

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ МОРСКОЙ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛИНИЕЙ  
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**SOLUTION TO THE PROBLEM OF FORECASTING AND OPERATIONAL  
MANAGEMENT OF MARITIME CONTAINER LINES  
ON THE BASIS OF SIMULATION**

*Морские контейнерные перевозки грузов являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. Выбор типа линии для каждого конкретного направления перевозок определяется характером грузопотока. Для уменьшения недочетов при решении прогнозных задач работы судов на линии необходимо прибегнуть к помощи имитационного моделирования с учетом как детерминированных, так и вероятностных процессов, возникающих при операционной деятельности судов на линии. Если детерминированные процессы можно определить на основе статистики, то учесть вероятностные процессы достаточно сложно. В статье предлагается имитационная модель морской контейнерной линии на примере компании Fesco в Санкт-Петербурге (Россия), приводится математическая модель и предлагается использование модели «следования за лидером» для описания движения судов. Основная задача, решаемая при моделировании, – достижение оптимального баланса между движением судов и решение группы прогнозных вопросов при изменении состава судов на линии.*

*Sea container transportations of cargoes are the main and leading form in the system of transporting goods. Select the line type for each direction of traffic is determined by the nature of the traffic. To reduce the slightest flaws in solving predictive problems of the courts on-line, you need to enlist the help of simulation taking into account both deterministic and stochastic processes arising from operating activities of vessels on the line. If deterministic processes can be determined on the basis of statistics, it is possible to consider stochastic processes is quite difficult. The paper proposes a simulation model of the marine container lines, on the example of a company Fesco in Saint Petersburg (Russia), the mathematical model and proposes using the model of “follow the leader” to describe the motion of ships.*

*Ключевые слова: морская контейнерная линия, грузопоток, моделирование работы кораблей, дискретное моделирование, модель следования за лидером, расписание движения судов, фидерная морская линия, регулярная морская линия.*

*Key words: sea container line, the traffic modeling of the operation of ships, discrete modeling, the model – following the leader, vessel schedules, marine feeder line, regular container shipping line.*

---

**Введение**

Лучший способ избежать малейших недочетов при решении прогнозных задач работы судов на линии – прибегнуть к помощи имитационного моделирования. Применение имитационных моделей, в первую очередь, предназначено для решения задачи прогноза объемов грузоперевозок (TEU), задачи визуального моделирования движения судов, для внесения уточнения в расписание [1]. В случае выхода на рынок новой компании актуальна задача расчета необходимого количества судов для обеспечения требуемых грузоперевозок между портами. Актуальность применения имитационного моделирования работы контейнерных перевозок обоснована тем, что аналитические расчеты, не могут описать процесс со 100 % соответствием. Между тем, работа морской контейнерной линии представляет собой сложную систему, жизнедеятельность которой, определяется как достаточно четким расписанием, так и случай-

ными факторами (нарушение расписания прибытия судов – опоздание в рамках временного окна, ухудшение погодных условий, поломка судна). Имитационная модель описывает работу, принимая во внимание весь набор специфических условий, необходимых для выполнения отдельных операций с морской линией. [2] – [4]. Прогон модели годовой работы линии занимает минуты. Пользователь на модели выполняет так называемые сценарии «что – если» и в кратчайшие сроки осуществляет проверку нескольких вариантов функционирования работы контейнерной линии. При этом модель предоставляет не только конечный результат расчётов, но и позволяет наблюдать за движением судов, вводя в реальную базу данных данные о судах транспортной компании, а также за динамикой изменения показателей с течением времени. Для большей наглядности результаты моделирования представляются в графическом, табличном и текстовом виде. Виды моделирования, их классификация и особенности были приведены в [5], там же рассматривалась практическая задача определения необходимого количества кранов в зависимости от входного потока судов.

### **Вопросы выбора типа контейнерной линии для дальнейшего использования и реализации имитационной модели**

Сегодня более 92 % мировых грузоперевозок генеральных грузов (грузов, транспортируемых в упаковке) на основных направлениях осуществляется в контейнерах. Морские контейнерные перевозки грузов являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. Развитие мировой торговли, улучшение различных цепей поставок, формирование устойчивых территорий консолидации грузопотоков для портов приводило к появлению достаточного запаса грузов, чтобы организовать регулярное или линейное расписание движения судов.

