

MODELLING OF MARINE TERMINAL GATE ON THE SIDE OF ROAD TRANSPORT

G. B. Popov

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

This paper considers issues of influence of entry gate at truck cargo front capacity on cargo terminal performance indicators. Up-to-date methods of simulation modelling are used to study this issues. Cargo terminal model in a generalized sense is developed using specialized software. General logic of model construction and its precise implementation with the selected program environment. Development is focused on the processes determinative for entry gate of a cargo terminal. Firstly, these processes consist of drawing up entry documents and sending loading orders to cargo handling zones. The process of truck inspection at the entry gates is also being modelled. Entry gates capacity for road transport depends on the number of simultaneously available slots. All the further processes within the cargo terminal are modelled in a general way. Cargo transfer occurring after the handling at handling zones is not considered. The designed model is tested by means of queueing theory, still relevant for transportation processes. [1]. To achieve this, a series of experiments is carried out. The results are compared to those of the preliminary calculations. To reveal the influence of entry gates variable attributes on cargo terminal performance indicators, yet another series of experiments is carried out. Besides the influence of actual attributes of entry gates, the influence of general factors, such as equability or irregularity of the incoming traffic flow, is considered. The results are considered in the context of relationships between a cargo terminal and a city.

Keywords: simulation modelling, adequacy proof, entry gate, truck cargo front, marine cargo terminal.

For citation:

Popov, German B. "Modelling of marine terminal gate on the side of road transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.

УДК 656.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОРОТ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА СО СТОРОНЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА

Г. Б. Попов

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

В статье рассматриваются вопросы влияния пропускной способности входных ворот автомобильного грузового фронта на показатели работы морского грузового терминала. Для изучения данных вопросов используются современные методы имитационного моделирования. При помощи специализированного программного обеспечения разработана модель грузового терминала в укрупненном виде. Рассмотрена общая логика построения модели и конкретная реализация в выбранной программной среде. Исследование сфокусировано на процессах, определяющих работу входных ворот грузового терминала. К таким процессам, в первую очередь, относится оформление документов на въезд и подача заявки в зону погрузочно-разгрузочных работ. Также моделируется процесс осуществления досмотровых операций на входных воротах. Пропускная способность входных ворот со стороны автомобильного грузового фронта зависит от количества одновременно открытых полос для досмотра транспортных средств. Дальнейшие процессы внутри грузового терминала моделируются в общем виде. Перемещения груза после обработки транспортных средств в зонах проведения погрузочно-разгрузочных работ не рассматривается. Созданная модель проверена при помощи методов теории массового обслуживания, по-прежнему являющейся актуальной для транспортных процессов [1]. С этой целью проведена серия экспериментов на модели, результаты которой сравнивались с результатами предварительных расчетов. Для выявления влияния переменных характеристик комплекса входных ворот на показатели работы терминала в целом проведена еще одна серия экспериментов. Помимо

влияния характеристик непосредственно комплекса входных ворот, рассматривается влияние общих факторов, таких как равномерность или неравномерность входящего потока транспортных средств. Результаты экспериментов рассмотрены с точки зрения взаимоотношений грузового терминала и города.

Ключевые слова: имитационное моделирование, доказательство адекватности, входные ворота, автомобильный грузовой фронт, морской грузовой терминал.

Для цитирования:

Попов Г. Б. Моделирование ворот морского терминала со стороны автомобильного грузового фронта / Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.

Введение

Вопрос влияния входных ворот морского грузового терминала на общие показатели работы неоднократно обсуждался в ходе различных исследований [1] – [4]. Однако при этом он рассматривался в рамках решения конкретных, специфических задач. Следует отметить, что ряд исследований косвенно касался данного вопроса и необходимости применения современных методов имитационного моделирования, не фокусируясь на нём [5] – [7]. Очевидно, имеется необходимость в применении современных средств моделирования для создания модели, описывающей влияние пропускной способности входных ворот грузового терминала на показатели работы терминала в целом. В данном исследовании поставлена задача создать имитационную модель входных ворот грузового терминала со стороны автомобильного грузового фронта, позволяющую проанализировать влияние характеристик входных ворот на работу терминала. Моделируемый терминал рассматривается в укрупненном виде и может представлять собой морской порт. Географическое расположение терминала и его специализация в данном исследовании не рассматриваются. При разработке решения интерес представляет рассмотрение задачи именно в обобщенном виде, унифицированном для множества более конкретных задач. Поэтому процессы, протекающие непосредственно в производственных зонах грузового терминала, рассматриваются в обобщенном виде.

