

**To the question of the transportation technological flows
The methods of simulation of the transport process**

Moreno Ferrarese (University of Verona)

Gennady M. Badin (Saint-Petersburg State University of architecture and construction)

Andrej V. Lyamkin (associate of the Peter's Academy, St. Petersburg)

Abstract

To study such a complex system as the transport process in the production scheme, it is required an efficient combination of the probabilistic modeling with the contingency management. It creates the new opportunities to study the behavior of the system under the different conditions. In each phase, the transport process is described through the situational and imitation simulations. The first is an aggregate of the managed machines, which, depending on specific situations, develop the control solutions for exposure on the second model. The second model / imitation / mimics the events occurring in each phase of the transport process. During delivery of the materials, products and designs for different projects on the production site, the various versions of situations (states) are emerging. In this article the regularities of the transportation technological processes are considered. A mathematical model of the traffic flows management, establishing the dependence of cost and effectiveness of the management control of the number of (initial) information in the performance of a given volume of transportation in the specific terms of construction, is proposed by the authors.

К вопросу об управлении транспортно-технологическими потоками.

Методика имитационного моделирования транспортного процесса.

Для исследования такой сложной системы, как транспортный процесс в производстве, необходимо сочетание метода вероятностного моделирования с ситуационным управлением, которые создают новые возможности для изучения поведения системы в различных условиях. В каждой фазе транспортный процесс описывается ситуационной и имитационной и имитационными моделями. Первая представляет собой совокупность управляющих автоматов, которые в зависимости от конкретных ситуаций вырабатывают управляющие решения для воздействия на вторую модель. Вторая модель /имитационная/ имитирует события, происходящие в каждой фазе транспортного процесса. При доставке материалов, изделий и конструкций на производство возникают различные варианты ситуаций (состояний) (рис.1), которые могут быть представлены в виде графов множества S решений:

$S = \{S_i\}, i=1, n$ S_i - Ситуации, связанные с изменением погодных климатических условий: S_{11} - нормальные условия; S_{12} - удовлетворительные условия; S_{13} - плохие условия; S_{14} - стихийные условия, S_{31} - нормальное состояние погрузочной техники, том числе по маркам машин

$S_{31}^1, S_{31}^2, \dots, S_{31}^0, S_{32}$ - выход погрузочной техники из строя; S_{32}^1 - мелкая поломка погрузочной техники; S_{32}^2 - крупная поломка погрузочной техники; S_{32}^3 - техническое обслуживание техники, S_4 - Состояние автотранспортных средств: S_{41} - нормальное рабочее состояние транспортных средств; S_{42} - выход выход автомобилей из строя, в том числе S_{42}^1 мелкая поломка и S_{42}^2 средняя поломка; S_{43} - атомобили находятся в техническом обслуживании.

Все варианты ситуаций могут быть представлены в виде различных динамичных графов. Примером возможного состояния одной из фаз транспортного процесса может служить рис.1.

