

Данная статья продолжает запланированную редакцией серию публикаций о теории и практике использования в проектировании морских портов и терминалов современного инструмента – мультиагентного имитационного моделирования (начало см. в «МП» №6-2013, «К вопросу о моделировании кошек»).

Авторы статьи описывают в ней результаты практической реализации теоретических положений нового метода проектирования в виде системы имитационного агентного моделирования работы порта и смежного транспорта на примере проекта строительства сухогрузного района морского порта Тамань.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ В ПОРТУ ТАМАНЬ

Система имитационного агентного моделирования работы морского порта, включающая подходной канал и смежный транспорт.

РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕВОЗОК, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ОБРАБОТКИ ГРУЗОВ, ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНЦИИ МЕЖДУ ПОРТАМИ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ – ВСЕ ЭТО ПРИВЕЛО К НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ОДНИМ ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СТАЛО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ПРЕДЛОЖЕННАЯ СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПОРТА И СМЕЖНОГО ТРАНСПОРТА НА СЕГОДНЯ ПРОШЛА УСПЕШНУЮ АПРОБАЦИЮ НА КРУПНЫХ ПРОЕКТАХ СОЗДАНИЯ МОРСКИХ ПОРТОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ДОКАЗАЛА СВОЮ ПОЛЕЗНОСТЬ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ.

НАСТОЯЩАЯ ПУБЛИКАЦИЯ КАСАЕТСЯ НЕКОТОРЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ОПИСАНИЯ НОВОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ С ЕЕ ПОМОЩЬЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СУХОГРУЗНОГО РАЙОНА ПОРТА ТАМАНЬ.

А.Л.КУЗНЕЦОВ, Д.Т.Н., ПРОФЕССОР ГУМРФ ИМ. АДМИРАЛА С.О.МАКАРОВА; **И.М.РУСУ**, ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР ООО «РМП-ТАМАНЬ»; **М.Н.ГОРЫНЦЕВ**, К.Т.Н., ДИРЕКТОР ПРОЕКТА ОАО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ»; **С.Н.ПРОТОПОВИЧ**, ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР ООО «ТРАНСПОСОФТ»; **А.М.КОРШУНОВА**, ЗАМЕСТИТЕЛЬ ДИРЕКТОРА ООО «НПЦЕНТР СММ».

ВВЕДЕНИЕ В ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пусть к некоторому причалу подходят одинаковые суда, грузовые операции над которыми занимают время. Для простоты будем считать, что в это время включены все основные погрузо-разгрузочные и любые вспомогательные операции, проведение необходимых комиссий, подготовка судовых документов, различные простои, бункеровка и т.д. и т.п. Иными словами, пусть $T_{обсл}$ включает все время занятости причала данным судном.

Если причал работает круглогодично, то «астрономический» бюджет его рабочего времени составляет $T_{аспр} = 365 \times 24 = 8760$ часов. Если причал работает лишь часть времени, напри-

мер, только в навигацию, или часть времени теряется по метеоусловиям – этот бюджет будет меньше: $T_{причл} \leq T_{аспр}$. В любом случае один причал при непрерывной обработке судов сможет принять $N = T_{причл} / T_{обсл}$ судов.

Если с каждым из судов связана грузовая партия V , то годовой грузопоток через наш причал составит величину $Q_{причл} = VN$. Эта величина называется *мощностью причала*.

Если, например, судно обрабатывается у причала 24 часа, то в год причал может принять 365 судов. При вместимости судна, скажем, 20 тыс. тонн мощность причала составит величину $365 \times 20000 = 730000$ т/год.

Если заказчик проекта строительства порта указал желаемый грузопоток,

например, в 1 млн т/год, то требуемое количество причалов, очевидно, составит величину $1000000 / 730000 = 1,37$.

