

OPTIMIZATION OF THE TRUCK DISCHARGE ZONE OF AN OIL TERMINAL USING DISCRETE-EVENT SIMULATION

A. V. Galin, G. M. Khvatov

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

This paper presents an optimization study of the truck discharge zone at an oil terminal using discrete-event simulation. The latest scientific literature on the subject is analyzed. The literature review shows that most studies focus on the application of simulation modeling to optimize operations at container terminals, while other types of terminals — such as bulk and liquid cargo terminals — have received considerably less attention. However, optimization of transport and handling processes at these terminals is equally important for their efficient operation. The study proposes a model developed in Python using the SimPy library to determine the optimal number of discharge racks required for efficient processing of tank trucks. The main optimization criteria are minimizing the truck queue length and waiting time. The model accounts for parameters such as truck unloading time, intervals between arrivals, and discharge performance at the racks. Five simulation runs were conducted with varying numbers of racks using a dataset with specified initial conditions. The simulation results demonstrate that the proposed model enables effective analysis of technological and layout solutions for the truck discharge zone. The model can be used to justify the required number of technological elements of the terminal. Based on the simulation outcomes, it is possible to draw conclusions about the adequacy or insufficiency of the number of racks for a given cargo flow and to assess the need for additional handling capacity. The proposed model is simple, transparent, and effective for use in the design of oil terminals.

Keywords: discrete-event simulation, oil terminal, truck discharge zone, queue optimization, SimPy library, tanker ship, tank farm, tank trucks, discharge rack, container terminal.

For citation:

Galina, Aleksandr V. and G. M. Khvatov. "Optimization of the truck discharge zone of an oil terminal using discrete-event simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.5 (2025): 672–681. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-672-681.

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА НЕФТЕНАЛИВНОГО ТЕРМИНАЛА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Галин, Г. М. Хватов

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

Рассмотрена задача оптимизации работы автомобильного грузового фронта нефтеналивного терминала с использованием метода дискретно-событийного моделирования. В рамках исследования проанализирована современная научная литература на эту тему, анализ которой показал, что большая часть исследований сфокусирована на вопросах применения имитационного моделирования для оптимизации процессов на контейнерных терминалах, в то время как другие виды терминалов, такие как навалочные и наливные терминалы, не так хорошо и подробно исследованы. В этой связи отмечается, что оптимизация транспортных и перегрузочных процессов на этих терминалах также важна для их эффективной эксплуатации. В данном исследовании предложена модель, разработанная на языке Python с применением библиотеки SimPy, для определения оптимального количества сливных эстакад, необходимых для эффективной обработки автоцистерн. Основным критерием оптимальности выбрана минимизация длины очереди и времени ожидания автомобилей в ней. Модель учитывает такие параметры, как время разгрузки цистерн, интервалы между прибытием автомобилей и производительность слива на эстакадах. Проведены

пять прогонов модели с варьированием количества эстакад на примере с заданными исходными данными. Результаты моделирования показали, что модель позволяет эффективно анализировать технологические и компоновочные решения автомобильного грузового фронта. Использование данной модели позволяет обосновать потребность в числе технологических элементов терминала. На основе проведенного моделирования можно сделать выводы о достаточности или недостаточности количества эстакад для заданного грузопотока, а также оценить необходимость введения в работу дополнительных перегрузочных мощностей. Предлагаемая модель является простой и эффективной для применения при проектировании нефтеналивных терминалов.

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, нефтеналивной терминал, автомобильный грузовой фронт, оптимизация очередей, библиотека SimPy, суда-танкеры, парк резервуаров, автоцистерны, разгрузочная эстакада, контейнерный терминал.

Для цитирования:

Галин А. В. Определение долготы места судна по глубинам на основе нейронной сети / А. В. Галин, Г. М. Хватов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 672–681. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-672-681. — EDN FWXUPU.

Введение (Introduction)

Морские терминалы нефти и нефтепродуктов состоят из нескольких ключевых зон, или грузовых фронтов. К главным грузовым фронтам относятся: морской грузовой фронт (причалная стенка, занятая приемом и погрузкой судов-танкеров), парк резервуаров для временного хранения нефти и нефтепродуктов, железнодорожный и / или автомобильный грузовые фронты (ЖГФ и / или АГФ), выполняющие прием и разгрузку соответствующих транспортных средств: железнодорожных вагонов-цистерн и автоцистерн.

