

# Моделирование пассажиропотоков в ТПУ



Сергей ВАКУЛЕНКО  
Sergey P. VAKULENKO

Виктор ДОЕНИН  
Viktor V. DOENIN



Надежда ЕВРЕЕНОВА  
Nadezhda Yu. EVREENOVA

*Вакуленко Сергей Петрович — кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и информационных технологий Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

*Доенин Виктор Васильевич — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия*

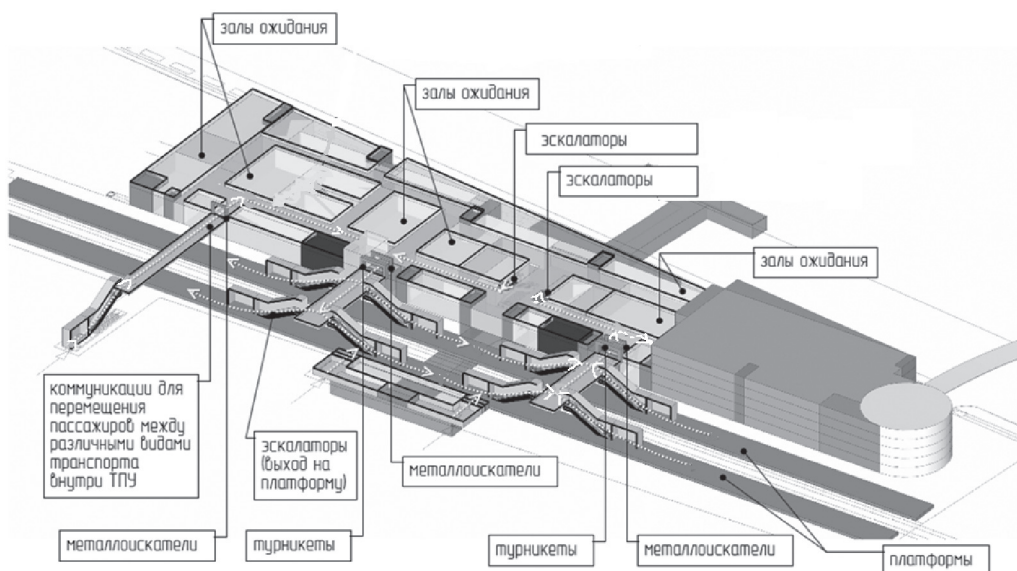
*Евреенова Надежда Юрьевна — аспирант и ассистент МИИТ, Москва, Россия.*

**Рассмотрена описательная часть моделирования пассажиропотоков в транспортно-пересадочном узле, учитывающая логические зависимости в организации их перемещения в целом и вместе с тем отдельных людей и групп. Показаны и получили свою трактовку все возможные типы операций, наблюдаемые в моделируемом пространстве и предполагающие реакции управляющих устройств. Разные по сложности ситуации с организацией пассажиропотока оцениваются при заданных архитектурно-планировочных решениях и размерах комплекса.**

*Ключевые слова:* транспортно-пересадочные узлы, пассажирские перевозки, математическое моделирование, пассажиропотоки, логика поведения пассажира.

**Т**ранспортно-пересадочный узел (ТПУ) — сложная система, состоящая из дискретного множества пассажиров, перемещающихся в дискретном пространстве в дискретные моменты времени, и при этом отдельно взятый каждый пассажир может автономно, независимо от других принимать решение о том, что необходимо сделать на следующем шаге, исходя из анализа своего собственного поведения или состояния всей системы. Для моделирования подобной системы необходимы принципы, учитывающие, что в основе организации движения пассажиропотоков и перемещения отдельных участников общего процесса лежат логические зависимости [1].

