

С. В. Дорошко // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1992. – С. 93–97.

7 **Негрей, В. Я.** Методика выбора расчетных вагонопотоков при разработке плана формирования поездов / В. Я. Негрей, С. В. Дорошко // Проблемы развития транспортных коммуникаций : междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2000. – С. 20–28.

8 **Кочнев, Ф. П.** Организация движения на железнодорожном транспорте / Ф. П. Кочнев, В. М. Акулиничев, А. М. Макарович. – М. : Транспорт, 1979. – 568 с.

9 **Петров, А. П.** План формирования поездов: Опыт, теория, методика расчетов / А. П. Петров. – М. : Трансжелдориздат, 1950. – 483 с.

10 **Правдин, Н. В.** Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, Н. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.

11 Развитие станций для повышения эффективности и безопасности формирования и пропуска групповых поездов в железнодорожных узлах / М. Н. Луговцов [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2002. – С. 45–46.

12 **Ардашин, В. А.** Распределение грузовых перевозок на полигонах железнодорожной сети / В. А. Ардашин // Тр. ИКТП при Госплане СССР. – 1981. – Вып. 88. – С. 52–63.

13 **Негрей, В. Я.** Распределение сортировочной работы в условиях колебаний вагонопотоков / В. Я. Негрей, Н. П. Негрей, С. В. Дорошко // Совершенствование технологии работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – С.45–52.

14 **Буянова, В. К.** Система организации вагонопотоков / В. К. Буянова, А. И. Сметанин, Е. В. Архангельский. – М. : Транспорт, 1988. – 223 с.

15 Транспорт и связь СССР : стат. сб. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 299 с.

Получено 25.01.2008

S. V. Doroshko. Calculated carriage flows for development of plan of formation and selection of shunting work distribution variant.

The analysis of existing methods of selection of choice of plan car traffic during train formation plan calculation is given. It is considered the influence of calculated meanings of car traffic volume on the loss of car-hour accumulation and also the number of days under which the correction of train marshalling plan is needed. The examples of calculation of flow capacity of car traffic volume under probable distribution of car traffic fluctuations are shown. It is given the calculation of the number of days in a year when the flow capacity will exceed the critical limit. It is offered for a number of assignments with unstable car traffic a probability model of marshalling plan formation. It is recommended to use variable economy per one car which is passed through the station without reclassification. Suggested recommendation will allow to establish lines of freight trains graph more precisely on directions, planning of train marshalling on direction with the aim decrease of rolling stock idletime, minimizations of shunting work.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2008. № 1 (16)

УДК 656.222.3

А. А. ЕРОФЕЕВ, старший преподаватель, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПЕЗДООБРАЗОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПОЛИГОНЕ

Определена цель системы поездообразования и направления ее оптимизации. Для выбора оптимального варианта поездообразования предложен метод динамического программирования. Приведена графическая интерпретация задачи формирования вариантов поездообразования и отыскания оптимального. Дано математическое описание полигона совместного поездообразования. Выделены полигоны влияния и зарождения корреспонденций вагонопотоков. Установлены нагрузки на систему и параметры, характеризующие вариант поездообразования. Определены вектор и начальное состояние системы, функции перехода и целевая. Установлены управляющие воздействия, которые могут использоваться при разработке вариантов. Приведены технологические ограничения, накладываемые на возможные сочетания вариантов поездообразования по станциям полигона. Сформулирована задача поездообразования и определены последовательность ее решения, возможность применения описанного математического аппарата в практических целях.

Эффективная система организации вагонопотоков основана на оптимизации процессов поездообразования на грузовых, сортировочных и участковых станциях. Целью оптимизации системы поездообразования является сокращение времени нахождения вагонов на станциях, затрат на их переработку, а также оптимизация

вагонопотоков на участках и направлениях дороги, позволяющая освоить объемы перевозок уменьшенным парком грузовых вагонов и локомотивов, снизить потребность в энергетических ресурсах.

Традиционно оптимизация системы поездообразования производится на станционном уровне,

что существенно сокращает количество возможных вариантов организации вагонопотоков в поезда и не позволяет, в некоторых случаях, учесть оптимальный. При управлении процессами поездообразования на железнодорожном полигоне появляется возможность объединения (усиления) струй за счет подвода в участковых назначениях части дальних корреспонденций в пункты зарождения более близких, что дает возможность сформировать назначения повышенной транзитности. К корреспонденциям, требующим первоочередного подвода в участковых поездах, можно отнести остатки вагонов, не вошедших в состав транзитного назначения из-за ограничений по массе и длине поезда. Следует учесть, что для сложного полигона возможно усиление назначения корреспонденциями с нескольких станций. Возможен подвод отдельных корреспонденций и в сквозных назначениях.

