

Разработка цифровых платформ функционирования логистических сетей

Development of digital platforms for the functioning of logistics networks

doi 10.26310/2071-3010.2022.280.2.007



Я. О. Лебедева,

к. э. н., докторант, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева/начальник управления проектно-инновационной деятельности, БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
✉ yana-lebedeva@bk.ru

Ya. O. Lebedeva,

candidate of economic sciences, head of the department of project-innovative activity, BSTU «Voenmeh» n. a. D. F. Ustinov



С. Н. Макарова,

к. э. н., директор, Центр научных коммуникаций и междисциплинарных проектов, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева
✉ stanislava-makarova@mail.ru

S. N. Makarova,

candidate of economic sciences, director, Center for scientific communications and interdisciplinary projects, Orel state university n. a. I. S. Turgenev



С. М. Сергеев,

к. т. н., доцент, Высшая школа производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет
✉ sergeev2@yandex.ru

S. M. Sergeev,

PhD, associate professor, Institute of industrial management, economy and trade, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

Предлагаемая работа является продолжением исследований направленных на разработку алгоритмов, заложенных в серверы интегрированных платформ функционирования логистических сетевых процессов, и востребованных в задачах формирования устойчивой цифровой среды. Отражая принципы, заложенные в концепцию «Промышленность 4.0», все современные программные решения строятся на основе сложных математических моделей играющих роль цифровых двойников. Только таким образом достигается главная цель — поиск оптимального управленческого решения. Рассматриваемые в настоящее время задачи логистики, как правило, формулировались лишь как одномерные цепи поставок или простые задачи формирования потребительской ценности на математических графах, в виде которых представлен образ сетевых логистических и коммерческих структур. Необходимый для устойчивой работы в конкурентной среде тренд на цифровизацию и внедрение систем искусственного интеллекта на стадии принятия управленческих решений диктует необходимость создания алгоритмов и моделей гораздо более адекватно отражающих сущность реальных процессов и максимально релевантных как в экономическом, так и в технологическом аспекте. Результаты данного исследования позволяют учесть дополнительно важный фактор многомерности процессов перемещения. Это обстоятельство всегда присутствует при перемещении непрерывных потоков между узлами логистической сети, а также, как правило, характерно для дискретных потоков.

The proposed work is a continuation of research aimed at developing algorithms embedded in the servers of integrated platforms for the functioning of logistics network processes, and in demand in the tasks of forming a stable digital environment. Based on the principles laid down in the concept of Industry 4.0, all modern software solutions are built on the basis of complex mathematical models that play the role of digital twins. Only in this way is the main goal achieved — the search for an optimal management solution. The logistics tasks currently under consideration, as a rule, were formulated only as one-dimensional supply chains or simple tasks of forming consumer value on mathematical graphs, in the form of which the image of network logistics and commercial structures is presented. The trend towards digitalization and the introduction of artificial intelligence systems at the stage of managerial decision-making, which is necessary for sustainable work in a competitive environment, dictates the need to create algorithms and models that much more adequately reflect the essence of real processes and are as relevant as possible both in economic and technological aspects. The results of this study allow us to take into account an additional important factor of the multidimensionality of the displacement processes. This circumstance is always present when moving continuous flows between nodes of the logistics network, and is also, as a rule, characteristic of discrete flows.

Ключевые слова: цифровизация, сетеподобная n -мерная область, логистика, начально-краевая задача, метод полу-дискретизации, алгоритм.

Keywords: digitalization, network-like n -dimensional domain, logistics, initial boundary value problem, semi-discretization method, algorithm.

Введение

До недавнего времени, как правило, в постановке проблем логистического характера использовались лишь одномерные цепи поставок или простые задачи формирования потребительской ценности на математических графах, в виде которых представлен образ сетевых логистических и коммерческих структур. Общемировой тренд на цифровизацию и внедрение систем искусственного интеллекта AI на стадии принятия управленческих решений диктует необходимость создания алгоритмов и моделей, гораздо более

адекватно отражающих сущность реальных процессов и максимально релевантных как в экономическом, так и в технологическом аспекте. Результаты, представленные в настоящей работе, позволяют учесть дополнительно важный фактор многомерности потоковых явлений и процессов перемещения (транспортировки). Это обстоятельство всегда присутствует в процессах движения непрерывных потоков между узлами логистической сети, а так же, как правило, это характерно и для дискретных потоков, которыми формализуются задачи, связанные с перемещением обычных грузов в виде контейнеров, пакетов и всех видов транспорта.