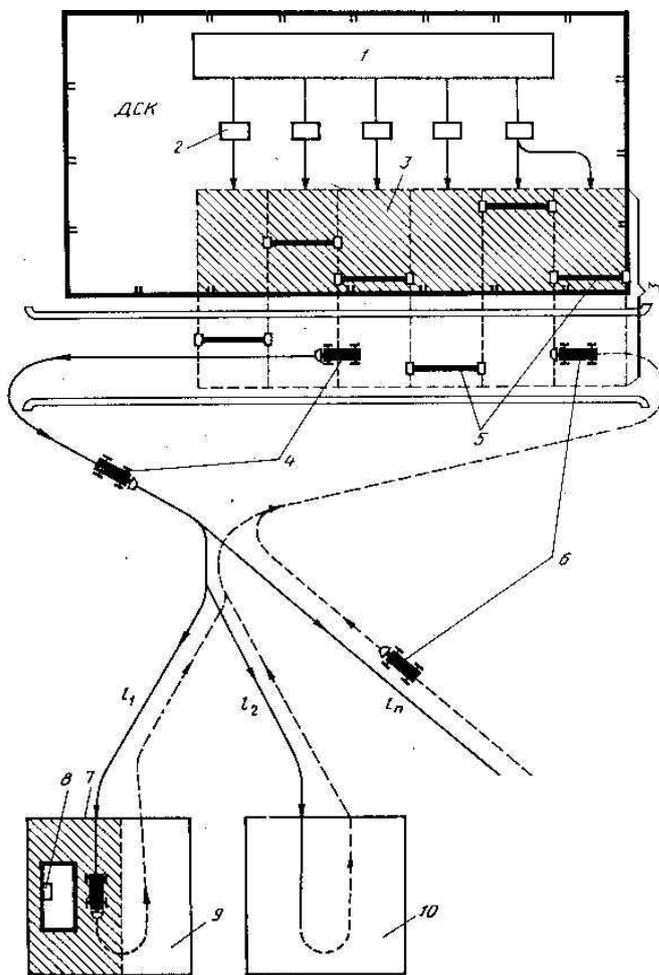


Рис. 1 Обобщенная транспортно-технологическая система

1 — производственные цеха строительных конструкций ДСК; 2 — внутризаводской транспорт; 3 — погрузочный склад; 4 — груженный панелевоз; 5 — краны мостовые; 6 — порожний панелевоз; 7 — строительная площадка; 8 — монтажная площадка; 9, 10, 11 — строительные объекты

Проведено статистическое исследование параметров транспортно-монтажного процесса: количество транспортных средств, работающих на линии; количество ездов одного автомобиля в смену; время обслуживания одного автомобиля одним постом погрузки; длительность работы крана на погрузке одного рейсокомплекта; длительность монтажа одной детали; количество деталей в рейсокомплекте; интервал между двумя последовательными прибытиями автомобилей на склад готовой продукции и на строительный объект. Статистическое распределение этих параметров (табл.1) использовалось при имитационном моделировании. Расчет простоев автомобилей в очереди осуществлялся после моделирования интервалов между двумя последовательными прибытиями автомобилей в пункт погрузки (разгрузки) и моделирования длительности погрузочных (разгрузочных) операций.

Критерий оптимальности взаимодействия автомобилей и постов погрузки цехов готовой продукции определяется выражением:

$$K_u = \frac{1}{\Pi_T} \left(\sum_i^I \sum_j^J t_{ij} \alpha_i + \sum_j^J t_j \alpha_j \right) \rightarrow \min,$$

где Π_T — производительность транспортно-монтажного процесса, т/час; t_{ij} — время простоя в очереди i -го автомобиля на j -м посту погрузки, час; $i = 1, \dots, I$; $j = 1, \dots, J$; α_i — стоимость часа простоя i -го автомобиля, руб./час; α_j — стоимость часа простоя крана на j -м посту погрузки цеха готовой продукции, руб./час.

Критерий оптимальности взаимодействия автомобилей и постов разгрузки на строительных объектах определяется выражением:

$$K_o = \frac{1}{\Pi_T} \left(\sum_i^I \sum_g^G t_{ig} \alpha_i + \sum_g^G t_g \alpha_g \right) \rightarrow \min,$$

где Π_T — производительность транспортно-монтажного процесса (объем доставленных деталей крупнопанельного домостроения), т; t_{ig} — время простоя в очереди g -го автомобиля на g -м строительном объекте, час; $i = 1, \dots, I$; $g = 1, \dots, G$; α_i — стоимость часа простоя g -го автомобиля, руб. / час; α_g — стоимость часа простоя крана на g -м строительном объекте, руб. / час.

Критерий оптимизации процесса доставки деталей определится выражением:

$$K = K_u + K_o \rightarrow \min$$

или

$$K = \frac{1}{\Pi_T} \left(\sum_i^I \sum_j^J t_{ij} \alpha_i + \sum_j^J t_j \alpha_j + \sum_i^I \sum_g^G t_{ig} \alpha_i + \sum_g^G t_g \alpha_g \right) \rightarrow \min,$$

В соответствии с алгоритмом имитации (рис. 2) было проанализировано 46 вариантов взаимодействия автомобилей с постами погрузки. Количество транспортных средств варьировалось от 12 до 18, постов погрузки — от 2 до 6, а строительных объектов — от 4 до 14.

Число реализаций модели составило 43. Адекватность расчетов по имитационной модели проверялась методом дисперсионного анализа, гипотеза об адекватности модели не отвергается при уровне значимости 0,05.