Контейнерные морские перевозки образуют транспортную сеть. С общих позиций такая сеть характеризуется определенным набором инструментов управления движением потоков, она состоит из набора портов, связанных маршрутами движения по расписанию соответствующих транспортных судов.

Пример: схематичное представление организации работы контейнерных линий приведено на рис. 1 [6, С. 79]. В данном случае приведены линейное и трамповое судоходства.

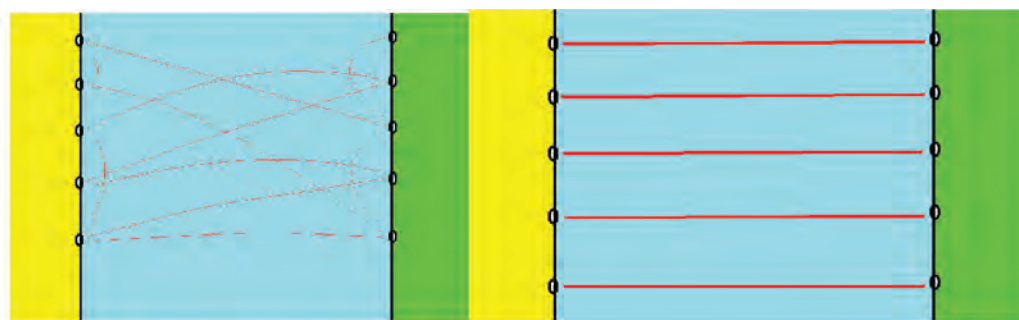


Рис. 1. Схематичное представление организации работы контейнерных линий

Наблюдается постоянный рост количества контейнерных судов, используемых для перевозки грузов. Это приводит к тому, что на достаточно длинных маршрутах контейнерных перевозок оправданным оказывается использование только крупных судов. Как следствие, для морской компании расписание движения судов связано с уменьшением частоты сервиса и, в результате, с некоторыми неудобствами для заказчика. На сегодняшний день можно сказать, что контейнерные перевозки стали клиентоориентированным бизнесом. Невозможность динамичного развития грузовой базы не позволяет в каждом порту по пути следования контейнеровоза организовать регулярное накопление грузов соответствующих размеров. Поэтому тенденция рационализации маршрутов приняла характер консолидации магистральных контейнерных линий, связывающих между собой порты и системы доставки грузов в эти порты морскими маршрутами. К примеру,

для перемещения груза между определенными портами могут использоваться специально созданные параллельные маршруты из нескольких линий, чтобы в совокупности поддержать требуемое расписание движения судов.

Расписание движения судов контейнерных линий предусматривает обслуживание заданного большого числа портов и минимальное транзитное время для основных грузопотоков за счет организации движения судов по нескольким определенным схемам, либо организации специализированных фидерных линий. Фидер – в морских контейнерных перевозках этим словом обозначают контейнерную линию, осуществляющую перевозку местного назначения внутри ограниченного водного бассейна. Многие крупные морские судоходные линии имеют свои собственные фидерные суда или используют заранее забронированные места на судах других перевозчиков. Фидерные перевозки особенно востребованы в мелководных регионах, где осадка больших океанских контейнеровозов просто не позволяет им подойти к причалу [7], [8].

Регулярные судовые линии отвечают основным требованиям по качеству морских транспортных услуг. Они позволяют транспортным компаниям максимально сократить резерв провозной способности контейнерных судов и оперативно регулировать движение судов на линии с учетом изменения обстановки в отдельных портах. Уточненное расписание может предусматривать замену одного судна другим с близкими характеристиками, введение в схему нового рейса или дополнительного порта, изменения дат прихода, либо отхода судов в отдельные порты [6], [9].

Любая судовая контейнерная линия характеризуется следующими переменными:

- номером;
- временем кругового рейса;
- количеством перевозок за навигацию (в случае особых географических условий);
- количеством работающих контейнерных судов;
- пунктами отправления и назначения;
- типом перевозимого груза;
- типами судов, образующих флот, и их загрузкой;
- расписанием движения судов;
- временем работы на контейнерной линии.