Для **определения оптимального варианта поездообразования для полигона** предлагается использовать *метод динамического программирования*. Процесс выбора разбивается на этапы и протекает в обратном направлении – от последней станции полигона планирования к первой. Для каждой станции полигона находятся такие варианты поездообразования, которые при определенных условиях (не только для данной станции, но и для всех последующих) оптимальны – условно-оптимальные решения. Далее производятся расчеты для предпоследней станции, определяется вариант поездообразования для данной станции уже с учетом найденного условно-оптимального решения для последней станции. Аналогично находятся решения и для остальных станций полигона.

Таким образом, для каждой станции определяет- ся некоторое множество условно-оптимальных вариантов. Непрерывная последовательность их для всех станций полигона совместного планирования выражает одно из возможных решений задачи в целом (допустимую стратегию).

Сопоставляя варианты поездообразования между собой, находим оптимальную стратегию (такое построение решения возможно благодаря принципу оптимальности Беллмана: в каждый момент времени оптимальная стратегия не зависит от предыдущего решения, а лишь от состояния системы в данный момент и от последующего решения) и, проходя весь процесс уже от начала к концу, выделяем по каждой станции оптимальные варианты поездообразования как составляющие выбранной стратегии.

Система поездообразования с позиции теории систем является развивающейся:

- корреспонденции продвигаются между станциями поездообразования и оказывают влияние на последующие станции полигона совместного планирования;
- мощности накапливаемых по каждой станции назначений изменяются с течением времени за счет образования новых корреспонденций и поступления уже имеющихся с других станций полигона.

Графическая интерпретация задачи отыскания оптимального варианта поездообразования методом динамического программирования представлена на рисунке 1.

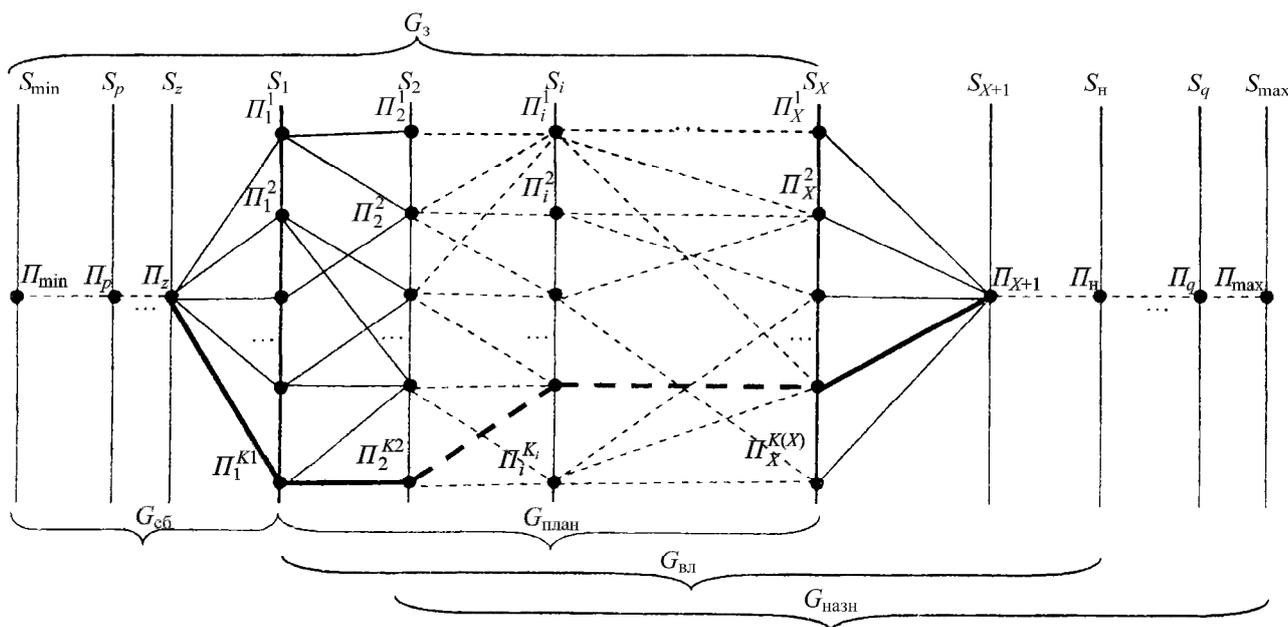


Рисунок 1 – Графическая интерпретация задачи отыскания оптимального варианта поездообразования