В данном исследовании рассмотрено применение метода дискретно-событийного моделирования для определения оптимального количества сливных эстакад на АГФ нефтеналивного терминала. Большая часть современных исследований на тему имитационного моделирования транспортных узлов касается контейнерных терминалов, в то время как навалочные и наливные терминалы рассматриваются в работах реже.

Выполнен анализ имеющейся научной литературы по теме данного исследования, а также приведено описание предлагаемой модели. На конкретном примере с заданными исходными данными представлены результаты прогона модели. Выполнен анализ полученных результатов моделирования и сформулированы основные выводы данного исследования.

Цель работы заключается в формировании метода определения потребного количества сливных постов на разгрузочной эстакаде для автотранспорта наливного терминала. Задачами исследования являются анализ литературы по теме моделирования наливных терминалов, описание моделируемой системы, формулировка, разработка и прогон модели, сбор и обработка результатов моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данном исследовании рассматривается терминал нефтепродуктов, на который груз поступает автомобильным транспортом (автоцистернами), сливается на специализированных сливных эстакадах, загружается в резервуары для временного хранения и убывает с терминала на судах-танкерах. Условная схема такого терминала приведена на рис. 1.

В предлагаемой модели рассматривается так называемый АГФ нефтеналивного терминала. Эта технологическая зона терминала состоит из ряда сливных эстакад, на которых осуществляется разгрузка автомобилей с цистернами. Предполагается, что на одной эстакаде может одновременно разгружаться один автомобиль. Основной целью моделирования является оптимизация количества сливных эстакад. Как и многие другие решения, определение потребного количества сливных эстакад выполняется на этапе проектирования терминала. После введения объекта в эксплуатацию количество эстакад может оказаться недостаточным или избыточным. Такая ситуация может возникать

как вследствие неправильно определенного объема грузопотока на терминал, так и из-за других причин (например, неточностей использования неверных расчетных методов).

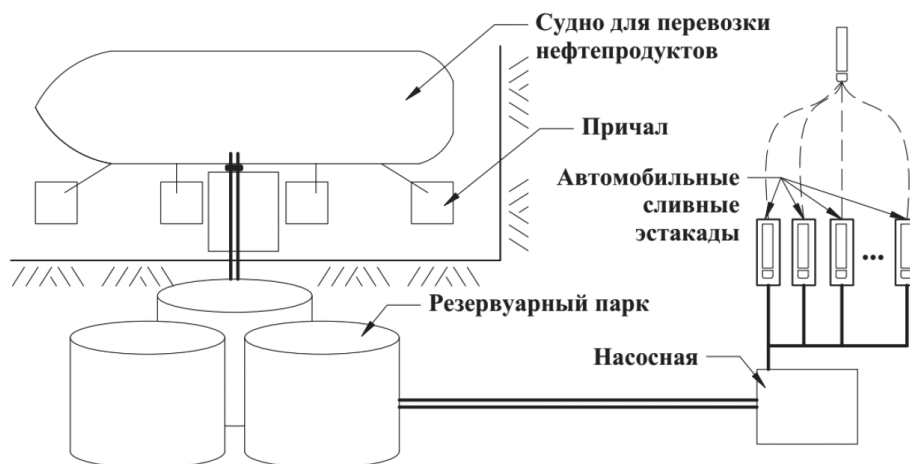


Рис. 1. Схема терминала нефтепродуктов с автомобильными сливными эстакадами

Модель, предлагаемая в настоящем исследовании, предназначена для более точного определения параметров АГФ нефтеналивного терминала. Расчетные методы, рекомендуемые в частности СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹, оперируют усредненными показателями, добавляя в расчеты некоторые коэффициенты, значения которых зачастую определяются проектировщиками на основе личного опыта. Предлагаемая модель позволяет описать систему АГФ нефтеналивного терминала не арифметическими зависимостями, а в виде системы взаимодействующих объектов и процессов. Модель основана на методе дискретно-событийного моделирования и реализует следующие основные понятия, связанные с ним:

- *дискретные события* — модель представляет собой последовательность отдельных дискретов времени, в рамках которых происходят некоторые события или выполняются процессы;
- *процессы* — элементы модели, имитирующие временные задержки, необходимые для выполнения каких-либо действий (например, слив автоцистерны на эстакаде);
- *ресурсы* — элементы модели, имитирующие объекты, используемые для выполнения процессов (например, сливные эстакады);
- *генераторы заявок* — элементы модели, создающие заявки, которые необходимо обработать для успешного выполнения некоторого процесса (например, прибытия автомобилей с цистернами).