Коммерческие условия работы линий определяются необходимостью конкурировать с другими морскими транспортными компаниями. Для каждой отдельной линии разрабатывается своя система ставок [4], [6]. Примерно 75 % современного линейного судоходства приходится именно на контейнерные перевозки. На контейнерных линиях Европа – Восток используются сверхбольшие контейнеровозы вместимостью более 15000 TEU's. Поэтому использование таких судов привело к коренному изменению всей системы контейнерных линейных перевозок. Как следствие, эффективная эксплуатация сверхкрупных контейнеровозов требует максимального сокращения порожних плаваний. Такие контейнерные суда в каждом из обслуживаемых районов заходят только в крупные порты. Остальные перевозки осуществляются фидерными линиями, на которых работают собственные или арендуемые суда.

### **Аналитические данные по грузообороту и работе морских линий на Северо-Западе России**

Объем грузооборота морских портов России в январе 2015 г. составил 52,9 млн т, что на 12,2 % превышает аналогичный показатель 2014 г. Об этом сообщает пресс-служба Ассоциации морских торговых портов России. В портах Балтийского бассейна объем перевалки грузов увеличился до 19,1 млн т (+14,1 %), из них перегрузка сухогрузов составила 6,7 млн т (+8,6 %), наливных — 12,4 млн т (+17,3 %). Увеличился объем перевалки грузов в портах Усть-Луга до 7,0 млн т (+27,3 %), Приморск до 5,4 млн т (+15,9 %), Высоцк — до 1,3 млн т (+14,0 %), Калининград — до 1,2 млн т (+17,5 %). В то же время грузооборот Большого порта Санкт-Петербург снизился до 4,1 млн т (–4,2 %). Схема основных маршрутов работы Балтийского региона приведена на рис. 2. Оконная форма представлена из системы мониторинга движения судов [1].

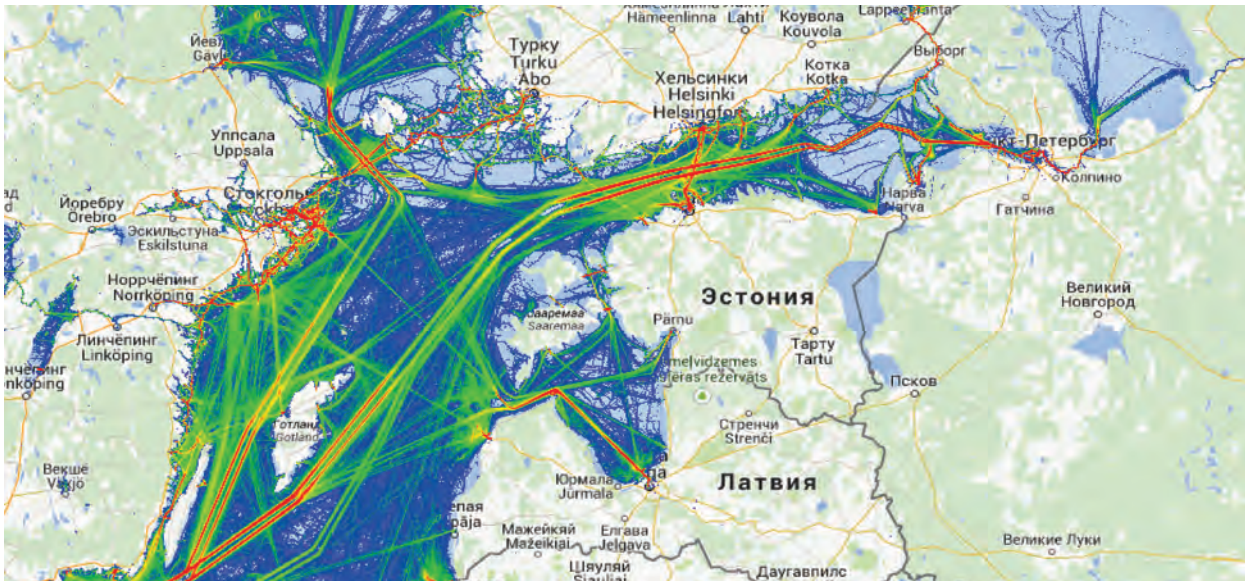


Рис. 2. Схема основных маршрутов работы Балтийского региона.  
Источник: <http://portnews.ru/news/194699/>

Известно что, ни один сверхкрупный контейнеровоз не заходит в порты Балтийского моря (России, стран Балтии). В Санкт-Петербург перевозят грузы в контейнерах около 15 океанских линий. Данные линии имеют в Санкт-Петербурге своих грузовых агентов, а четыре линии — свои представительства [10], [11].

