

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412

OPTIMIZATION OF OIL TANKERS HANDLING AT EXPORT OIL TERMINALS

A. V. Galin, G. M. Khvatov

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

The problem of optimizing the process of loading a tanker with oil products is examined in the paper. A common oil terminal layout is briefly described. The handling time for all scheduled vessels (minimization of this indicator is required) and the total time of vessels in queue (minimization is also required) are selected as optimality criteria. It is noted that this problem is interconnected with the problem of berth allocation, known in the international scientific literature as the berth allocation problem (BAP). The current state of the BAP is considered, and the development of this problem is analyzed. It is noted that research on this topic mainly focuses on container terminals and, to a lesser extent, on terminals specialized for bulk cargo. The number of BAP studies for oil terminals is not large. The task of developing a spreadsheet-based mathematical model, which would make it possible to compare berth allocation options at an oil terminal and select the optimal one, is set in the paper. The main variables of the model, their relationships, accepted assumptions and scenarios are described. Simulation results are presented and they clearly demonstrate the difference between the conditional option of the complete absence of dispatching at the terminal and the option of rational dispatching, i. e. rational distribution of vessels among berths. It is noted that even with an insignificant difference in the moment of completing the handling of all scheduled vessels, there is a significant difference between the total duration of vessel downtime. Conclusions and main possible directions for further research on this topic are formulated.

Keywords: berth allocation, oil tanker handling time, oil terminals, cargo handling, mathematical modelling, spreadsheets, rational dispatching.

For citation:

Galina, Aleksandr V., and Grigoriy M. Khvatov. "Optimization of oil tankers handling at export oil terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 403–412. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412.

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОГРУЗКИ НЕФТЕНАЛИВНЫХ ГРУЗОВ НА ТАНКЕРНОМ ФЛОТЕ

А. В. Галин, Г. М. Хватов

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

В настоящей статье рассмотрена задача оптимизации процесса загрузки танкера нефтеналивными грузами. Приведено краткое описание широко распространенной конфигурации нефтеналивных терминалов. В качестве критериев оптимальности выбраны такие параметры, как время завершения грузовых операций со всеми запланированными судами (необходима минимизация этого показателя) и суммарное время судов в очереди на обработку (также необходима минимизация). Отмечается, что рассматриваемая в работе задача взаимосвязана с задачей назначения причалов судам, известной в международной научной литературе, как Berth Allocation Problem. Исследовано текущее состояние проблемы Berth Allocation Problem и выполнен анализ ее разработанности. Отмечается, что исследования по данной теме в основном сфокусированы на контейнерных терминалах и в меньшей степени на терминалах, специализированных для навалочных грузов, а также, что количество исследований задачи Berth Allocation Problem для нефтеналивных терминалов невелико. В статье ставится задача разработки математической модели на основе средств работы с электронными таблицами, которая позволит сравнивать варианты назначения причалов для судов нефтеналивного терминала, выбирая оптимальный. Описаны основные переменные модели, их взаимосвязь, принятые допущения и сценарии, на основе которых выполнено сравнение вариантов назначения причалов для танкеров. Приведены результаты

моделирования, наглядно демонстрирующие разницу между условным вариантом полного отсутствия диспетчеризации на терминале и вариантом рациональной диспетчеризации, т. е. рационального распределения судов по причалам. Отмечается, что даже при незначительной разнице в сроках окончания обработки всех запланированных судов имеется существенная разница между суммарной продолжительностью простоев судов в ожидании погрузки. Сформулированы выводы и основные возможные направления дальнейших исследований по данной теме.

Ключевые слова: назначение причалов, время стоянки танкера, нефтеналивные терминалы, грузовые операции, математическое моделирование, электронные таблицы, рациональная диспетчеризация.

Для цитирования:

Галин А. В. Оптимизация погрузки нефтеналивных грузов на танкерном флоте / А. В. Галин, Г. М. Хватов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 403–412. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412.