Полигон поездобразования состоит из множества станций $\{S\}$. Каждая из станций полигона отображается в виде оси графа. Множество станций $\{S_i\}$ принадлежат полигону совместного планирования $G_{\text{план}}$ и находятся в пределах от станции входа $S_{\text{вх}} = S_1$ до выходной станции полигона $S_{\text{вых}} = S_K$. Для каждой из станций полигона $G_{\text{план}}$ определяется оптимальный вариант организации поездобразования.

Корреспонденции в систему поездобразования поступают с полигона зарождения вагонопотоков G_3 . Данный полигон включает в себя станции, принадлежащие полигону сбора информации $\{S_p\} \in G_{\text{сб}}$, которые расположены в пределах от наиболее дальней станции образования корреспонденций $S_{\text{мин}}$ до входной станции полигона планирования $S_{\text{вх}}$ (исключая ее) и множество станций полигона планирования $\{S_i\} \in G_{\text{план}}$, т. е. $G_{\text{сб}} + G_{\text{план}} = G_3$.

На полигоне назначений $G_{\text{назн}}$ можно выделить полигон влияния $G_{\text{вл}}$, в пределах которого возможны корректировки плана формирования. Полигон влияния $G_{\text{вл}}$ ограничивает наиболее дальняя станция $S_n \in G_{\text{назн}}$, до которой с полигона планирования $G_{\text{план}}$ может быть сформировано транзитное назначение. Следовательно, корректировки плана формирования, проведенные для станций полигона $G_{\text{план}}$, влияют на выбор варианта поездобразования станций полигона $G_{\text{вл}}$, т. е. $\{S_i\} - S_{\text{вх}} + \{S_K\} \in G_{\text{вл}}$. До станций назначения $\{S_q\}$, находящихся далее S_n , корреспонденции следуют в соответствии с действующим планом формирования либо в соответствии с вариантами, выбранными для последующих полигонов планирования.

Оси графа, соответствующие станциям входа $S_{\text{вх}}$ и выхода $S_{\text{вых}}$ и ограничивающие полигон планирования, выделены на рисунке жирными линиями.

Для каждой станции полигона планирования S_i можно выделить множество вариантов организации поездобразования $P_i^1; P_i^2; \dots; P_i^K$, которые характеризуются перечнем формируемых назначений и их мощностью, накоплением вагонов на каждое назначение, где K – количество вариантов поездобразования по каждой станции. Каждый вариант поездобразования отображается в виде вершины на соответствующей оси графа. Варианты поездобразования упорядочены на осях графа по степени реализации потенциала транзитности.

Состояние P_i^1 оценивается максимальным уровнем реализации потенциала транзитности – корреспонденции при данном варианте поездобразования следуют преимущественно в самостоятельных сквозных назначениях, состояние P_i^K соответствует минимальной реализации потенциала транзитности – корреспонденции следуют в участковом назначении.

Расстояния между вертикальными осями графа отражают этапы продвижения корреспонденций между станциями.

Вершины графа (варианты поездобразования $\{P_j^j\}$) связаны между собой дугами. Так как варианты поездобразования на станциях полигона планирования взаимозависимы друг от друга, вершины графа соединены дугами не каждая с каждой, а с учетом варианта поездобразования, реализованного на предыдущей станции полигона. Весом дуги $D(P_{i-1}^{j1}; P_i^{j2})$ являются затраты на реализацию варианта поездобразования P_i^{j2} на станции S_i в зависимости от мощности поступающего в переработку со станции S_{i-1} вагонопотока, который может усилить соответствующие назначения (определяется вариантом плана формирования P_{i-1}^{j1}).

Ориентированным путем или цепью, связывающей вершины $P_{\text{вх}}^j$ и $P_{\text{вых}}^j$, является последовательность дуг, описывающая последовательную реализацию вариантов поездобразования на станциях полигона планирования, т. е. вариант поездобразования для полигона. Длиной цепи является сумма весов дуг $\sum_{i=S_{\text{вх}}}^{S_{\text{вых}}} D(P_i^j; P_i^j)$, т. е. сум-

марные затраты, связанные с реализацией выбранного варианта поездобразования. Исходный вариант поездобразования, соответствующий действующему на начальный момент времени на полигоне плану формирования, выделен на графе жирными линиями.