Дискретно-событийное моделирование является подвидом имитационного моделирования. В отечественной и зарубежной научной литературе широко освещены вопросы имитационного моделирования транспортных систем. Выполним анализ исследований, связанных с этой темой, для определения нерешенных задач и выделения основных используемых методов.

В исследовании [1] рассмотрена дискретно-событийная модель контейнерного терминала, разработанная на основе электронных таблиц с использованием макросов. Данная модель позволяет имитировать основные технологические контейнерного терминала: железнодорожный грузовой фронт, морской грузовой фронт и склад. Модель представляет собой относительно простой в применении инструмент, не требующий наличия специализированного ПО для моделирования. Разработанная модель позволяет более точно оценивать пропускную способность контейнерных терминалов, учитывая взаимосвязь технологических зон.

В статье [2] рассмотрено применение имитационного моделирования для повышения точности расчета вместимости складов навалочных грузов. Имитационное моделирование позволяет

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 с.

учесть стохастичность судозаходов, колебания грузопотока и избежать избыточных запасов технологических ресурсов. Основными факторами влияния в модели являются неравномерность прибытия судов, объемы судовых партий, годовой грузопоток и коммерческие задержки. Результаты моделирования показали, что средний запас груза на складе зависит в первую очередь от размера грузопотока и вместимости судов.

В исследовании [3] рассматривается применение имитационного моделирования для оценки сценариев развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла (МТУ). Целью исследования является оптимизация параметров транспортной инфраструктуры для обеспечения устойчивой работы при возрастающем вагонопотоке, включая расчет мощности объектов и времени обработки заявок (поездов, судов). В качестве инструмента моделирования выбрана специализированная среда разработки AnyLogic. В модели выполнено разделение объектов МТУ на *постоянные* (станции, пути) и *переменные устройства* (погрузочная техника, бригады) с учетом случайных факторов, влияющих на время обработки заявок. В рамках оценки текущего грузопотока модель подтвердила, что МТУ справляется с 59 поездами в сутки, но при этом объекты (например, часть веток ж.-д. путей) работают на пределе с коэффициентом загрузки до 0,86. По оценкам авторов, при увеличении потока до 70 поездов в сутки система становится неэффективной: коэффициенты загрузки критически растут до 0,96 в порту Ванино, что требует модернизации инфраструктуры.

В некоторых работах, например [4, 5], предложены имитационные модели не самих транспортных и перегрузочных процессов, а процессов управления и взаимодействия заинтересованных сторон. Такие модели представляют особый интерес, поскольку находятся на стыке технических и технологических аспектов транспортных процессов, с одной стороны, и коммерческих аспектов этих процессов, с другой.

Авторы исследования [6] используют имитационное моделирование для решения проблемы простоя танкеров и возникающего в связи с этим демереджа. При этом отмечается, что длительное время ожидания танкеров на терминалах наливных грузов после отправки уведомления о готовности приводит к значительному увеличению расходов всех заинтересованных сторон. Снижение простоев является критически важным для операционной эффективности терминала. В модели учтены следующие факторы: зависимость от типа груза и размера судна, погодные условия, линейные ограничения (невозможность одновременной обработки одного типа груза на нескольких причалах).