Введение (Introduction)

Морские терминалы по перегрузке нефти и нефтепродуктов являются одним из ключевых звеньев в транспортной цепи при реализации сырья и могут быть разделены на три зоны:

- зону приема груза: железнодорожный грузовой фронт и / или автомобильный грузовой фронт (АГФ);
- зону накопления судовых партий и временного хранения грузов (емкостной парк терминала);
- зону отгрузки нефтепродуктов на суда: морской грузовой фронт, представленный одним или несколькими причалами для перегрузки погрузки нефтепродуктов в суда.

Указанные зоны связаны между собой технологическим трубопроводом, по которому осуществляется перемещение нефтепродуктов при помощи насосов, установленных в насосных станциях. В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации работы морского грузового фронта терминала, оснащенного причалами для перегрузки нефти. Научная новизна исследования, изложенного в настоящей статье, заключается в применении методов математического моделирования для сравнения вариантов назначения причалов заходящим в нефтеналивной порт танкерам, что может быть полезным при принятии решений о назначении того или иного причала для обработки некоторого судна.

Целью исследования является разработка простого и доступного прототипа на основе средств работы с электронными таблицами, который может быть использован для оптимизации процессов погрузки нефтеналивных грузов в танкеры на причалах морских терминалов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

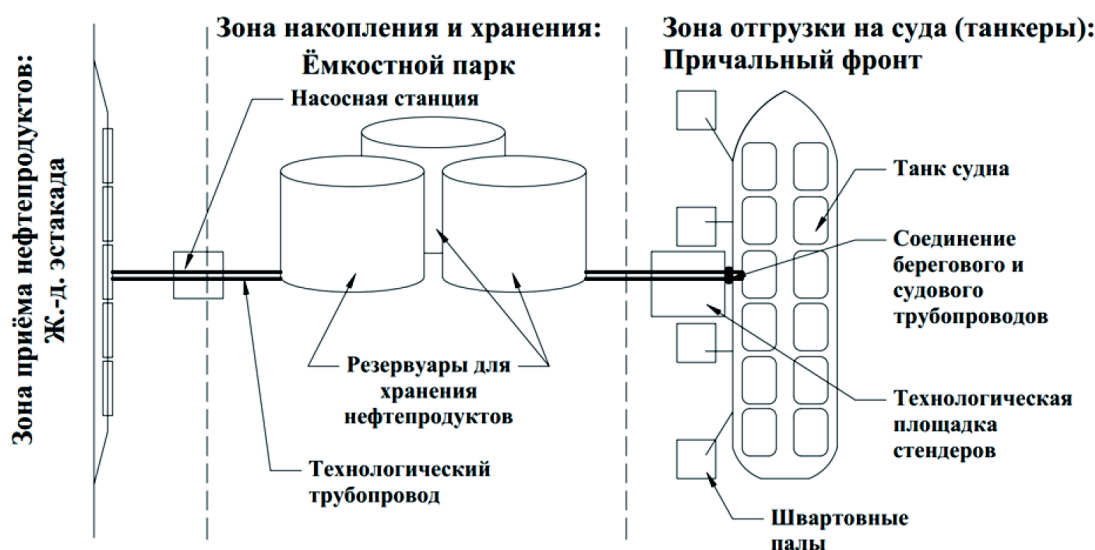
Причалы как гидротехнические сооружения проектируются с учетом различных нагрузок и заданных типоразмеров судов. Причалы для перегрузки нефти сооружаются в виде пирсов, расположенных параллельно, перпендикулярно или под углом к берегу [1].

Технологическое проектирование причалов нефти и нефтепродуктов регламентировано СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹. Данный нормативный документ устанавливает, в частности, рекомендуемые проектные нормы времени стоянки танкеров по операциям слива и налива. Кроме того, в прил. Г данного документа регламентировано рекомендуемое значение коэффициента занятости причала для терминалов, специализированных для наливных грузов на уровне 0,45–0,55.

В предлагаемом исследовании рассматривается задача оптимизации погрузки нефтепродуктов в морские танкеры на причалах нефтеналивных терминалов, условная схема одного из которых приведена на рисунке. Критерием оптимальности выбрана продолжительность обработки группы танкеров за определенный промежуток времени (в данном случае за месяц). Чем продолжительность меньше, тем более эффективна работа системы причалов на погрузку нефтепродук-

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

тов в танкеры. Кроме того, рассматривается суммарное время ожидания судов в очереди на рейде, возникающее при том или ином распределении судов между причалами. Время ожидания судов также должно быть минимизировано.



