

А.Е. Радаев, В.В. Кобзев**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ СЕТИ ПОСТАВОК
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПРОЦЕССНОЙ МОДЕЛИ****A.E. Radaev, V.V. Kobzev****OPTIMIZING THE CONFIGURATION
FOR THE SUPPLY NETWORK OF INDUSTRIAL ENTERPRISES
BASED ON THE PROBABILISTIC PROCESS MODEL**

Современные условия развития отечественных промышленных предприятий определяют особую важность решения задач обеспечения надежности функционирования соответствующих сетей поставок. На основе результатов обзора и сравнительного анализа литературы по соответствующей тематике сделан вывод об относительно малом количестве методических разработок и инструментальных средств в области обоснования характеристик функционирования сети поставок, в том числе в части надежности. Данное обстоятельство определило целесообразность разработки оптимизационной модели обоснования характеристик сети поставок промышленных предприятий на базе обобщенной постановки задачи управления сетью поставок. Разработанная модель обеспечивает определение оптимальной конфигурации сети поставок в части состава предприятий-участников и объемов обрабатываемых ими грузопотоков на основе критериев суммарных затрат на выполнение проекта (заказа конечных потребителей), общей длительности и обобщенной надежности реализации соответствующих процессов по перемещению и обработке предметов производства. При этом каждый из перечисленных критериев может учитываться при реализации модели либо в составе целевой функции, формируемой по принципу линейной свертки критериев, либо в составе ограничений. Основными исходными данными для реализации оптимизационной модели являются характеристики процессной модели сети поставок в части затрат, длительности и надежности выполнения операций по перемещению и обработке предметов производства, а также требования конечных потребителей в части количества готовой продукции, общей стоимости, длительности и надежности выполнения заказа (последние три характеристики в зависимости от способа учета критериев оптимизации могут определяться как нормативными, так и предельно допустимыми значениями). Основными искомыми переменными модели являются объемы материальных потоков между предприятиями-участниками сети поставок; вспомогательные переменные описывают кумулятивные значения показателей длительности и надежности на различных стадиях процесса обработки предметов производства. В отличие от большого количества существующих разработок, созданная оптимизационная модель является линейной и потому может быть легко реализована с использованием современных программных средств.

СЕТЬ ПОСТАВОК; ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ; НАДЕЖНОСТЬ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

At the current stage in the development of domestic industrial enterprises, it is especially important to ensure reliable operation of the corresponding supply networks. Review and comparative analysis of literature in the respective scientific area allows to conclude that relatively few methodological procedures and instrumental tools have been for determining the performance characteristics of supply networks, including their reliability parameters. It was thus deemed practical to create an optimization model for determining these characteristics for the supply networks of industrial enterprises based on a generalized setting for the problem of managing a



supply network. The model created allows to determine the network's optimal configuration with respect to the composition of the participating enterprises and the material flows processed by these enterprises on the basis of the criteria describing the general costs of implementing the project (as ordered by the ultimate consumers), the total duration and the generalized reliability of implementing the respective processes concerned with product transfer and processing. Each of the above-mentioned criteria can be taken into account within the model either as a component of the objective function, or as an element of the corresponding constraints. The main initial data for implementing the optimization model are the characteristics of the supply network's process model concerning costs, duration and reliability characteristics for product transfer and processing, and also the demands of the ultimate consumers for the amount of the finished product, general costs, total duration and reliability of fulfilling the order (the last three characteristics can be determined by both normative and maximum admissible values depending on the method used for taking into account the optimization criteria). The main sought-for variables of the model are the volumes of material flows between the enterprises making up the supply network; the auxiliary variables describe cumulative values of duration and reliability at different processing stages. As opposed to most of the previously developed tools, this optimization model is linear and therefore can be easily implemented with modern software tools.

SUPPLY NETWORK; INDUSTRIAL ENTERPRISE; RELIABILITY; MODELING; OPTIMIZATION MODEL.

Введение. Проблемы моделирования и эффективного управления сетями поставок предприятий приобретают все большую значимость в современных условиях развития отечественной промышленности, характеризующихся усложнением структуры и повышением интенсивности соответствующих грузопотоков, а также усложнением структуры соответствующих технологических процессов при необходимости освоения и производства наукоемкой, инновационной продукции, конкурентоспособной на мировых рынках [4, 5, 8, 10, 14, 15]. Особую важность при этом приобретают вопросы обеспечения надежности функционирования сетей поставок как ключевой характеристики, в значительной степени определяющей эффективность деятельности соответствующих предприятий и их устойчивое развитие на перспективу.

Важно отметить, что вопросам надежности функционирования цепей поставок посвящено достаточно большое количество научных работ, выполненных отечественными и зарубежными авторами, как в области методических разработок [1, 2, 13, 16, 17], так и в области инструментальных средств [3, 6, 9, 11]. Более подробный анализ публикаций второй категории в части математических моделей (описание основных разработок представлено в табл. 1) позволил сделать вывод об относительно небольшом количестве соответствующих инструментальных средств, а также об их ограниченности с позиций решения прикладных задач — большинство су-

ществующих моделей предполагают агрегированный характер описания структуры сети поставок и являются нелинейными, что в совокупности с большим количеством переменных значительно усложняет процесс их реализации с использованием современных вычислительных алгоритмов.

Методика и результаты исследования. Постановка научной задачи заключается в разработке оптимизационной модели, обеспечивающей обоснование (на основе потребностей конечных потребителей) характеристик сети поставок промышленных предприятий в разрезе соответствующих бизнес-процессов с учетом показателей надежности функционирования рассматриваемой системы.