Здравый смысл и Нормы технологического проектирования морских портов заставят нас округлить это число в большую сторону, приняв в качестве расчетного значения 2 причала. Таким образом, коэффициент использования мощности двух причалов составит величину $1000000 / (2 \times 730000) = 68\%$.

При 100% занятости обоих причалов они достигают своей мощности, которая составляет величину $2 \times 730000 = 1460000$ т/год. Здесь мы, кстати, сталкиваемся с двумя постановками задачи проектирования порта: *прямой*, когда необходимо оценить



мощности под заказанный грузопоток, и *обратной*, когда требуется оценить возможный грузопоток через заданные мощности.

В реальности суда имеют различную конструкцию и различную вместимость, что будет обеспечивать разброс времени обслуживания $T_{обсл}$ и грузовых партий V . Хуже того, обеспечить постоянное нахождение судов под обработкой у причала (для достижения мощности) можно лишь двумя способами: 1. организовав заходы в порт точно по расписанию с регулярным интервалом $T_{обсл}$; 2. организовав очередь судов на рейде в ожидании освобождения причала.

При этом надо понимать, что во втором случае очередь для гарантии постоянной занятости причала должна наблюдаться все время: если причал освободится, а суда для него не будет, то простой причала теоретически уже не может быть компенсирован ничем. На практике наличие такой очереди будет вызывать ее неограниченный рост во времени.

Для портового оператора вид постоянно работающих причалов является благостной картиной: его мощности все время работают, принося ему деньги. Владельцу же судна вид очереди на рейде внушает уныние: идущее по морю судно обогащает его, простаивающее в порту – разоряет.

Баланс этих противоречивых интересов портового оператора и судовладельца требует нахождения оптимального соотношения коэффициента использования (занятости) причала $K_{зан}$ и времени ожидания судна в очереди $T_{оч}$. При выполнении этого баланса причал будет использоваться не на все 100% мощности ($K_{зан} < 1$), а суда будут стоять в очереди некоторое приемлемое для них время $T_{оч}$.

Грузопоток через причал, который возможно получить при выполнении некоторых дополнительных условий

(в данном случае – баланса интересов судовладельца и портового оператора), характеризуемый степенью использования мощности причала, составляет его *пропускную способность*.

БЫЛО И ПРОШЛО...

В конце XX века решение проблемы баланса интересов было найдено с помощью методов Теории массового обслуживания (ТМО). Каждое судно было предложено считать некоторой заявкой на обслуживание, длительность которого характеризовалась ве- >>

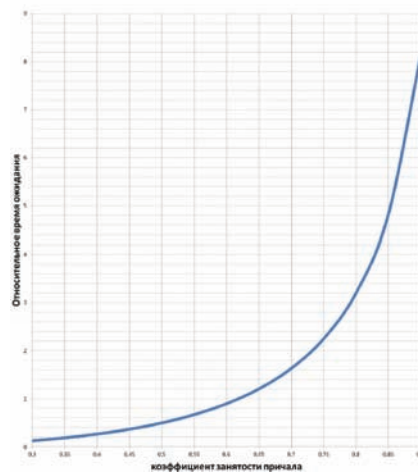


РИС. 1. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ОЖИДАНИЯ КАК ФУНКЦИЯ ЗАНЯТОСТИ ПРИЧАЛА

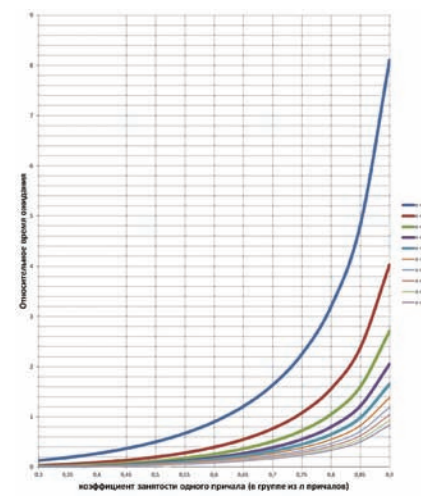


РИС. 2. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ОЖИДАНИЯ КАК ФУНКЦИЯ ЗАНЯТОСТИ ПРИЧАЛА В ГРУППЕ

личной $T_{обсл}$. То или иное количество судозаходов определяло величину $K_{зан}$, и при выполнении определенных требований в отношении свойств случайного потока судов ТМО предлагала решение в виде аналитических зависимостей относительного времени ожидания $T_{ожид} = T_{ов}/T_{обсл}$ от $K_{зан}$. График этой зависимости для одного причала показан на рисунке 1.