Решение задачи построения математической модели функционирования ТПУ показано на примере предпроектных проработок. Аксонометрическая схема узла приведена на рис. 1. Особый интерес представляет его второй уровень (рис. 2), поскольку именно здесь сконцентрирован наибольший процент технологических площадей. Для рассматриваемого предпроектного варианта в пространстве ТПУ формируются следующие пассажиропотоки:



**Рис. 1. Аксонометрическая схема ТПУ: размещение основных устройств и направления движения основных пассажиропотоков.**

$V^u$  — пассажиры с проездными документами, попадающие на 2-й этаж узла с помощью эскалаторов и двигающиеся в направлении турникетов входа на пассажирскую платформу к пригородным поездом;

$V^m$  — пассажиры с проездными документами, следующие на пересадку с монорельсового транспорта в направлении турникетов входа на пассажирскую платформу к пригородным поездом;

$V^p$  — пассажиры с проездными документами, пользующиеся паркингом и двигающиеся в направлении турникетов к пригородным поездом;

$C^{uk}$  — пассажиры, попадающие на 2-й этаж ТПУ с помощью эскалаторов и направляющиеся к кассам, а затем к турникетам пригородного сообщения;

$C^{mk}$  — пассажиры, следующие на пересадку с монорельсового транспорта к кассам, а затем к турникетам пригородного сообщения;

$C^{pk}$  — пассажиры, пользующиеся паркингом и направляющиеся к кассам, а затем к турникетам входа на пассажирскую платформу;

$W^u$  — пассажиры, прибывшие в пригородных электропоездах и следующие через турникеты выхода с пассажирских платформ к эскалатору;

$W^{pu}$  — пассажиры, прибывшие на личном автотранспорте и следующие к эскалатору;

$W^{mu}$  — пассажиры, прибывшие монорельсовым транспортом и следующие к эскалатору;

$W^p$  — пассажиры, прибывшие в пригородных электропоездах и следующие через турникеты выхода с пассажирских платформ на «перехватывающую» парковку;

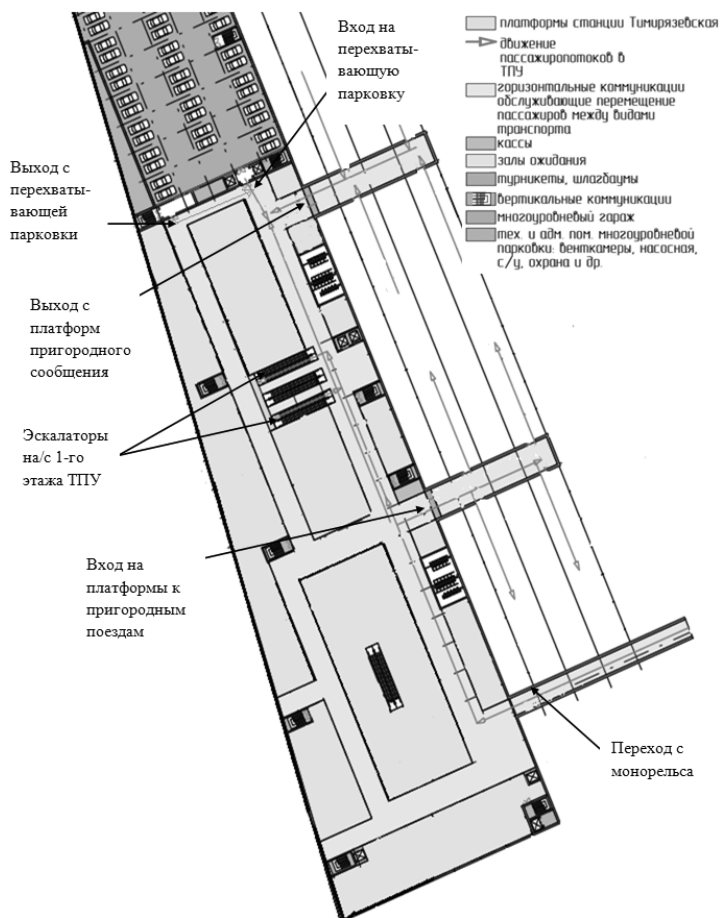
$W^m$  — пассажиры, прибывшие монорельсовым транспортом и следующие на «перехватывающую» парковку.

Помимо перечисленных пассажиропотоков в пространстве ТПУ может быть незначительное число людей, следующих в залы или из залов ожидания, направляющихся к объектам сервисного обслуживания или от них и т. д. Однако в ТПУ их доля настолько мала по сравнению с основными пассажиропотоками, что она не может повлиять на устойчивость и эффективность функционирования узла.

