



КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕСАДОЧНОГО УЗЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е. А. Гайдук, А. А. Силина, В. Е. Таратун

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассматриваются методы создания концептуальной модели пересадочного узла на примере интеграции водного транспорта в транспортную систему Санкт-Петербурга. С использованием системного подхода проанализированы материальные, формальные, действующие и целевые аспекты взаимодействия наземного и водного транспорта. Выявлены проблемные зоны инфраструктуры, ограничивающие развитие регулярных речных маршрутов, и предложены принципы проектирования пересадочных узлов, способствующих мультимодальности. Разработана концептуальная модель, отражающая потоки пассажиров, данные и принципы управления.

Ключевые слова: транспортная система, водный транспорт, пересадочные узлы, концептуальная модель, причальная инфраструктура, городской пассажирский транспорт, цифровые двойники.

Для цитирования:

Гайдук, Е. А. Концептуальная модель пересадочного узла с применением цифровых технологий / Е. А. Гайдук, А. А. Силина, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 2(45). – с. 121-132. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-2-121-132.

Введение

В условиях постиндустриальной экономики город активно меняет свою роль. Если раньше город играл роль лишь замкнутого пространства со своими определёнными функциями, то при стремительной урбанизации физическая граница пространства стирается, города сливаются, образуя агломерации, — следовательно, меняется и их взаимодействие.

Кроме того, город теряет и своё значение как исключительно индустриальной системы. Так, например, предлагая идеальный тип города, Макс Вебер делает акцент на физическом пространстве и автономии городов и выделяет их производственную и рыночную роль [1]. А современные мегаполисы, по мнению М. Кастельса, становятся «информационными городами», в рамках которых роль территориального расположения снижается, при этом увеличивается роль коммуникационных сетей: доминирует пространство потоков, которое «связывает удалённые друг от друга места общими функциями и смыслами на основе электронных схем и скоростных транспортных коридоров, изолируя и подчиняя логику опыта, воплощённого в пространстве мест» — независимость города снижается [2]. Централизованная модель сменяется полицентрической, и это приводит к необходимости более эффективного перераспределения транспортной сети. Растёт потребность во внедрении цифровых технологий на транспорте. Переход к интеллектуальным транспортным системам улучшает конкурентоспособность города в глобальной экономике: с их помощью можно оптимизировать потоки людей и товаров, обеспечивать инклюзивность различных социальных слоёв в городскую систему, что улучшает её эффективность.

Принципы анализа транспортной системы

Планирование транспортных систем может осуществляться на различных уровнях [3] в зависимости от масштаба планирования (Рис. 1). Для обеспечения эффективной работы транспортной системы города необходимо разработать стратегию на первом уровне, которая позволит интегрировать различные виды транспорта в единый комплекс, при этом учитывая потребности конкретного района и его жителей. Оптимизация транспортной системы – сложная задача, требующая учета множества факторов. К ним относятся плотность населения, уровень автомобилизации, географические особенности региона и поведение граждан. Важно понимать, что транспортная система представляет собой взаимосвязанный комплекс, включающий общественный, личный и грузовой транспорт, а также различные объекты



инфраструктуры. Изменение одного элемента может повлиять на всю систему в целом. Решение этой проблемы возможно только на основе системного подхода, который подразумевает рассмотрение не отдельных элементов, а совокупности сущностей и их взаимосвязей [4].

