5. Приказ Минтранса России от 21.10.2015 N 313 (ред. от 10.03.2016) // "Об утверждении Обязательных постановлений в морском порту Керчь" (Зарегистрировано в Минюсте России 27.10.2015 N 39490)
6. Никонорова, М. А. Особенности правового регулирования лоцманской проводки судов по Керченскому проливу (порт Керчь) / М. А. Никонорова // Океанский менеджмент. – 2019. – № 1(4). – С. 34-40.
7. Мухин О.И. Моделирование систем. [Электронный ресурс]: <http://stratum.ac.ru/education/textbooks/modelir/lection28.html> (дата обращения: 14.05.2023).
8. Савин В. И. Математические методы оптимального планирования работы флота и портов. -М. 1969. - 168 с.
9. Куракин В.С., Пьяных С.М. Определение характеристик входящих судовых потоков при различных вариантах организации движения, труды ГИИВТ, выпуск 119, ч. 1, ГИИВТ, Горький, 1972.
10. Земсков, А. В. Аналитический метод исследования немарковских процессов с потоками Эрланга / А. В. Земсков, А. А. Сулима // Артиллерийский журнал. – 2023. – № 1. – С. 53-59.

### References

1. Ivanovsky, A. N. Estimation of the safe width of the ship's lane when passing through the Kerch-Yenikalsky Channel / A. N. Ivanovsky, N. V. Ivanovsky // Young Scientist. - 2019. - № 28(266). - С. 39-41.
2. Baburin V. A. Organizational and legal aspects of improving the service of ships in ports // Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet Admiral S. O. Makarov. 2009. №3 (3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-pravovye-aspekty-sovershenstvovaniya-obslyzhivaniya-sudov-v-portah> (date of reference: 14.05.2023).
3. Kirichenko, S. V. Introspective analysis of the energy potential of wind conditions Kerch Peninsula / S. V. Kirichenko // Bulletin of Kerch State Marine Technological University. - 2019. - № 1. - С. 31-37.
4. Goryachev I. S. Calculation of probability of vessel grounding when passing through cramped water areas by example of Kerch Strait / I. S. Goryachev, V. V. Svyatsky, N. V. Ivanovsky // Theory and practice of navigational safety in sea routes and fishing areas : Materials of I National Scientific-Practical Conference, Kerch, 11-12 June 2021 / Edited by E. P. Masyutkin. - Kerch: Kerch State Marine Technological University, 2021. - С. 87-94.
5. Order of the Ministry of Transport of Russia from 21.10.2015 N 313 (ed. from 10.03.2016) // "On approval of compulsory regulations in the seaport of Kerch" (Registered with the Ministry of Justice of Russia 27.10.2015 N 39490).
6. Nikonorova M.A. Features of the legal regulation of pilotage on the Kerch Strait (port of Kerch) / M.A. Nikonorova // Ocean Management. - 2019. - № 1(4). - С. 34-40.
7. Mukhin O.I. Modeling of systems. [Electronic resource]: <http://stratum.ac.ru/education/textbooks/modelir/lection28.html> (date of reference: 14.05.2023).
8. Savin V. I. Mathematical methods of optimal planning of fleet and port operation. -M. 1969. - 168 p.
9. Kurakin V.S., Pyanykh S.M. Determination of characteristics of incoming ship flows at different variants of traffic organization, Proceedings of GIWTE, issue 119, part 1, GIWTE, Gorky, 1972.
10. Zemskov, A. V. Analytical method for studying non-Markovian processes with Erlang flows / A. V. Zemskov, A. A. Sulima // Artillery Journal. - 2023. - № 1. - С. 53-59.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Святский Виталий Владимирович**, преподаватель кафедры Судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, [vetal-s25-009@mail.ru](mailto:vetal-s25-009@mail.ru)

**Vitalii V. Sviatskii**, Lecturer of the Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: [vetal-s25-009@mail.ru](mailto:vetal-s25-009@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.  
Received 21.06.2023; published online 20.12.2023.