Общее описание модели

Наиболее эффективным способом разработки модели является использование методов имитационного моделирования. Средством создания имитационной модели выбрано приложение AnyLogic 6 (информация о лицензии: USB-ключ #00559). Выбор данного приложения основан на возможности совместной реализации различных подходов при разработке моделей [8].

На рис. 1 представлен общий вид моделируемого терминала. Количество открытых полос на воротах, парковочных мест и слотов в зонах погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) задаются в начале прогона модели.

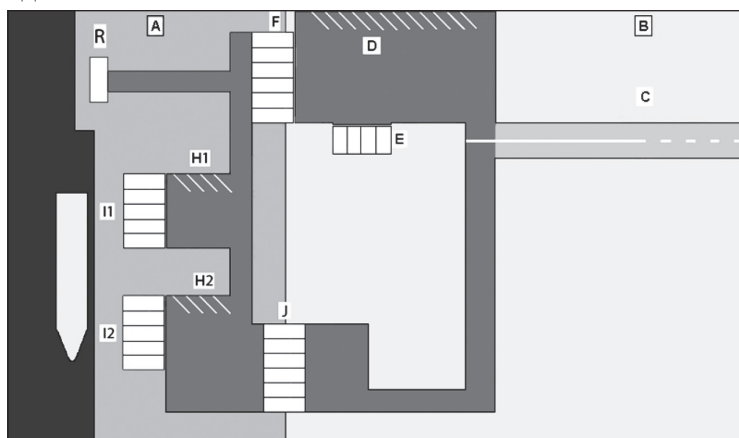


Рис. 1. Общий вид терминала: A — территория терминала; B — примыкающая городская территория; C — магистраль; D — парковка перед входными воротами; E — офис оформления документов; F — входные ворота; H1 — зона ПРР для контейнеризованного груза; H2 — зона ПРР для генерального груза; I1 и I2 — парковки перед зонами ПРР; J — зона оформления актов о повреждении прибывшего контейнера; R — выходные ворота терминала

Входящий поток транспортных средств разбивается на пять категорий: грузовые автомобили тентованные порожние, грузовые автомобили тентованные гружёные, контейнеровозы с порожним контейнером (возможно наличие повреждений на контейнере), контейнеровозы с гружёным контейнером, контейнеровозы без контейнера. Доли каждой категории в общем потоке транспортных средств задаются в начале прогона модели. Моделируемый период времени выбран равным 90 дней.

Разработка модели

Описанный выше моделируемый грузовой терминал представляет собой сложную систему массового обслуживания. Транспортные средства в системе представляют собой заявки, имеющие набор характеристик. Разработка модели осуществляется посредством выстраивания логической цепочки элементов, каждый из которых симулирует определенное поведение. Заявка, генерируемая в элементе-источнике, проходит по цепочке элементов определенным образом и выводится из системы в элементе *sink*.

Набор переменных, которые несет в себе заявка, характеризует принадлежность транспортного средства к одной из вышеуказанных категорий, наличие повреждений контейнерного оборудования, а также фиксирует время прохождения заявки через элементы модели и порядковый номер заявки, что необходимо для сбора статистики.

Логическая структура модели представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что большинство элементов модели являются подсистемами элементов, работающими как единое целое. Это означает, что все элементы, входящие в такую подсистему, имеют идентичные параметры и пропускают через себя поток заявок как один элемент логической цепочки. Примером может служить элемент, моделирующий входные ворота терминала *F*. Помимо задержки транспортного средства на время досмотра, он осуществляет разделение потока транспортных средств по категориям и отправляет их в соответствующие зоны обработки.