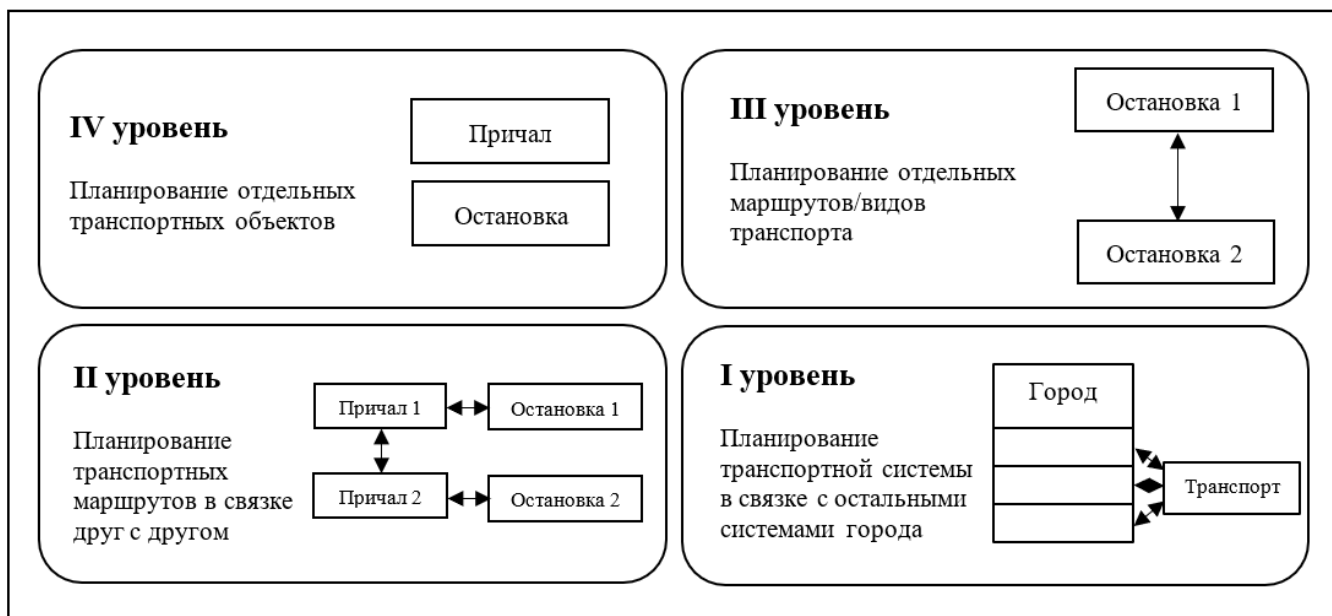


Рис. 1. Уровни планирования транспортных систем

В современных мегаполисах для обеспечения эффективной работы транспортной системы города необходимо разработать стратегию на первом уровне, которая позволит интегрировать различные виды транспорта в единый комплекс, при этом учитывая потребности конкретного района и его жителей. Оптимизация транспортной системы — сложная задача, требующая учета множества факторов. К ним относятся плотность населения, уровень автомобилизации, географические особенности региона и поведение граждан. Важно понимать, что транспортная система представляет собой взаимосвязанный комплекс, включающий общественный, личный и грузовой транспорт, а также различные объекты инфраструктуры. Изменение одного элемента может повлиять на всю систему в целом. Решение этой проблемы возможно только на основе системного подхода, который подразумевает рассмотрение не отдельных элементов, а совокупности сущностей и их взаимосвязей.

На примере опыта организации сетей водного транспорта в других городах можно понять, что необходимо воспринимать цели и причины его внедрения, так как это может принципиально изменить итоговый результат. В качестве основы для анализа системы взято учение Аристотеля о концепции четырёх причин. Его суть сводится к тому, что существует 4 первопричины бытия: материальная, формальная, движущая, целевая. Материя — это составляющая объекта, форма — суть, идея или образ объекта, действующая причина — внешний стимул, который преобразует материю в форму, а цель — замысел, ради которого осуществляется действие [5]. Концепция Аристотеля удобна для применения в анализе систем по многим причинам. Во-первых, совокупностью данных причин можно описать любой процесс или объект, при этом объяснение работы системы остаётся комплексным. Во-вторых, данной структурой причин подчёркивается взаимосвязь между устройством и предназначением, что согласуется с системным подходом. В-третьих, согласно данному принципу, система не отделяется от её цели, а её эффективность оценивается именно в контексте выполнения этой цели. Концепцию можно использовать как инструмент для постановки и анализа проблем, рассматривая её под разными углами: достаточно ли ресурсов,



как она организована, как и ради чего возникают изменения. Подход помогает формировать сбалансированные и содержательные модели.

Безусловно, для использования концепции «четырёх причин» её необходимо переложить на язык системного анализа:

1. Материальная причина — ресурсы или элементы системы. Пример: сырьё, данные, человеческие ресурсы.
2. Формальная причина — структура, организация системы. Пример: связи между элементами, алгоритмы работы.
3. Действующая причина — механизм функционирования. Пример: запускающие процессы, внешние и внутренние воздействия.
4. Целевая причина — цель или функция системы. Пример: задача, которую система должна решать.