Постановка задачи

В работе представлен подход, используемый при анализе сетевых потоковых явлений и процессов переноса сплошных и дискретных сред по сетеподобным nD носителям, ориентированный на разработку алгоритмов, заложенных в серверы интегрированных платформ функционирования логистических сетевых процессов и востребованных в задачах формирования устойчивой цифровой среды. Особенность современного этапа развития производственного менеджмента состоит в том, что его эффективность базируется на программных решениях, построенных на основе сложных математических nD моделей, в основе которых лежат формализмы дифференциальных уравнений с n -мерным пространственным переменным, обобщенные решения таких уравнений принадлежат пространствам Соболева. Предлагаемые результаты исследования являются развитием рассматриваемых ранее задач сетевой логистики, носящих одномерный характер.

Материалы и методы

Математическое описание одномерных потоковых явлений и процессов переноса сплошных и дискретных сред, анализ этих явлений и процессов [1, 2] становятся все менее пригодными в связи с огромным потоком информационного взаимодействия — указанные явления и процессы приобретают характер многомерности [3, 4]. Обработка данных в режиме реального времени о параметрах потока [5, 6] на всем протяжении его движения в плечах между узлами сети дополнительно затрудняется сложно структурированной топологией сети, что характерно для современной логистики. Следует отметить также, что в случае транспортировки сплошных потоков, перемещаемая среда может содержать несколько фракций, обладающих различными параметрами движения, в том числе скоростями. При исследовании и математическом описании процессов перемещения потоков дискретных грузов возникает проблема выбора пространств дискретных функций с определенными свойствами, описывающими количественные характеристики потоковых явлений в узлах сети с помощью балансовых соотношений. В работе предложен подход, основанный на анализе дифференциально-разностных систем с пространственным переменным, изменяющимся в сетеподобной области $\mathfrak{Z} \subset R^n, n \geq 2$. На рис 1 представлена схема формализации, где принято $\omega_j (j=1, \overline{M})$ — узлы; Γ — одномерная транспортная сеть, элементы множеств $\partial\Gamma$ и $J(\Gamma)$ — хабы и потребители/распространители этой сети; $S_j (meas S_j > 0)$ поверхности примыкания. Начало такому анализу положено работами [3, 4].

Результаты

Изучение потоковых явлений в сетевых носителях процессов переноса сплошных сред инициировало возникновение неклассического подхода к анализу начально-краевой задачи

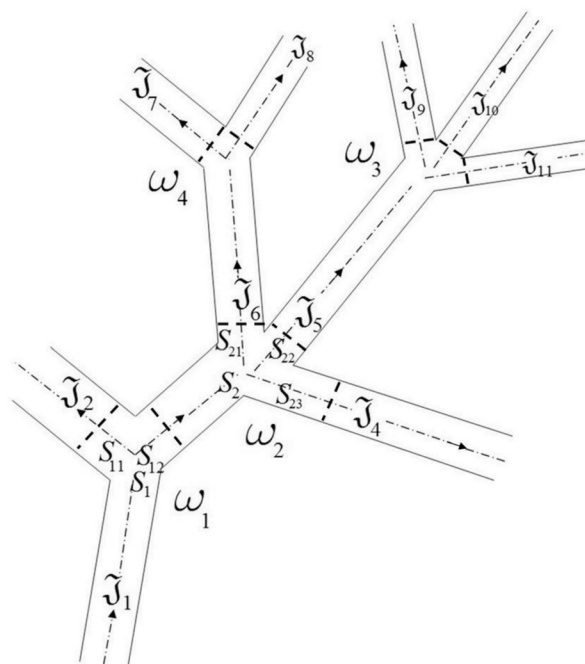


Рис. 1. Формализация логистической сети

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) + b(x) y(x, t) = f(x, t), \quad (1)$$

$$y|_{t=0} = \varphi(x), x \in \Gamma, y|_{x \in \partial\Gamma} = 0, \quad (2)$$