### Описание математической модели

Эффективность работы контейнерной линии может быть достигнута, если порожние заходы судов будут сведены к минимуму и будет обеспечено наилучшее использование разных типов контейнерных судов по грузоподъемности. Для реализации поставленных задач необходимо определять структуру и размер имеющихся в компании судов. На стратегическом и тактическом уровне управления работой морской контейнерной можно выделить следующие задачи:

1. определение структуры и потребного размера контейнерных судов;
2. составление оптимальных маршрутов движения судов;
3. составление оптимального расписания движения судов.

Структурировать контейнерные суда руководитель компании может по любым из многочисленных характеристик судна, влияющих на экономический результат его работы, основные из которых: грузоподъемность (грузоподъемность), скорость движения, расход топлива, стоимость расходов, потребности в техническом обслуживании и ремонте и т.д. Однако у перевозчика растет доходная часть при увеличении такого параметра как грузоподъемность, и одновременно подвергаются изменениям в сторону увеличения затрат все остальные параметры. Для реализации задач оперативного управления, либо прогнозирования работы контейнерной линии предлагается ввести следующую схематичную классификацию судов по соответствующим классам с учетом вместимости контейнеров для перевозки (рис. 3).

На практике за основной критерий анализа принимают различные экономические показатели работы контейнерной линии. В качестве критерия оптимальности, с экономической точки зрения, может быть использована сумма всех расходов по флоту за время рейса судна.

На практике такая задача решается методом линейного программирования, методом потенциалов, симплекс-методом.

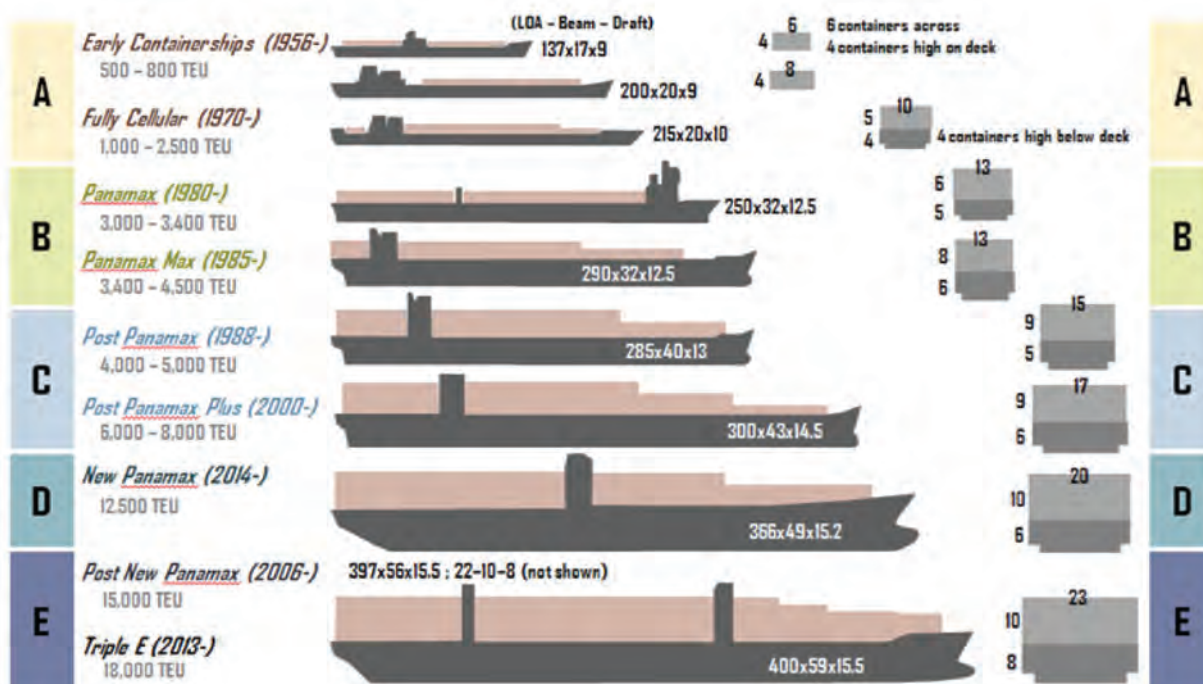


Рис. 3. Схематичная классификация судов для имитационной модели

Построение экономико-математической модели задачи минимизации можно представить в общем виде как