Этот подход можно применить и к анализу транспортной системы. В работе рассматривается взаимодействие наземного и водного транспорта. Упрощённый вариант такого анализа представлен на рисунке 2. Ключевой момент — возможность создания интеллектуальной транспортной системы на базе текущего состояния городского пассажирского транспорта Санкт-Петербурга. Поэтому значительное внимание уделяется обмену данными и разработке цифрового двойника модели для оптимизации работы системы в будущем.



Рис. 2. Концептуальная модель системы «Наземный транспорт-водный транспорт»

Материальная причина

Санкт-Петербург — один из крупнейших транспортных узлов России, сочетающий в себе разнообразные виды транспорта, однако его инфраструктура не справляется с растущими потребностями населения. Транспортная система города характеризуется разрозненностью:



между различными видами транспорта отсутствует эффективная связка, а улично-дорожная сеть (УДС) перегружена и функционирует на пределе пропускной способности [6]. Исторически сложившаяся радиально-дуговая планировка приводит к концентрации потоков в центральной части города, усугубляя ситуацию. Высокий уровень автомобилизации, нехватка парковочных зон и ограниченные возможности для расширения дорожной сети приводят к пробкам, в которых в часы пик средняя скорость движения может снижаться до 6–15 км/ч [7].

Городской наземный пассажирский транспорт представлен метрополитеном, автобусами, трамваями и троллейбусами. Несмотря на доминирующее положение метро, его недостаточная доступность и изношенность обуславливают смещение нагрузки на наземные виды транспорта [8]. Автобусная сеть покрывает до 90% города и имеет высокую плотность, однако подвержена влиянию дорожных заторов. Электрический наземный транспорт — трамваи и троллейбусы — сталкиваются с проблемами устаревшей инфраструктуры и низкой скоростью обновления подвижного состава [9]. Все эти факторы формируют ситуацию, при которой горожане всё чаще отдают предпочтение личному транспорту, усиливая перегрузку УДС и снижая эффективность общественного транспорта [10].

При этом в транспортной системе Петербурга остаётся слабо используемый ресурс — водные пути. Их общая протяжённость составляет 282 км, и они исторически интегрированы в городскую планировку [11]. Однако регулярные пассажирские перевозки по воде развиты слабо: большинство маршрутов носят экскурсионный характер. По данным на 2024 год в городе функционируют 76 причалов, из которых лишь 19 — городские, объединённые в проект «Городские причалы Санкт-Петербурга» (Рис. 3). Эти объекты находятся под управлением СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта» и обеспечивают базовую инфраструктуру для речных перевозок [12]. Несмотря на ежегодный рост количества швартовок, большая часть причалов загружена неравномерно, а некоторые используются крайне редко.