для эволюционного дифференциального уравнения (1) с распределенными параметрами на графе Γ с множеством граничных $\partial\Gamma$ узлов [1, 7]. Соотношением (1) определяется закон переноса по сети). Формализмы (1), (2) определяют математическое описание (математическую модель) разнообразных по своей природе процессы транспортировки сплошных сред (углеводороды, нефть, газ и пр.) по сетевым носителям. Редукция начально-краевой задачи (1), (2) к дифференциально-разностной системе вида

$$\frac{1}{\tau} (u(k) - u(k-1)) - \frac{d}{dx} \left(a(x) \frac{du(k)}{dx} \right) + b(x) u(k) = f_{\tau}(k), \quad k=1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

$$u(0) = \varphi(x), u(k)|_{x \in \partial\Gamma} = 0, \quad (4)$$

с использованием метода Роте (метод полудискретизации по временной переменной $\tau \in [0, T]$ [5, 8, 9]), сводящему, по существу, исследование вопросов существования и фактического определения решений начально-краевых задач к изучению краевых задач для уравнений эллиптического типа с оператором

$$-\frac{d}{dx} \left(a(x) \frac{du(k)}{dx} \right) + b(x) u(k) = f_{\tau}(k)$$

(что существенно упрощает исследование), открыла не только новые пути анализа процессов переноса в непрерывном времени, но и дало возможность изучать эти же процессы в дискретно-временной интерпрета-

ции [1, 10, 11]. Данное обстоятельство принципиально важно и открывает возможность создания широкого спектра алгоритмов для решения практических задач при разработке цифровых логистических платформ и формировании цифровых транспортных коридоров. Также становится возможным применить хорошо разработанные и реализованные в библиотеках стандартных подпрограмм методы поиска оптимальных по экономическим критериям, решений практических задач в области логистики.

Здесь, в соотношениях (1)-(4), параметры

$$\hat{\omega} = \bigcup_{j=1}^M \omega_j \text{ и } \hat{\mathfrak{S}} = \bigcup_{k=1}^N \mathfrak{S}_k$$

характеризуют количественные показатели состояния потока $y(x, t)$, функции $\varphi(x)$ и $f(x, t)$ определяют внешние свойства транспортных носителей; $u(k) := u(x, k)$,

$$f_{\tau}(k) := f_{\tau}(x; k) = \frac{1}{\tau} \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} f(x, t) dt,$$

$k=1, 2, \dots, K; \tau=T/K$, функции $u(k), k=1, 2, \dots, K$, являются дискретно-временным аналогом для функции $y(x, t)$ в каждый момент времени $t=k\tau, k=1, 2, \dots, K$.

Естественным распространением результатов работ [1, 5, 12, 13] явился переход от изучения упомянутых выше одномерных математических моделей

процессов транспортировки сплошных сред к аналогичному анализу многомерных моделей, которые формируются в классах функций с многомерными сетеподобными областями \mathfrak{S} изменения переменных (в приложениях область \mathfrak{S} -3D магистральные или сетеподобные газо- и нефтепроводы, магистрали и пр. [4, 6, 14]). В этом случае речь идет о построении и исследовании математических моделей [15, 16], аналогичных (1), (2) и (3), (4), задаваемых на функция с пространственной переменной x , изменяющейся в сетеподобной n -мерной области $\mathfrak{S} (n \geq 2)$. Такие модели в большей степени адекватности соответствуют физическим процессам.

Проведение математического описания сетеподобной ограниченной области \mathfrak{S} , содержит общий случай, когда $\mathfrak{S} \subset R^n, n \geq 2 (R^n - \text{евклидово } n\text{-мерное пространство})$, т. е. переменная x в соотношениях (1), (2) и (3), (4) является векторной: $x=(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$.