Основными положениями разработанной нами оптимизационной модели являются: рассматриваемая сеть поставок, представляющая собой совокупность предприятий-участников и их взаимодействие друг с другом в разрезе условных каналов и организационных уровней по следующим основным принципам:

- организационные уровни сети поставок определяют последовательность операций преобразования и задержки материального потока, обрабатываемого в соответствии с проектом или портфелем проектов, реализуемых в рамках сети поставок в течение определенного временного периода;
- условные каналы сети поставок определяют максимальное количество предприятий-участников на каждом организационном уровне;

Таблица 1

Описание основных научных разработок по тематике исследования

Авторы разработки	Краткое описание разработки	Основные недостатки разработки
<p>Корчагин В.А., Суворов В.А., Чекрызов Е.А. [6]</p>	<p>Модель оптимизации состава цепи поставок в части количества элементов, имеющих определенную вероятность отказа:</p> $\sum_{i=1}^S A_i \left(1 - \prod_{j=1}^m \varepsilon_{ji}^{x_{ji}} \right) \rightarrow \max$ $\begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^S a_{ji} x_{ji} \leq B; \\ x_{ji} \geq 0; x_{ji} \in Z, \\ j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, S. \end{cases}$ <p>A_i – вес (важность) i-го узла цепи поставок; ε_{ji} – вероятность отказа j-го структурного элемента в i-м узле цепи поставок; $0 \leq \varepsilon_{ji} \leq 1$; x_{ji} – искомого количество резервных элементов, выделяемых для j-го структурного элемента i-го узла цепи поставок; m – количество структурных элементов в каждом узле цепи поставок; S – количество узлов в цепи поставок; B – величина бюджета</p>	<p>Высокий уровень абстракции модели, исключающий возможность учета особенностей реализации соответствующих бизнес-процессов. Отсутствие возможности учета приоритетов использования резервных элементов. Нелинейный характер модели, обуславливающий трудность ее реализации</p>
<p>Муханова Г.С., Тышканбаева М.Б., Чакеева К.С., Унтупов С.К. [11]</p>	<p>Модель формирования сети поставок с последовательно-параллельной схемой структурной надежности:</p> $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^n p_{ij} \right) x_{ij} z_{ij} c_{ij} \rightarrow \min,$ $\begin{cases} \prod_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot x_{ij} \geq p_0; \\ \sum_{i=1}^n z_{ij} \cdot x_{ij} \geq q_0; \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \\ x_{ij} \in \{0; 1\}; z_{ij} \geq 0; \\ i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m. \end{cases}$ <p>c_{ij}, p_{ij} – соответственно затраты и надежность функционирования i-го канала поставок по отношению к j-му участнику; x_{ij} – искомые логические переменные, описывающие целесообразность включения i-го канала в цепь поставок j-го потребителя; $x_{ij} = 1$, если включение целесообразно, в противном случае $x_{ij} = 0$; z_{ij} – искомые переменные объема поставки в рамках i-го кагала для j-го потребителя; p_0, q_0 – требуемые значения соответственно уровня надежности функционирования сети поставок и объема покрываемого спроса; n, m – общее количество соответственно каналов поставки и потребителей</p>	<p>Трудность интерпретации смысла целевой функции, представляющей собой произведение затрат на функционирование элементов цепи поставок и показателя надежности. Большое количество переменных, а также нелинейных связей, обуславливающих трудоемкость процесса реализации модели</p>
<p>Лукинский В.С. [9]</p>	<p>Обобщенная экономико-математическая модель выполнения логистического цикла «Точно в срок»:</p> $\sum_{i=1}^N C_i(\bar{T}_i, \sigma_i) \varphi_i(\bar{T}_i, \sigma_i) \rightarrow \min,$ $\begin{cases} \Phi \left(\frac{T_0 - \sum_{i=1}^N \bar{T}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i}} \right) \leq P_0; \\ \bar{T}_i \geq 0; \sigma_i \geq 0; \\ i = 1, \dots, N. \end{cases}$ <p>\bar{T}_i, σ_i – искомые характеристики соответственно среднего значения и среднеквадратического отклонения длительности выполнения i-й операции логистического цикла; C_i – удельные затраты на выполнение i-й операции логистического цикла; φ_i – временная характеристика, обуславливающая затраты на выполнение i-й операции логистического цикла; $\Phi(\dots)$ – табулированная функция нормального распределения; P_0 – вероятность превышения фактической длительности выполнения логистического цикла некоторого заданного планового значения T_0; N – количество операций в логистическом цикле</p>	<p>Отсутствие возможности учета различных вариантов структуры цепи поставок. Отсутствие непосредственного учета показателей надежности для отдельных составляющих логистического цикла и, как следствие, невозможность выявления «узких мест» в рамках цепи поставок. Невозможность учета законов распределения, отличных от нормального. Нелинейный характер модели, обуславливающий трудность ее реализации</p>

Окончание табл. 1

Авторы разработки	Краткое описание разработки	Основные недостатки разработки
<p>Зайцев Е.И., Парфенов А.В., Уваров С.А. [3]</p>	<p>Аутсорсинговая модель формирования цепи поставок требуемой надежности</p> $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_{ij} + R_{ij}(1 - P_{ij}))x_{ij} \rightarrow \min,$ $\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \\ \prod_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_{ij}x_{ij} \geq \beta; \\ x_{ij} \in \{0; 1\}, \\ i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n. \end{cases}$ <p>S_{ij}, R_{ij} – затраты, связанные соответственно с реализацией и отказом j-го процесса в части i-й стратегии в рамках цепи поставок; P_{ij} – вероятность безотказной реализации i-й стратегии в рамках j-го процесса в цепи поставок; x_{ij} – искомые логические переменные, описывающие целесообразность реализации j-го процесса в цепи поставок в соответствии с i-й стратегией; β – заданная вероятность безотказной работы цепи поставок; n, m – соответственно количество процессов в цепи поставок и максимальное количество стратегий реализации процесса</p>	<p>Отсутствие возможности учета резервных мощностей цепи поставок при реализации соответствующих процессов.</p> <p>Невозможность реализации процессов с использованием смешанной стратегии.</p> <p>Нелинейный характер модели и, как следствие, высокая трудоемкость ее реализации</p>

– взаимодействие между каждой отдельной парой предприятий-участников сети поставок подразумевает главным образом перемещение материального потока от предшествующего участника к последующему;

– каждое предприятие-участник сети поставок, расположенное на определенном организационном уровне, может взаимодействовать только с предприятиями предшествующего и/или последующего организационных уровней;

– начальный организационный уровень сети поставок соответствует исходным поставщикам, конечный – потребителям, совокупность которых описывается единым участником сети поставок.