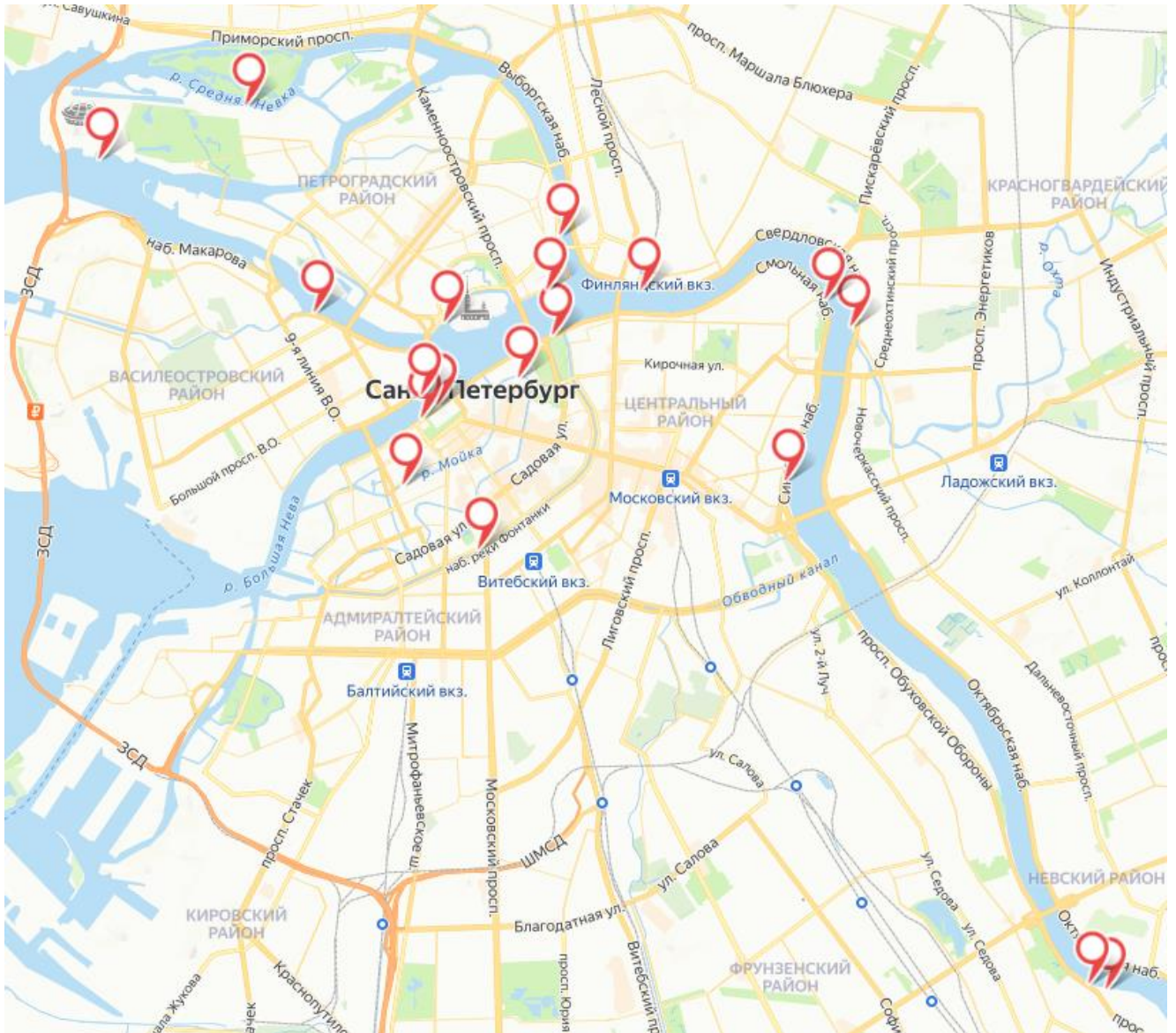


Рис. 3. Карта городских причалов Санкт-Петербурга

Одним из ключевых факторов успешной интеграции водного транспорта является организация удобных пересадочных узлов. Анализ показал, что лишь немногие городские причалы расположены в шаговой доступности от остановок наземного транспорта. Только 5 из 19 находятся менее чем в трёх минутах ходьбы от остановки общественного транспорта [13], причём единичные действительно соответствуют требованиям мультимодального узла. Однако даже в текущих условиях существуют перспективные точки пересадки, такие как Свердловская, Петровская и Университетская набережные, которые могут быть включены в пилотные проекты. В сочетании с корректировкой маршрутов автобусов и согласованием расписаний возможно создание эффективной и комфортной системы пересадок «автобус – речной трамвай», способной перераспределить пассажиропотоки и снизить нагрузку на перегруженные участки УДС.

Формальная причина

Анализ состояния транспортной системы показал, что интеграция отдельных проектов в систему ГПТ не приведёт к желаемому результату, а именно к разгрузке наземного пассажирского транспорта. Акцент при проектировании новой системы необходимо делать на мультимодальности и работе отдельных агентов системы в связке. Возможная модель



интеграции водного транспорта отражена на рисунке 4.