Таблица 1

Статистические параметры распределения характеристик перевозок деталей производства

Характеристики транспортно-монтажного процесса	трансп-	Математическое ожидание	Дисперсия	Средне-квадратическое отклонение	Асимметрия	Эксцесс
1		2	3	4	5	6
Количество транспортных средств на линии, ед		25,429	35,358	5,946	0,662	-0,016
Длительность выгрузки одного рейсокомплекта, мин		17,167	62,650	7,916	1,360	2,224
Длительность загрузки одного рейсокомплекта, мин		17,099	19,520	4,418	1,342	3,070
Время обслуживания одного автомобиля на посту погрузки, мин		28,316	35,143	5,928	1,859	7,123
Время монтажа одной детали, итн		13,036	17,036	4,127	-0,297	-0,786
Количество ездов за смену, ед.		2,050	1,555	1,247	0,800	-0,699
Масса рейсокомплекта, т		15,544	1,710	1,308	0,365	0,525
Количество деталей в рейсокомплекте, ед		5,381	3,548	1,884	4,900	2,230

Критерий оптимальности взаимодействия автомобилей и постов погрузки цехов готовой

$$\sum_{i \in P_{out}} C_i S_i(T) \geq b(T)$$

продукции определяется выражением:

Одним из решающих условий минимизации стоимости доставки грузов непосредственно на стройки является организация транспортного процесса на всем пути следования грузов. Такая форма организации транспортного процесса предусматривает заинтересованность всех участников перевозок: грузоотправителей, транспортных предприятий и грузополучателей. Совмещенная технология на основе транспортно-технологических карт позволяет повысить скорость доставки грузов в 1,5-2 раза, улучшить использование транспортных средств и грузоподъемных механизмов и за счет этого значительно поднять

качество транспортного обслуживания строек. Схема выбора рациональных комплектов транспортных средств по критерию минимума затрат перевозки грузов дана на рис.2.