Пример описания структуры сети поставок в виде ориентированного графа, вершины которого отождествляются с предприятиями-участниками сети поставок, а дуги – с возможными направлениями движения материального потока, представлен на рис. 1.

– в наиболее простом случае в рамках сети поставок рассматриваются процессы перемещения, обработки и хранения предметов производства определенного наименования (определенной номенклатурной группы) на различных стадиях обработки (в составе материального ресурса, в виде отдельных единиц, в составе собранного готового изделия); таким образом, речь идет о штучных и тарно-штучных грузах;

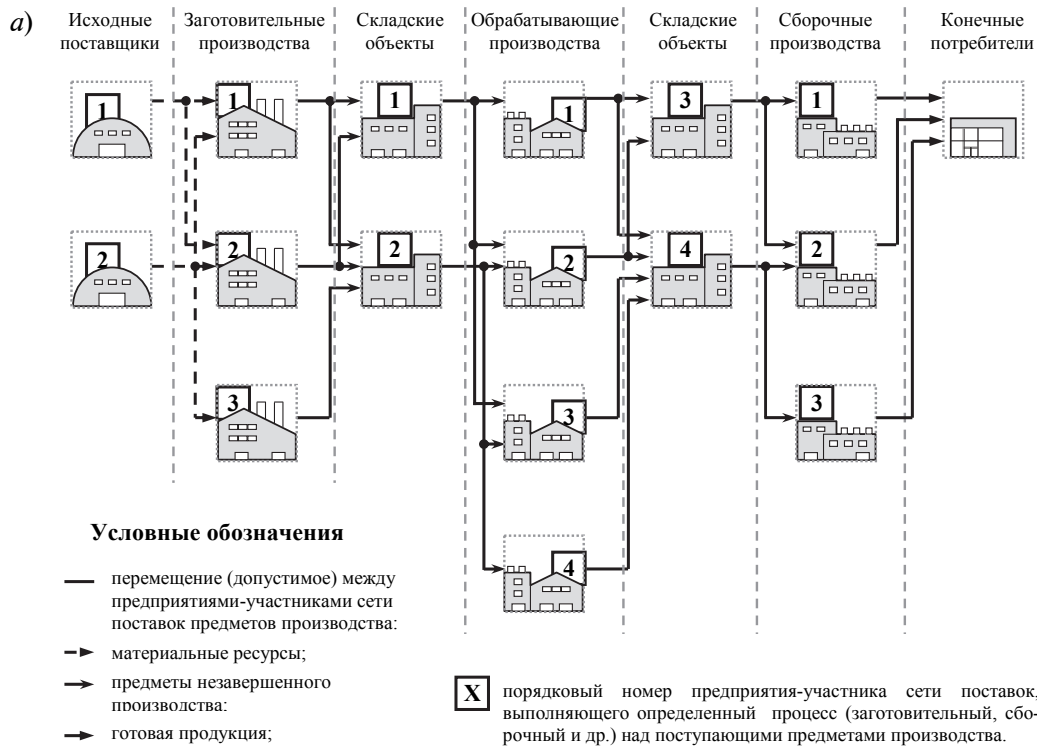
– на базе заданной структуры сети поставок промышленных предприятий формируется процессная модель, описывающая совокупности возможных последовательностей процессов движения, преобразования и задержки материального потока в рамках сети поставок в соответствии с проектом (портфелем проектов) в течение рассматриваемого временного периода.

Процессная модель формируется по следующим основным принципам:

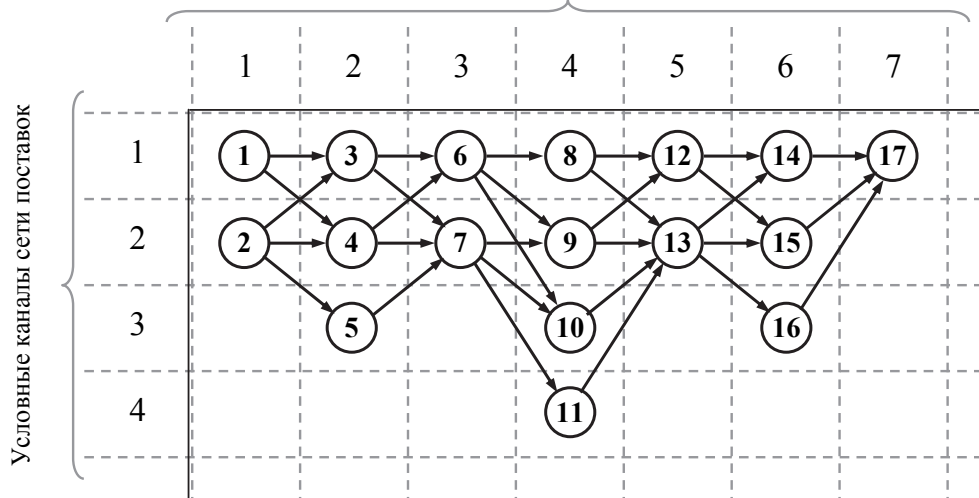
– каждый участник сети поставок в зависимости от его специализации отождествляется с процессом задержки (склад) или преобразования (заготовительное, обрабатывающее или сборочное производство) материального потока;

– каждое возможное взаимодействие между предприятиями-участниками сети поставок отождествляется с процессом транспортировки предметов производства;

– каждый процесс определяется количеством одновременно обрабатываемых предметов производства, плановой длительностью цикла обработки, соответствующими затратами, а также показателем надежности, характеризующим своевременность выполнения операции и сохранность предметов производства при реализации соответствующих технологических процессов.