Авторы исследования [7] описывают инфраструктурную проблему морских портов Бразилии, в частности ограниченную пропускную способность и недостаточную межмодальную интеграцию, что приводит к заторам и снижению эффективности грузовых операций. Отсутствие синхронизации прибытия грузовиков создает пиковые нагрузки и простои, увеличивая логистические издержки. Авторы предлагают модель интеграции порта с хинтерлендом («тыловой» территорией, связанной с портом наземными видами транспорта) на основе двух ключевых элементов: технологий и алгоритмического управления потоками. В качестве технологий в исследовании рассматривается использование радиочастотных меток, камер с компьютерным зрением и биометрии для ускорения обработки грузовиков на пропускных пунктах. Разработанная авторами модель основана на гибридном подходе (дискретно-событийное и микросимуляционное моделирование). Приведено обоснование того, что внедрение этой модели совместно с технологиями отслеживания перемещения грузов по терминалу позволило снизить среднюю длину очередей на 78–99 % в пяти крупных портах Бразилии. Ряд исследований [8–10] объединены темой моделирования контейнерных терминалов. Данные работы посвящены разным аспектам моделирования, начиная от оптимизации схемы планировки автоматизированных терминалов, до разработки системы поддержки операционных решений на основе имитационного моделирования.

Как видно из анализа современной литературы по теме данного исследования, в большинстве публикаций приведено описание моделей контейнерных терминалов. Таким образом, имитационное моделирование контейнерных терминалов является популярной темой исследований, поскольку перегрузка контейнеров (как и генеральных грузов) требует высокого уровня оптимизации процессов для достижения их высокой эффективности. Отсутствие оптимизированных перегрузочных

процессов на контейнерном терминале более остро влияет на снижение его доходности, чем, например, на навалочных или нефтеналивных терминалах. Однако это не означает, что потребность в оптимизации перегрузочных процессов на последних отсутствует.

Модель, предлагаемая в данном исследовании, выполнена в виде отдельного файла с кодом на языке программирования Python с использованием открытой библиотеки SimPy предназначенной для целей имитационного и дискретно-событийного моделирования. Использование языка программирования Python и его библиотек позволяет избежать зависимости от специализированного проприетарного программного обеспечения, например, такого как AnyLogic, Arena, Simul8 и др. Компилятор языка программирования Python и многие его библиотеки, включая SimPy, распространяются бесплатно и имеют открытый исходный код, что является их существенным преимуществом. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры дискретно-событийной модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Имя переменной в модели	Описание
Общее время разгрузки цистерны на эстакаде	t_o	мин	SERVICE_TIME	Время, затрачиваемое на слив груза на эстакаде и на вспомогательные операции с автоцистернами
Средний период прибытия автомобилей	$T_{a/м}$	мин	MEAN_ARRIVAL_TIME	Временной интервал между двумя последовательными прибытиями автомобилей на терминал
Количество сливных эстакад	$N_{a.эст}$	ед.	N_POSTS	Количество сливных эстакад для автомобилей. На одной эстакаде может одновременно сливаться одна автоцистерна
Период моделирования	T	мин	SIM_PERIOD	Период моделирования в минутах. Принят 1 мес = 43290 мин

Четыре переменные, указанные в табл. 1, воспринимаются моделью как константы. Их значения должны быть напрямую введены пользователем. Для определения значений предлагается воспользоваться более удобной и наглядной формой электронных таблиц.

Обычно среднее время разгрузки автомобиля на сливной эстакаде и период времени между прибытием автомобилей не известны заранее. Они определяются на основе других исходных данных, передаваемых инвестором / заказчиком проектной организации. Среди этих исходных данных обычно указываются:

- расчетный месячный грузооборот $Q_{мес}$, тыс. м³ / мес.;
- расчетная грузоподъемность одной цистерны а/м или автомобильной цистерны, V , м³;
- производительность слива на сливной эстакаде P , м³ / ч;
- время вспомогательных операций с автоцистернами на эстакаде $t_{всп}$, мин.

Если значения приведенных величин известны, то можно определить параметры модели на основе следующих формул:

$$t_o = V / P \cdot 60 + t_{всп}; \quad (1)$$

$$T_{a/м} = 60 / N_{a/м/ч}; \quad (2)$$

$$N_{a/м/ч} = Q_{мес} \cdot 1000 / V / 30,5 / 24. \quad (3)$$

Для моделирования неравномерности прибытия автомобилей на терминал используется экспоненциальное распределение. Для генерации значений интервалов времени прибытия используется функция *random.exponential(interval)* библиотеки NumPy, где в качестве аргумента *interval* подставлено значение параметра модели MEAN_ARRIVAL_TIME (средний интервал прибытия автоцистерн в минутах).