Условимся говорить, что область \mathfrak{S} с границей $\partial\mathfrak{S}$ состоит из подобластей \mathfrak{S}_l с границами $\partial\mathfrak{S}_l (l=1, N)$, присоединенных друг к другу в M узловых местах $\omega_j (j=1, M, 1 \leq M \leq N-1)$:

$$\mathfrak{S} = \hat{\mathfrak{S}} \cup \hat{\omega},$$

где

$$\hat{\mathfrak{S}} = \bigcup_{l=1}^N \mathfrak{S}_l, \hat{\omega} = \bigcup_{j=1}^M \omega_j, \mathfrak{S}_l \cap \mathfrak{S}_j = \emptyset, (l \neq j),$$

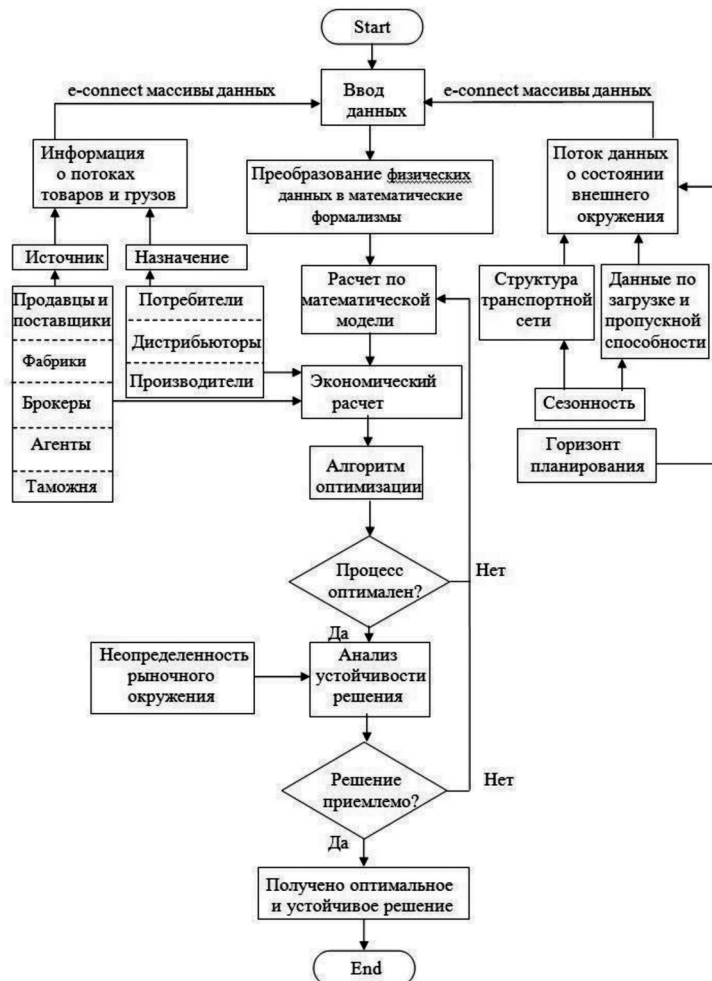


Рис. 2. Блок-схема программного решения

$$\omega_j = \bigcap \omega_j = \emptyset, (l \neq j), \mathfrak{S}_l \cap \omega_j = \emptyset \forall l \neq j [1, 3].$$

Для фиксированного узлового места ω_j ($j=1, M$), обозначим через S_j ($\text{meas } S_j > 0$) поверхность примыкания $1+m_j$ подобластей \mathfrak{S}_l и \mathfrak{S}_s ($s=\overline{1, m_j}$):

$$S_j = \bigcup_{s=1}^{m_j} S_{js} \quad (\text{meas } S_{js} > 0), S_j \subset \partial \mathfrak{S}_l, S_{js} \subset \partial \mathfrak{S}_s \quad (s=\overline{1, m_j}).$$

Подобласти \mathfrak{S}_l ($l=\overline{1, N}$), считаем звездными (самый распространенный вариант в логистике известный как spoke-hub distribution paradigm) относительно некоторого шара, своего для каждой. Таким образом, следует отметить, что область \mathfrak{S} структурирована по аналогии с графом-дерево (в приложениях — с сетью) [1, 2, 17, 18], а подобласти \mathfrak{S}_l аналогичны ребрам графа. Дифференциально-разностная система, которая является дискретно-временной математической моделью процесса переноса.

