

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КРАНОВ STS КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКОГО ПОРТА

А.Л. Кузнецов, А.Д. Семенов (Санкт-Петербург)

Введение

Существует несколько подходов к расчету необходимого количества причальных кранов контейнерного терминала [1, 2]. Один из подходов заключается в делении годового грузопотока терминала на годовую производительность крана с учетом требуемого уровня занятости причала. Другой подход заключается в согласовании количества кранов с характеристиками расчетного судна [3]. Вместе с тем использование этих методов может привести к выбору избыточного количества кранов, что увеличивает как капитальные, так и операционные расходы проектируемого терминала.

Слишком большое количество кранов на причальной линии приведет к снижению их эффективности, поскольку два крана, работающие рядом, не могут обрабатывать контейнеры в двух соседних бейх (рис. 1).

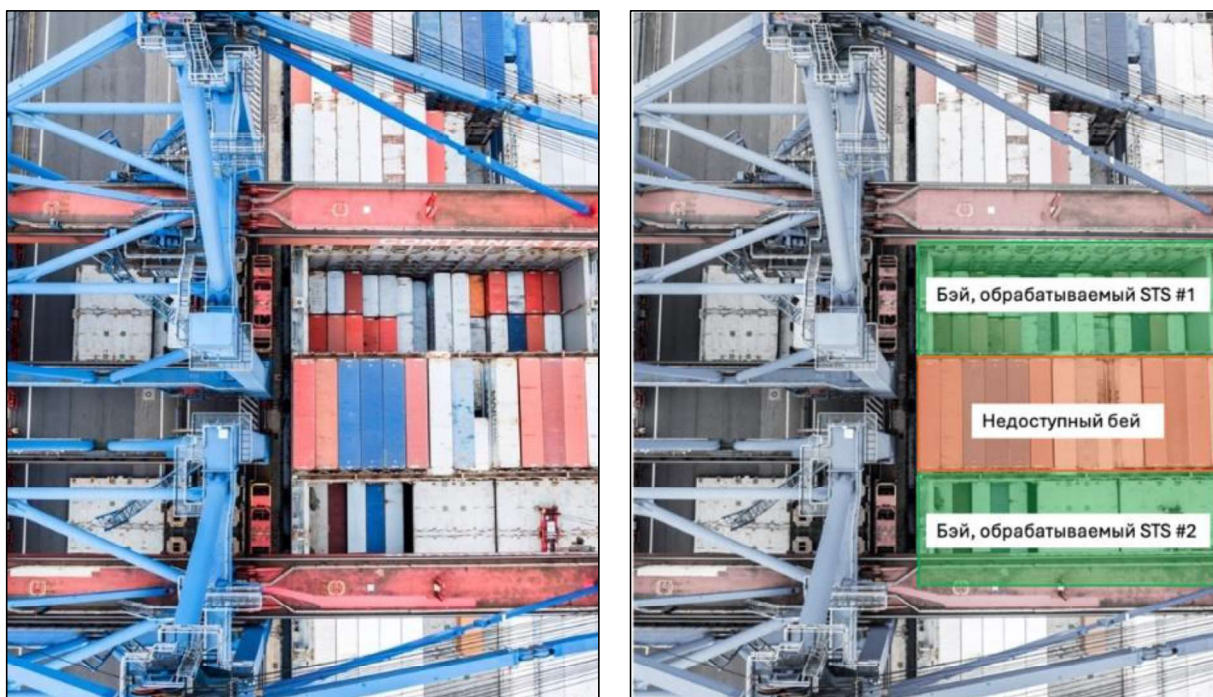


Рис. 1. Пример максимально близкого расположения кранов STS (вид сверху) [4, 5]

Анализ данных терминалов показывает, что средняя длина причальной линии для одного крана составляет 95 м (рис. 2).