При определении мощности назначений для заранее установленного периода планирования агрегируются значения мощностей элементарных корреспонденций, поступающих в систему поездобразования за установленный период и имеющих одну станцию назначения.

Методика определения оптимального варианта поездобразования. Система поездобразования может быть рассмотрена в дискретные моменты времени $t = t_0; t_1; \dots; t_j; \dots; t_n$, где t_0 – начальный момент времени (исходное состояние

системы); t_n – конечный момент времени для установленного периода планирования поездообразования.

В зависимости от мощности вагонопотока, поступающего в систему поездообразования, и его структуры в каждый конкретный момент времени t может изменяться дальность накапливаемых назначений, их количество и продолжительность накопления по каждой из выбранных станций.

Совокупность состояний системы поездообразования станции S_i в момент времени t можно определить через *вектор состояний системы*

$$\Pi(i)_t = \{ \Pi(i)_t^1; \Pi(i)_t^2; \dots; \Pi(i)_t^{K_i} \}.$$

При определении оптимального варианта поездообразования расчеты выполняются отдельно для каждого дискретного момента времени, т. е. строится множество направленных графов сочетаний вариантов, и для каждого из них устанавливается условно-оптимальная стратегия. Множество значений оптимальных стратегий образуют динамическую матрицу условно-оптимальных стратегий (матрицу изменения во времени оптимальных вариантов поездообразования по станциям совместного планирования). Расчеты выполняются отдельно по установленным периодам времени для всего множества графов.

Состояние системы поездообразования первой станции полигона совместного планирования S_1 для первого графа (на начальный момент времени $t = 0$) считается заданным [имеется массив данных о поездах, подлежащих расформированию ($P_{S_1}^p$), составах, подлежащих отправлению со станции ($P_{S_1}^o$), положении путей сортировочного парка (H_{S_1}), прогноз подвода поездов к станции ($P_{S_1}^{np}$) и количество накапливаемых на станции на k , принимается известным прогнозные время завершения накопления вагонов на каждое назначение].

Система поездообразования может быть переведена из начального состояния в последующее при помощи функции перехода $U(i)$ (управляющего воздействия), характерной для каждой станции. Эта функция – количественная характеристика перехода системы в следующее состояние на определенном этапе в зависимости от предыдущего: затраты на продвижение множества корреспонденций со станции S_i до станции S_{i+1} в соответствии с выбранным вариантом поездообразования.

Множество вариантов организации поездообразования на станции S_i (исходное состояние) обо-

значим как $\Pi(i)$. Состояние системы $\Pi(i+1)$ определяет вектор состояния $\Pi(i)$, т. е. состояние на предыдущем этапе планирования и управляющее воздействие на систему $U(i+1)$ (вариант организации работы по реализации каждого из возможных вариантов

$$\{ \Pi(i+1)_t^1; \Pi(i+1)_t^2; \dots; \Pi(i+1)_t^{K_{i+1}} \}.$$

поездообразования на станции S_{i+1} , целесообразность которого определяется путем расчета связанных с ним затрат).

Управляющее воздействие $U(i+1)$ состоит в определении:

- перечня накапливаемых на станции S_{i+1} назначений $\{N_{i+1;q}\}$
- перечня корреспонденций, входящих в состав каждого назначения $\{k_{pq}\}$;
- времени окончания формирования поездов по каждому назначению $\{T_{N_{i+1;q}}^{off}\}_{t+1}$;
- потребных технических и технологических ресурсов, необходимых для реализации выбранного варианта.

Управляющее воздействие определяет затраты на перевод системы в каждое из возможных состояний системы

$$\{ \Pi(i+1)_t^1; \Pi(i+1)_t^2; \dots; \Pi(i+1)_t^K \}.$$

Если имеющихся технических и технологических ресурсов недостаточно для реализации выбранного варианта поездообразования $\Pi(i+1)_t^j$, т. е. невозможно реализовать такое управляющее воздействие $U(i)^j$, которое позволит выполнить переход из состояния $\Pi(i)_t^j$ в состояние $\Pi(i+1)_t^j$, такой вариант поездообразования из расчетов исключается.