Результаты (Results)

Выполнено пять прогонов модели с исходными данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные, использованные в прогонах модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетный месячный грузооборот	$Q_{\text{мес}}$	тыс. м ³ / мес.	500
Расчетная грузоподъемность одной цистерны а/м	V	м ³	40
Производительность слива	P	м ³ / ч	300
Время слива цистерны	$t_{\text{сл}}$	мин	8
Время вспомогательных операций	$t_{\text{всп}}$	мин	3
Общее время разгрузки цистерны	t_o	мин	11
Расчетное количество а/м в мес.	$N_{\text{а/м/мес}}$	ед. / мес	12500
Расчетное количество а/м в сут	$N_{\text{а/м/сут}}$	ед. / сут	410
Расчетное количество а/м в ч	$N_{\text{ам/ч}}$	ед. / ч	18
Средний период прибытия а/м	$T_{\text{ам}}$	мин	3,33

Между прогонами варьируется параметр N_{POSTS} , количество сливных эстакад — 1–5 ед. Определение оптимального значения этого параметра является основной целью моделирования.

Значения остальных параметров моделирования принимаются на основе исходных данных и расчетов по формулам (1)–(3):

- общее время разгрузки автоцистерны, $\text{SERVICE_TIME} = 11$ мин;
- средний период прибытия автоцистерн, $\text{MEAN_ARRIVAL_TIME} = 3,33$ мин;
- период моделирования, $\text{SIM_PERIOD} = 43290$ мин.

При количестве эстакад $N_{\text{а.эст}} = 1-3$ очередь автомобилей на слив растет неограниченно. Это означает, что такого количества эстакад недостаточно для того, чтобы справиться с потоком автомобилей, прибывающих на терминал для разгрузки. Графики длины очередей для рассматриваемых трех случаев, полученные на основе моделирования, представлены на рис. 2.

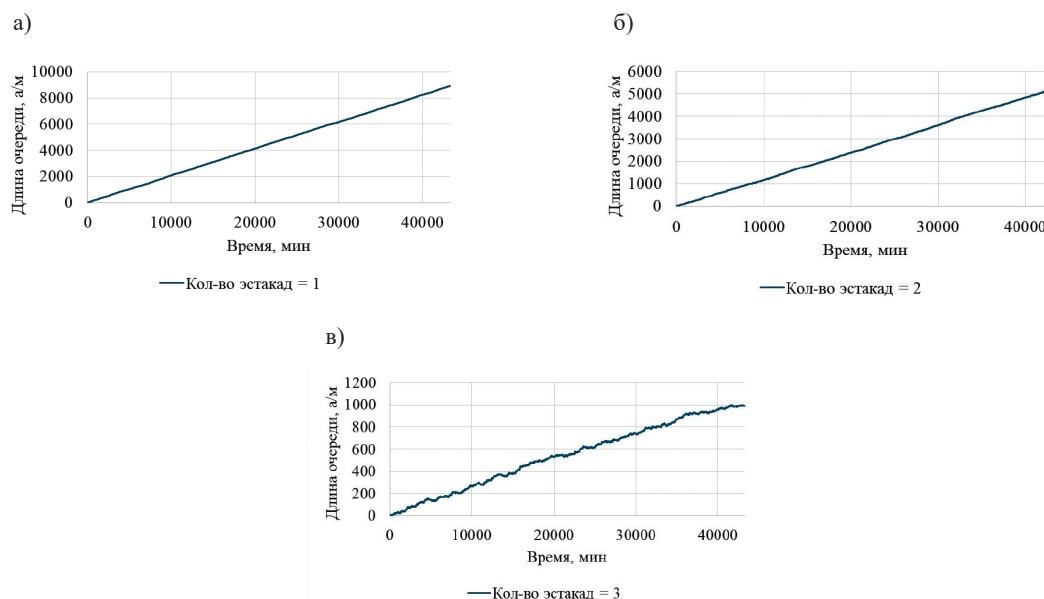


Рис. 2. Результаты моделирования длины очереди автомобилей:

а — при одной сливной эстакаде; б — при двух эстакадах; в — при трех эстакадах

Средние значения длины очереди автомобилей для этих случаев составляют:

- одна эстакада — средняя длина очереди 4458 автомобилей;
- две эстакады — средняя длина очереди 2606 автомобилей;
- три эстакады — средняя длина очереди 538 автомобилей.