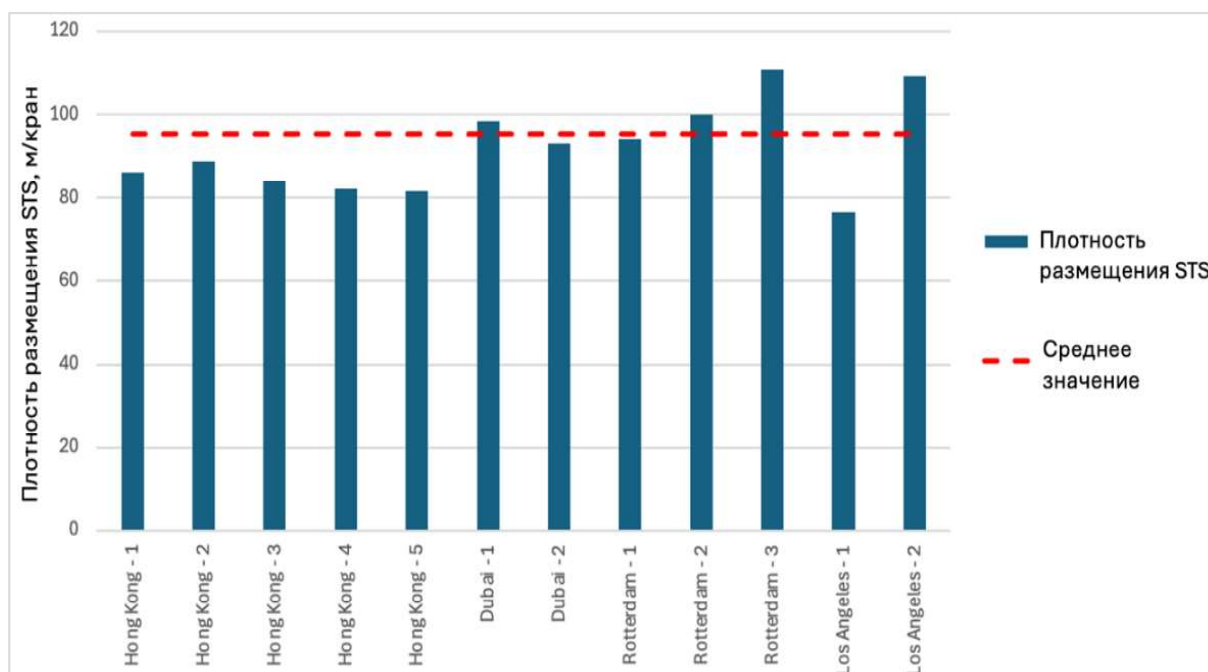


Рис. 2. Расстояние от причала до одного крана на разных терминалах [6]

Как следствие, выбор количества кранов должен учитывать длину причальной линии. В то же время, учитывая вариации размеров судов, нерегулярный характер судозаходов и их размеров (количество выгружаемых и погружаемых контейнеров), а также технологию выполнения грузовых операций, простой алгебраический подход не может адекватно отразить сложность операций по переброске грузов между портами и причалами.

Методы и материалы

Решение поставленной задачи требует определения основных ограничений, определяющих количество кранов, размещаемых на причале. Прежде всего, минимальное и максимальное количество кранов, которые могут быть размещены на судне, определяется допустимым расстоянием перемещения крана и количеством отсеков судна. Расстояние перемещения крана в основном определяется длиной электрического кабеля и расположением силовых разъемов. Поскольку эта длина может быть выбрана на этапе проектирования порта, минимальное количество кранов, которое может быть размещено на судне, составляет 1.

Максимальное количество кранов определяется следующим образом:

$$N = \left\lfloor \frac{B}{b_{sts}} \right\rfloor,$$

где B – количество бэй судна;

b_{sts} – минимальное количество бэй между двумя кранами (для кранов типа STS оно равно 2, а для порталых кранов – не менее 3).

Максимальное количество кранов STS, которые могут быть размещены на различных типах судов, представлено в табл. 1.

Таблица 1

Максимальное количество STS, которые могут быть размещены на судне [7]

#	Тип судна	Вместимость, TEU	Количество отсеков	Максимальное количество кранов STS
1	Small Feeder	1000	8	4
2	Feeder	2500	10	5
3	Panamax	4500	17	8
4	Port Panamax	6000	20	10
5	Post Panamax II	8500	23	11
6	VLCS	15 000	23	11
7	New Panamax	12 500	22	11
8	ULCS	21 000	24	12

Минимальное и максимальное количество кранов позволяет рассчитать теоретическое время обработки груза:

$$T_{handl} = \frac{V_{call}}{n \cdot P_{sts}},$$

где V_{call} – заход кораблей, TEU;

n – количество кранов;

P_{sts} – производительность STS, TEU/ч.