Условная схема нефтеналивного терминала
Schematic diagram of the oil terminal

Поставленная задача достаточно близка к задаче оптимизации назначения причалов для судов, известной в международной научной литературе под названием Berth Allocation Problem (BAP). Первые исследования по данной теме начались еще в 1990-е гг. и были представлены рядом статей, касающихся назначения причалов для судов на контейнерных терминалах [2], [3]. С момента первых публикаций до настоящего времени формулировка задачи, методы ее решения, а также классификация подвидов существенно усложнились. Авторы исследования [4] приводят библиометрический анализ исследований задачи назначения причалов (BAP), выделяя в его рамках следующие подвиды задачи по критерию времени прибытия судов в порт: статическую, динамическую, стохастическую, цикличную, со строгим расписанием.

По критерию времени обслуживания судов в порту выделяют следующие подвиды:

- с фиксированным временем обслуживания;
- с зависимостью времени обслуживания от размещения судов;
- с учетом назначения причальных перегружателей (Quay Cranes (QC));
- с учетом планирования работы причальных перегружателей QC;
- стохастическая.

По способу представления причальной стенки выделяют задачу с причальной стенкой с дискретными причалами, с непрерывной причальной стенкой, с гибридной причальной стенкой (часть причалов дискретная, часть — непрерывная).

Предложенная в исследовании [4] классификация демонстрирует сохранившуюся специфику задачи BAP. В первую очередь рассматривается задача назначения причалов на специализированных контейнерных терминалах, так как большинство исследований задачи BAP касается именно этого типа морских терминалов. Многие современные исследования рассматривают задачу BAP в совокупности с задачей планирования работы причальных перегружателей [5], [6]. Некоторые исследования учитывают особенности работы конкретных портов. Например, авторы статьи [7] учитывают ограничения, накладываемые подходным каналом к морскому порту. Существуют работы, касающиеся проблемы назначения причалов также для специализированных терминалов навалочных грузов. Авторы статьи [8] описывают математические модели для задачи BAP на навалочных терминалах.

Наиболее близкая задача к определенной в настоящем исследовании описана в статье [9]. В этом исследовании рассматривается задача назначения причалов для танкеров на экспортном нефтеналивном терминале с применением смешанного целочисленного программирования (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) для поиска оптимальных решений.

Модель, предлагаемая в настоящем исследовании, выполнена в виде расчетного листа электронной таблицы с поддержкой макросов. Описание модели приведено в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели обработки танкерного флота у причалов терминала