б) Организационные уровни сети поставок



Математическое описание

$N_K = 17; k \in \{1, 2, \dots, 17\} = K; N_L = 7; l \in \{1, 2, \dots, 7\} = L;$
 $L^W = \{1, 3, 5, 7\}; L^{P-B} = \{2\}; L^{P-M} = \{4\}; L^{P-A} = \{6\};$
 $N_B = 4; b \in \{1, 2, 3, 4\} = B; K_1^L = \{1, 2\}; \dots; K_7^L = \{17\};$
 $K_1^B = \{1, 3, 6, 8, 12, 14, 17\}; \dots; K_4^B = \{11\};$
 $\Psi = \{(1, 3), (1, 4), (2, 3), \dots, (15, 17), (16, 17)\}; N_\Psi = 30;$
 $\psi \in \{1, 2, \dots, 30\}; l_1 = 1; b_1 = 1; \dots; l_{10} = 4; b_{10} = 3; \dots; l_{17} = 7; b_{17} = 1.$

Рис. 1. Пример сети поставок промышленных предприятий, удовлетворяющей положениям оптимизационной модели:

a) структурная схема; б) графическая интерпретация структуры сети

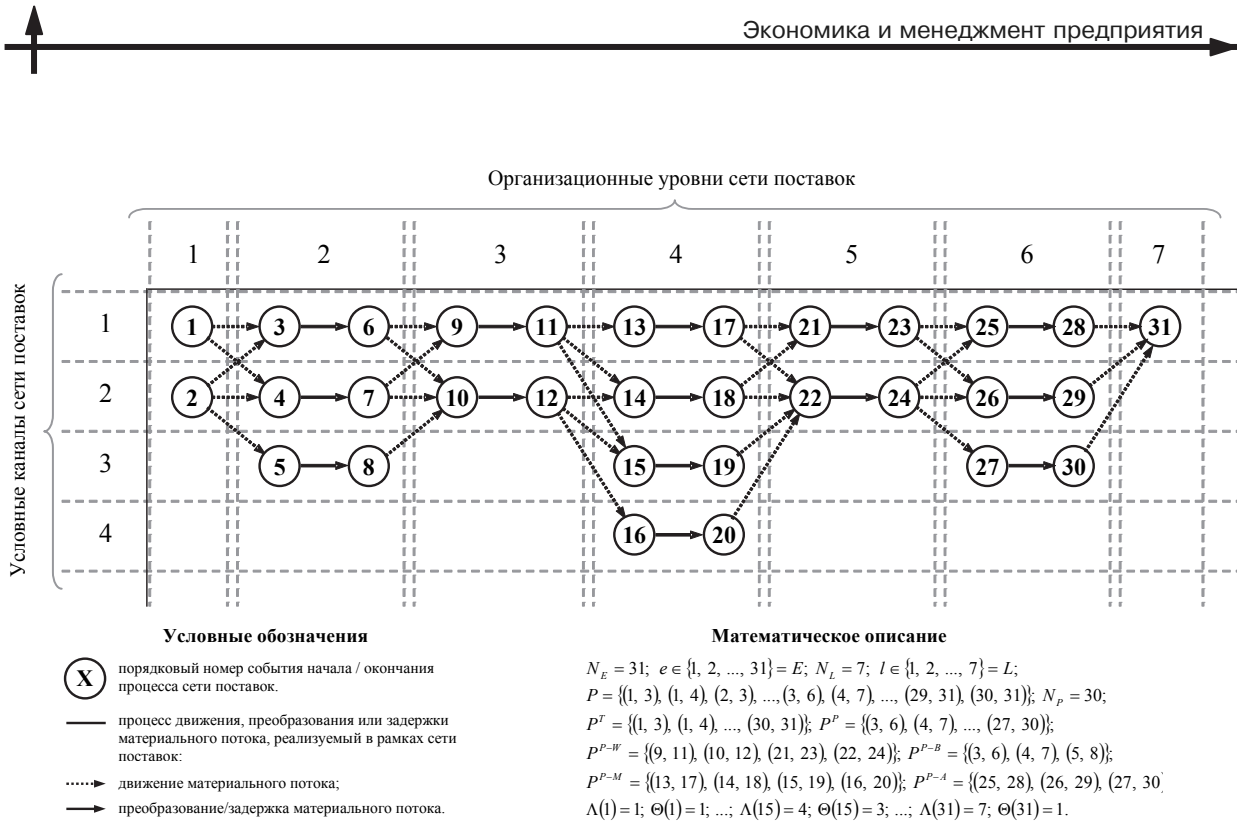


Рис. 2. Пример процессной модели сети поставок промышленных предприятий

Графическая интерпретация процессной модели представляет собой ориентированный граф, дуги которого отождествляются с реализуемыми операциями, а вершины — с событиями начала/окончания операций. Соответствующий пример представлен на рис. 2.

Требуется в рамках отдельного проекта (портфеля проектов), реализуемого в течение определенного временного интервала, на базе требований конечных потребителей в части количества готовой продукции определить оптимальную конфигурацию сети поставок по критериям стоимости, длительности и надежности реализации проекта (портфеля проектов). Под конфигурацией сети поставок в данном случае понимается совокупность предприятий-участников, фактически задействованных в реализации проекта или портфеля проектов по удовлетворению потребностей конечных потребителей, а также формы взаимодействия предприятий в части движения и преобразования соответствующих материальных потоков.

При этом важно отметить, что рассматриваемая оптимизационная модель базируется на обобщенной постановке задачи управления сетью поставок, сетевой модели бизнес-процессов сети поставок промышленных предприятий [7], а также оптимизационной

модели адаптивного функционирования сети поставок [12].

Исходные данные для реализации рассматриваемой оптимизационной модели включают следующее.