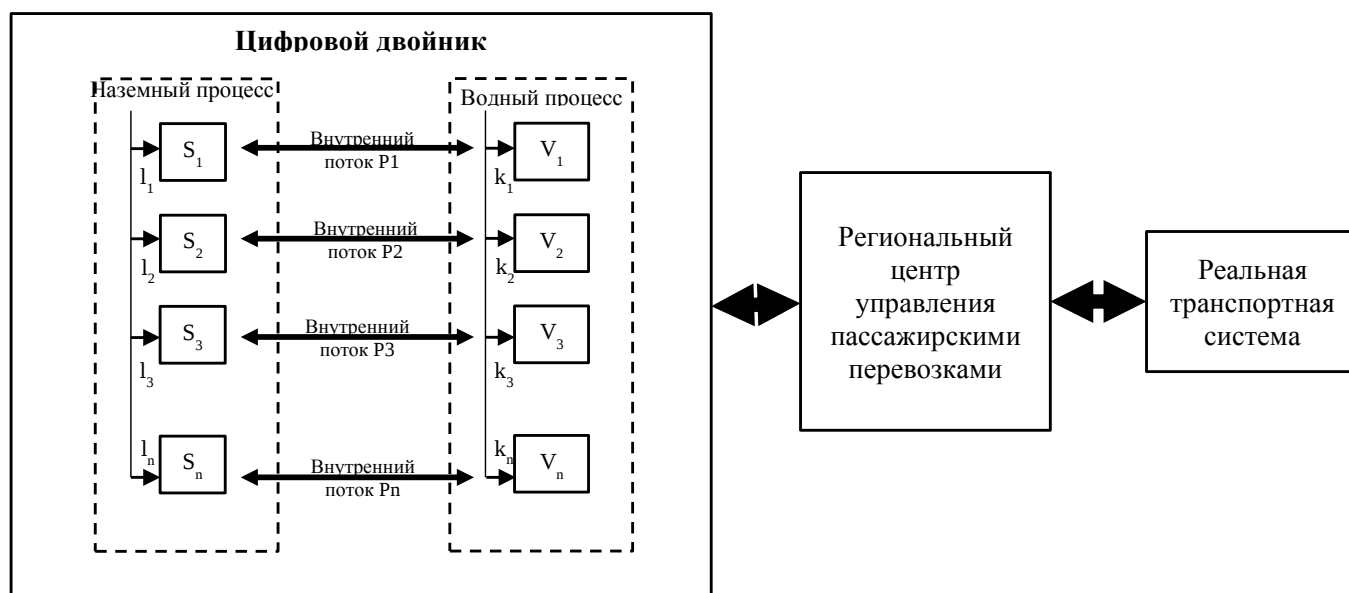


Рис. 4. Новая модель взаимодействия городского пассажирского наземного транспорта и внутреннего водного транспорта

Она рассматривает объединение наземного и водного процесса путём введения внутренних потоков $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$. Структурными элементами системы выступают внешние пассажиропотоки — $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ и $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$. Все эти сущности вместе с опорными элементами водных путей V и автобусных путей S составляют структурную основу цифрового двойника. В качестве агентов системы введены региональный центр управления пассажирскими перевозками и реальная транспортная система, их связка с цифровым двойником обеспечивают возможность эффективного динамического управления реальной транспортной системой. Так, обновление транспортной системы будет основано на данных, полученных с цифрового двойника, что снизит риски. При этом наличие обратной связи поможет оптимизировать работу системы: оптимизация будет происходить в цифровом двойнике уже на основе реальных данных. Данная модель показывает необходимость расположения причалов и автобусных остановок в максимальной близости друг от друга, а также согласования расписаний движения водного и автобусного транспорта [11]. При такой организации водный транспорт становится не автономной системой, а равноправным элементом общей сети.

Пересадочные узлы должны проектироваться как логистическая структура, учитывающая плотность пассажиропотока, время пересадки, расстояние между остановочными пунктами. Таким образом, каждая точка пересадки — это система со входом, обработкой и выходом пассажиров.

Исследование причальной инфраструктуры показало, что причальная инфраструктура Санкт-Петербурга организована недостаточно для полноценной интеграции водного транспорта, так как они находятся слишком далеко от остановочных пунктов. Кроме того, их большая часть расположена в области повышенного туристического интереса и сильно загружена. Тем не менее, даже в данной ситуации существуют опции для организации пилотных маршрутов. Например, водный транспорт может связывать северные районы города: Красногвардейский, Калининский, Петроградский, Василеостровский. Перемещаться между этими районами на метро неудобно ввиду отсутствия кольцевой линии, а перемещение с помощью наземного транспорта осложняется из-за разрыва районов реками и нехваткой мостов. Кроме того, при поездках между этими районами пассажирам зачастую приходится



делать пересадки, что негативно сказывается на времени в пути из-за нестабильных интервалов прибытия автобусов. В такой ситуации водные пути могут стать удобной связью между ними.