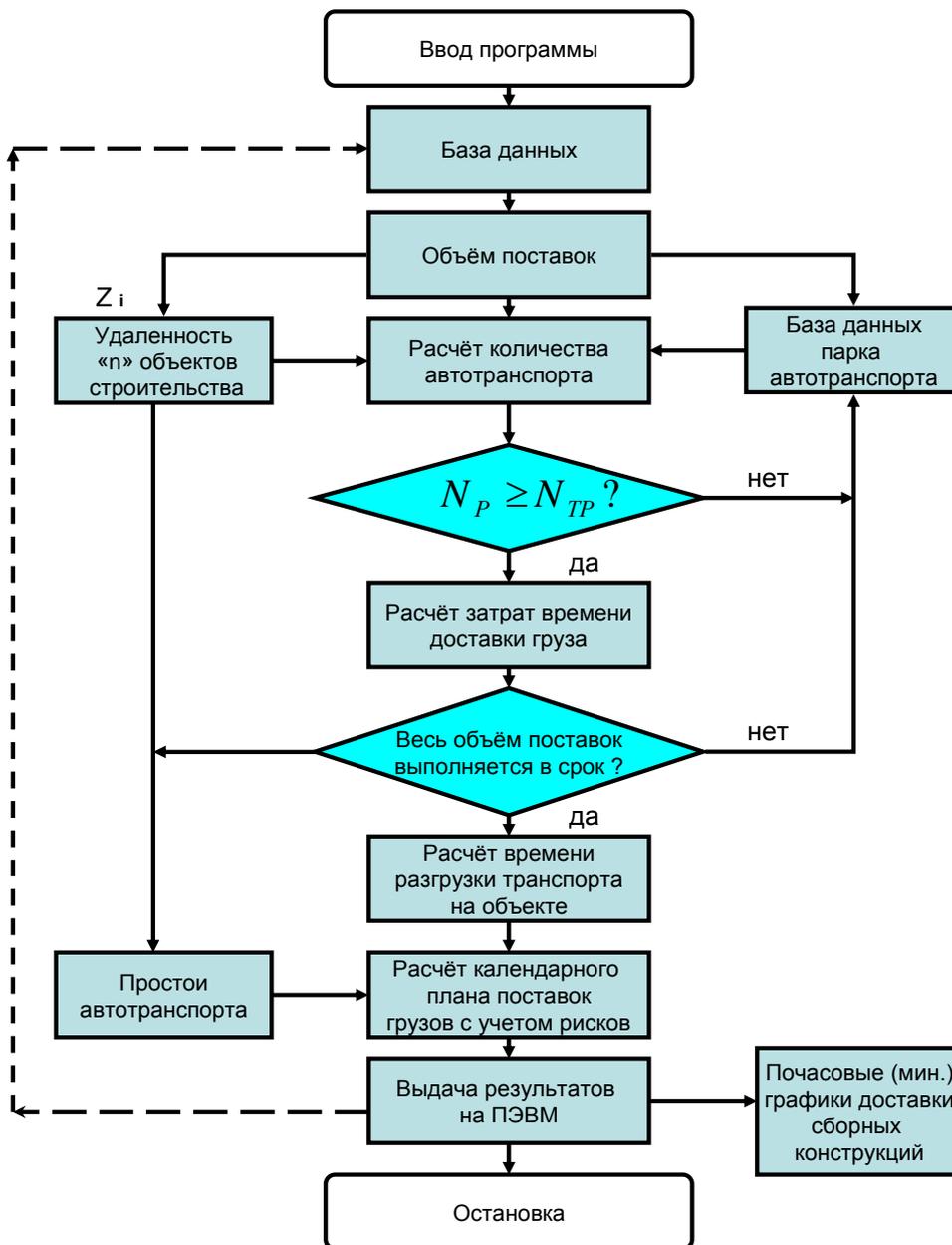


Рис. 2. Блок схема алгоритма имитационной модели доставки грузов автотранспортом до объектов строительства (схема выбора по критерию минимума затрат перевозки грузов)

Показатель эффективности и качества рекомендуется определять как максимальный доход при минимальных фактических затратах, связанных с транспортированием грузов. Чтобы контролировать и оказывать влияние на надежность транспортного процесса необходимо определить ее количественную характеристику. Для проектирования надежных систем и сравнения между собой отдельных транспортных процессов предлагаются показатели, приведены в табл. 2

Показатели транспортного процесса

Наименование	Характеристика показателя	Математическое выражение
Удельная пропускная способность	Отношение провозной способности к максимальной загрузке транспорта	$K_1 = P / Q_{\max}$
Коэффициент устойчивости	Степень соответствия транспортного процесса спроектированному процессу строительно-монтажных работ	$K_2 = \Delta Q / V_\sigma$ при $\Pi > 1$ процесс можно считать устойчивым $\Delta Q = Q_a - Q_b$; где Q_a - верхняя граница допустимого объема перевозок/ часового/ суточного; Q_b - нижняя граница допуска; V_σ - коэффициент вариации $V_\sigma = \sigma / Q_z$, где $Q_z = \frac{Q_a + Q_b}{2}$
Коэффициент нагрузки	Отношение средней провозной способности к средней загрузке системы в определенный период времени, час, смену	$K_3 = P_{cp} / Q_{cp}$
Себестоимость перевозок	Затраты автотранспортного предприятия, связанные перемещением несвоевременной доставкой грузов	$Z = Z_n + Z_{np} + Z_\delta$, где Z_n - затраты на перевозку Z_{np} - затраты на погрузку-разгрузку Z_δ - затраты из-за несвоевременной доставки грузов

Уровень качества и надежности транспортного процесса в строительстве находит отражение в проектно-технологической документации при организации поставок комплектов конструкций, материалов и изделий на производственные площадки.

В конечном итоге, эффективность и качество транспортного процесса характеризуется качеством труда всех участников строительства, качеством парка транспортных средств и грузоподъемных машин, а также качеством проектно-технологической документации.

Закономерности транспортно-технологических процессов при реализации технологических схем поставок грузов

Анализируя взаимосвязь транспортного и технологического процессов на примере массового индустриального строительства можно отметить следующие способы реализации связей: последовательное, совмещенное и одновременное (рис.3).

В I случае связь транспортного и строительного процессов можно выразить следующими формулами:

$$t_j^H = t_i^H + T_i \text{ или } \tau_{ij} = T_i;$$

$$t_j^H = t_i^H + T_i + \Delta T \text{ или } \tau_{ij} = T_i + \Delta T$$

где t_j^H, t_i^H - соответственно, моменты начала транспортного /i-го/ и

строительного /j-го/ процессов;

T_i - продолжительность выполнения транспортного процесса;

τ_{ij} - величина организованного перерыва между началами транспортного и строительного процессов;

ΔT - величина перерыва между окончанием транспортного и началом строительного процесса.

При последовательном выполнении транспортного и строительного процессов организационная их взаимосвязь реализуется в процессе комплектации объектов путем определения величины опережения завоза материалов и изделий на стройки τ_{ij} , зависящей от методов строительства объектов, дорожно-транспортных условий и способов доставки.

Наибольшее распространение в строительстве нашел способ совмещенного выполнения транспортного и строительного процессов. В этом случае доставка грузов производится с опережением начала их монтажа.

В случае совмещенного выполнения процессов величина опережения $\tau_{ij} \rightarrow 0$ и они объединены в единый транспортно-монтажный процесс, работа выполняется по единому транспортно-монтажному графику.