Зависимость между количеством кранов и временем обработки судна представлена на рис. 3.

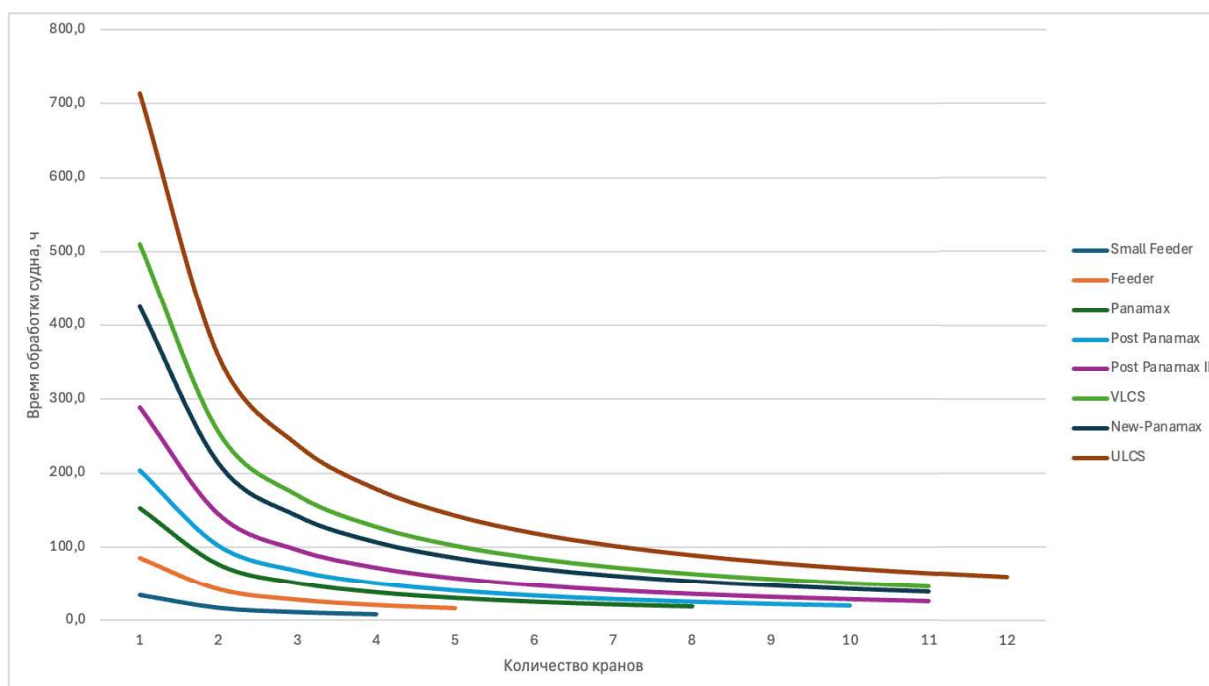


Рис. 3. Теоретическое время обработки груза

В то же время теоретическое время обработки судна не учитывает количество бэй, обслуживаемых краном. Поэтому рассчитанное время представляет собой идеализированную картину. Более глубокий подход заключается в рассмотрении размещения контейнеров на судне как массива (рис. 4).

	Bay																
Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1			13	13	13	13	13	13	13	13	13	8					
2	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8				
3	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8			
4	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8		
5	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	
6	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
7	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
8	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
9	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	
10	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8		
11	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8			
12	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8				
13			13	13	13	13	13	13	13	13	13	8					

Рис. 4. Пример представления контейнеров в виде массива

Элементы массива представляют количество контейнеров в определенном бэй и ряду. Этот массив распределяется между кранами, работающими на судне. Подмассивы представляют количество контейнеров, обслуживаемых краном. Пример такого распределения представлен на рис. 5.