Длительные дискуссии между всеми участвующими сторонами морского бизнеса привели к некоторому усредненному пониманию приемлемой величины относительного времени ожидания. Эта величина различалась по видам груза (металлы, уголь, контейнеры и т.д.), по характеру организации перевозок (трамповое и линейное судоходство), по виду собственности (что мог позволить себе владелец одновременно порта и флота, минимизируя совокупные потери, не мог позволить владелец только порта, работающего в конкурентной среде).

Тем не менее, для нескольких характерных случаев были сформулированы ориентиры для приемлемого значения относительного времени ожидания. Так, для контейнерных линейных перевозок они составляли величину около $T_{ожид} = T_{ов}/T_{обсл} \approx 0,3$. Иными словами, судно готово было подождать в очереди треть среднего времени обслуживания.

Из рисунка 1 видно, что такое относительное время ожидания достигается при значении $K_{зан}$ на уровне 40%. Для портового оператора, точнее, для инвестора, этот факт оказался достаточно неприятным. Построенный инфраструктурный объект с высокой капиталоемкостью отрабатывал вложенные в него средства с низкой эффективностью.

В то же время теория показывала, что любая система массового обслуживания при увеличении числа каналов обслуживания заявок (в нашем случае – причалов) может позволить себе более высокое значение $K_{зан}$ при том же значении относительного времени ожидания (см. рис. 2). То есть

при наличии нескольких причалов эффективность их использования могла быть обеспечена на гораздо более высоком уровне. Это является еще одним проявлением эффекта масштабной экономии: большие деньги работают лучше малых.

Подход на основе ТМО оказался настолько плодотворным, что на долгие десятилетия сформировал образ мышления проектировщиков порта. Пропущенное звено в последовательном изложении представленных в фундаментальной работе¹ результатов привело, к сожалению, к тому, что данная методика стала рассматриваться как истина в последней инстанции, что во многих случаях создало препятствия для критического переосмысления или эвристического расширения предлагаемых зависимостей.

Еще одним неприятным следствием результативности подхода ТМО стало повсеместное использование в качестве расчетного параметра величины $K_{зан}$, хотя данная величина по своему смыслу носит промежуточный характер.

Действительно, в большинстве случаев исходным расчетным параметром является грузопоток Q , характеризующий суммарный поток заявок за некоторый период, чаще всего за год. Грузопоток, реализуемый судами со средней вместимостью V , определяет интервал прибытия заявок $T_{инт} = Q/V$. Имеющееся на причалах оборудование обеспечивает обслуживание каждого судна (заявки) за время $T_{обсл}$. Следовательно, с ростом грузопотока увеличивается число обслуживаемых судов, что приводит к уменьшению интервала между их заходами и повышает занятость каждого из имеющихся в порту причалов. Одновременно это приводит к образованию очереди.

Очевидно, что гораздо логичнее было бы построить зависимости двух основных величин, интересующих судовладельца и портового оператора –

¹ Port development. A handbook for planners in developing countries. UNCTAD. ISBN 92-1-112160-4, UN, NY, 1985.