При количестве эстакад $N_{\text{а.эст}} = 4$ или 5 очередь автомобилей на слив не демонстрирует неограниченного роста. В отличие от трех рассматриваемых вариантов при количестве эстакад, равном четырем и пяти, наблюдаются периоды увеличения и уменьшения количества автомобилей в очереди на разгрузку. Это свидетельствует о стабильности системы и ее способности справиться с заданным грузопотоком. Результаты моделирования для случаев, когда количество эстакад равно четырем и пяти, представлены на рис. 3.

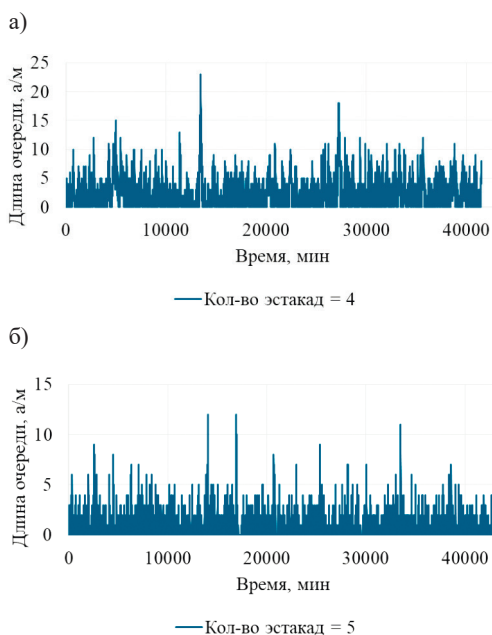


Рис. 3. Результаты моделирования длины очереди автомобилей:
а — при четырех сливных эстакадах; б — при пяти эстакадах

Графики изменения длины очереди автомобилей на слив для всех рассмотренных вариантов приведены на рис. 4.

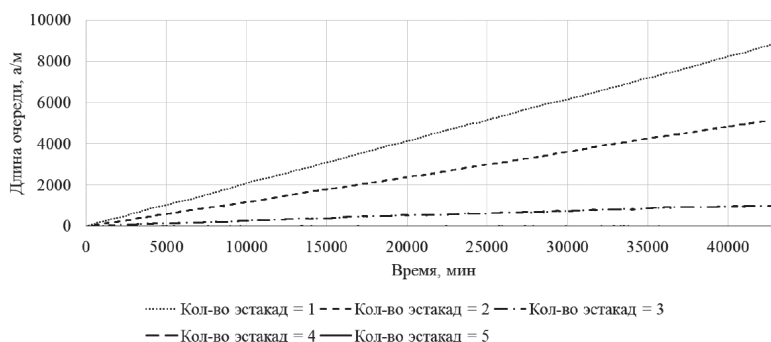


Рис. 4. Динамика изменения длины очереди в течение прогона модели

Помимо длины очереди для прогонов с четырьмя и пятью эстакадами обработаны данные по времени ожидания в очереди. Средние или Полученные средние значения этих показателей составляют:

- четыре эстакады — средняя длина очереди 2,5 автомобилей, среднее время ожидания 5,7 мин;
- пять эстакад — средняя длина очереди 0,6 автомобилей, среднее время ожидания 0,9 мин.

Гистограммы распределения времени ожидания в очереди для случаев с четырьмя и пятью эстакадами приведены на рис. 5.

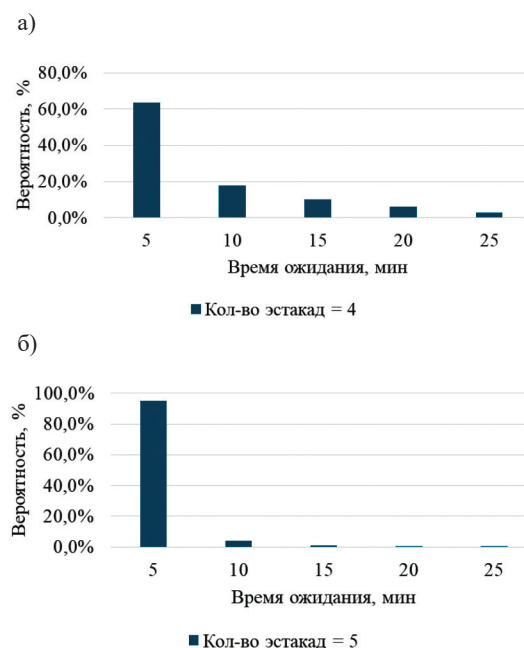


Рис. 5. Распределение времени ожидания автомобилей в очереди на слив:
а — при четырех сливных эстакадах; б — при пяти эстакадах