Действующая причина

Система связи двух видов транспорта была рассмотрена также в формализованном виде, а ее структурные элементы и принцип действия были описаны в рамках математической модели. Модель в виде ориентированного графа $O(C, A, D, \varphi)$ показана на рисунке 5, где $C = \{c_1, \text{Срезервированием } N+2\}$ являются узлами, участвующими в формировании пассажиропотока для обработки в системе; $B = \{a_2, a_3, \dots, a_{N+1}\}$ – узлы с указанием промежуточных точек обработки пассажирских перевозок; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{N+1}\}$ – дуги с указанием маршрута, пассажиропотока и потока информации; $\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ – элементы, описывающие параметры пассажиров в логистической системе пассажирских перевозок.

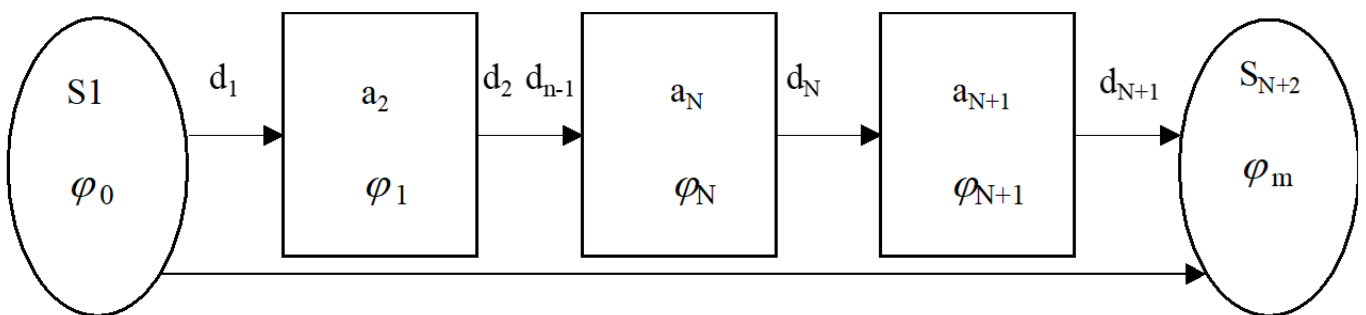


Рис. 5. Объектно-структурная модель информационного потока, совместимая с двумя подсистемами

Система также представлена в виде алгоритмической модели, показанной на рисунке 6. Каждый узел этой модели является элементарным звеном логистической цепочки, которая включает информационные и мониторинговые потоки, а также функцию их преобразования. Во время перевозки пассажиров в общем потоке движения происходит событие, которое требует обновления информации о пассажире. События, запускаемые потоками X и Y , приводят к изменению состава пассажиров, ожидающих обработки, и/или их статуса в логистической системе. В то же время модель генерации данных должна быть реализована в программном обеспечении на каждом этапе передвижения пассажира. Это позволит создать цифровой аналог и предотвратить фрагментацию информационных потоков транспортных подсистем [14].