относительного времени ожидания в очереди $T_{ожид}$ и коэффициента занятости причала $K_{зан}$, – от грузопотока и количества причалов в порту. Это и было сделано за счет определенной аналитической работы. Зависимость $K_{зан}$ от грузопотока Q при заданном количестве n причалов в рассматриваемом случае стала иметь вид $K_{зан} = (NT_{обсл}) / (n365) = (QT_{обсл}) / (n365V)$, (см. рис.3). Зависимость относительного времени ожидания, пересчитанная как функция изменения годового грузопотока, стала выглядеть так, как показано на рисунке 4.

Таким образом, используя методы ТМО, мы построили новую по форме расчетную модель, позволяющую оценить основные характеристики работы порта, которыми интересуются его владельцы (стивидорные компании) и их клиенты (судоходные компании).

Этими характеристиками выбраны коэффициенты занятости причалов $K_{зан}$ и среднее время ожидания в очереди на обслуживание судов $T_{ожид}$.

Ключевым изменяемым параметром при этом был выбран грузопоток, варьируемыми параметрами – вместимость судна, количество причалов и интенсивность обработки судов на них. Условно структура этой модели показана на рисунке 5.

ОГРАНИЧЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТМО

Существенным ограничением на использование методов теории массового обслуживания является природа потока транспортных средств. Как правило, в большинстве реальных случаев нарушаются основные требования к потоку, позволяющие использовать известные теоретические методы.

В частности, поток транспорта практически никогда не бывает стационарным, поскольку коммерческие условия

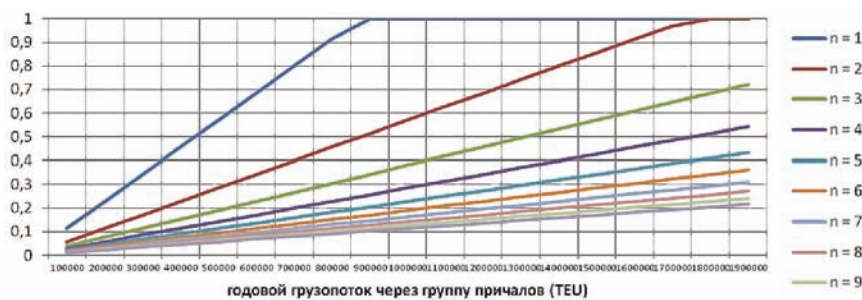


РИС. 3. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАНЯТОСТИ ПРИЧАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА В ГРУППЕ И ГРУЗОПОТОКА

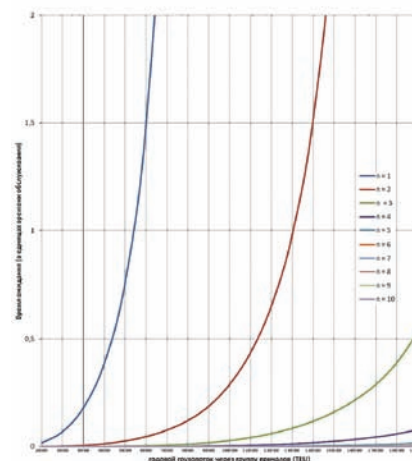


РИС. 4. ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ОТ ГРУЗОПОТОКА ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА ПРИЧАЛОВ

работы терминала и смежных объектов в цепи поставок (расписания движения, работа подходных каналов, внешних складов, органов контроля, офисов, действия муниципальных властей и т.п.) вызывают существенные неравномерности поступления транспорта. Эти неравномерности носят сезонный характер (летние поставки продуктов, квоты и пр.), месячный (например, предновогодняя торговля), недельный (увеличение потока в пятницу и понедельник), сменный (дневная развозка прямо в пункты торговли) и часовой (начало рабочего дня). Возможное наложение всех этих факторов приводит к тому, что интенсивность поступления заявок на обслуживание от заданного проектом среднего значения отличается не на проценты, а в разы.

Это вызывает методический вопрос: на какую интенсивность ориентироваться при расчете характеристик — среднюю, которая не будет наблюдаться никогда (чаще всего реальные значения будут несколько ниже как компенсация пиковых всплесков), или максимальную, которая будет наблюдаться лишь короткое время?