Логистическая модель алгоритма имеет следующий вид.

1-й шаг. Формирование исходных данных $a_{kl}(x) \in L_2(\mathfrak{S})$ ($k, l \in \{1, 2, \dots, K\}$), $b(x), \varphi(x) \in L_2(\mathfrak{S})$, $f(x, t) \in \tilde{L}_{2,1}(\mathfrak{S})$ (здесь $L_{2,1}(\mathfrak{S})$ — пространство суммируемых функций $f(x, t)$ с нормой, определенной соотношением

$$\|f\| = \int_0^T \left(\int_{\mathfrak{S}} f^2(x, t) dx \right)^{1/2} dt.$$

2-й шаг. Построение равномерной сетки

$$\omega_\tau = \{t_k = k\tau, k=0, 1, \dots, K, \tau=T/K\}$$

временного отрезка $[0, T]$, τ — шаг сетки и формирование дифференциально-разностной системы с исходными данными

$$f_\tau(k) = \frac{1}{\tau} \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} f(x, t) dt \in L_2(\mathfrak{S}), k=1, 2, \dots, K.$$

3-й шаг. Построение разностной схемы для системы линейных алгебраических уравнений, определение обобщенного решения системы (совокупности функций

$$y(k) \in \tilde{W}_0^1(\mathfrak{S}), k=1, 2, \dots, K)$$

как решение с наперед заданной точностью.

4-й шаг. Построение приближений $y_K(x, t)$ по совокупности

$$y(k) \in \tilde{W}_0^1(\mathfrak{S}), k=1, 2, \dots, K,$$

посредством соотношений

$$y_K(x, t) = y(k), t \in ((k-1)\tau, k\tau], k=1, 2, \dots, K)$$

5-й шаг. Определение погрешностей вычислений, установленным алгоритмом.

На основе полученного решения один из вариантов применения представлен на рис. 2 отражающем блок-схему программного продукта.

Заключение

Предложенный в работе метод поиска обобщенного решения начально-краевой задачи для эволюционного уравнения с частными производными имеет ряд преимуществ. Этот метод основан на отыскании априорных оценок для норм обобщенных решений дифференциально-разностной системы и на этой основе доказательству разрешимости краевой задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений. Используемый прием эффективен при формировании алгоритма цифровизации сетевых логистических и коммерческих структур, описываемых формализмами представленной задачи [15-19]. На практике результаты представленной работы дают базу для подхода, основанного на анализе дифференциально-разностных аналогов начально-краевых задач с распределенными параметрами в сетеподобных областях (современная инструментальная база математического описания сетевых потоковых явлений и процессов переноса сплошных сред по сетевым носителям). Это открывает новый, эффективный путь изучения указанных явлений и процессов. Этот подход предопределяет возможность при формировании математических моделей явлений и процессов вводить различные классы обобщенных решений, определяемые тем или иным функциональным пространством. Также открываются возможности для многочисленных исследований, относящихся к широкому кругу процессов переноса сплошных и дискретных сред, к числу которых относятся исследования задач оптимизации (управления, оптимального управления), устойчивости, стабилизации для изучаемых явлений и процессов, а также родственные им вопросы. Основное применение таких алгоритмов состоит в принятии оптимальных с экономической точки зрения решений в системах искусственного интеллекта AI, организующих магистральную транспортировку важнейших для мировой производственной деятельности углеводородов и других непрерывных грузопотоков. При исследовании и формализации потоков дискретных грузов такие сечения представляют собой массив возможных трасс относящихся ко всем доступным видам транспортировки между узлами логистической сети. Одним из них, например, служит набор полос движения в каждом направлении. Такой частный случай решения задачи в первую очередь продиктован общемировым трендом на интенсивную разработку алгоритмов обеспечения движения беспилотного наземного транспорта, перспектива применения которого нацелена на ближайшее десятилетие.