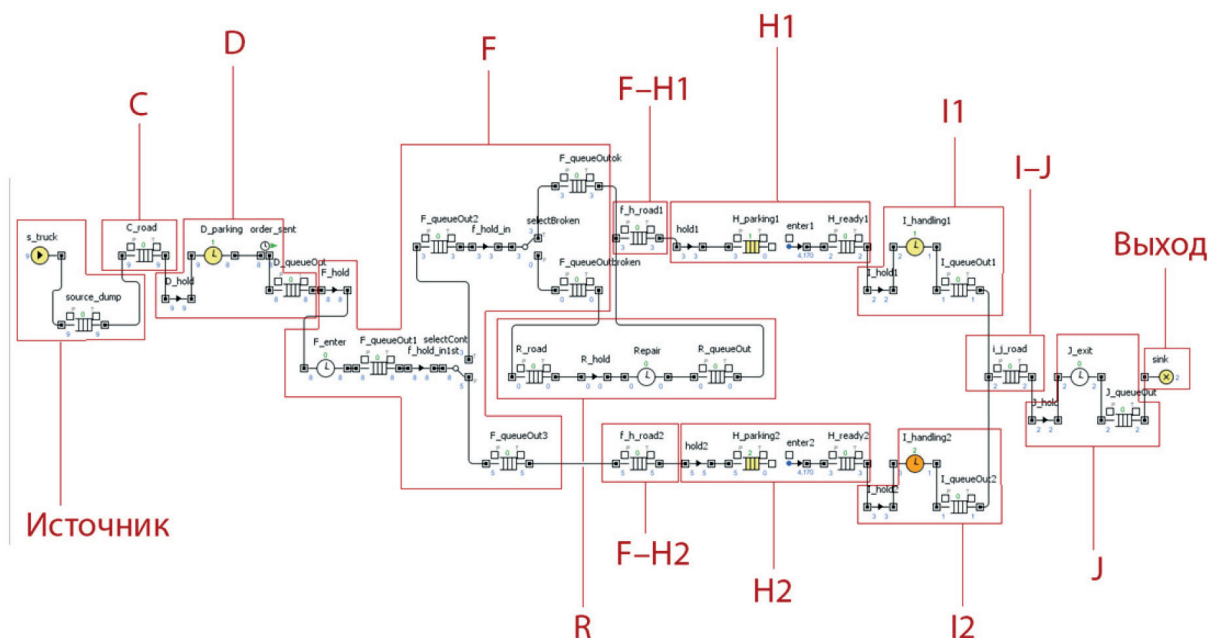


Рис. 2. Логическая структура модели:

H1 и *H2* — парковки перед зонами ПРР; *I1* — зона ПРР для контейнеризированного груза;

I2 — зона ПРР для генерального груза;

F-H1, *F-H2* и *I-J* — буферные дороги внутри терминала; *J* — выходные ворота

При наличии одной логической цепочки модель являлась бы саморегулирующейся системой, невосприимчивой к внешней среде, в которой она находится. Однако в реальности на такую

систему оказывают влияние внешние воздействия, она должна иметь определенный набор изменяемых исходных параметров, а также выводить статистику, основанную на собственной деятельности. В целях реализации такого механизма, во-первых, используется набор переменных, содержащих в себе параметры моделируемой системы. Во-вторых, вводятся события, оказывающие внешние воздействия на состояние системы. В-третьих, разрабатываются функции, используемые для получения статистических данных на основе работы моделируемой системы. Данный принцип наглядно представлен на рис. 3.

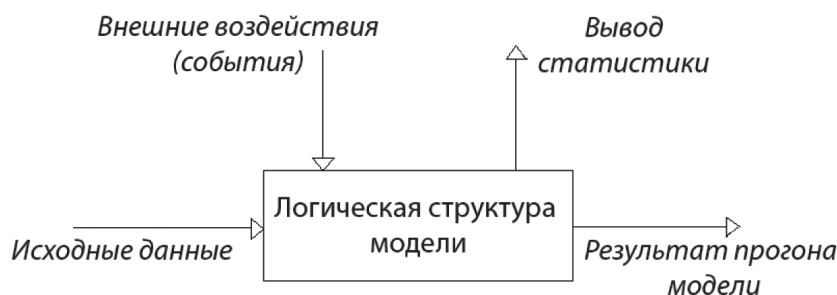


Рис. 3. Общий принцип работы модели

Использованные наборы переменных, событий и функций при разработке модели представлены на рис. 4. Первый сегмент блока «Переменные» хранит в себе исходные данные, вводимые в начале прогона модели, второй сегмент используется для вычисления и вывода статистики, третий сегмент (начиная с переменной $k_distort$) представляет собой вспомогательные переменные. События делятся на *циклические* и *нециклические*. Первое событие в списке присваивает значения исходных данных параметрам логических элементов модели при запуске, срабатывает один раз и является нециклическим. Остальные события — циклические. Средний сегмент блока «События» используется для вычисления статистики, верхний обеспечивает корректную работу логических элементов внутритерминальных парковок, последнее событие включает разделение интенсивности входящего потока транспортных средств на ночную и дневную. В блоке «Функции» первая функция в списке используется для обновления данных в течение прогона модели, вторая — для сбора статистики, третья — вспомогательная.