	Bay																
Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1			13	13	13	13	13	13	13	13	13	8					
2	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8				
3	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8			
4	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8		
5	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	
6	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
7	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
8	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	8
9	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	
10	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8		
11	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8			
12	8	8	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8				
13			13	13	13	13	13	13	13	13	13	8					
Number of containers	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
	1704						2008						770				

Рис. 5. Пример разделения массива распределения контейнеров

Поскольку краны STS работают одновременно, время обработки судна определяется «самым медленным» краном STS – тем, которому необходимо разгрузить больше контейнеров. Следовательно, формулу следует изменить следующим образом:

$$T_{handl} = \max\{T_{handl}^i\} = \max\left\{V_{P_{sts}}^i\right\},$$

где V_{handl}^i – количество контейнеров, которые должен обслужить кран i .

Пример расчета времени обработки груза с использованием этого метода для судна класса «Panamax» представлен на рис. 6.

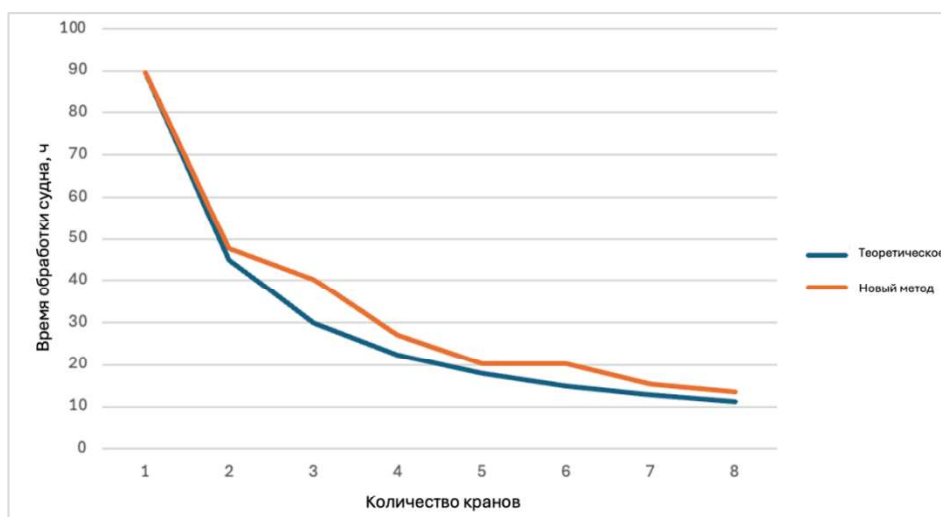


Рис. 6. Пример расчетного времени обработки груза

В то же время, такой подход не позволяет анализировать использование кранов на двух смежных причалах, технологию выгрузки контейнеров в трюмах, а также перемещение STS между бэй. В связи с этим, для анализа данной задачи разработана имитационная модель работы STS на причале морского порта.

Модель принимает в качестве входных данных количество портовых кранов и характеристики судов, включая количество бэй, рядов, ярусов и размер судозахода. Она имитирует работу портовых кранов по погрузке и разгрузке судов, осуществляющих судозаход на контейнерный терминал. Краны последовательно обрабатывают бэй каждого судна, учитывая при этом положение других кранов. Если кран не может получить доступ к следующему бэю, он ожидает, пока путь не освободится. Порядок погрузки и разгрузки генерируется случайно, чтобы отразить сложность реальных операций по обработке грузов.

Рабочий сектор каждого крана может быть ограничен расстоянием до точки подключения крана, что отражает реальные эксплуатационные ограничения. Модель также включает трехмерную анимацию, которую можно использовать для проверки алгоритма и представления результатов (рис. 7).