Список использованных источников

1. S. Y. Barykin, L. N. Borisoglebskaya, V. V. Provotorov, I. V. Kapustina et al. Sustainability of management decisions in a digital logistics network//Sustainability (Switzerland). 2021. 13 (16). 9289.
2. S. L. Podvalny, V. V. Provotorov, E. S. Podvalny. The controllability of parabolic systems with delay and distributed parameters on the graph//Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. P. 324-330.
3. V. V. Provotorov, E. N. Provotorova. Optimal control of the linearized Navier-Stokes system in a netlike domain//Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes, 2017. Vol. 13. Iss. 4. P. 431-443. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2017.409>.

4. M. A. Artemov, E. S. Baranovskii, A. P. Zhabko, V. V. Provotorov. On a 3D model of non-isothermal flows in a pipeline network//Journal of Physics. Conference Series. 2019. Vol. 1203. Article ID 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>.
5. V. V. Provotorov, S. M. Sergeev, V. N. Hoang. Point control of differential-difference system with distributed parameters on the graph//Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control processes. 2021. Vol. 17. Iss. 3. P. 277-286.
6. E. S. Baranovskii, V. V. Provotorov, M. A. Artemov, A. P. Zhabko. Non-isothermal creeping flows in a pipeline network: existence results//Symmetry. 2021. V. 13.
7. M. Matsuda, T. Nishi, M. Hasegawa, S. Matsumoto. Virtualization of a supply chain from the manufacturing enterprise view using e-catalogues//Procedia CIRP. 2019. 81. 932-937. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.230>.
8. S. Mitra. Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns//Comput. Ind. Eng. 2012. 62. 870-879. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.008>.
9. S. Pan. Opportunities of product-service system in physical internet//Procedia CIRP. 2019. 83. 473-478. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.107>.
10. S. M. Sergeev, T. I. Sidnenko, D. B. Sidnenko. Distribution centers for agriculture, their modeling//In: International Scientific School «Paradigma» Summer-2016 Selected Papers. Yelm, WA, USA, 2016. P. 92-97.
11. Л. Н. Борисоглебская, И. А. Миронова, С. М. Сергеев. Моделирование коммерческой деятельности предприятий в условиях инновационных предложений//Инновации. 2013. № 1 (171). С. 107-111.
12. H. Aslam, A. Q. Khan, K. Rashid, S. Rehman. Achieving supply chain resilience: the role of supply chain ambidexterity and supply chain agility//J. Manuf. Technol. Manag. 2020. 31. 1185-1204. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2019-0263>.
13. S. Bag, L. C. Wood, S. K. Mangla, S. Luthra. Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy//Resour. Conserv. Recycl. 2020. 152. 104502. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104502>.
14. G. Frederico, J. A. Garza-reyes. 2020. Supply chain strategy reboot — Supply Chain Management Review.
15. B. Sarkar, R. Guchhait, M. Sarkar et al. Impact of safety factors and setup time reduction in a two-echelon supply chain management//Robot. Comput. Integr. Manuf. 2019. 55. 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.001>.
16. V. Scherbakov, G. Silkina, Logistics of smart supply chains//Proc. Int. Conf. Digit. Technol. Logist. Infrastruct. (ICDTLI 2019). St. Petersburg, Russ., 4-5 April, 2019. 66-71. <https://doi.org/10.2991/icdtli-19.2019.15>.
17. Y. Zhang, G. H. Huang, L. He. A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system//Waste Manag. 2014. 34. 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002>.
18. S. M. Sergeev. Expansion of DEA methodology on the multimodal conception for the 3PL//In: Modern informatization problems in simulation and social technologies Proceedings of the XXIII-th International Open Science Conference. Editor in Chief O.Ja. Kravets. 2018. P. 169-176.
19. V. Scherbakov, G. Silkina. Conceptual model of Logistics Vocational Education in the digital economy//Proc. Int. Conf. Digit. Technol. Logist. Infrastruct. (ICDTLI 2019). St. Petersburg, Russ., 4-5 April, 2019. 120-125. <https://doi.org/10.2991/icdtli-19.2019.24>.