Проследование корреспонденций по полигону совместного планирования можно определить через последовательность

$$\Pi = \{ \Pi(1); \Pi(2); \dots; \Pi(i); \dots; \Pi(X) \},$$

где $\Pi(i)$ – вектор состояния системы по каждой станции поездообразования. Последовательность векторов определяет стратегию развития системы. Стратегия является допустимой, если существует управление, позволяющее выполнить переход из любого состояния системы в следующее. Исход-

ная стратегия, соответствующая действующему плану формирования, на графе выделена жирной линией. Остальные варианты стратегий образуются последовательностью соединенных векторов. Если между состояниями $\Pi(i)^{j_i}$ и $\Pi(i+1)^{j_{i+1}}$ нет вектора связи, считается, что данная стратегия недопустима, и в расчетах она не рассматривается.

Каждая стратегия оценивается функцией цели $W(\Pi)$. Для системы поездообразования функцией цели будут являться суммарные затраты, связанные с продвижением корреспонденций со станций полигона совместного планирования до станции назначения. При этом учитываются затраты на нахождение под накоплением поступающих корреспонденций $\{k_{pq}\}$ и следования корреспонденций до станций назначения $\{q\}$ по участкам и транзитом через технические станции. Задача состоит в том, чтобы найти допустимую стратегию, обеспечивающую максимум функции цели (максимальную экономию затрат на продвижение корреспонденции от станции поездообразования до станции назначения за счет повышения транзитности вагонопотока). Следует отметить, что в отличие от затрат на накопление, экономия от реализации потенциала транзитности возникает не только на полигоне совместного планирования, но и на полигоне назначения корреспонденций. Следовательно, для расчета целевой функции необходимы параметры всех станций полигона назначений $G_{\text{назн}}$.

Функция цели для системы поездообразования может быть задана через суммарные затраты на реализацию управляющих воздействий $U\{\Pi(i); \Pi(i+1)\}$, по переводу системы из состояния $\Pi(i)$ в состояние $\Pi(i+1)$:

$$W(\Pi) = \sum_{i=1}^X U\{\Pi(i), \Pi(i+1)\}.$$

То есть определяются затраты на продвижение корреспонденций до станций назначения S_q в соответствии с выбранным для станции S_i вариантом поездообразования $\Pi(i)$ и установленными вариантами поездообразования для последующих станций полигона $\Pi(i+1)$. Следовательно, функцию цели можно считать функцией управления, так как любую допустимую стратегию определяет последовательность допустимых управлений

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_X).$$

Таким образом, задачу выбора оптимального сочетания вариантов поездообразования $\Pi = \{\Pi(1); \Pi(2); \dots; \Pi(X)\}$ по станциям полигона $S_1; S_2; \dots; S_i; \dots; S_X$ на каждый период времени t_j можно сформулировать следующим образом: необходимо определить последовательность управлений

$$U' = (U'_0, U'_1, \dots, U'_X),$$

максимизирующих функцию цели

$$W(\Pi) = \sum_{i=1}^X U\{\Pi(i), \Pi(i+1)\}$$

при условии, что

$$\Pi(i+1) = f\{\Pi(i), U(i)\}; \Pi(i) \in \{\Pi(i)_t^j\};$$

$$U(i) \in \{U(i)_t\}; i = 1, 2, \dots, X.$$

Обозначим через $W\{\Pi\}$ максимальное значение функционала $\sum_{i=1}^X U_i$ для $\Pi(i); U(i); i = 1, \dots, X$, удовлетворяющего условиям задачи. Тогда, применяя последовательно принцип оптимальности к функциям W_1, W_2 и т. д., можно записать следующую систему функциональных уравнений:

$$W_1\{\Pi(1)\} = \max[U_1\{\Pi(1), \Pi(2)\} + W_2\{\Pi(2)\}];$$

$$W_2\{\Pi(2)\} = \max[U_2\{\Pi(2), \Pi(3)\} + W_3\{\Pi(3)\}];$$

...

$$W_i\{\Pi(i)\} = \max[U_i\{\Pi(i), \Pi(i+1)\} + W_{i+1}\{\Pi(i+1)\}];$$

...

$$W_X\{\Pi(X)\} = \max[U_X\{\Pi(X), \Pi(X+1)\}].$$

Так как станция S_{X+1} не принадлежит полигону планирования $S_{X+1} \notin G_{\text{план}}$, то вариант поездообразования $\Pi(X+1)$ считается заданным и оптимизации (применительно к рассматриваемому полигону планирования) не требует.