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Описание
Производительность налива	P	м ³ / ч	Производительность налива основного объема судовой партии продуктов
Пониженная производительность в начале и конце налива	$P_{нк}$	м ³ / ч	Пониженная производительность в начале и конце налива продуктов в танкер для безопасности проведения погрузочных операций
Объем в начале и конце налива	$V_{нк}$	м ³	Объем, для которого снижается производительность в начале и конце налива продуктов в танкер
Средняя плотность продуктов	ρ	т / м ³	Условная средняя плотность наливаемых нефтепродуктов
Уникальный идентификатор судозахода	i	–	Уникальное значение, присваиваемое каждому судозаходу в модели для его идентификации
Дедвейт i -го судна	DWT_i	т	Дедвейт судна i . В модели рассчитывается на основе стенированной загрузки судна и служит для определения продолжительности вспомогательных операций танкера, не совмещаемых с грузовыми.
Загрузка i -го судна	D_i	м ³	Судовая партия нефтепродуктов для судна i . Генерируется случайным образом в заданном диапазоне
Продолжительность грузовых операций	$t_{гр.i}$	ч	Чистое время налива продуктов в танкер. Зависит от судовой партии D_i и производительности налива танкера ($P, P_{нк}, V_{нк}$)
Продолжительность технологических операций	$t_{тх.i}$	ч	Время операций шлангования танкера, замеров и подсчетов груза в танкере.
Продолжительность вспомогательных операций	$t_{всп.i}$	ч	Время швартовых операций, досмотров, комиссий и т. д. Зависит от дедвейта судна (DWT_i) и регламентируется нормами
Всего продолжительность занятости причала танкером	$t_{ст.i}$	ч	Суммарное время грузовых, технологических и вспомогательных операций, т. е. время, в течение которого причал порта будет занят обработкой танкера
Момент времени захода i -го судна в порт	τ_i	ч	Момент времени, в который судно i совершает судозаход в порт
Порядковый номер судна в потоке судов, заходящих в порт	k	–	Номер судна по порядку в общем потоке судов, заходящих в порт
Номер причала	j	–	Номер причала, входящего в причальный фронт терминала
Порядковый номер судна в очереди обработки судов у причала j	m	–	Номер судна по порядку внутри очереди обработки судов у причала j . Назначается после распределения судов по причалам
Продолжительность ожидания i -го судна	$t_{ож.mj}$	ч	Длительность ожидания судна m в очереди на обработку у причала j
Время освобождения причала j от обработки судна	$\tau_{осв.mj}$	ч	Момент времени, когда причал j освобождается от обработки судна m в очереди к этому причалу

Работу модели можно разделить на четыре основных блока:

- 1-й блок — генерация параметров судозаходов;
- 2-й блок — сортировка судозаходов по времени захода в порт (τ_i);
- 3-й блок — назначение причалов для заходящих в порт судов;
- 4-й блок — определение времени ожидания судов в очереди и времени освобождения причалов от обработки судов.

Генерация судозаходов осуществляется в виде случайной генерации судовой партии i -го судозахода в установленном диапазоне D_i , на основе которого определяется дедвейт судна (для дальнейшего определения времени вспомогательных операций) по формуле

$$DWT_i = [(D_i \rho) / 0,9]$$

Округление дедвейта происходит в большую сторону до тысяч тонн. 0,9 — коэффициент перехода от грузоподъемности судна, выраженной в тоннах, к дедвейту. На основе полученного значения DWT_i подбирается значение $t_{вспi}$ с учетом рекомендаций СП 350.1326000.2018 (прил. Ц табл. 3). Время вспомогательных операций усредняется между значениями для налива танкеров в весенне-летний и осенне-зимний периоды времени.

Чистое время грузовых операций с судном определяется по формуле

$$t_{гр.i} = (D_i - 2V_{нк}) / P + 2V_{нк} / P_{нк}.$$

Таким образом, учитывается необходимость снижения производительности налива продуктов в суда в начале и конце погрузки, для безопасности осуществления грузовых операций.

Продолжительность технологических операций (шлангование, замеры, подсчет груза) устанавливается оператором модели и в работе реального терминала должна определяться на основе статистики по таймшитах обработки судов. В приведенных далее примерах расчета на модели время технологических операций принято $t_{тхi} = 4,7$ ч.

Промежуток времени, в течение которого происходят судозаходы танкеров в порт, выбран в модели равным 1 мес. или 732 ч. Для каждого судозахода i генерируется случайным образом τ_i — момент времени, когда судно заходит в порт и готово к обслуживанию у причалов. Значения этого параметра находятся в диапазоне $0 < \tau_i \leq 732$.

Суда, заходящие в порт, сортируются на основе времени их захода τ_i от меньшего к большему значению. Таким образом, устанавливается хронологическая последовательность сгенерированных судозаходов. После сортировки каждому судозаходу присваивается порядковый номер в потоке судов, заходящих в порт (k).