References

1. S. Y. Barykin, L. N. Borisoglebskaya, V. V. Provotorov, I. V. Kapustina et al. Sustainability of management decisions in a digital logistics network//Sustainability (Switzerland). 2021. 13 (16). 9289.
2. S. L. Podvalny, V. V. Provotorov, E. S. Podvalny. The controllability of parabolic systems with delay and distributed parameters on the graph//Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. P. 324-330.
3. V. V. Provotorov, E. N. Provotorova. Optimal control of the linearized Navier-Stokes system in a netlike domain//Vestnik of Saint Peterburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes, 2017. Vol. 13. Iss. 4. P. 431-443. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu.10.2017.409>.
4. M. A. Artemov, E. S. Baranovskii, A. P. Zhabko, V. V. Provotorov. On a 3D model of non-isothermal flows in a pipeline network//Journal of Physics. Conference Series. 2019. Vol. 1203. Article ID 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>.
5. V. V. Provotorov, S. M. Sergeev, V. N. Hoang. Point control of differential-difference system with distributed parameters on the graph//Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control processes. 2021. Vol. 17. Iss. 3. P. 277-286.
6. E. S. Baranovskii, V. V. Provotorov, M. A. Artemov, A. P. Zhabko. Non-isothermal creeping flows in a pipeline network: existence results//Symmetry. 2021. V. 13.
7. M. Matsuda, T. Nishi, M. Hasegawa, S. Matsumoto. Virtualization of a supply chain from the manufacturing enterprise view using e-catalogues//Procedia CIRP. 2019. 81. 932-937. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.230>.
8. S. Mitra. Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns//Comput. Ind. Eng. 2012. 62. 870-879. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.008>.
9. S. Pan. Opportunities of product-service system in physical internet//Procedia CIRP. 2019. 83. 473-478. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.107>.
10. S. M. Sergeev, T. I. Sidnenko, D. B. Sidnenko. Distribution centers for agriculture, their modeling//In: International Scientific School «Paradigma» Summer-2016 Selected Papers. Yelm, WA, USA, 2016. P. 92-97.
11. Л. Н. Борисоглебская, И. А. Миронова, С. М. Сергеев. Modeling of commercial activity of enterprises in terms of innovative proposals//Innovations. 2013. № 1 (171). P. 107-111.
12. H. Aslam, A. Q. Khan, K. Rashid, S. Rehman. Achieving supply chain resilience: the role of supply chain ambidexterity and supply chain agility//J. Manuf. Technol. Manag. 2020. 31. 1185-1204. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2019-0263>.
13. S. Bag, L. C. Wood, S. K. Mangla, S. Luthra. Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy//Resour. Conserv. Recycl. 2020. 152. 104502. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104502>.
14. G. Frederico, J. A. Garza-reyes. 2020. Supply chain strategy reboot — Supply Chain Management Review.
15. B. Sarkar, R. Guchhait, M. Sarkar et al. Impact of safety factors and setup time reduction in a two-echelon supply chain management//Robot. Comput. Integr. Manuf. 2019. 55. 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.001>.
16. V. Scherbakov, G. Silkina, Logistics of smart supply chains//Proc. Int. Conf. Digit. Technol. Logist. Infrastruct. (ICDTLI 2019). St. Petersburg, Russ., 4-5 April, 2019. 66-71. <https://doi.org/10.2991/icdtli-19.2019.15>.
17. Y. Zhang, G. H. Huang, L. He. A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system//Waste Manag. 2014. 34. 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002>.
18. S. M. Sergeev. Expansion of DEA methodology on the multimodal conception for the 3PL//In: Modern informatization problems in simulation and social technologies Proceedings of the XXIII-th International Open Science Conference. Editor in Chief O.Ja. Kravets. 2018. P. 169-176.
19. V. Scherbakov, G. Silkina. Conceptual model of Logistics Vocational Education in the digital economy//Proc. Int. Conf. Digit. Technol. Logist. Infrastruct. (ICDTLI 2019). St. Petersburg, Russ., 4-5 April, 2019. 120-125. <https://doi.org/10.2991/icdtli-19.2019.24>.