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i (i = \overline{1, m}); \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j (j = \overline{1, n}); \quad x_{ij} \geq 0, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}), \quad (2)$$

где  $x_{ij}$  — параметр управления, который отражает величину грузоместимости идущего в балласте судна из  $i$ -го порта с избытком груза в  $j$ -ый порт с его недостатком;  $W_{ij}$  — расстояние между портами  $i$  и  $j$ ;  $a_i$  — запасы груза в  $i$ -ом порту;  $b_j$  — необходимое количество груза в  $j$ -ом порту.

Можно задачу сформулировать следующим образом: количество груза, подаваемое на  $i$ -ый грузопоток должно быть равно количеству потребной грузовой вместимости, необходимой для освоения перевозок на заданном направлении. При этом целевая функция удовлетворяет следующим условиям:

- 1) расходы по флоту должны быть минимальными;
- 2) загрузка судов должна быть максимальной;
- 3) порожние пробеги и время на них должно быть сведено к минимуму.

Недостатком данной модели является множество ограничений, которые нужно задавать, а при изменении показателей одного судна выполнять пересчет снова. Гораздо практичнее использовать имитационные модели для исследования контейнерных линий. Визуализация модели движения судов может быть записана с помощью концепции модели «следования за лидером» (рис. 4) [12].



Рис. 4. Схематичное представление модели следования за лидером

На рис. 4  $N$  — номер судна работающего на контейнерной линии. Предполагается, что каждое судно согласует свою скорость со скоростью впереди идущего судна в соответствии с расписанием и схематичным представлением. Движение судна может быть описано в виде

$$\ddot{X}(t) = \frac{1}{\tau}(\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i+1}(t)), \quad (3)$$

где  $\tau$  — время согласования движения судов.

Данная модель предлагается авторами для реализации в имитационной модели.

### Алгоритм имитационной модели и исходные данные для реализации

Основной алгоритм реализации имитационной модели можно разделить на два этапа. Первый этап состоит из анализа статистической информации о типах судов и объемах перевозок и завершается формированием входных параметров для имитационной модели. Второй этап состоит из программной реализации и проработки механизма включения морской контейнерной линии в имитационную модель. Дополнительно в модели нужно учитывать следующие параметры:

- интенсивность движения судов в месяц из порта  $A$  в порт  $B$ ;
- интенсивность движения судов из порта  $B$  в порт  $A$ ;
- среднее время обслуживания (Порт 1);
- среднее время обслуживания (Порт 2).

Объектом исследования выбрана компания *Fesco (FESCO ESF)*. Контейнерные перевозки являются основой бизнеса группы *Fesco*. Компания осуществляет доставку контейнеров, используя интермодальные схемы, либо организует отдельно морские контейнерные перевозки и железнодорожные отправки. Наиболее важны транзитные коридоры и экспортно-импортные маршруты *Fesco* [10].

Фрагмент реального расписания движения судов компании *Fesco* с указанием, в качестве примера судна «Violetta», приведен на рис. 5. Судно стояло под разгрузку в порту Санкт-Петербург 22 февраля 2015 г.

Дата последнего обновления: 16.02.2015

ЛОКАЦИИ		СУДНО / РЕЙС									
		E.R. RIGA 15023	VIOLETTA 15024	RUNBORG 15025	VORONEZH V1501	E.R. VISBY 15027	VIONA 15028	JONNI RITSCHER 15029	E.R. RIGA 15031	VIOLETTA 15032	RUNBORG 15033
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ погрузка	ETS	Вс, 08.02.2015	Вт, 10.02.2015	Пт, 13.02.2015		Вс, 15.02.2015	Пн, 16.02.2015	Чт, 19.02.2015	Сб, 21.02.2015	Пн, 23.02.2015	Пт, 27.02.2015
	ETA			Ср, 18.02.2015				Ср, 25.02.2015	Пт, 27.02.2015		Ср, 04.03.2015
РОТТЕРДАМ разгрузка / погрузка	ETS			Чт, 19.02.2015	Пт, 13.02.2015			Чт, 26.02.2015	Вс, 01.03.2015		Чт, 05.03.2015

Рис. 5. Фрагмент расписания судозаходов фидерных линий *Fesco* в порт Санкт-Петербург

### Моделирование работы контейнерной линии

На основе входных данных создания интерфейса на ввод различных судов (как предлагается на рис. 3) и разработанного алгоритма была создана имитационная модель. Фрагмент имитационной модели, реализованной в среде Anylogic, представляющий движение судов, приведен на рис. 6. На рис. 6 представлены следующие объекты: 1 — (Source) генератор заявок; 2 — (Queue) очередь; 3 — (Conveyor) транспортный поток; 4 — (Delay) генератор задержек; 5 — (Sink) удаление заявок.