Увязка заключается в нахождении величины организационного перерыва между началами выполнения транспортного и строительно-монтажного процессов τ_{ij} , после которого строительный процесс при заданной интенсивности потребления материалов q_j , будет выполняться непрерывно при необходимом запасе материалов на строительной площадке в каждый рассматриваемый момент Δt .

q_{ij} - размер запаса материалов и изделий. Результатом расчета является выявление минимально необходимого значения l_{ij} .

Интенсивность потребления материалов и изделий и продолжительность процессов связаны отношением:

$$T = Q/q, \text{ где } T \text{ - продолжительность процесса, смены;}$$

Q - объем укладки /доставки/ материалов и изделий, т;

q - интенсивность укладки /доставки/ в смену, т.

За время τ_{ij} результате выполнения транспортного процесса будет выполнен объем работ, равный $q_i \tau_{ij}$, а по i -му процессу - 0. За время Δt объем поставки будет равен $q_i \Delta t$, а объем укладки $q_j \Delta t$.

При различной интенсивности выполнения процессов уравнения связи могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{I случай: } T_i < T_j; & \quad \tau_{ij} = q_{ij} / q_i; \\ \text{II случай: } T_i > T_j; & \quad \tau_{ij} = q_{ij} Q_j / q_i Q_i + (T_i - T_j); \\ \text{III случай: } T_i \leq T_j; & \quad \tau_{ij} = q_{ij} Q_j / q_i Q_i; \end{aligned}$$

Предлагаемая методика позволяет наиболее эффективно планировать сроки начала и окончания комплектации объектов материалами и изделиями, а также составлять рациональные графики работы автотранспортных средств. В результате этого, на пример, сокращаются простои бригад на стройках из-за отсутствия материалов и транспортных средств в ожидании разгрузки.

Величина опережения доставки комплектов материалов и изделий на производственные площадки перед началом укладки их имеет значительные колебания и составляет от одного до десяти дней. Таким образом, транспорт непосредственно и активно влияет на количественные и качественные показатели деятельности строительных организаций и тем самым воздействует на эффективность технологического процесса.

Перемещение грузов от поставщиков на производственную площадку в результате движения автотранспортных средств соответствует некоторая минимально необходимая величина грузопотока Q_{\min} . В процессе реализации грузопотока выполняется фактический грузопоток Q_{ϕ} . Насколько рационален принятый вариант грузопотока можно судить по отношению этих грузопотоков η_Q :

$$\eta_Q = \frac{Q_{\min}}{Q_{\phi}} ; \quad 0 \leq \eta_Q \leq 1$$

Каждому варианту грузопотока соответствует минимальная транспортная мощность P_{\min} , которая при реализации фактического грузопотока выражается фактической мощностью P_{ϕ} , находящейся с P_{\min} в определенном отношении η_M :

$$\eta_M = \frac{P_{\min}}{P_{\phi}} ; \quad 0 \leq \eta_M \leq 1$$

По произведению η_Q и η_M может быть получен показатель экстремальности выполнения транспортного процесса и коэффициент использования мощности подвижного состава.

Условие реализации транспортного процесса выражается следующим образом:

$$Q_{\phi} = P_{\phi} \cdot K_T \cdot T_H = P_{\min} \cdot K_{T_{\max}} \cdot T_H$$

где $K_T, K_{T_{\max}}$ - среднеарифметический и максимальный коэффициенты использования мощности подвижного состава $0 < K_T < 1$;

T_H - время нахождения автомобиля в работе.