1. Характеристики структуры сети поставок:

- множество K индексов предприятий-участников сети поставок, каждый из которых обозначается как $k \in K$; при этом $K = \{1, 2, \dots, N_K\}$, где N_K — количество предприятий (ед.) или порядковый номер участника сети, описывающего конечных потребителей;

- множество L индексов организационных уровней сети поставок, каждый из которых обозначается как $l \in L$; при этом $L = \{1, 2, \dots, N_L\}$, где N_L — количество организационных уровней (ед.) или порядковый номер уровня конечных потребителей;

- множество B индексов условных каналов сети поставок, каждый из которых обозначается как $b \in B$; при этом $B = \{1, 2, \dots, N_B\}$, где N_B — количество условных каналов (ед.) в сети поставок;

- таким образом, каждое k -е предприятие-участник сети поставок определяется парой значений l_k и b_k индексов соответствующего организационного уровня и условного канала;

– множества K_l^L и K_b^B индексов предприятий-участников сети поставок, соответствующих каждому l -му организационному уровню и каждому b -му условному каналу;

$$\begin{aligned} K_1^L \cup K_2^L \cup \dots \cup K_{N_L}^L &= \\ &= K_1^B \cup K_2^B \cup \dots \cup K_{N_B}^B = K; \end{aligned} \quad (1)$$

– множества L^W , L^{P-B} , L^{P-M} , L^{P-A} индексов организационных уровней, соответствующих складским объектам (сюда же предлагается относить и исходных поставщиков и конечных потребителей), заготовительным, обрабатывающим и сборочным производствам соответственно:

$$L^W \cup L^{P-B} \cup L^{P-M} \cup L^{P-A} = L; \quad (2)$$

– множество Ψ связей между предприятиями-участниками сети поставок; каждая связь с порядковым номером ψ описывается парой индексов (k_s^ψ, k_f^ψ) предприятий-участников сети поставок ($k_s^\psi, k_f^\psi \in K$), отождествляемых с пунктами отправления и назначения соответственно; $\psi \in \{1, 2, \dots, N_\Psi\}$, где N_Ψ – общее количество связей между предприятиями-участниками сети поставок; таким образом,

$$\Psi = \left\{ (k_s^1, k_f^1), (k_s^2, k_f^2), \dots, (k_s^{N_\Psi}, k_f^{N_\Psi}) \right\}. \quad (3)$$

2. Характеристики процессной модели сети поставок:

– множество E индексов возможных событий начала/окончания процессов в рамках сети поставок; каждое событие описывается индексом $e \in E$; при этом $E = \{1, 2, \dots, N_E\}$, где N_E – общее количество событий начала/окончания процессов (ед.) или порядковый номер события, соответствующего окончанию доставки продукции до конечных потребителей;

– множество P возможных процессов движения, преобразования и задержки материального потока, обрабатываемого в рамках цепи поставок; каждый процесс с порядковым номером p описывается парой индексов (e_s^p, e_f^p) событий ($e_s^p, e_f^p \in E$; $e_s^p \neq e_f^p$) соот-

ветственно начала и окончания процесса; $p \in \{1, 2, \dots, N_p\}$, где N_p – общее количество возможных процессов в рамках сети поставок ($N_p = N_K + N_\Psi$); таким образом:

$$P = \left\{ (e_s^1, e_f^1), (e_s^2, e_f^2), \dots, (e_s^{N_p}, e_f^{N_p}) \right\}; \quad (4)$$

– подмножества P^T , P^P возможных процессов соответственно транспортировки и преобразования/задержки материального потока:

$$P^T = \left\{ (e_s^p, e_f^p) \mid \Lambda(e_f^p) = \Lambda(e_s^p) + 1 \right\}; \quad (5)$$

$$P^P = \left\{ (e_s^p, e_f^p) \mid \Lambda(e_f^p) = \Lambda(e_s^p) \right\}, \quad (6)$$

где $\Lambda(e)$ – функция, возвращающая индекс организационного уровня сети поставок, в рамках которого может быть реализовано событие с индексом e ; $\Lambda(e) \in L$;

– подмножества P^{P-W} , P^{P-B} , P^{P-M} , P^{P-A} возможных процессов соответственно складирования, заготовительного, обрабатывающего и сборочного производств; в частности, подмножество P^{P-W} определяется выражением

$$\begin{aligned} P^{P-W} &= \left\{ (e_s^p, e_f^p) \mid \Lambda(e_f^p) = \right. \\ &= \left. \Lambda(e_s^p); \Lambda(e_s^p), \Lambda(e_f^p) \in L^W \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогичным образом формируются выражения для подмножеств P^{P-B} , P^{P-M} , P^{P-A} , при этом

$$P^{P-W} \cup P^{P-B} \cup P^{P-M} \cup P^{P-A} = P; \quad (8)$$

– количество n_{ij} (ед.) каналов обслуживания, выделяемых для реализации каждого процесса $(i, j) \in P$; под каналами обслуживания в данном случае понимаются единицы технологического оборудования, используемые для обработки предметов производства;

– максимальное количество q_{ij} (шт./ед.) предметов производства, одновременно или последовательно обрабатываемых в рамках одного канала обслуживания при выполнении процесса $(i, j) \in P$. Назначение характеристик n_{ij} и q_{ij} для различных вариантов процессов, реализуемых в рамках сети поставок, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Назначение характеристик модели для различных видов процессов

Вид процесса	Назначение характеристики	
	Количество каналов обслуживания n_{ij} , ед.	Максимальное количество предметов производства для канала обслуживания r_{ij} , шт./ед.
Транспортировка	Количество выделяемых транспортных средств	Вместимость транспортного средства в предметах производства
Складирование	Количество ячеек для хранения складской тары	Вместимость складской тары, размещаемой в ячейке
Заготовительное производство	Количество единиц технологического оборудования для получения заготовок	Количество единиц материального ресурса, одновременно или последовательно обрабатываемых единицей оборудования
Обрабатывающее производство	Количество технологических модулей для механо-, термо- и других видов обработки	Количество единиц предметов производства, одновременно и последовательно обрабатываемых на одном технологическом модуле
Сборочное производство	Количество сборочных стендов/агрегатов	Количество единиц готовых изделий, одновременно или последовательно формируемых на одном сборочном стенде/агрегате

– максимальное количество r_{ij} (шт.) предметов производства, одновременно обрабатываемых в рамках процесса $(i, j) \in P$, выделяемого в рамках сети поставок; в общем случае характеристика r_{ij} определяется выражением вида

$$r_{ij} = n_{ij}q_{ij}; \quad (9)$$

– затраты c_{ij} (руб./ед.) на обработку партии предметов производства (с наибольшим объемом q_{ij}) в одном канале обслуживания при реализации процесса $(i, j) \in P$;

– длительность t_{ij} (ч/ед.) цикла обработки партии предметов производства с наибольшим объемом r_{ij} при выполнении процесса $(i, j) \in P$;

– надежность p_{ij} реализации процесса $(i, j) \in P$, определяемая вероятностью его своевременного выполнения, а также сохранности предметов производства по окончании процесса. Важно отметить, что данная характеристика не зависит от количества обрабатываемых в рамках соответствующего процесса предметов производства.