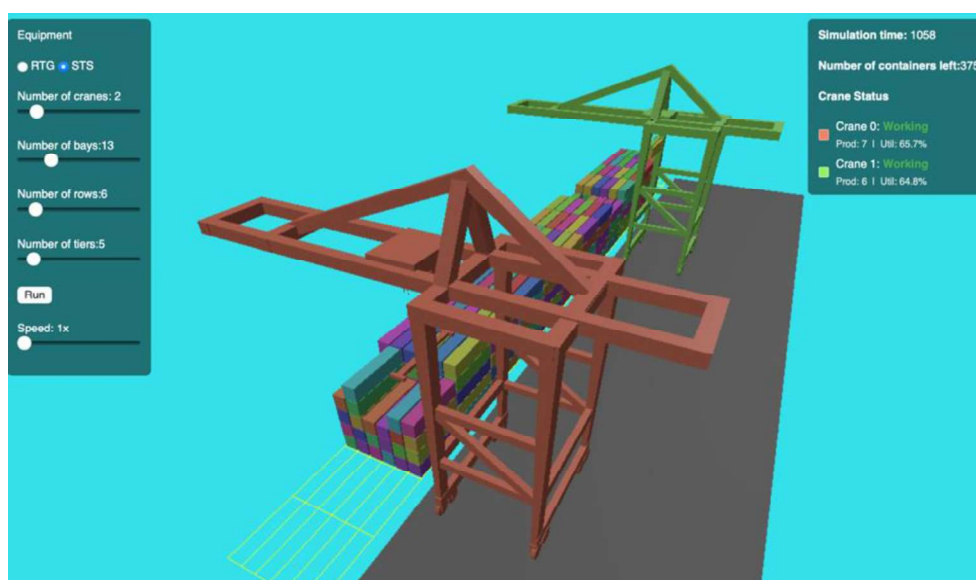


Рис. 7. Основной экран имитационной модели

Результаты

Модель позволяет рассчитать производительность причальных кранов, коэффициент использования и время обработки контейнеров. Приведенные ниже диаграммы иллюстрируют результаты моделирования работы двух причалов, обслуживающих до двух судов вместимостью 4334 TEU (рис. 8–10).

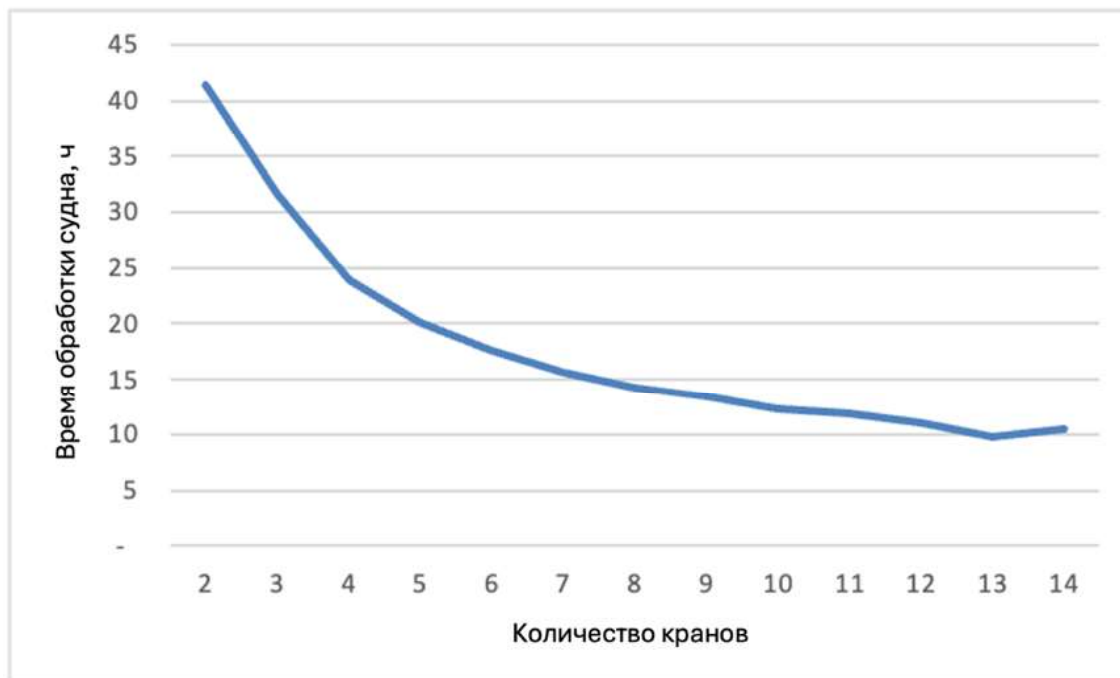


Рис. 8. Пример зависимости времени обработки судов в зависимости от количества кранов