Решение системы начинается с последнего уравнения. Результат используется при решении предпоследнего уравнения и т. д. Для достижения общего оптимального результата процедура расчета выполняется два раза: на первом этапе при вычислениях от конца к началу процесса определяются оптимальные значения состояний системы

на каждом шаге расчета $P(i)$, затем при расчете от первого шага до последнего определяются оптимальные управления $U(i)$ и конечное состояние системы $P(X)$ при оптимальном управлении.

Таким образом, использование метода динамического программирования позволяет производить совместное планирование поездообразования для произвольного количества станций полигона. При этом для каждой станции определяются такие варианты поездообразования, которые обеспечивают максимальный эффект для полигона в целом.

Получено 05.06.2007

A. A. Erofeev. Mathematical target setting of definition optimum alternative trains makeup on railroad system.

The purpose of trains makeup system and directions of its optimization is determined. It is offered for a choice of optimum variant trains makeup a method of dynamic programming. It is given graphic interpretation problems of formation of trains makeup variants and starch optimum. The mathematical description of range joint trains makeup is given. The range of influence and range of origin of correspondence of traffic volumes are allocated. Loadings are established on system and the parameters describing of trains makeup variant. The vector of a condition of system, an initial condition of system, function of transition and criterion function are determined. Managing influences which may be used by development of variants are established. Technological restrictions, impose on possible combinations of trains makeup variants on stations of range are given. The problem trains makeup is formulated and the sequence of its decision is determined. The opportunity of application of the described mathematical device in the practical purposes is determined.

Приведенная методика может быть использована для разработки управляющих алгоритмов и написания программного обеспечения.

Список литературы

- 1 **Аветикян, А. А.** Потенциал транзитности вагонопотоков / А. А. Аветикян. – М. : Транспорт, 1981. – 191 с.
- 2 **Тишкин, Е. М.** Автоматизация управления вагонным парком / Е. М. Тишкин. – М. : Интекст, 2000. – 224 с.
- 3 **Вол, М.** Анализ транспортных систем / М. Вол, Б. Мартин. – М. : Транспорт, 1981. – 516 с.
- 4 **Грунтов, П. С.** Эксплуатационная надежность станций / П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1986. – 247 с.
- 5 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / под ред. П. С. Грунтова – М. : Транспорт, 1994. – 476 с.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2008. № 1 (16)

УДК 656.62(047)

Н. Н. КАЗАКОВ, кандидат технических наук; О. А. ТЕРЕЩЕНКО; ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ГРУЗОВОЙ ЛИНИИ

В настоящее время одной из сфер эффективного функционирования водного транспорта Республики Беларусь является использование его в системе мультимодальных перевозок экспортно-импортных грузов. Реализовать данную задачу с максимальным эффектом можно только в том случае, если рассматривать процесс функционирования мультимодальной грузовой линии как объект оптимизации.

Мультимодальная грузовая линия является сложной оптимизируемой системой, одним из методов исследования которых является имитационное моделирование. Изложена концепция создания имитационной модели мультимодальной грузовой линии с участием водного транспорта, построенной по модульному принципу. В качестве модулей предлагается использовать модули двух порядков, адекватно описывающих элементарные технологические операции и укрупненные операции перевозочного процесса.

Имитационная модель мультимодальной грузовой линии, построенная по предложенным принципам, позволяет моделировать параметры организации перевозочного процесса с участием нескольких видов транспорта в зависимости от различных факторов. При использовании результатов моделирования в оптимизационных моделях эксплуатационной науки в качестве исходных данных возникает возможность обоснования оптимальных параметров перевозочного процесса и процессов взаимодействия видов транспорта в зависимости от выбранных критериев.

Материал изложен на примере организации мультимодальной перевозки нефтегрузов Мозырского нефтеперерабатывающего завода в порт Вуковар с участием водного транспорта Республики Беларусь.

Тенденции мирового рынка в настоящее время сложились таким образом, что большинство грузовладельцев отказалось от традиционной системы доставки груза отдельными видами транспорта изолированно друг от друга, перейдя к интегрированной – мультимодальной перевозке. Система

мероприятий организации перевозок грузов и движения подвижных единиц по системе мультимодальных грузовых линий является важным резервом логистической эффективности доставки товара от грузовладельца до потребителя.

Несмотря на то, что мультимодальные и интер-