В первом случае всплески интенсивности будут приводить к образованию очередей, для чего спланированная мощность может оказаться недостаточной. Во втором случае запланированное количество пунктов обслуживания (а значит, и связанные с ними ресурсы) большую часть времени использоваться не будет.

В наиболее часто встречающейся постановке эта проблема может быть сформулирована следующим образом. Рассчитываемыми ресурсами является число каналов обслуживания, определяемое из максимально допустимой длины очереди. Заданными величинами являются интенсивности поступления и время обслуживания. В задании на проектирование следует указать: какой критерий должен быть использован, для какого грузопотока — максимального, среднего, минимального, с каким качеством (время ожидания, длина очереди), какие ограничения являются строгими, какие могут быть временно нарушены и проч.

При отсутствии у заказчика предположений о характере грузопотока, жесткости ограничений и потерь, связанных с дефицитом или избытком проектных ресурсов, следует провести расчет нескольких полярных вариантов.

Очевидно, что влияние того или иного закона распределения интервалов поступления партий на склад может оказаться намного серьезней, чем это позволяет оценить распределение

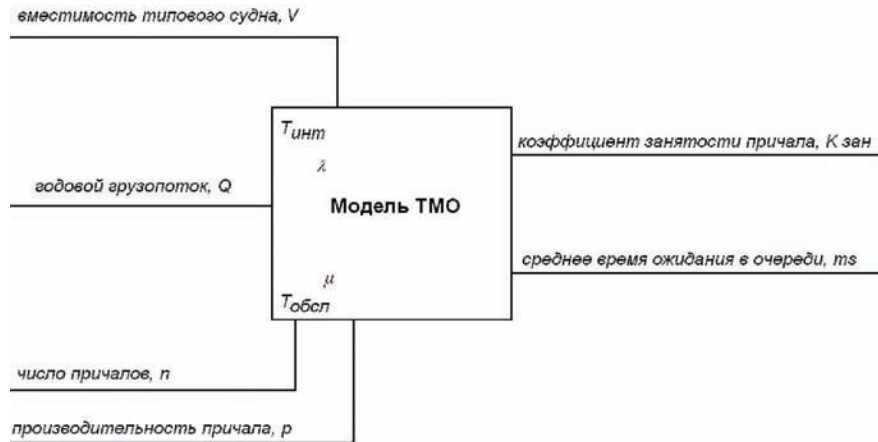


РИС. 5. СТРУКТУРА ПРЕОБРАЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ТМО

по тому или иному простому статистическому закону: показательному, степенному, нормальному, Эрланга и т.д. Это влияние также может оказаться более значительным, чем колебания объемов партий.

Следует учесть, что все результаты Теории массового обслуживания выведены для однородных по природе каналов обслуживания и поступающих заявок. Чем больше различия в этих элементах, тем менее точными становятся получаемые результаты.

ПОДХОД НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ИЛИ НАЧАЛО ОПИСАНИЯ СИСТЕМЫ

Пусть имеется заданный для рассматриваемого порта или грузового терминала грузопоток Q , который реализуется за некоторый выбранный интервал времени T (например, год, месяц или неделя) судами, вместимость которых задана дискретным распределением $P(V)$, например, как на рисунке 6.

Это распределение задает частоту p_i появления в потоке из N судозаходов за время T судов вместимостью v_i , т.е.

$$\sum_{i=1}^I p_i = 1; \sum_{i=1}^I n_i v_i = Q; n_i = N p_i$$

Отсюда мы имеем:

$$N \sum_{i=1}^I n_i p_i = Q; N = \frac{Q}{\sum_{i=1}^I n_i p_i}$$

что, в свою очередь, позволяет определить среднее число судов каждого типа в потоке из N судозаходов:

$$n_i = \frac{Q p_i}{\sum_{i=1}^I n_i p_i}$$

Таким образом, для каждого типа судов мы получаем возможность оценить средний интервал между ними в потоке $\tau_i = T/n_i$.