Генератор заявок создает заявки в соответствии с начальным расписанием. В данной имитационной модели заявками являются суда. Здесь используются пять типов судов в зависимо-

сти от грузовой вместимости. В модель внесена возможность реализации работы в двух направлениях. На каждый генератор поступают данные о количестве судов определенного типа, работающих на линии. Заявки образуют очередь. Очередь образует транспортный поток. При обработке судна в порту появляется задержка по времени, причем в систему можно внести как вероятность задержки, так и точные данные. В момент, когда судно прибывает в порт назначения, заявка в системе удаляется.

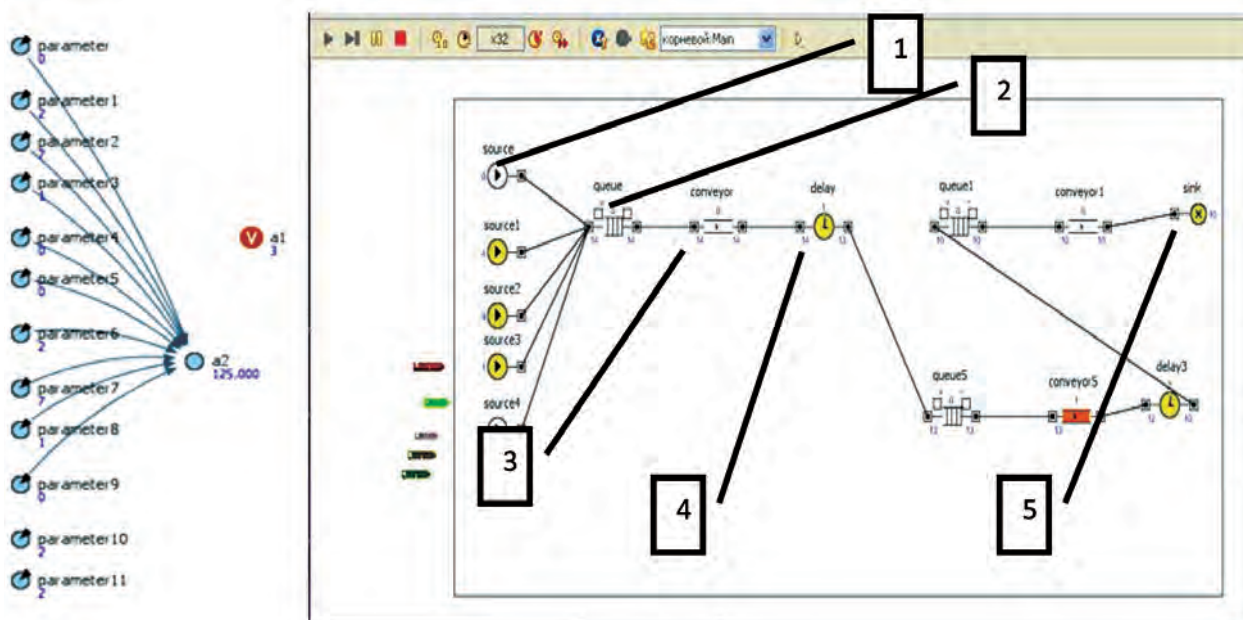


Рис. 6. Структура имитационной модели работы контейнерной линии

На основе имитационной модели можно строить различные прогнозные задачи. В модели реализована возможность добавления новых судов к уже работающим на линии (рис. 7).