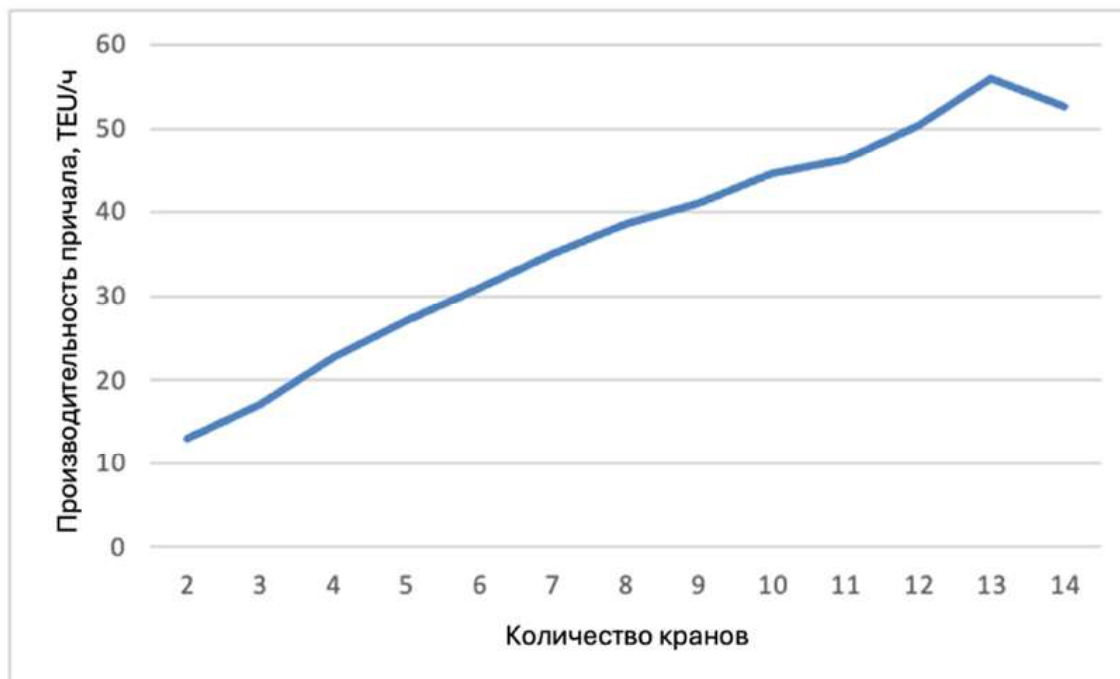


Рис. 9. Пример производительности причала в зависимости от количества кранов



Рис. 10. Пример изменения коэффициента использования портовых кранов в зависимости от количества кранов

Как видно из данных – при размещении слишком большого количества кранов на причальной линии производительность кранов снижается. Кроме того, размещение большого количества кранов на одной и той же причальной линии приводит к невозможности выполнения всех необходимых грузовых операций.

Заключение

Результаты показывают, что фактическая производительность кранов отличается от теоретических расчетов. При этом форма зависимостей схожа, аномалий не выявлено, что доказывает адекватность разработанной модели.

Описанный подход предоставляет специалистам по проектированию терминалов практичный инструмент для принятия решений о выборе количества кранов на причале на основании анализа возможных вариантов бэй-плана судна. Вместо того чтобы полагаться на алгебраические правила и выбирать избыточное количество кранов, проектировщики могут анализировать различное количество кранов и определять точку, в которой дополнительные краны снижают эффективность работы терминала.

Литература

1. UNCTAD. Port design. A handbook for developing countries, 1985, 227 p.
2. **Saanen Y., van Meel J., Verbraeck A.** The design and assessment of next generation automated container terminals //15th European Simulation Symposium. – 2003.
3. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов.
4. **Zrnić N., Hoffmann K.** Development of design of ship-to-shore container cranes: 1959–2004 //International Symposium on History of Machines and Mechanisms: Proceedings HMM2004. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2004. С. 229-242.
5. **Кузнецов А.Л., Давыденко Е.А.** Моделирование погрузо-разгрузочных работ на контейнерном терминале //Транспортное дело России. 2022. №. 2. С. 205-207.
6. Google Earth. URL: <https://earth.google.com/>.
7. **Theo Notteboom, Athanasios Pallis and Jean-Paul Rodrigue** (2026) Port Economics, Management and Policy, 2nd Edition, New York: Routledge, 734 pages / 232 illustrations. ISBN 9781032955339.