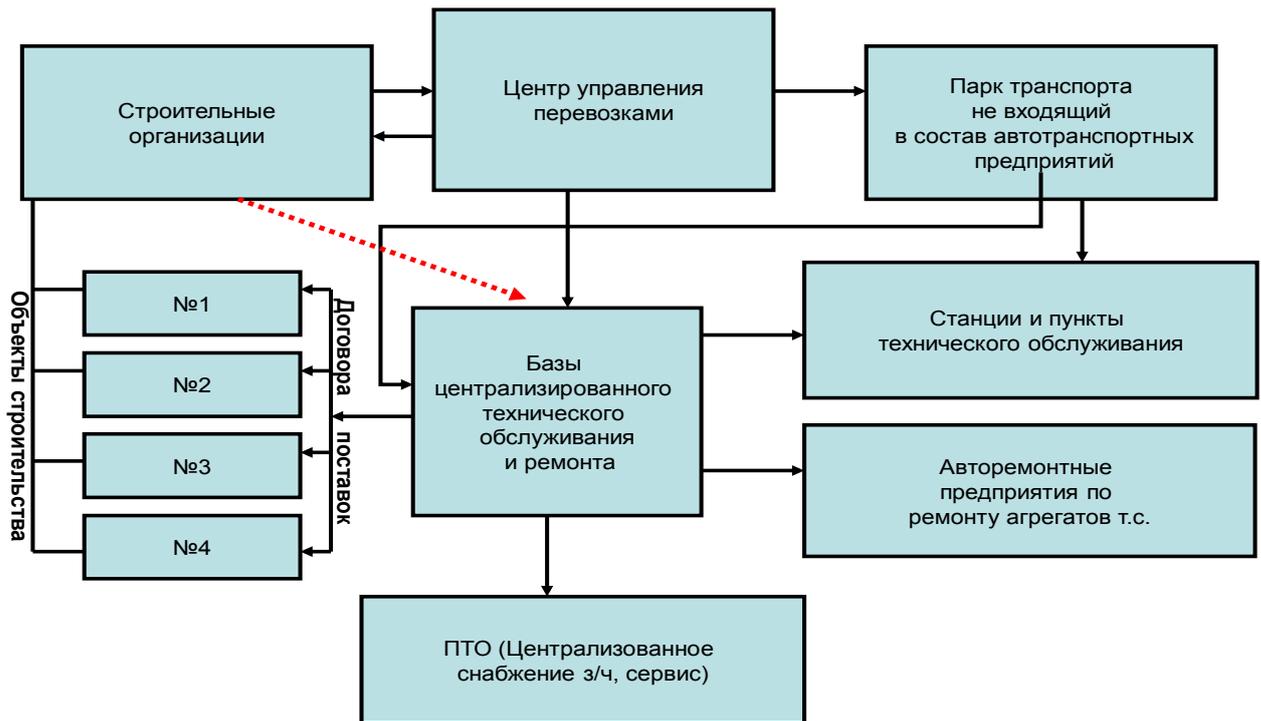


Рис. 3 Принципиальная схема системы технического обслуживания и ремонта технологического транспорта

(Красной линией на рисунке обозначены прямые поставки с использованием автомобильного транспорта)

Управление транспортно-технологическим процессом можно представить в виде замкнутого цикла, включающего в себя три непрерывно повторяющиеся фазы: планирование перевозок, получение сведений о выполнении плана, принятие решения об уточнении или корректировке плана. Процедуру выработки управляющих решений обобщенно можно описать как последовательность следующих этапов: получение информации о состоянии системы, включая внешние условия; выработка варианта решения; анализ последствий принятия выдвинутого варианта с помощью модели при учете данных о состоянии системы в момент выработки решения; выяснение степени соответствия полученного результата поставленной цели (рис.4).

Осуществим постановку задачи. Обозначим вектор состояния системы в момент t через $U(t)$. Этот вектор предполагается полным, т.е. любая информация о состояниях системы до момента t и ранее реализованных управлениях, приведших систему в $U(t)$, не изменяет условия выбора последующих управлений и их эффективность. Для транспортно-технологической системы таким вектором является набор значений поставок материалов $S(t)$ и фаз $\varphi(t)$ операций, реализующих эти поставки. Функционирование системы можно рассматривать как преобразование ее состояния во времени, переход $U(0)$ в $U(t)$. Задача состоит в нахождении таких моделей