3. Характеристики проекта (портфеля проектов), реализуемого в рамках сети поставок в течение рассматриваемого временного периода:

– количество Q^z (ед./мес.) единиц готовой продукции, запрашиваемое конечными потребителями. Количество заготовок Q_k^B (ед./мес.), доступных у каждого k -го исходного постав-

щика ($k \in K_1$) в рамках рассматриваемого периода; при этом наличие решения задачи определяется выполнением условия вида

$$\sum_{k \in K_1} Q_k^B \prod_{\mu=1}^M d_{\mu} \geq Q^z \prod_{\omega=1}^{\Omega} v_{\omega}, \quad (10)$$

где M, Ω – количество (ед.) стадий соответственно заготовительного и сборочного процесса, предусмотренных технологией изготовления изделий; v_{ω} – входимость (шт./ед.) предметов производства в сборочную единицу / готовое изделие в рамках ω -й стадии сборки; d_{μ} – количество компонент (шт./ед.), получаемых из единицы материального ресурса в рамках μ -й стадии заготовительного процесса;

– пропускная способность S_k (шт./мес.), обеспечиваемая в течение периода каждым k -м предприятием-участником сети поставок (за исключением исходных поставщиков и конечных потребителей $k \in K \setminus (K_1^L \cap K_{N_L}^L)$).

Характеристика S_{ij} соответствующего процесса преобразования/задержки материального потока определяется выражением

$$S_{ij} = S_k : l_k = \Lambda(i) = \Lambda(j), \quad (11)$$

$$b_k = \Theta(i) = \Theta(j),$$

где $\Theta(e)$ – функция, возвращающая индекс условного канала сети поставок, в рамках которого может быть реализовано событие с индексом e ; $\Theta(e) \in B$;

– пропускная способность S_ψ (шт./мес.), обеспечиваемая в течение периода для каждой ψ -й связи между предприятиями-участниками сети поставок ($\psi \in \Psi$). Характеристика S_{ij} соответствующего процесса транспортировки описывается формулой

$$S_{ij} = S_\psi : l_{k_s^\psi} = \Lambda(i), l_{k_f^\psi} = \Lambda(j),$$

$$b_{k_s^\psi} = \Theta(i), b_{k_f^\psi} = \Theta(j); \quad (12)$$

– следующая группа характеристик определяются основными критериями, на базе которых производится обоснование характеристик сети поставок, суммарных затрат C_Σ , наибольшей общей длительности T_Σ , наименьшей обобщенной надежности P_Σ выполнения работ, а также способом их учета в рамках решения задачи, т. е.:

– если отдельный критерий учитывается в составе целевой функции, то в состав исходных данных в общем случае включается соответствующее нормативное значение (C_Σ^q , или T_Σ^q , или P_Σ^q) и коэффициент важности (α_C , или α_T , или α_P ; при этом $\alpha_C, \alpha_T, \alpha_P \in (0; 1]$; $\alpha_C + \alpha_T + \alpha_P = 1$);

– если отдельный критерий учитывается в составе ограничений задачи, то в составе исходных данных должно быть предусмотрено соответствующее предельно допустимое значение ($[C_\Sigma]$, или $[T_\Sigma]$, или $[P_\Sigma]$).

Искомые переменными оптимизационной модели являются следующие:

– количество x_{ij} (шт.) предметов производства, обрабатываемых за период в рамках каждого процесса $(i, j) \in P$, реализуемого в рамках сети поставок;

– логические переменные y_{ij} , определяющие целесообразность реализации процесса $(i, j) \in P$ в рамках сети поставок;

$$y_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если процесс } (i, j) \text{ целесообразно} \\ & \text{реализовывать;} \\ 1 & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (13)$$

– количество циклов z_{ij}^C и z_{ij}^T (ед.) обработки партий предметов производства соответственно в одном и во всех каналах обслуживания в рамках процесса $(i, j) \in P$;

– наибольшее значение кумулятивной величины τ_e общей длительности обработки предметов производства в соответствии с проектом

(портфелем проектов) к моменту наступления каждого e -го события ($e \in E$) в сети поставок;

– наименьшее значение ρ_e обобщенного показателя надежности реализации процессов движения и преобразования материального потока в соответствии с проектом (портфелем проектов) к моменту наступления каждого e -го события ($e \in E$) в сети поставок.

Промежуточные расчетные характеристики разработанной модели определяются фактическими значениями основных критериев, на базе которых осуществляется решение задачи:

– фактические суммарные затраты C_Σ (руб./мес.) на реализацию проекта (портфеля проектов) в сети поставок в рамках рассматриваемого временного периода, определяемые по формуле

$$C_\Sigma(\{z_{ij}^C\}) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} c_{ij} z_{ij}^C, \quad (14)$$

где I – множество индексов начальных событий процессов в сети поставок; J_i – множество индексов конечных событий процессов, которым соответствует начальное событие с индексом i ;

– фактические наибольшая общая длительность T_Σ (ч/мес.) и наименьшая обобщенная надежность P_Σ (ед./мес.) реализации проекта (портфеля проектов) в сети поставок в рамках рассматриваемого временного периода, описываемая выражением

$$T_\Sigma(\tau_{e^*}) = \tau_{e^*}, \quad (15)$$

$$P_\Sigma(\rho_{e^*}) = \rho_{e^*} \quad (16)$$

где e^* – индекс конечного события в сети поставок, соответствующего поступлению заказанной продукции к конечным потребителям; $\Lambda(e^*) = N_L$.