В модели принят ряд допущений. В модели отсутствуют повторяющиеся заходы одних и тех же судов, несмотря на то, что реальности такие судозаходы обычно встречаются. Производительность налива грузов (P) задается одним значением для всех причалов. В реальности производительность налива продуктов определяется мощностью насосов, расположенных в насосных станциях терминала. Трубопровод разных причалов может быть подключен к разным насосным станциям с разной мощностью насосов. Кроме того, производительность налива может отличаться для разных грузов, а сами грузы могут быть разделены на группы, перекачиваемые по разному технологическому трубопроводу. В модели рассматривается один условный груз, наливаемый во все танкеры, при этом любое судно любых размеров может быть поставлено к любому причалу. Время прибытия судна в порт и время готовности судна к постановке к причалам с точки зрения модели представлены одной и той же переменной τ_i . В реальности судно, прибывшее на якорную стоянку порта, может быть не сразу готово к постановке к причалу. Соответствующая информация подается капитаном судна в виде нотиса о готовности.

После сортировки судозаходов по времени готовности судов к постановке к причалу и присваиванию порядкового номера каждому судозаходу назначается причал для каждого заходящего судна. Назначение причала судну является вопросом диспетчеризации входящего потока судов.

В реальной деятельности терминала этим вопросом занимаются специалисты диспетчерской службы оператора терминала по согласованию со службой управления движением судов (СУДС) порта. Решение о назначении данного причала судну осуществляется с учетом многих факторов. В приведенном далее примере выполнено сравнение двух сценариев назначения причалов судам: «случайного» — по сути, представляющего собой полное отсутствие диспетчеризации и случайное назначение причалов судам, и «рационального» — подбора причалов для судов исходя из информации о количестве причалов, их занятости и времени подхода судов.

Пример результата первых трех шагов модели (генерации параметров судозаходов, сортировки судозаходов и назначения причалов судам) приведен в табл. 2. В модели принято наличие трех причалов на терминале.

Таблица 2

**Пример генерации,
сортировки судозаходов и назначения причалов судам**

Номер судна	Дедвейт судна	Загрузка судна	Продолжительность операций			Продолжительность занятости причала танкером	Момент времени захода в порт	Порядковый номер судозахода	Номер назначаемого причала
			грузовых	технологических	вспомогательных				
i	$DWT_i, \text{ т}$	$D_i, \text{ м}^3$	$t_{гр}, \text{ ч}$	$t_{тх}, \text{ ч}$	$t_{всп}, \text{ ч}$	$t_{ст}, \text{ ч}$	$\tau_i, \text{ ч}$	k	j
24	38000	33814	17,3	4,7	8,75	30,7	2	1	1
14	53000	46854	23,8	4,7	10,5	39,0	15	2	2
32	25000	21790	11,3	4,7	7,75	23,7	16	3	3
31	47000	41443	21,1	4,7	8,75	34,5	21	4	1

На основе номера назначаемого причала j формируются таблицы очереди судов на обслуживание для каждого причала в отдельности. Каждому судну, попадающему в очередь обработки к причалу j , назначается порядковый номер m . Таким образом, каждый судозаход в модели можно идентифицировать по значению одной из трех переменных:

- уникальному идентификационному номеру судозахода i , присваиваемому при генерации судозаходов;
- порядковому номеру судозахода k , присваиваемому после сортировки судозаходов по времени прибытия в порт (также уникален для каждого судна).
- порядковому номеру судозахода внутри очереди к каждому из причалов m , присваиваемому после назначения причалов судам и являющемуся уникальным только в рамках очереди к конкретному причалу.

Для каждого судозахода, обрабатываемого на причале j , рассчитывается продолжительность ожидания судна в очереди на обработку $t_{ожmj}$ и момент времени освобождения причала от обработки судна $\tau_{освmj}$. Продолжительность ожидания судна с порядковым номером m у причала j определяется по следующей формуле:

$$t_{ожmj} = \max(\tau_{осв(m-1)j} - \tau_m; 0). \quad (1)$$

Если судно с порядковым номером m готово встать к причалу j в момент времени после того, как судно с порядковым номером $(m-1)$ уже закончило обработку у причала j , то выражение $\tau_{осв(m-1)j} - \tau_m$ будет отрицательным, что в реальности невозможно. В реальности это означает, что судну с порядковым номером m нет необходимости ждать, оно сразу может встать к причалу, т. е. его время ожидания равно нулю, что отображено в правой части формулы (1) после точки с запятой. Если же судно $(m-1)$ еще не закончило обработку у причала j , к моменту, когда судно m готово встать к причалу, то продолжительность ожидания судна m будет являться разницей

между моментом освобождения причала от обработки судна $(m-1)$ и моментом готовности судна m к постановке к причалу: $\tau_{\text{осв}(m-1)j} - \tau_m$.