Таблица 1

**Исходные данные для моделирования и результаты эксперимента**

Класс судов	Класс А 500–2500 TEU	Класс В 3000–4500 TEU	Класс С 4000–8000 TEU	Класс D 12500 TEU	Класс E 15000–18000 TEU	Расчетное количество судов	Расчетный грузопоток в TEU
Запуск 1				1		1	25000
Запуск 2			3	1		4	61000
Запуск 3		2	6	1		9	113000
Запуск 4			4	1		5	73000
Запуск 5			2	1		3	49000
Запуск 6		2	4	1		7	89000
Запуск 7			1	1		2	37000
Запуск 8		1	4	1		6	81000
Запуск 9		2	5	1		8	101000
Запуск 10		2	7	1		10	125000

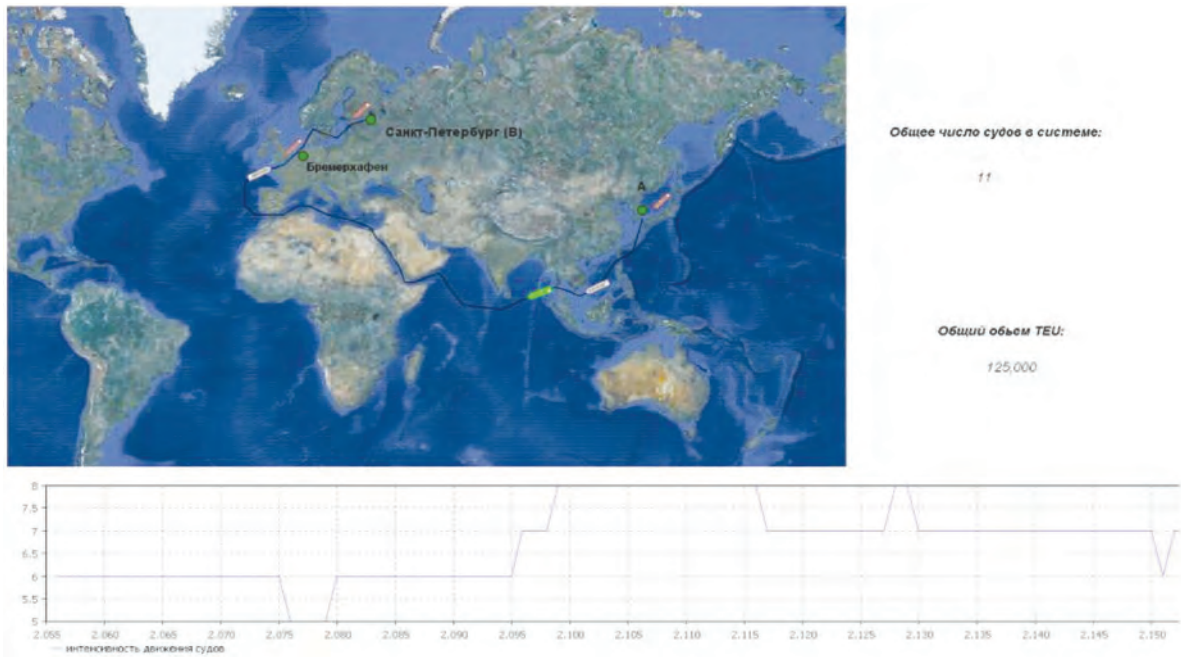


Рис. 7. Оконная форма имитационной модели работы одной линии *Fesco*

### Результат моделирования

В результате реализации имитационной модели (на основе линии *Fesco*), при работе 10 судов грузопоток составил 125000 TEU's. Также имитационная модель была протестирована при условии работы сразу двух различных линий в одном направлении, максимальный грузопоток оказался равным 161000 TEU's. Получилось, что для данной линии необходимо задействовать 16 судов различных классов, а именно три судна класса А (500 – 2500 TEU's), пять судов класса В (3000 – 4500 TEU's), семь судов класса С (4000 – 8000 TEU's) и одно судно класса D (125000 TEU's). Итоговый грузопоток приведен на рис. 8.