Целевая функция и основные функциональные ограничения задачи в общем случае имеют вид

$$\alpha_C \frac{C_\Sigma(\{z_{ij}^C\})}{C_\Sigma^q} + \alpha_T \frac{T_\Sigma(\tau_{e^*})}{T_\Sigma^q} -$$

$$- \alpha_P \frac{P_\Sigma(\rho_{e^*})}{P_\Sigma^q} \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} C_\Sigma(\{z_{ij}^C\}) \leq [C_\Sigma]; \\ T_\Sigma(\tau_{e^*}) \leq [T_\Sigma]; \\ P_\Sigma(\rho_{e^*}) \geq [P_\Sigma]. \end{cases} \quad (18)$$

Важно отметить, что отдельный критерий нецелесообразно учитывать одновременно и в составе целевой функции и в составе ограничений; таким образом, выражения (17) и (18) в общем случае несовместны. Пример корректной постановки задачи для учета в целевой функции критериев стоимости и надежности, а критерия длительности – в ограничении определяется выражением

$$\alpha_C \frac{C_\Sigma(\{z_{ij}^C\})}{C_\Sigma^q} - \alpha_P \frac{P_\Sigma(\rho_{e^*})}{P_\Sigma^q} \rightarrow \min, \quad (19)$$

$$T_\Sigma(\tau_{e^*}) \leq [T_\Sigma].$$

Остальные структурные и функциональные ограничения разработанной оптимизационной модели описываются выражениями вида

$$\tau_i - \tau_j + t_{ij} z_{ij}^T - T(1 - y_{ij}) \leq 0, \quad (i, j) \in P; \quad (20)$$

$$\rho_i p_{ij} - \rho_j + 1 - y_{ij} \geq 0, \quad (i, j) \in P; \quad (21)$$

$$\sum_{j \in J_i} x_{ij} \leq Q_k^B, \quad \Lambda(i) = \Lambda(j) - 1 = 1 = l_k, \quad (22)$$

$$\Theta(i) = b_k, \quad (i, j) \in P, \quad k \in K;$$

$$\sum_{j \in J_i} x_{ij} = Q^\Sigma, \quad \Lambda(i) + 1 = \Lambda(j) = N_L, \quad (i, j) \in P; \quad (23)$$

$$\sum_{\substack{i \in I_e \\ (i, e) \in P^T}} x_{ie} = \sum_{\substack{j \in J_e \\ (e, j) \in P^P}} x_{ej}, \quad e \in E; \quad (24)$$

$$\sum_{\substack{i \in I_e \\ (i, e) \in P^{P-M} \cap P^W}} x_{ie} = \sum_{\substack{j \in J_e \\ (e, j) \in P^T}} x_{ej}, \quad e \in E; \quad (25)$$

$$\sum_{\substack{i \in I_e \\ (i, e) \in P^{P-B}}} x_{ie} d_e \geq \sum_{\substack{j \in J_e \\ (e, j) \in P^T}} x_{ej}, \quad e \in E; \quad (26)$$

$$\sum_{\substack{i \in I_e \\ (i, e) \in P^{P-A}}} x_{ie} = v_e \sum_{\substack{j \in J_e \\ (e, j) \in P^T}} x_{ej}, \quad e \in E; \quad (27)$$

$$z_{ij}^C \geq \frac{x_{ij}}{q_{ij}}; \quad z_{ij}^T \geq \frac{x_{ij}}{r_{ij}}, \quad (i, j) \in P; \quad (28)$$

$$x_{ij} \leq M y_{ij}, \quad (i, j) \in P; \quad (29)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq S_{ij}, \quad (i, j) \in P; \quad (30)$$

$$x_{ij}, z_{ij}^C, z_{ij}^T \in Z; \quad y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in P; \quad (31)$$

$$\tau_e \geq 0; \quad 0 \leq \rho_e \leq 1, \quad e \in E, \quad (32)$$

где I_e – множество индексов начальных событий для процессов, которым соответствует

конечное событие с индексом e ; J_e – множество индексов конечных событий для процессов, которым соответствует начальное событие с индексом e ; d_e – количество компонент (шт./ед.), получаемых из единицы материального ресурса по окончании процесса заготовительного производства, описываемом событием с индексом e ; $d_e \in \{d_\mu\}$; v_e – входимость (шт./ед.) предметов производства в сборочную единицу / готовое изделие, окончание сборки которого описывается событием с индексом e ; $v_e \in \{v_\omega\}$; T, M – произвольные большие положительные числа, измеряемые соответственно в единицах времени и в единицах грузопотока; Z – множество целых чисел.

Ограничения (20) и (21) определяют кумулятивный характер вычисления переменных $\{\tau_e\}$ и $\{\rho_e\}$. При этом если определенному предприятию-участнику сети поставок ставится в соответствие несколько входящих материальных потоков, поступающих в разные моменты времени в рамках рассматриваемого периода, то промежуточный и выходящий (относительно предприятия) материальные потоки будут описываться наибольшей длительностью и наименьшей обобщенной надежностью, вычисляемыми на базе вышеупомянутых входящих потоков.

Ограничения (22) и (23) описывают соответствие материальных потоков на входе и выходе сети поставок (на первом и последнем организационных уровнях) объемам материальных ресурсов и готовой продукции соответственно.

Ограничение (24) определяет соответствие объемов входящих и внутренних материальных потоков по отношению к каждому предприятию-участнику сети поставок. Ограничения (25)–(27) описывают соотношения между объемами внутренних и выходящих грузопотоков для каждого предприятия-участника сети поставок в зависимости от его специализации; для складов и обрабатывающих производств величина материального потока не изменяется – ограничение (25); для заготовительных производств – увеличивается пропорционально количеству компонент в единице материального ресурса – ограничение (26); для сборочных производств – уменьшается пропорционально входимости предметов производства в сборочную единицу / готовое изделие – ограничение (27).