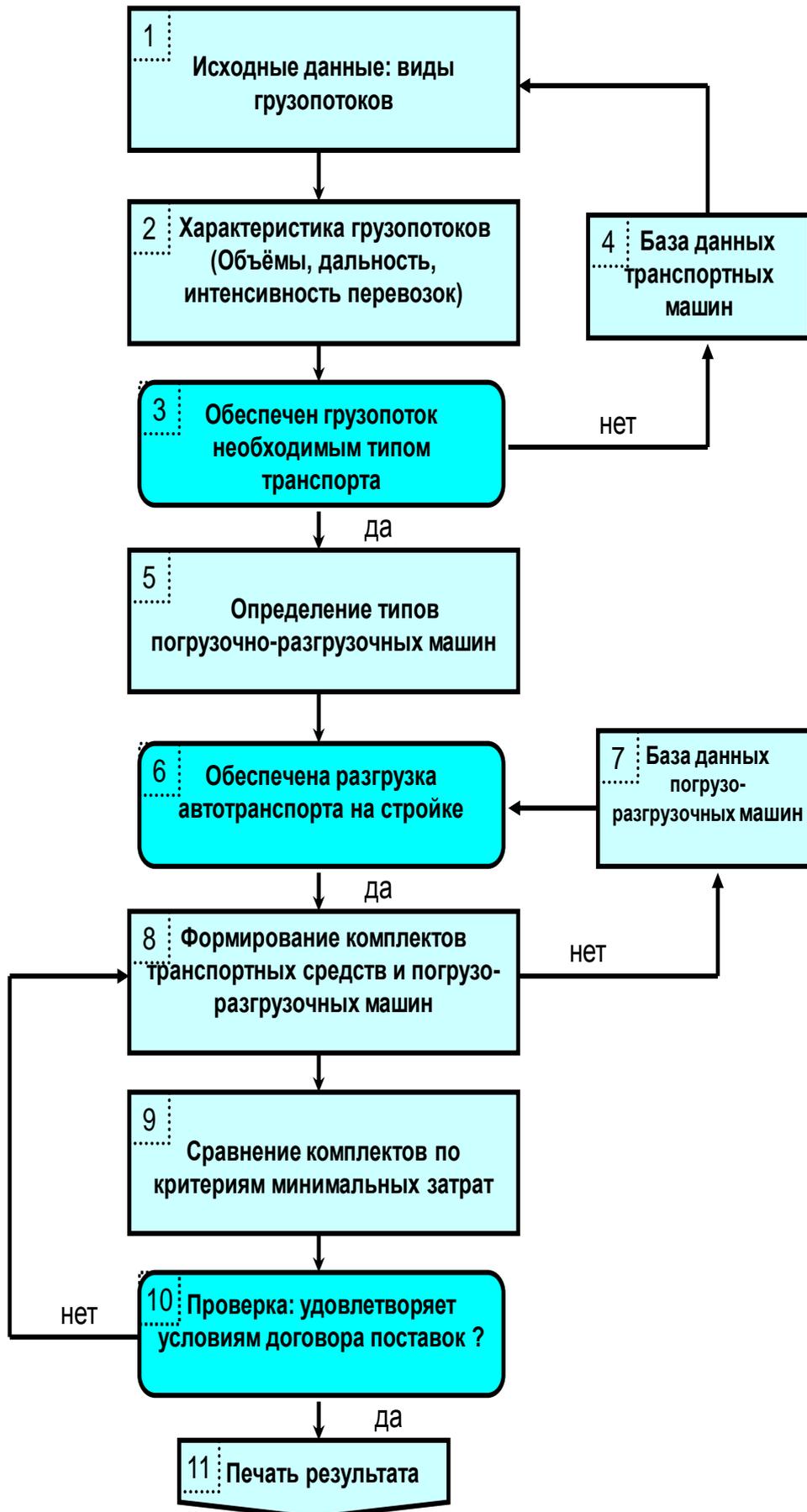


Рис.4 Алгоритм выбора рациональных компонентов транспортных и погрузочно-разгрузочных средств по критериям минимума затрат перевозки грузов

организации и управления, при которой вариант поставок строительных грузов будет оптимальным, а эффективность системы управления максимальной.

Обозначим оператор преобразования через m , а вид оператора принимаемых решений (управлений) через $\chi(\tau), \tau \in [0; t]$. Выбор конкретного варианта управления $\chi(\tau)$ задает и предопределяет траекторию системы в пространстве состояний $U(t), t \in [0; T]$ как результат применения к исходному состоянию $U(0)$ операторов $m(\chi(\tau)), \tau \in [0; T]$. Построение такой траектории и есть оценка последствий принятия решения χ . Для отбора варианта необходимо выяснить степень соответствия поставленной цели и результата, т.е. пары $\chi(\tau), U(t), t \in [0; T]$.

Приведем для пояснения два возможных случая.

1. Цель заключается в достижении определенного объема перевозок (T), исчисленного в заданных ценах C_i , т.е. в выполнении условия

$$\sum_{i \in P_{out}} C_i S_i(T) \geq b(T)$$

где P_{out} - объем перевозимых грузов.

Понимаемая цель геометрически трактуется как область в пространстве состояний, в которую должна войти траектория в конечный момент времени T .

Желаемая цель может определяться поведением траектории, например, как требование выполнения норматива C_3 среднего уровня стоимости перевозки исходных и последующих грузов

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{p \in P_{out}} C_p S_p(t) d(t) \leq C_3$$

Обе приведенные формулы определяют цель с помощью некоторого ограничения на вид траекторий в пространстве состояний. Цель считается достигнутой, если принятый вариант управления приводит к траектории, удовлетворяющей ограничениям и к значениям функционалов, не выходящим за пределы заданных.

2. Требование достижения максимума объема или минимума себестоимости перевозок. Такая формализация выдвигает требование невыхода функционала за заданные пределы. Если ввести функцию-индикатор допустимой области, равную единице всюду в этой области и нулю вне ее, то достижение максимума индикатора будет эквивалентно входу в допустимую область.