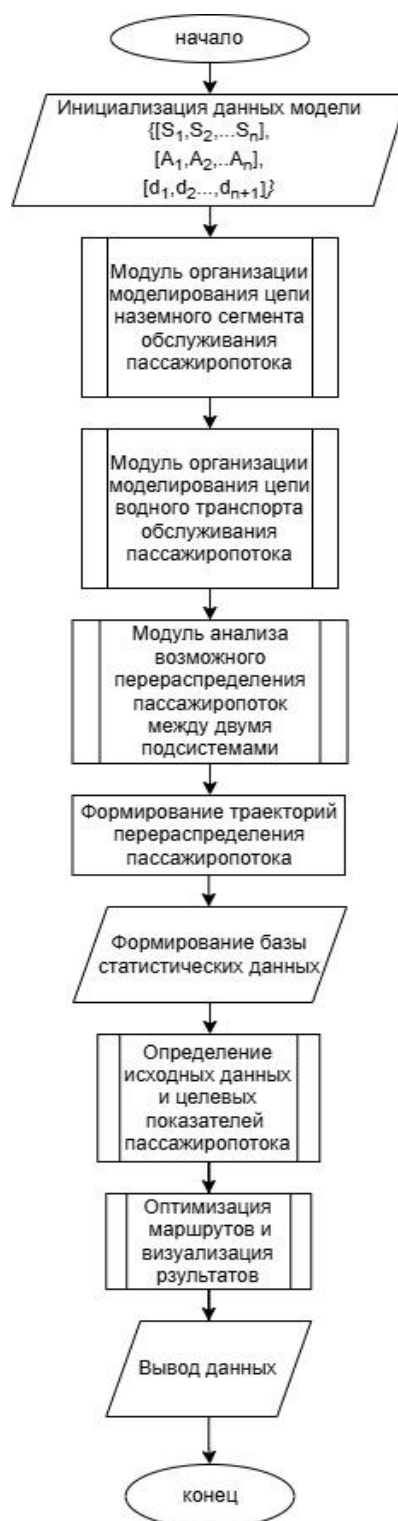


Рис. 6. Алгоритмическая модель

Делая упор на необходимость снижения нагрузки на транспортную инфраструктуру, можно преобразовать объектно-структурную модель в математическую модель, основанную на классической транспортной задаче. Моделируется ситуация, в которой пассажиры перемещаются из одной начальной точки на пересадочную станцию и из пересадочной станции в конечную точку маршрута. Целевая функция (1) представляет собой сумму общего времени в пути пассажиров от начальной точки до пересадочного пункта и от пересадочного пункта до конечной точки маршрута. В условиях минимальной нагрузки на транспортную систему эта функция, как правило, минимальна.



$$\sum_{k \in K} c_k x_k + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{kj} x_{kj} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K — количество промежуточных точек на маршруте

J — количество конечных точек на маршруте

c_k — время в пути и посадки на k -й вид транспорта

x_k — количество пассажиров, садящихся на k -й вид транспорта

c_{kj} — время в пути от k -го промежуточного пункта до j -й конечной точки

x_{kj} — количество пассажиров, путешествующих от k -го промежуточного пункта до j -й конечной точки.

При этом ограничения решения (2) должны учитывать, что количество пассажиров, достигших конечного пункта назначения j , равно начальному количеству пассажиров S . Ограничения добавлены для учета максимального пассажиропотока $T_{k \max}$ при выборе транспорта K . D_j указывает количество пассажиров, пунктом назначения которых является пункт J .

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in J} x_{kj} = S \\ x_k < T_{k \max} \\ x_k > T_{k \min} \\ \sum_{j \in J} x_{kj} = \sum_{k \in K} x_k \\ \sum_{k \in K} x_{kj} = D_j \\ x_k, x_{kj} \geq 0; j \in J, i \in I \end{array} \right. \quad (2)$$

Целевая причина

Целевая причина задаёт направление развития транспортной системы, так как без чёткого целеполагания нельзя рационально оценить эффективность внедряемых решений. В условиях высокой нагрузки на транспортную систему целями функционирования новой модели пассажирского транспорта с интеграцией водного становятся:

- Уменьшение времени нахождения пассажира в транспортной системе
- Разгрузка наземной инфраструктуры
- Повышение устойчивости транспортной сети
- Улучшение имиджа города

Таким образом, интеграция водного транспорта становится не самоцелью, а инструментом для достижения стратегических задач города. Задача интеграции водного транспорта может быть решена с использованием цифровых двойников. В интеллектуальной транспортной системе цифровой двойник играет роль управляющего элемента. Во-первых, его можно использовать при внедрении новых элементов системы, когда их влияние на функционирование системы сложно спрогнозировать, чтобы уменьшить риски за счёт проведения экспериментов на виртуальном объекте. Во-вторых, он играет роль обратной связи в уже работающей транспортной системе — с поступлением реальных входных данных можно отрегулировать маршрутизацию и расписание движения транспорта в зависимости от ситуации. В-третьих, имитационная модель — удобный инструмент для сбора статистики и отслеживания показателей при реализации проекта.