Формулы выше позволяют для заданного грузопотока Q за выбранный интервал времени T по заданному распределению вместимости судов $P(V)$ вычислить средний интервал между подходами судов каждого класса (вместимости) $v_i, \tau_i = T/n_i$.

Предположим далее, что случайная величина, которой является интервал между судозаходами судов данного типа, изменяется вокруг этого среднего значения по некоторому произвольному закону, описываемому функцией распределения Φ_i (равномерному, экспоненциальному, Эрланга того или иного порядка или же фиксированному графику). Это позволяет для каждого выделенного класса судов сгенерировать свой частный поток событий (см. рис. 7).

Иными словами, зная закон распределения случайной величины τ_i и ее матожидание, мы можем сгенерировать конкретную реализацию последовательности судозаходов.

Далее предположим, что для обработки судов у нас имеется несколько >>

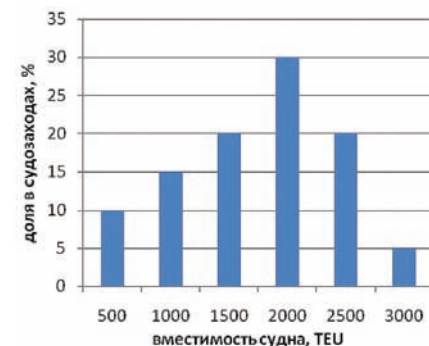


РИС. 6. ГИСТОГРАММА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВМЕСТИМОСТИ ФЛОТА

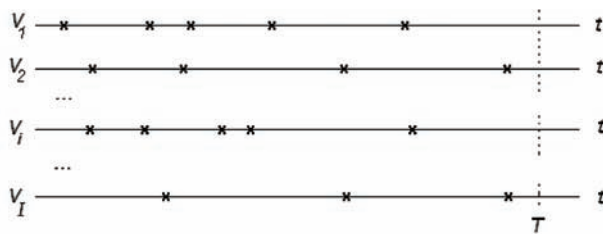


РИС. 7. ЧАСТНЫЕ ПОТОКИ СУДОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

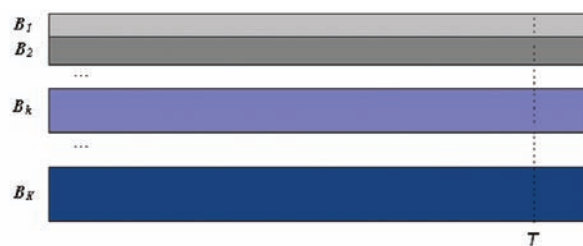


РИС. 9. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ РЕСУРС ПРИЧАЛОВ

ко различных причалов B_k , $k=1, \dots, K$, характеристики которых (длина, допустимая осадка, оборудование, коммерческие условия контрактов с линиями и пр.) позволяют принимать не все суда, а производительность оборудования – обрабатывать их за разные интервалы времени. В общем случае оборудование может составлять единый пул, распределяемый по тем или иным законам между отдельными причалами. Этот случай будет рассмотрен в отдельной части исследования.

Введем в рассмотрение матрицу $[t_{ik}]_{i,k}$, элемент t_{ik} которой показывает, за какое время судно вместимости

v_i обслуживается у причала B_k . Будем считать, что если $t_{ik}=0$, то судно не может обслуживаться у данного причала (см. рис. 8).

$$\begin{vmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1K} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{i1} & t_{i2} & \dots & t_{iK} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{r1} & t_{r2} & \dots & t_{rK} \end{vmatrix}$$

РИС. 8. МАТРИЦА ВРЕМЕН ОБСЛУЖИВАНИЯ СУДНА У ПРИЧАЛА

Причалы B_k во время интервала предоставляют определенный инфраструктурный ресурс в пространственно-временной плоскости, как это показано на рисунке 9.