Например, требование (1) эквивалентно требованию

$$\max l \left[\sum_{i \in P_{out}} C_i S_i(T) - b(T) \right]$$

Таким образом, в первом случае выработка управляющего решения закончится, как только будет найден хоть один вариант управления $\chi(\tau)$, при котором соответствующая траектория $U(t)$ войдет в допустимую ограничением область. Во втором случае процесс выработки решения может закончиться только после установления факта, что не существует ни одного варианта управления, приводящего к лучшему (большему или меньшему) значению функционала. В принципе для установления этого факта требуется перебрать все возможные варианты управлений, ибо хотя бы один пропущенный и может оказаться лучшим.

Совокупность формальных приемов поиска наилучших решений составляет задачу оптимизации системы управления транспортным процессом. Учет неадекватности модели и реальности в рамках самого модельного описания осуществляется введением в модель факторов неопределенности. Дадим обобщенное описание роли этих факторов, обозначив их символом Ω . Если детерминированная модель дает однозначное отображение начального состояния $U(0)$ в состояние $U(t)$ (при принятом фиксированном решении) единственную траекторию движения в пространстве состояний, то модель с фактором неопределенности задает семейство, пучок траекторий. Фиксированному ω соответствует единственная траектория. Множество возможных значений ω , область неопределенности Ω отображаются на множество всех траекторий, входящих в пучок.

Таким образом, модель предусматривает, что при единственно закрепленном варианте управления χ будущее поведение не единственно и может соответствовать любому из пучка траекторий, описываемых семейством операторов m , $\omega \in \Omega$. Тем самым построение модели отображает постулированную выше невозможность точного прогноза последствий

Исходя из гипотезы статистической устойчивости факторов неопределенности можно считать их случайными величинами. При этом удастся ввести на области Ω вероятностную меру $P(\omega \in \Omega)$ для любого $\chi \in \Omega$, иными словами, дать численную характеристику возможности реализации того или иного значения фактора неопределенности. Вероятностное описание неопределенности делает модель стохастической, а процесс изменения состояния — случайным процессом. Под факторами неопределенности понимаются разбросы параметров операций a^{\pm}, τ относительно их средних значений.

Любая строительная транспортно-технологическая система состоит из множества элементов, находящихся в сложных и разнообразных взаимозависимостях, многие из которых могут иметь случайный характер. Энтропия H такой системы по аналогии со статистической физикой может быть записана в виде

$$H = a l_n B,$$

где a — постоянная; B — показатель неупорядоченности системы.

В качестве меры процесса управления можно выбрать количество управляющей информации. Тогда неупорядоченность системы после внесения в нее управляющей информации J изменится и станет равной

$$B = B_{\text{экс}} \exp(-J/a)$$

Неупорядоченность системы приводит к снижению ее эффективности, причем эффективность системы определяется

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} [1 - B_0 \exp(-1/a)],$$

где B_0 — показатель неупорядоченности системы в исходном состоянии при наличии управляющей информации J_0 . Полагая, что стоимость системы управления C_y пропорциональна количеству управляющей информации, получаем связь стоимости системы управления с эффективностью всей системы

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} [1 - B_0 \exp(-\frac{C_y}{C_{yo}})]$$

Повышение степени управления должно сочетаться с ростом эффективности самой системы, так как никакая степень управления не позволит превзойти \mathcal{E}_{\max} . Если выразить как функцию вложенных в систему средств (C_3), то можно определить оптимальный уровень управления и максимальный уровень эффективности системы

$$\mathcal{E}_{\max} = \mathcal{E}_0 [1 - \exp(-\frac{C_3}{C_{30}})],$$

где \mathcal{E}_0, C_{30} - коэффициенты.

Тогда, приняв допустимый уровень затрат $C = C_3 + C_y$, можно вычислить оптимальные затраты на управления и повышение эффективности транспортных перевозок. При логистическом подходе к выбору и оптимизации схем транспортировки строительных грузов экономическая составляющая транспортных затрат зависит от трудоемкости, продолжительности выполнения погрузо-разгрузочных и транспортных операций, от рисков, связанных с нарушением сроков и непрерывности процессов доставки грузов на производственную площадку.

Вывод.

Предложена математическая модель управления транспортными потоками строительных грузов, устанавливающая зависимость стоимости и эффективности системы управления от количества управляющей (исходной) информации при выполнении заданного объема транспортных перевозок в конкретные сроки строительства объектов.