Сбор значений по времени ожидания в очереди выполняется для прогонов со всеми рассматриваемыми вариантами количества эстакад на терминале. Однако обработка этих значений для случаев с одной, двумя и тремя эстакадами является бессмысленной, поскольку при неограниченном увеличении длины очереди время ожидания также увеличивается неограниченно.

Обсуждение (Discussion)

Из рис. 2 видно, что с увеличением количества сливных эстакад очередь автомобилей снижается: при одной эстакаде неограниченная очередь автомобилей достигает почти 9000 автомобилей за 1 мес. моделирования, при двух эстакадах — около 5200 автомобилей за 1 месяц, при трех эстакадах — меньше 1000 автомобилей. Это особенно хорошо видно на рис. 4, где совмещены графики длины очереди автомобилей для всех рассмотренных вариантов количества эстакад. На этом рисунке графики изменения длин очередей автомобилей при количестве эстакад, равном четырем и пяти, почти совпадают с горизонтальной осью графика при масштабировании.

Средние длины очередей в случаях с одной, двумя и тремя эстакадами равны около или примерно 4500, 2600 и 540 автомобилей соответственно. Все три значения не являются реалистичными с точки зрения оперативной деятельности реально существующих (или проектируемых) терминалов. Эти показатели свидетельствуют о том, что система с таким количеством сливных эстакад для разгрузки автоцистерн принципиально не способна справиться с заданным в примере грузопотоком. Вместе с тем значения длин очередей при количестве эстакад, равном четырем и пяти, составляют 2,5 и 0,6 автомобиля в среднем соответственно, что вполне отвечает разумным ожиданиям от работы терминала. Таким образом, на основе результатов моделирования длин очередей можно сделать вывод о нецелесообразности дальнейшего рассмотрения вариантов с одной, двумя или тремя сливными эстакадами. При заданных исходных параметрах такое количество эстакад будет в любом случае недостаточным.

Варианты с количеством эстакад, равным четырем и пяти, отличаются не только средними длинами очередей, но и средним временем ожидания автомобилей — около 6 мин и мин соответственно. Из всех приведенных результатов можно сделать вывод о необходимости и достаточности