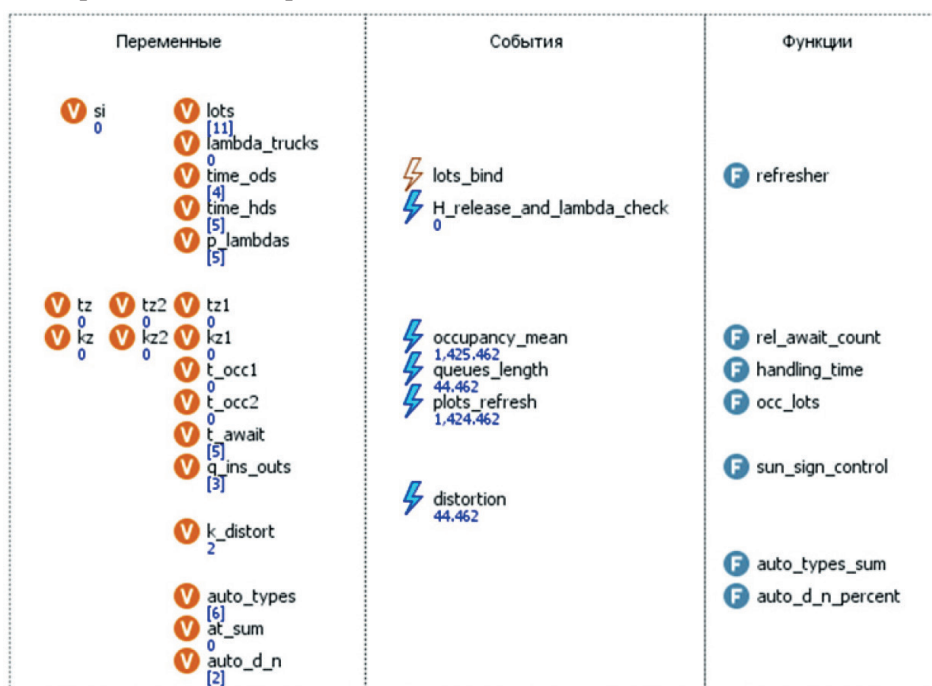


Рис. 4. Переменные, события и функции, использованные при разработке модели

В модели используется один элемент-источник, генерирующий различные категории входящих заявок, характеристики которых отличаются. В связи с этим возникла необходимость разработки механизма разделения единого потока заявок на категории, наглядное представление реализации которого приведено на рис. 5. Некоторому числу X присваивается случайное значение в промежутке между числами 0 и 100, распределенное по равномерному закону. Переменным x_1, x_2, x_3, x_4 присваиваются значения, равные долям каждой категории транспортных средств в общем потоке транспортных средств, поступающих на терминал. Значение доли пятой (последней) категории является разностью между числом 100 и суммой первых четырех переменных. Входящей заявке (транспортному средству) будет присвоена категория в зависимости от того, на какой из отрезков, приведенных на рис. 5, попало значение переменной X .

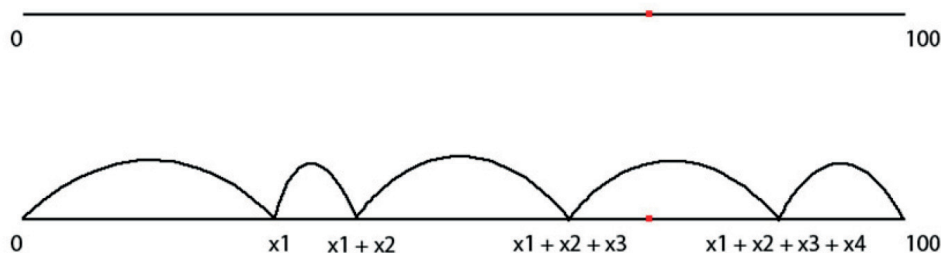


Рис. 5. Разделение входящего потока заявок на категории

Проверка адекватности модели

С точки зрения теории массового обслуживания (ТМО) моделируемый терминал представляет собой многоканальную многофазную систему массового обслуживания [9]. Количество каналов в каждой фазе обслуживания регулируется исходными данными, вводимыми в начале прогона модели. Схема терминала как системы массового обслуживания приведена на рис. 6, где λ — интенсивность входящего потока транспортных средств, μ_E — интенсивность потока обработки заявок в офисе перед въездом (величина, обратная времени, затрачиваемому на обработку одной заявки на въезд), μ_F — интенсивность потока обработки транспортных средств на входных воротах терминала (величина, обратная времени, затрачиваемому на досмотр), μ_I — интенсивность потока обработки транспортных средств в зоне проведения погрузочно-разгрузочных работ (величина, обратная времени, затрачиваемому на погрузку или разгрузку одного транспортного средства), μ_J — интенсивность потока обработки транспортных средств на выезде из терминала (величина, обратная времени, затрачиваемому на досмотр, равна μ_F).