Момент освобождения причала j от обработки судна m определяется на основе информации о моменте готовности судна m к постановке к причалу (τ_m), времени ожидания судна m в очереди к причалу j ($t_{\text{ож}mj}$) и времени, необходимом для обработки судна m у причала j ($t_{\text{ст}mj}$):

$$\tau_{\text{осв}mj} = \tau_m + t_{\text{ож}mj} + t_{\text{ст}mj}. \quad (2)$$

Поскольку любое судно может быть идентифицировано по его порядковому номеру внутри очереди к причалу m , на основе которого может быть определен общий порядковый номер судозахода k и уникальный идентификационный номер судозахода i , продолжительность обработки судна у причала $t_{\text{ст}mj}$ может быть определена как соответствующая ей величина $t_{\text{ст}i}$ для подстановки в формулу (2). В табл. 3 приведен пример определения описанных величин для одного из причалов модели.

Таблица 3

Пример очереди судов в модели

Причал 1						
m	i	k	τ_m	$t_{\text{ст}mj}$	$t_{\text{ож}mj}$	$\tau_{\text{осв}mj}$
1	24	1	2	30,7	0,0	32,7
2	31	4	21	34,5	11,7	67,2
3	40	7	81	35,1	0,0	116,1

Далее для всех судозаходов у всех причалов определяется суммарное ожидания судов в очереди на обработку:

$$t_{\text{ож}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M t_{\text{ож}mj}. \quad (3)$$

Также определяется момент окончания обработки всех сгенерированных судов во всех очередях ко всем причалам:

$$T = \max(\tau_{\text{осв}mj}). \quad (4)$$

Величина T , определяемая по формуле (4), является *критерием оптимальности предлагаемого распределения танкеров по причалам* и должна быть минимальной. Помимо нее размер величины $t_{\text{ож}}$, определяемой по формуле (3), также свидетельствует о качестве предоставляемых портом услуг: чем выше значение этой переменной, тем дольше суда вынуждены простаивать в ожидании постановки к причалу. Эта величина также требует минимизации.

Результаты

Выполнено три повтора генерации судозаходов, имеющих следующие значения параметров:

- количество генерируемых судозаходов — 50 ед.;
- продолжительность моделируемого периода — 1 мес. (732 ч);
- количество причалов нефтеналивного терминала — 3 ед.;
- производительность налива — 2000 м³/ч;
- производительность начальных и конечных промежутков налива — 500 м³/ч;
- объем налива с пониженной производительностью в начале и конце налива — 125 м³;
- загрузка судна 10 000–50 000 м³;
- средняя плотность нефтепродуктов — 1,0 т/м³.

Получены следующие результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Значение варианта генерации		
			1	2	3
Загрузка максимального судна	$\max(D_i)$	м ³	49844	48772	49741
Время обработки максимального судна	$t_{ст\ i}$	ч	40,5	39,9	40,4
Загрузка последнего по прибытию судна	D_{50}	м ³	48605	29653	44823
Момент прибытия последнего судна	τ_{50}	ч	731,0	708,0	705,0
Время обработки последнего судна	$t_{ст50}$	ч	39,8	28,6	36,2
Теоретически оптимальное значение момента окончания обработки судов	$T_{теор}$	ч	770,8	736,6	741,2
Момент окончания обработки судов по «случайному» сценарию	$T_{случ}$	ч	803,1	783,1	784,2
Момент окончания обработки судов по «рациональному» сценарию	$T_{рац}$	ч	780,8	763,9	741,2
Превышение теоретического оптимума по «случайному» сценарию	$T_{случ} / T_{теор}$	—	104,2 %	106,3 %	105,8 %
Превышение теоретического оптимума по «рациональному» сценарию	$T_{рац} / T_{теор}$	—	101,3 %	103,7 %	100 %
Суммарная продолжительность ожидания судов в очереди по «случайному» сценарию	$t_{ож.случ}$	ч	1101,6	1330,9	946,2
Суммарная продолжительность ожидания судов в очереди по «рациональному» сценарию	$t_{ож.рац}$	ч	224,0	219,9	244,9
Отношение суммарного ожидания судов по «случайному» сценарию к суммарному ожиданию судов по «рациональному» сценарию	$t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$	—	492 %	605 %	386 %