четырёх сливных эстакад для автомобилей на рассматриваемом нефтеналивном терминале. Средняя длина очереди 2,5 автомобиля и среднее время ожидания в ней около 6 мин являются приемлемыми значениями для обработки заданного грузопотока. При пяти сливных эстакадах средняя длина очереди составляет менее одного автомобиля, а среднее время ожидания в ней — менее 1 мин. Это свидетельствует о том, что на терминале почти не будет наблюдаться очередей в любой момент времени. В данном случае можно предположить, что строительство и введение в эксплуатацию пятой сливной эстакады является целесообразным для повышения качества обслуживания грузопотока, но не является обязательным для его обработки. В случае увеличения грузопотока рекомендуется провести повторное моделирование с обновленными исходными данными.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сформирован метод определения потребного количества сливных постов на разгрузочной эстакаде для автотранспорта наливного терминала. Предлагаемый метод базируется на использовании разработанной модели АГФ нефтеналивного терминала. Дискретно-событийная модель АГФ терминала нефтепродуктов разработана с использованием инструментов, находящихся в открытом доступе и с открытым исходным кодом: язык программирования Python, библиотеки SimPy и NumPy.
2. Модель является достаточно простым в применении инструментом, позволяющим быстро и эффективно оценить потребность в количестве сливных эстакад для автомобилей на нефтеналивном терминале.
3. Собранные и проанализированные данные по результатам моделирования показывают работоспособность и адекватность разработанной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. — EDN TRJAZE.
2. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости склада навалочных грузов морского порта с помощью имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 3. — С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89. — EDN EKRTZA.
3. Нечипорук М. В. Имитационное моделирование развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла / М. В. Нечипорук, В. А. Анисимов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 3. — С. 73–88. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-73-88. — EDN GCPKZY.
4. Шаповалова М. А. Имитационное моделирование системы взаимоотношений участников транспортно-логистического процесса на морском грузовом терминале / М. А. Шаповалова, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 336–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345. — EDN NILVAS.
5. Рожко А. И. Концептуальная структура системы управления транспортно-логистическим проектом на основе имитационного моделирования / А. И. Рожко, А. А. Ханова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2022. — № 1. — С. 60–71. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-1-60-71. — EDN LKZXZT.
6. Özkan E. D. A simulation model for evaluating the cargo transfer alternatives in liquid cargo terminals / E. D. Özkan, U. U. Koçer, S. Nas, Ö. İşlek, E. Tüzgen, A. Doğan // SIMULATION. — 2023. — Vol. 99. — Is. 1. — Pp. 23–39. DOI: 10.1177/00375497221107938.
7. Frazzon E. M. Smart port-hinterland integration: conceptual proposal and simulation-based analysis in Brazilian ports / E. M. Frazzon, J. M. Constante, Y. Triska, J. V. D. S. Albuquerque, J. { }. Martinez-Moya, L. D. S. Silva, A. M. Valente // International Journal of Integrated Supply Management. — 2019. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 334–352. DOI: 10.1504/IJISM.2019.103197.

8. Li X. Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives / X. Li, Y. Peng, J. Huang, W. Wang, X. Song // *Ocean & Coastal Management*. — 2021. — Vol. 213. — Pp. 105882. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105882.

9. Park K. A Predictive Discrete Event Simulation for Predicting Operation Times in Container Terminal / K. Park, M. Kim, H. Bae // *IEEE Access*. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 58801–58822. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3389961.

10. Kastner M. Integrated Simulation-Based Optimization of Operational Decisions at Container Terminals / M. Kastner, N. Nellen, A. Schwientek, C. Jahn // *Algorithms*. — 2021. — Vol. 14. — Is. 2. DOI: 10.3390/a14020042.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. “Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

2. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin, S. S. Val'kova and A. M. Sampiev. “Analysis of seaport bulk cargo warehouse capacity by using simulation modeling.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2022): 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.

3. Nechiporuk, M. V. and V. A. Anisimov. “Simulation modeling of Vanino-Sovgavan multimodal transport node development.” *Bulletin Of Scientific Research Results* 3 (2022): 73–88. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-73-88.

4. Shapovalova, M. A. and A. D. Semenov. “Simulation modeling of the system of relations between the participants of the transport and logistics process at the sea cargo terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo I Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 336–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345.

5. Rozhko, A. I. and A. A. Khanova. “Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 1 (2022): 60–71. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-1-60-71.

6. Özkan, E. D., A. Doğan, et al. “A simulation model for evaluating the cargo transfer alternatives in liquid cargo terminals.” *SIMULATION* 99.1 (2023): 23–39. DOI: 10.1177/00375497221107938.

7. Frazzon, E. M., A. M. Valente, et al. “Smart port-hinterland integration: conceptual proposal and simulation-based analysis in Brazilian ports.” *International Journal of Integrated Supply Management* 12.4 (2019): 334–352. DOI: 10.1504/IJISM.2019.103197.

8. Li, X., X. Song, et al. “Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives.” *Ocean & Coastal Management* 213 (2021): 105882. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105882.

9. Park, K., M. Kim and H. Bae. “A Predictive Discrete Event Simulation for Predicting Operation Times in Container Terminal.” *IEEE Access* 12 (2024): 58801–58822. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3389961.

10. Kastner, M., N. Nellen, A. Schwientek and C. Jahn. “Integrated Simulation-Based Optimization of Operational Decisions at Container Terminals.” *Algorithms* 14.2 (2021). DOI: 10.3390/a14020042.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Хватов Григорий Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: Gregorykhvatov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —
Grand Ph D. in Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Khvatov, Grigoriy M. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Gregorykhvatov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 июля 2025 г.
Received: July 16, 2025