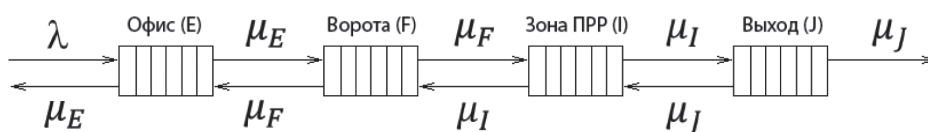


Рис. 6. Терминал как система массового обслуживания

Критическим показателем работоспособности системы массового обслуживания является приведенная интенсивность потока заявок, выражающая среднее число заявок, приходящих за среднее время обработки одной заявки, и вычисляемая по формуле

$$r = \frac{\lambda}{\mu},$$

где λ — интенсивность входящего потока заявок; μ — интенсивность потока обработки заявок.

Поскольку система многофазная, её общая интенсивность потока обработки равна интенсивности потока обработки наименее производительного элемента [9]. Таким элементом может являться любой из приведенных на рис. 6 элементов, однако в действительности наиболее вероят-

но, что этим элементом будет являться зона проведения погрузочно-разгрузочных работ как самая трудозатратная.

При $r > 1$ система является нестабильной, размер очереди заявок на входе стремится к бесконечности, коэффициент занятости всех каналов равен единице. При $r < 1$ система является стабильной, размер очереди заявок колеблется около некоторого значения, коэффициент занятости всех каналов меньше единицы. Очевидно, что критической точкой стабильности для любой системы массового обслуживания является соотношение входящего потока и потока обслуживания, при котором $r = 1$ [9].

Для проверки модели на адекватность был проведен ряд экспериментов. В рамках экспериментов значения приведенной интенсивности потока заявок r , рассчитанной с помощью ТМО, сравнивались со средним значением коэффициента занятости зоны погрузочно-разгрузочных работ за несколько прогонов ($k'_{зан}$), вычисляемым при моделировании при одних и тех же исходных данных. Результаты проверки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты проверки модели

Предварительный расчет			Результат работы модели		
λ , а/м в сут	μ , а/м в сут	r	λ , а/м в сут	μ , а/м в сут	$k'_{зан}$
12	72	0,1667	12	72	0,1621
24	72	0,3333	24	72	0,3254
36	72	0,5	36	72	0,5008
48	72	0,6667	48	72	0,6750
60	72	0,8333	60	72	0,8429
72	72	1	72	72	0,9955

Полученные результаты позволяют сделать вывод о корректности работы модели и рассматривать более сложные ситуации, которые невозможно рассчитать с помощью ТМО.

Проведение экспериментов на модели

В ходе проведения ряда экспериментов были выявлены некоторые закономерности, касающиеся в первую очередь влияния характеристик входных ворот грузового терминала на общие показатели его работы. Основные показатели работы терминала были выбраны в соответствии с рекомендациями Конференции ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) [10], [11]. На рис. 7 приведено сравнение результатов прогона модели при одних и тех же исходных данных, но разных количествах открытых полос на пропускном пункте входных ворот. В первом случае (рис. 7, а) открыты все шесть доступных полос для досмотра входящих транспортных средств, во втором случае (рис. 7, б) открыта только одна полоса. Интенсивность входящего потока выбрана так, чтобы обеспечить высокую нагрузку на грузовой терминал.

Из полученных результатов следует, что пропускная способность входных ворот не влияет на коэффициент занятости зоны ПРР и время относительного ожидания, поскольку наибольшие временные затраты на обработку транспортного средства приходятся непосредственно на эту зону, которая следует в цепочке за входными воротами. Однако количество открытых полос непосредственно влияет на длину очереди перед воротами терминала (рис. 8). Очевидно, что открытие дополнительных полос на входных воротах позволяет справиться с проблемой очередей перед входными воротами, но не влияет на работу самого терминала.