Для оценки оптимальности результатов введена величина $T_{теор}$ — теоретическое оптимальное значение момента окончания обработки судов. Значение этой величины складывается из значения момента времени прибытия последнего по порядку судна ($k = 50$) и времени его обработки ($t_{ст50}$):

$$T_{теор} = \tau_{50} + t_{ст50}.$$

Значения момента окончания обслуживания судов по сценарию «случайный» ($T_{случ}$) и сценарию «рациональный» ($T_{рац}$) сравниваются со значением этого теоретического минимума. Чем ближе полученные отношения к 100 %, тем рациональнее полученное решение. Кроме того, сравниваются величины продолжительности стоянки судов в очереди на обслуживание ($t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$). Поскольку теоретически оптимальное значение времени ожидания судов в очереди на обслуживание равно нулю, сравнивать эти значения с ним нет смысла. Чем ниже значение выражения $t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$, тем более рациональным является найденное решение.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты показывают, что при случайном назначении причалов момент окончания обработки судов превышает теоретический минимум на 4–6 %, в то время как при рациональном назначении причалов эта величина составляет 0–4 %. Согласно варианту 3 генерации судозаходов (см. табл. 4), модель смогла найти оптимальный вариант назначения причалов судам с точки зрения момента завершения их обслуживания (отношение $T_{рац} / T_{теор} = 100 \%$, т. е. момент окончания обработки судов по «рациональному» сценарию совпадает с теоретическим минимумом). При этом важно отметить, что данный показатель не является единственным критерием оптимальности.

В модели могут быть сгенерированы ситуации, когда большое количество судов заходит в порт в начале моделируемого периода, а самый последний судозаход сильно отстоит от остальных по времени и происходит в конце моделируемого периода. В таком случае вероятность того, что $T_{\text{рац}} / T_{\text{теор}} = 100 \%$ и даже $T_{\text{случ}} / T_{\text{теор}} = 100 \%$, достаточно велика. Однако между случайным и рациональным назначением причалов судам и рациональным будет также наблюдаться существенная разница в суммарном времени ожидания судов, поскольку нерациональное распределение их по причалам вызывает существенные простои. Это подтверждается результатами моделирования: отношение $t_{\text{ож.случ}} / t_{\text{ож.рац}}$ достигает 300–600 %, т. е. суммарное время ожидания судов при случайном назначении причалов в 3–6 раз превышает тот же показатель при рациональном распределении судов.