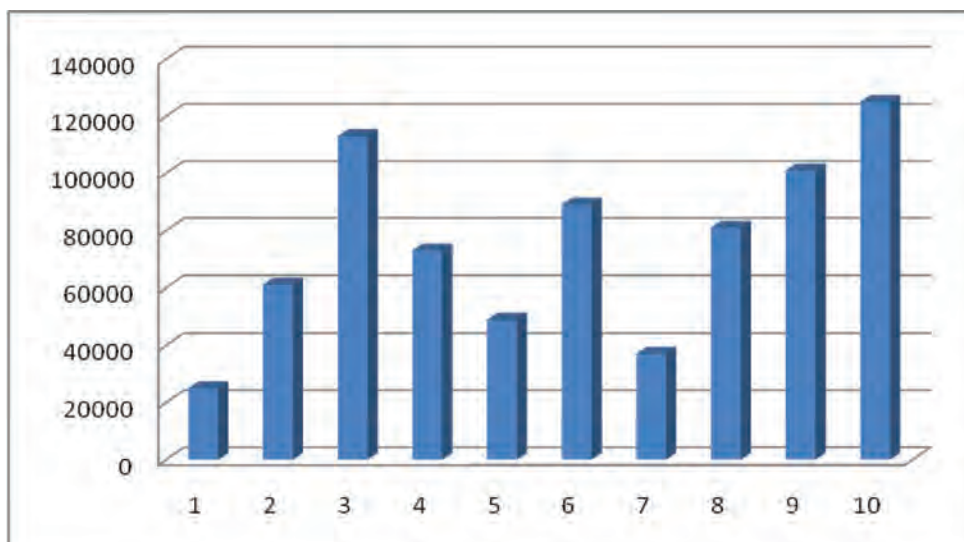


Рис. 8. График изменения грузопотока

### Заключение

Проведенное исследование направлено на разработку имитационной модели работы морской контейнерной линии, которая в последующем должна использоваться как для решения



группы прогнозных задач, так и для принятия оперативных решений по операционной деятельности. Рассматриваемая имитационная модель содержит возможность внесения различных задержек в работе контейнерной линии (задержку в погрузке, поломку и т.д.), содержит реализованные входные интерфейсы по заданию типов судов на основе их грузовой вместимости. Исходными данными было выбрано расписание движения судов реальной контейнерной линии *Fesco*. Необходимо отметить, что созданная разработка может быть использована для любой морской транспортной компании, которая осуществляет фидерное, регулярное, либо линейное судодоходство.

В статье предлагается возможность реализации такого метода как «модель следования за лидером». Авторы расширяют возможность применения данного метода для реализации различных задач моделирования в транспортной отрасли. В результате исследования и экспериментирования с добавлением новых судов на линии, в зависимости от грузопотока, получаются графики загруженности линии, прогнозируются объемы перевозок, появляется возможность исследования различных задержек в работе. Дополнительно можно сказать, что при замене модельного времени на реальное можно создать интерактивную имитационную карту движения судов, которая будет работать в режиме «реального времени».

#### Список литературы

1. *Фетисов В. А.* Практические задачи моделирования транспортных систем / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2012. — 185 с.
2. *Рыжиков Ю. А.* Имитационное моделирование. Теория и технологии. / Ю. А. Рыжиков. — Альтекс, 2004. — 384 с.
3. *Кириченко А. В.* Развитие логистики в современных транспортных условиях / А. В. Кириченко, О. А. Деняк // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 3 (49). — С. 3–5.
4. *Фетисов В. А.* Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 3–7.
5. *Fetisov V. A.* System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals / V. A. Fetisov, N. N. Maiorov // Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology. — 2015. — № 5–6. — P. 102–105.
6. *Кириченко А. В.* Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.] — СПб.: ГУАП, 2011. — 228 с.
7. *Mangan J.* Global Logistics and Supply Chain Management / J. Mangan, Ch. Lalwani, T. Butcher, R. Javadpour. — Wiley, 2 edition, 2011. — 446 p.
8. *Song D.-W.* Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management / D.-W. Song, Ph. M. Panayides. — Kogan Page, 2012. — 344 p.
9. *Rodrigue J.-P.* The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — Routledge 3 edition. — 2013. — 432 p.
10. Расписание судозаходов фидерных линий в порт Санкт-Петербург. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.credotrans.ru/ru/port\\_forwarding/fidernye\\_linii\\_v\\_portu\\_spb](http://www.credotrans.ru/ru/port_forwarding/fidernye_linii_v_portu_spb) (дата обращения — 22.02.2015).
11. *Маринич А. Н.* Судовая автоматическая идентификационная система АИС. / А. Н. Маринич [и др.]. — М.: Судостроение, 2004. — 180 с.
12. *Фетисов В. А.* Моделирование транспортных процессов. / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2011. — 165 с.