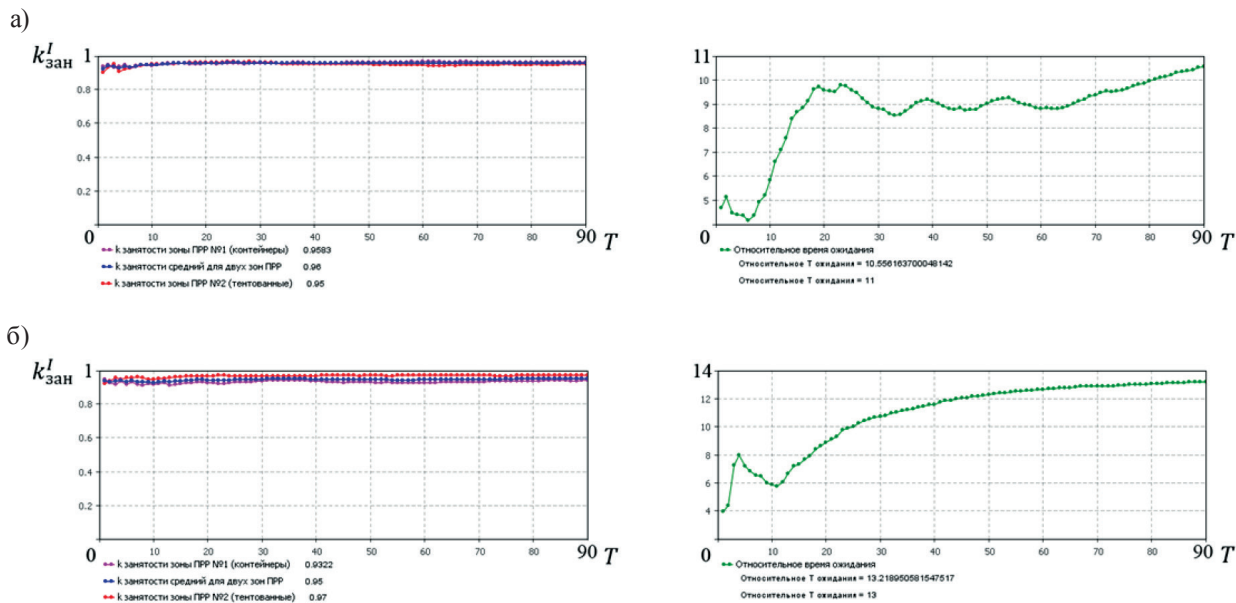


Рис. 7. Сравнение коэффициента занятости зоны ПРР и времени относительного ожидания на входных воротах терминала:
а — при шести открытых полосах; б — при одной открытой полосе

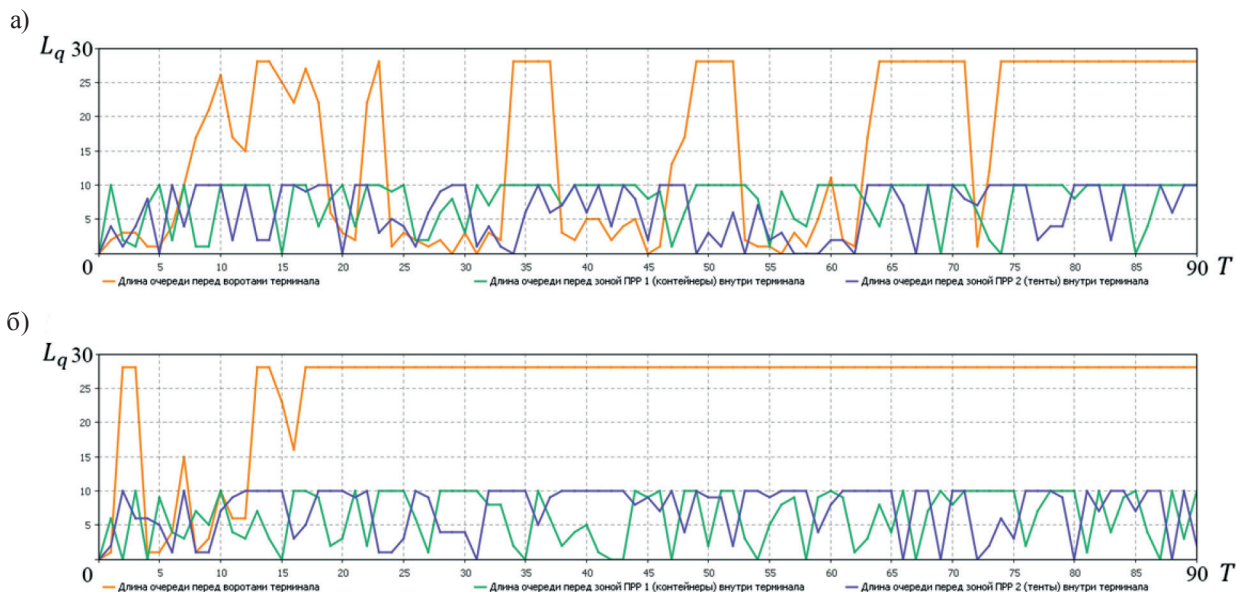


Рис. 8. Сравнение динамики изменения длин очередей на входных воротах терминала:

а — при шести открытых полосах; б — при одной открытой полосе

Условные обозначения: оранжевая линия — длина очереди перед воротами терминала;
синяя линия — длина очереди перед зоной ПРР для контейнеризированного груза;
зеленая линия — длина очереди перед зоной ПРР для генерального груза

При введении исходных данных имеется возможность *включить* или *выключить* колебания входящего транспортного потока в зависимости от времени суток. Сравнив результаты прогона модели с равномерным входящим потоком (рис. 9, а) и потоком, делящимся по интенсивности на *ночной* и *дневной* (рис. 9, б), можно сделать вывод о том, что использование функции неравномерности входящего потока транспортных средств позволяет смоделировать ситуацию, приближенную к реальности, в которой колебания длины очереди перед терминалом обусловлены низкой интенсивностью потока ночью и высокой — днем.