С целью сокращения объема описания сходных по поведению потоков их виды будут только упомянуты, а при небольших отличиях друг от друга найдут отражение лишь их типичные особенности. Пространство ТПУ представлено в виде разбитой на зоны ленты (рис. 3). В каждой зоне может быть записан только один символ



Рис. 2. План второго этажа и направления движения пассажиропотоков ТПУ.



из алфавита  $Y$ , содержащий следующие переменные [2]:

$$Y = \{S_i, B_j, V_l, R_m, N_p\}. \quad (1)$$

Символы  $B_j$  характеризуют незанятость зоны каким-либо объектом;  $S_i$  — адреса пунктов ТПУ;  $V_l$  — транспортные объекты (пассажиры);  $R_m$  — места возможного изменения маршрута движения пассажира и выбора дальнейшего направления;  $N_p$  — препятствия на пути следования.

Перемещение объекта  $V_l$  осуществляет управляющее (исполнительное) устройство  $q_j$ , которое обладает способностью просматривать ближайшие соседние зоны и перемещать объект вперед или назад.

События, которые возникают в подобной модели, и реакции транспортного оператора описаны выражением:

$$\frac{V_l}{q_j} BST \frac{V_l}{q_k}, \quad (2)$$

где первая тройка символов

$$\frac{V_l}{q_j} B \quad (3)$$

характеризует событие, а вторая —

$$ST \frac{V_l}{q_k} \quad (4)$$

одну из возможных реакций транспортного оператора.

Под транспортным оператором понимают конечную совокупность операций, среди которых нет операций с одинаковыми начальными тройками. В целом совокупность (2) означает логическую операцию, которая может быть использована для управления транспортным процессом на каком-то шаге его развития. При рассмотрении всех возможных типов логических операций использовано множество  $D$ , характеризующее реакции управляющего устройства  $q_j$ :

$$D = \{ST, RE, EX, R, L, R(S_k)\}, \quad (5)$$

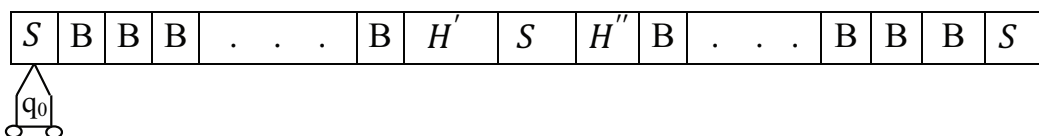


Рис. 3. Разбивка пространства ТПУ на зоны.

где ST — команда на перемещение на один шаг по ходу движения; RE — команда изменения направления движения; EX — команда ожидания или остановки; R — команда на изменения направления движения направо, а L — налево;  $R(S_k)$  — команда на выполнение одного шага от зоны R к зоне  $S_k$ .

Используя демонстрируемую технологию, рассмотрим поведение потока  $V^u$ . Его описание будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{V_i^{ub}}{q_0^i} BST \frac{V_i^{ub}}{q_1^i}; \frac{V_i^{ub}}{q_1^i} BST \frac{V_i^{ub}}{q_2^i}; \dots; \\
 & \frac{V_i^{ub}}{q_{b-1}^i} BST \frac{V_i^{ub}}{q_b^i}; \frac{V_i^{ub}}{q_b^i} BR \frac{V_i^{us}}{q_0^i}; \\
 & \frac{V_i^{us}}{q_0^i} BST \frac{V_i^{us}}{q_1^i}; \frac{V_i^{us}}{q_1^i} BST \frac{V_i^{us}}{q_2^i}; \dots; \\
 & \frac{V_i^{us}}{q_{s-1}^i} BST \frac{V_i^{us}}{q_s^i}; \frac{V_i^{us}}{q_s^i} Kl_1 L \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}; \\
 & \frac{V_i^{ux}}{q_0^i} BST \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}; \frac{V_i^{ux}}{q_0^i} C_f EX \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}; \\
 & \frac{V_i^{ux}}{q_0^i} B(d) ST(d) \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}; \\
 & \frac{V_i^{ux}}{q_0^i} TU(c) TU(o) \frac{V_i^{ut}}{q_0^i}; \\
 & \frac{V_i^{ut}}{q_0^i} TU(o) ST \frac{V_i^{ut}}{q_0^i}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