Выводы (Symmaru)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель назначения причалов заходящим в порт судам, которая учитывает специфику нефтеналивных терминалов. Модель позволяет быстро оценить влияние принимаемого решения о назначении судну данного причала. Доступен ручной ввод назначаемых причалов судам. Из результатов моделирования, приведенных в табл. 4, видно, что основная задача данного исследования достигнута: модель является эффективным инструментом сравнения различных сценариев назначения причалов судам, имея при этом модель имеет ряд допущений.
2. Информация о моментах захода судов генерируется в модели предварительно, до моделирования, т. е. модель является *статической*. Чтобы сделать модель динамической, информация о судозаходах должна быть неизвестна до начала моделирования, что является более приближенной к реальности ситуацией.
3. Причалы в модели идентичны по своим характеристикам друг другу: производительности перекачки нефтепродуктов на различных причалах в реальности могут отличаться, а также могут существовать ограничения на постановку судов определённого размера (и дедвейта) к конкретным причалам.
4. Добавление алгоритма оптимизации позволит не только сравнивать различные варианты (сценарии) назначения причалов судам, но и автоматически оптимизировать распределение судов по причалам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко А. В. Технологические процессы морских нефтеналивных терминалов: монография / А. В. Кириченко, О. А. Изотов, В. А. Гай, С. В. Латухов, В. А. Никитин; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2015. — 192 с.
2. Lai K. K. A study of container berth allocation / K. K. Lai, K. Shih // Journal of advanced transportation. — 1992. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 45–60. DOI: 10.1002/atr.5670260105.
3. Imai A. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia / A. Imai, K. I. Nagaiwa, C. W. Tat // Journal of Advanced transportation. — 1997. — Vol. 31. — Is. 1. — Pp. 75–94. DOI: 10.1002/atr.5670310107.
4. Dragovic B. A comprehensive bibliometric analysis and assessment of high-impact research on the berth allocation problem / B. Dragovic, N. Zrnic, A. Dragovic, E. Tzannatos, M. A. Dulebenets // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 300. — Pp. 117163. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117163.
5. Rodrigues F. Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey / F. Rodrigues, A. Agra // European Journal of Operational Research. — 2022. — Vol. 303. — Is. 2. — Pp. 501–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.12.040.
6. Tang M. Discretization-strategy-based solution for berth allocation and quay crane assignment problem / M. Tang, B. Ji, X. Fang, S. S. Yu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 495. DOI: 10.3390/jmse10040495.
7. Corry P. The berth allocation problem with channel restrictions / P. Corry, C. Bierwirth // Transportation Science. — 2019. — Vol. 53. — No. 3. — Pp. 708–727. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

8. Ernst A. T. Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals / A. T. Ernst, C. Oğuz, G. Singh, G. Taherkhani // *Journal of Scheduling*. — 2017. — Vol. 20. — Pp. 459–473. DOI: 10.1007/s10951-017-0510-8.

9. Alfares H. K. Berth Allocation for Loading Tankers at an Oil Export Terminal / H. K. Alfares // *Applied Optimization in the Petroleum Industry*. — Cham: Springer International Publishing, 2023. — Pp. 237–259. DOI: 10.1007/978-3-031-24166-6_10.

REFERENCES

1. Kirichenko, A.V., O. A. Izotov, V. A. Gai, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Tekhnologicheskie protsessy morskikh neftenalivnykh terminalov*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2015.

2. Lai, K. K., and Katharine Shih. “A study of container berth allocation.” *Journal of advanced transportation* 26.1 (1992): 45–60. DOI: 10.1002/atr.5670260105.

3. Imai, Akio, Ken'ichiro Nagaiwa, and Chan Weng Tat. “Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia.” *Journal of Advanced transportation* 31.1 (1997): 75–94. DOI: 10.1002/atr.5670310107.

4. Dragović, Branislav, Nenad Zrnić, Andro Dragović, Ernestos Tzannatos, and Maxim A. Dulebenets. “A comprehensive bibliometric analysis and assessment of high-impact research on the berth allocation problem.” *Ocean Engineering* 300 (2024): 117163. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117163.

5. Rodrigues, Filipe, and Agostinho Agra. “Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey.” *European Journal of Operational Research* 303.2 (2022): 501–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.12.040.

6. Tang, Min, Bin Ji, Xiaoping Fang, and Samson S. Yu. “Discretization-strategy-based solution for berth allocation and quay crane assignment problem.” *Journal of Marine Science and Engineering* 10.4 (2022): 495. DOI: 10.3390/jmse10040495.

7. Corry, Paul, and Christian Bierwirth. “The berth allocation problem with channel restrictions.” *Transportation Science* 53.3 (2019): 708–727. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

8. Ernst, Andreas T., Ceyda Oğuz, Gaurav Singh, and Gita Taherkhani. “Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals.” *Journal of Scheduling* 20 (2017): 459–473. DOI: 10.1007/s10951-017-0510-8.

9. Alfares, Hesham K. “Berth Allocation for Loading Tankers at an Oil Export Terminal.” *Applied Optimization in the Petroleum Industry*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 237–259. DOI: 10.1007/978-3-031-24166-6_10.

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. —
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: 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 22 апреля 2024 г.

Received: April 22, 2024.