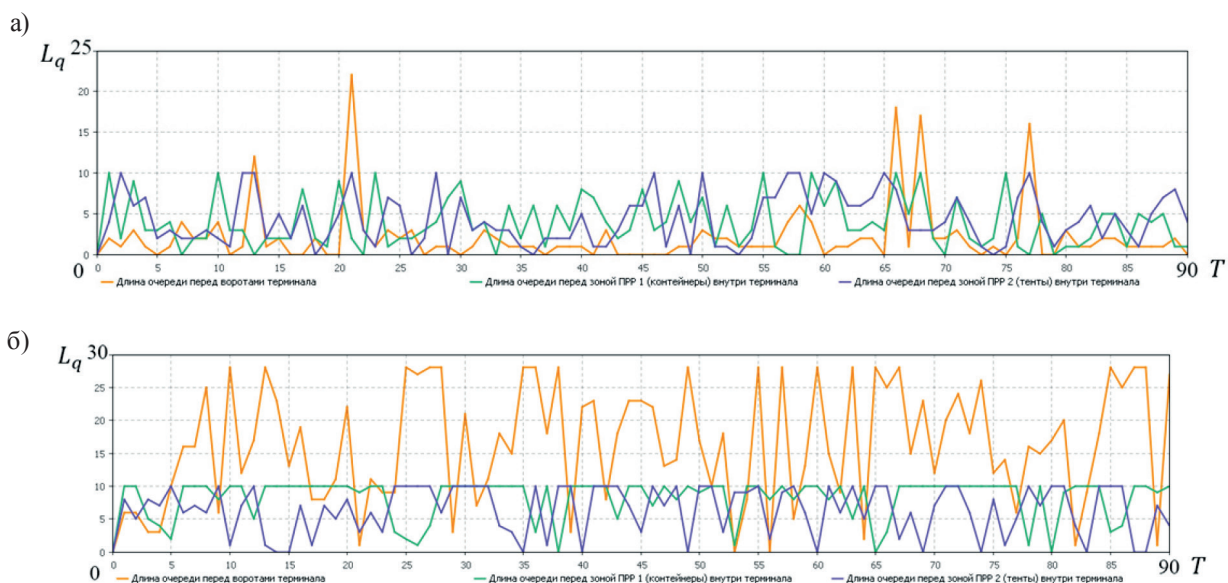


Рис. 9. Сравнение динамики изменения длин очередей при равномерном (а) и неравномерном (б) входящем потоке

Также было проведено исследование влияния времени, затрачиваемого на оформление и подачу заявки на проведение ПРР и на работу системы. Полученные результаты приведены в табл. 2, откуда следует, что время оформления заявки не влияет на коэффициент занятости зоны ПРР, но влияет на время относительного ожидания и длины очередей внутри терминала перед зоной ПРР.

Таблица 2

Показатели работы грузового терминала

λ , а/м в сут	μ , а/м в сут	$T_{\text{заявки}}$, МИН	$k_{\text{зан}}^I$	$T_{\text{отн.ожид.}}$, МИН	$L_q^{\text{ПРР}}$	$L_q^{\text{вх.ворота}}$
36	72	7	0,5181	0,75	0,44	0,121
36	72	15	0,4904	1,1	0,495	0,088
36	72	20	0,5127	1,4	0,692	0,099
36	72	30	0,5023	1,91	0,846	0,176
60	72	7	0,8280	2,84	2,374	0,253
60	72	15	0,8343	2,99	2,429	0,297
60	72	20	0,8326	3,21	2,681	0,286
60	72	30	0,8513	4,6	4,022	0,374

В соответствии с результатами экспериментов можно сделать вывод о том, что характеристики входных ворот влияют в первую очередь на внешнюю составляющую работы терминала. Действительно, пропускная способность входных ворот мало сказывается на занятости зоны ПРР, поскольку этот показатель главным образом зависит от производительности зоны и интенсивности входящего потока транспортных средств. Однако пропускная способность входных ворот может играть серьезную роль во взаимоотношениях администрации грузового терминала и городских властей.