В (6)  $Kl_1$  — линия последней кассы, за которой пассажир поворачивает налево к какому-то из турникетов  $TU_z$ ; s — число шагов, которое делает пассажир до первого поворота налево; b — число шагов, которое делает пассажир до первого поворота направо; x — число шагов после поворота до турникета z; t — фаза движения пассажира после прохода турникета z;  $C_f$  — пассажиры кассы f, образующие очереди у входа к платформам пригородных поездов; TU (c), TU (o) — турникеты закрытый и открытый соответственно.

В описании поведения потока пассажиров (6) не все они, сойдя с эскалаторного полотна, поворачивают направо к входу на платформы пригородного сообщения. Им можно сделать ещё несколько шагов вперёд, а затем повернуть налево. Этот выбор зависит от многих причин: физическое, душевное состояние, состояние пространства (его свобода) и т. д., и потому он моделируется на основе случайной зависимости:

$$s_i = 10 \cdot p_i, \tag{7}$$

где  $p_i$  — случайное число от 0 до 1, округляемое до первой цифры после запятой.

Учитывая особенности планировочной структуры ТПУ, можно предположить, что пассажиропотокам  $V^u$ ,  $V^m$ ,  $V^p$ , следующим мимо касс к турникетам входа на пригородную пассажирскую платформу, при большой его величине целесообразно следовать через большие очереди к кассам. Эта ситуация в описании потока (6) моделируется следующим фрагментом:

$$\frac{V_i^{ux}}{q_0^i} C_f EX \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}; \frac{V_i^{ux}}{q_0^i} B(d) ST(d) \frac{V_i^{ux}}{q_0^i}. \tag{8}$$

Совокупность выражений (9) характеризует поведение пассажиропотока  $C^{uk}$ , субъекты которого нуждаются в приобретении проездных билетов в кассах ТПУ:

$$\begin{aligned}
 & \frac{C_i^{uk}}{q_0^i} BST \frac{C_i^{ukb}}{q_1^i}; \frac{C_i^{ukb}}{q_1^i} BST \frac{C_i^{ukb}}{q_2^i}; \dots; \\
 & \frac{C_i^{ukb}}{q_{b-1}^i} BST \frac{C_i^{ukb}}{q_b^i}; \frac{C_i^{ukb}}{q_b^i} BR \frac{C_i^{uks}}{q_0^i}; \\
 & \frac{C_i^{uks}}{q_0^i} BST \frac{C_i^{uks}}{q_1^i}; \frac{C_i^{uks}}{q_1^i} BST \frac{C_i^{uks}}{q_2^i}; \dots; \\
 & \frac{C_i^{uks}}{q_{s-1}^i} BST \frac{C_i^{uks}}{q_s^i}; \frac{C_i^{uks}}{q_s^i} Kl_1 L \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i}; \\
 & \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i} BST(f) \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i}; \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i} C^{kf} EX \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i}; \\
 & \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i} B(d) ST(df) \frac{C_i^{ukf}}{q_0^i};
 \end{aligned} \tag{9}$$





$$\frac{C_{i}^{ukf}}{q_0^i} K_f EX(t) \frac{C_{i}^{ukh}}{q_1^i}; \frac{C_{i}^{ukh}}{q_1^i} K_f R \frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i};$$

$$\frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i} BST(z) \frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i};$$

$$\frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i} TU_z(c) TU_z(o) \frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i}; \frac{C_{i}^{ukh}}{q_0^i} TU_z(o) ST \frac{C_{i}^{ukt}}{q_0^i}.$$

Здесь  $f$  — фаза движения пассажира от момента выбора кассы до покупки билета;  $C^{kf}$  — пассажиропоток, ожидающий обслуживания в очереди к кассе;  $K_f$  — касса с номером  $f$ ;  $EX(t)$  — время, затрачиваемое кассиром на продажу билета;  $h$  — фаза движения пассажира после покупки билета и до турникетов.