На рисунке 10 представлена структура предлагаемой модели.

Выходными величинами являются две векторных переменных:

1) вектор средних коэффициентов занятости причалов

$$K_{зан}^m = \{k_{зан}^m\}, \text{ где } k_{зан}^m = (\sum_k t_k^m \cdot t_k^m) / (L_m T_0^m)$$

t_k^m – длина судна k обслуженного на причале m ,

t_k^m – время обслуживания судна k на причале m ,

L_m – длина причала m ,

T_0^m – бюджет времени причала m ,

2) и вектор среднего времени ожидания в очереди по типам судов

$$T_{ожд}^i = \{t_{ожд}^i\}, \text{ где}$$

$$t_{ожд}^i = \sum_k t_{ожд}^{i,k} / \sum_k t_{обсл}^i,$$

$t_{ожд}^{i,k}$ – ожидание в очереди судна k типа i ,

$t_{обсл}^i$ – время обслуживания судна k типа i .

Интегральными скалярными оценками для этих векторных величин являются средняя занятость причалов порта $K_{зан}^{cp} = (\sum_k t_k^m) / (L T_0^m)$ и среднее время ожидания по всем судам $T_{ожд}^{cp} = (\sum_k t_{ожд}^{i,k}) / (\sum_k t_{обсл}^i)$. ■

(Продолжение следует)

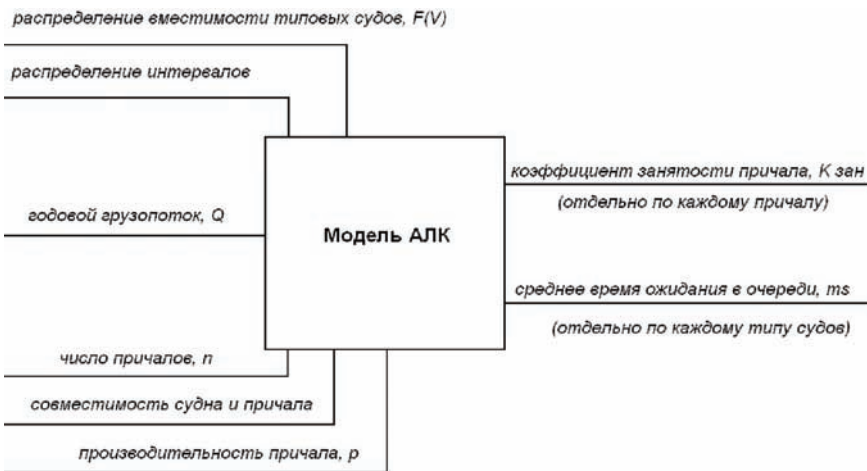


РИС. 10. СТРУКТУРА ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ

ПОДПИШИСЬ НА ЖУРНАЛ «МОРСКИЕ ПОРТЫ» НА 2014 ГОД

Подписной индекс
в каталоге «Почта России»
на полгода **47766**
на год **79194**

«Морские порты» – информационно-аналитический журнал федерального уровня о российском портовом комплексе и всех процессах, связанных с международными перевозками грузов через морские порты России.

«Морские порты» – полноцветное печатное издание форматом А4 объемом до 100 страниц выходит тиражом 7,5 тыс. экземпляров 10 раз в год. Журнал является печатным органом Ассоциации морских торговых портов (АСОП) и издается при поддержке Федерального агентства морского и речного транспорта (Росморречфлот) Министерства транспорта и Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации.

Журнал «Морские порты» распространяется по подписке, в виде представительских рассылок в федеральные органы государственной власти, ведомственные структуры, администрации приморских регионов и портов - крупных транспортных узлов, а также на крупнейших международных выставках и конференциях, посвященных транспортной тематике.

«Морские вести России»

«Морские порты»

«Морской флот»

«Международный экспедитор»

«Транспортное дело России»