Заключение

Развитие городской транспортной системы требует поиска решений, обеспечивающих не только увеличение её пропускной способности, но и устойчивость, гибкость и



ориентированность на конечного пользователя. В условиях плотной застройки и ограниченности улично-дорожной сети Санкт-Петербурга, интеграция водного транспорта представляет собой эффективный путь перераспределения пассажиропотоков и снижения нагрузки на наземные маршруты. Однако для успешной реализации этой идеи требуется системный подход, учитывающий все элементы транспортной инфраструктуры.

Данное исследование проводится в ГУАП на базе лабораторий кафедры системного анализа, и логистики ФГАОУ ВО ГУА

П при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга»).

Разработанные структурные и математические модели позволяют оценить влияние внедрения речных маршрутов на пассажиропотоки и временные затраты. Особое внимание уделено логистике пересадки: расстоянию между остановками, расписаниям, цифровому взаимодействию транспортных элементов. Использование цифровых двойников и имитационного моделирования обеспечивает возможность адаптации транспортной системы в условиях изменяющейся городской среды. Представленные в статье методы могут быть использованы при проектировании пилотных маршрутов, особенно в районах, где доступ к эффективной транспортной инфраструктуре ограничен. Внедрение предложенной концептуальной модели позволит создать более сбалансированную, устойчивую и ориентированную на потребности граждан систему городского транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вебер М.* Город / М. Вебер. – М.: Strelka Press, 2017. – 252 с.
2. *Castells M.* The Informational City: Economic Restructuring and Urban Development / М. Castells. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1992. – 416 с.
3. *Вукан Р. Вучик* Транспорт в городах, удобных для жизни / Р. Вукан, Вучик. – М.: Альпина Паблишер, 2023 – 676 с.
4. *Мороз, Е. О.* Совершенствование проектирования транспортно-логистических систем на основе имитационного моделирования / Е. О. Мороз // Вестник молодежной науки. – 2020. – № 2(24). – С. 11.
5. *Садовникова, К. А.* Учение Аристотеля о "четырёх причинах" / К. А. Садовникова // Экономика и социум. – 2018. – № 5(48). – С. 1043-1044.
6. *Виниченко, В. А.* Формирование улично-дорожных сетей: мировой и российский опыт / В. А. Виниченко, Д. А. Савельев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2021. – № 60. – С. 37-45.
7. Адресная инвестиционная программа на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов (Приложение 12 к Закону Санкт-Петербурга «О бюджете Санкт-Петербурга на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов» – Санкт-Петербург: Вестник Законодательного Собрания, 2024. – 6 с.
8. Постановление Правительства Санкт Петербурга от 30.06.2014 № 552 «О государственной программе Санкт Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт Петербурга» (с изменениями на 26 декабря 2024 года). – Санкт-Петербург: Реестр нормативных правовых актов Санкт-Петербурга, 2024. – 241 с.
9. Стратегия развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года. – Санкт-Петербург: Дирекция по развитию транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области, 2016. – 516 с.
10. Годовой отчёт о ходе реализации государственной программы Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга» за 2024 год. – Санкт-Петербург: Комитет по транспорту Санкт-Петербурга. – 178 с.
11. *Таратун, В. Е.* Концептуальная модель взаимодействия подсистемы внутренних



- водных путей с транспортной системой мегаполиса Санкт-Петербурга / В. Е. Таратун, Е. А. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – С. 163-168
12. Администрация Санкт-Петербурга. Речной транспорт [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/vneshnij-transport/rechnoj-transport/ (дата обращения: 30.04.2025).
13. Яндекс Карты. Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. – URL: <https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.436611%2C59.908018&z=13> (дата обращения: 15.04.2025).
14. Таратун, В. Е. Исследование и разработка модели цифрового двойника процессов по интеграции внутренних водных путей как элемента основной транспортной системы мегаполиса / В. Е. Таратун, Е. А. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – С. 203-213. – DOI 10.31799/2077-5687-2023-3-203-213.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гайдук Елена Александровна

Студент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

Силина Ангелина Александровна

Кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: angd999@gmail.com

Таратун Виталий Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: taratun.vitaliy@guap.ru

Дата поступления: 04.06.2025

Дата принятия: 01.07.2025