В описании  $C^{uk}$  (9) пассажир после поворота налево к кассам принимает решение, к какой кассе он будет двигаться далее. Это он делает, исходя из длины очереди перед каждой из касс, в соответствии с выражением:

$$K_i = \min_f \{R_1, R_2, \dots, R_f\}, \quad (10)$$

где  $R_i$  — длина очереди перед  $i$ -й кассой, а пассажир выбирает для себя ту, что с минимальной очередью среди  $f$  касс. После этого  $C^{ukx}$  преобразуется в символ  $C^{ukf}$ , что означает начало новой фазы — происходит движение  $ST(f)$  к выбранной кассе  $f$ . Фаза продолжается до момента достижения «спиной» последнего ожидающего билета в этой очереди.

Пассажир, находясь в очереди, не может делать полный шаг, так как зона перед ним занята. Тогда он начинает двигаться «потихоньку», делая неполный шаг. Если освобождается часть зоны размером  $B(d)$ , то и пассажир делает перемещение соответствующего размера  $ST(d)$ . Виртуально в пространстве имеется множество сеток с различным шагом дискретизации  $d$ .

Аналогичным образом описываются пассажиропотоки  $C^{mk}$  и  $C^{pk}$ .

Наиболее простыми оказываются потоки прибывающих в ТПУ пассажиров, поскольку они не нагружены необходимостью решать какие-либо задачи, кроме одной: выйти из узла. Например, пассажиры  $W^{pu}$  с «перехватывающей» парковки следуют прямо через распределительный зал к эскалатору (11):

$$\frac{W_i^{pu}}{q_0^i} EPST \frac{W_i^{pub}}{q_1^i}; \frac{W_i^{pub}}{q_1^i} BST \frac{W_i^{pub}}{q_2^i}; \dots;$$

$$\frac{W_i^{pub}}{q_{b-1}^i} BST \frac{W_i^{pub}}{q_b^i}; \frac{W_i^{pub}}{q_b^i} BR \frac{W_i^{pur}}{q_0^i};$$

$$\frac{W_i^{pur}}{q_0^i} BST \frac{W_i^{pur}}{q_0^i}; \frac{W_i^{pur}}{q_0^i} W_l^{pur} EX(r) \frac{W_i^{pur}}{q_0^i};$$

$$\frac{W_i^{pur}}{q_0^i} B(d) ST(d) \frac{W_i^{pur}}{q_0^i}; \quad (11)$$

$$\frac{W_i^{pur}}{q_0^i} ESST \frac{W_i^{pue}}{q_0^i},$$

где  $EP$  — линия входа на 2-й этаж ТПУ с «перехватывающей» парковки;  $EX(r)$  — время, затрачиваемое пассажиром в ожидании входа на эскалатор;  $ES$  — линия начала эскалатора, работающего на спуск;  $e$  — индекс пассажира, покинувшего 2-й этаж ТПУ.

По фрагментам описания пассажиропотоков ТПУ можно заметить, что наиболее сложная ситуация по организации пассажиропотоков при заданном архитектурно-планировочном решении складывается в центральной части 2-го этажа пересадочного узла.

## Выводы

Применение приведенной технологии формализованного описания пассажиропотоков ТПУ позволяет систематизировать представление о процессах, протекающих в нем, и проанализировать общие свойства транспортных систем, абстрагируясь от деталей, характерных для каждого отдельного вида транспорта или системы, а также учесть логические зависимости в организации движения и перемещении пассажиров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Евреенова Н. Ю. Моделирование пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах // Труды международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспорта»: В 2 т. — Т. 2. — М.: МИИТ, 2013. — С.95–102.
2. Доенин В. В. Моделирование транспортных процессов и систем. — М.: Изд. «Спутник+», 2012. — 288 с.
3. Доенин В. В., Лай Мань Зунг, Ляпунцова Е. В. Логико-разностные модели движения транспортных объектов// Естественные и технические науки. — 2012. — № 2. — С. 474–480. ●