Как видно из результатов экспериментов, малая пропускная способность входных ворот может явиться причиной возникновения скопления транспортных средств перед воротами с последующим их скоплением на прилегающих к терминалу дорожных путях. При невозможности поставить транспортное средство на парковку D перед воротами терминала водители будут за-

нимать обочину либо крайнюю полосу близлежащей магистрали C , что может создавать заторы в дорожном движении. Открытие дополнительных полос на входных воротах позволяет решить эту проблему, в то время как сокращение времени обработки заявок на производство ПРР на терминале позволяет сокращать внутритерминальные очереди.

Выводы

1. Разработана и описана имитационная модель входных ворот морского грузового терминала со стороны автомобильного грузового фронта. Модель создана при помощи специализированного программного обеспечения, предназначенного для целей имитационного моделирования.
2. Адекватность модели доказана при помощи методов теории массового обслуживания. Для подтверждения адекватности была проведена серия экспериментов на модели, результаты которых совпали с результатами расчетов.
3. При помощи модели проанализировано влияние некоторых характеристик входных ворот терминала на показатели работы терминала в целом. Выявлено, что не все характеристики одинаково влияют на работу терминала. Помимо непосредственно характеристик входных ворот терминала, на его работу также влияют характеристики входящего потока транспортных средств, например, его равномерность или неравномерность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arita C. The dynamics of waiting: the exclusive queueing process / C. Arita, A. Schadschneider // *Transportation Research Procedia*. — 2014. — Vol. 2. — Pp. 87–95. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.012.
2. Guan C. Container terminal gate appointment system optimization / C. Guan, R. R. Liu // *Maritime Economics & Logistics*. — 2009. — Vol. 11. — Is. 4. — Pp. 378–398. DOI: 0.1057/mel.2009.13.
3. Özkan E. D. Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method / E. D. Özkan, S. Nas, N. Güler // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2016. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.
4. Selinka G. Time-dependent performance approximation of truck handling operations at an air cargo terminal / G. Selinka, A. Franz, R. Stolletz // *Computers & Operations Research*. — 2016. — Vol. 65. — Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.cor.2014.06.005.
5. Кузнецов А. Л. Генезис имитационного моделирования в ходе развития методов технологического развития проектирования портов и терминалов / А. Л. Кузнецов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2009. — № 4. — С. 3–7.
6. 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.
7. Кузнецов А. Л. Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 33–42.
8. Куприяшкин А. Г. Основы моделирования систем: учеб. пособие / А. Г. Куприяшкин. — Норильск: НИИ, 2015. — 135 с.
9. Павский В. А. Теория массового обслуживания: учеб. пособие / В. А. Павский. — Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2008. — 116 с.
10. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
11. Port performance indicators. — Geneva: UNCTAD, 1978. — 24 p.

REFERENCES

1. Arita, Chikashi, and Andreas Schadschneider. "The dynamics of waiting: the exclusive queueing process." *Transportation Research Procedia* 2 (2014): 87–95. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.012.
2. Guan, Changqian, and Rongfang Rachel Liu. "Container terminal gate appointment system optimization." *Maritime Economics & Logistics* 11.4 (2009): 378–398. DOI: 0.1057/mel.2009.13.

3. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, and Nil Güler. "Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.3 (2016): 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.
4. Selinka, Gregor, Axel Franz, and Raik Stolletz. "Time-dependent performance approximation of truck handling operations at an air cargo terminal." *Computers & operations research* 65 (2016): 164–173. DOI: 10.1016/j.cor.2014.06.005.
5. Kuznetsov, A. L. "Genesis of the agent simulation in development of methods of technological design of ports and terminals." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2009): 3–7.
6. 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): С. 7–16.
7. Kuznetsov, Alexander Lvovitch, Sergei Sergeyeovich Pavlenko, and Victoria Nickolaevna Scherbackova-Slysarenko. "Container distribution networks modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 33–42.
8. Kupriyashkin, A. G. *Osnovy modelirovaniya sistem: ucheb. posobie*. Noril'sk: NII, 2015.
9. Pavskii, V. A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya: uchebnoe posobie*. Kemerovo: Kemerovskii tekhnologicheskii institut pishchevoi promyshlennosti, 2008.
10. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
11. *Port performance indicators*. Geneva: UNCTAD, 1978.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Попов Герман Борисович — аспирант
Научный руководитель:
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: german_bp@mail.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Popov, German B. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov Aleksandr Lvovich —
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: german_bp@mail.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.