Ограничения (28) и (29) определяют соотношения между значениями переменных $\{x_{ij}\}$, $\{y_{ij}\}$, $\{z_{ij}^C\}$, $\{z_{ij}^T\}$ оптимизационной модели, ограничения (30)–(32) – области допустимых значений всех переменных модели.

Важно отметить, что выражения (14)–(32) определяют линейный характер модели, что выгодно отличает ее от существующих разработок в части трудоемкости реализации инструментального средства с использованием современных программных сред [18].

Вышеизложенное описание модели обоснования характеристик сети поставок промышленных предприятий позволяет сформулировать наиболее важные допущения предложенной разработки и ограничения по ее практическому применению.

1. Ввиду того, что при моделировании процессов движения и преобразования / задержки материального потока в рамках сети поставок допускается разделение и слияние его отдельных компонент, реализация модели не обеспечивает непосредственную оценку надежности функционирования рассматриваемой системы в целом: обобщенный показатель надежности P_Σ^q как ключевой критерий модели определяет наименьшую из вероятностей безотказной реализации процесса движения и преобразования/задержки компонент материального потока, образующихся при его разделении и слиянии. Тем не менее, структура оптимизационной модели в части выражений (17) и (21) определяет стремление надежности функционирования сети поставок к максимальному значению. Соответствующая количественная характеристика может быть вычислена на базе конфигурации сети поставок, полученной по результатам реализации разработанной модели, с использованием элементов теории надежности при описании последовательных и параллельных связей между предприятиями-участниками сети поставок как элементами технической системы.

2. Вероятность p_{ij} реализации каждого отдельного процесса (i, j) в рамках сети поставок не зависит от количества обрабатываемых предметов производства x_{ij} . Данное положение не оказывает негативного влияния на точность получаемых результатов только в том случае, если конкретное предприятие-

участник сети поставок, ответственное за выполнение процесса, реализует его по определенным стандартам, регламентирующим фиксированный уровень качества выполняемых процессов над элементами поступающего материального потока.

3. Разработанная модель описывает процессы движения и преобразования/задержки материального потока от исходных поставщиков до конечных потребителей и не учитывает при этом наличие на момент решения задачи предметов незавершенного производства на различных стадиях их обработки в рамках отдельных предприятий-участников сети поставок. Данный недостаток может быть устранен посредством ввода дополнительных функциональных ограничений на переменные $\{x_{ij}\}$:

$$\sum_{\substack{i \in I_e \\ (i, e) \in P^{P-M} \cap P^W}} x_{ie} + \Delta_e = \sum_{\substack{j \in J_e \\ (e, j) \in P^T}} x_{ej}, \quad e \in E, \quad (14)$$

где Δ_e – запас предметов производства (шт./мес.), доступный к моменту начала отправки обработанных деталей за пределы предприятия-участника сети поставок, описываемому событием с индексом e .

Таким образом, приведенная оптимизационная модель может быть эффективно использована как в рамках организационного проектирования сети поставок, так и в процессе функционирования последней (реализации проекта или портфеля проектов) для определения оптимальных характеристик системы в части не только суммарных затрат, общей длительности, но также и обобщенной надежности выполнения работ.

Выводы.

Обзор и сравнительный анализ методических разработок и инструментальных средств в области обеспечения надежности функционирования цепей поставок позволили сделать вывод об ограниченности или отсутствии методических разработок и инструментальных средств, пригодных для практического использования в условиях функционирования цепей поставок промышленных предприятий с целью повышения эффективности их текущей деятельности и обеспечения устойчивого развития на перспективу.

Разработанная оптимизационная модель обоснования характеристик функционирования сети поставок промышленных предпри-



ятий предполагает кумулятивный характер вычисления обобщенного показателя надежности реализации соответствующих бизнес-процессов при линейном характере целевой функции и ограничений модели.

Разработанную оптимизационную модель предполагается использовать в качестве основы для дальнейших исследований по следующим направлениям:

– реализация разработанной модели обоснования характеристик сети поставок промышленных предприятий на практических

примерах, в рамках которых рассматриваются процессы перемещения и обработки компонент материального потока в соответствии с проектом (портфелем проектов), реализуемым предприятиями в рамках ограниченного временного периода;

– модернизация разработанной модели для возможности учета многономенклатурного характера материальных потоков как в части материальных ресурсов, так и в части готовой продукции, заказываемой конечным потребителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аристов В.М.** Методы оценки безопасности цепи поставок организации в условиях неопределенности и риска // *Экономический вектор*. 2015. № 4(3). С. 6–10.
2. **Дмитриев А.В.** Международная логистическая координация на рынке транспортно-экспедиторских услуг // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Экономика и менеджмент. 2015. Т. 9, № 3. С. 151–158.
3. **Зайцев Е.И., Парфенов А.В., Уваров С.А.** Процессная модель формирования сетей поставок // *Логистика и управление цепями поставок*. 2012. № 2(49). С. 5–14.
4. **Иванова Н.Л., Ключарева Н.С.** Влияние макроэкономических факторов на риски деятельности предприятий // *Неделя науки СПбПУ: матер. науч.-практ. конф. с Междунар. участием / Инженерно-экономический институт*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 20–22.
5. **Ильин И.В., Найденышева Е.Г.** Этапы формирования государственно-частного партнерства для развития социальной инфраструктуры // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. Экономические науки. 2015. № 4(233). С. 91–98. DOI: 10.5862/JE.223.8
6. **Корчагин В.А., Суворов В.А., Чекрызов Е.А.** Математическая модель и алгоритм решения, повышающие эффективность функционирования транспортно-логистических систем // *Вестник ТОГУ: Транспорт*. 2013. № 2(29) С. 91–100.
7. **Кобзев В.В., Радаев А.Е., Кривченко А.С.** Менеджмент цепи поставок: учеб. пособие / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. В.В. Кобзева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 319 с.
8. **Левенцов А.Н., Левенцов В.А.** Проблемы управления запасами на машиностроительных предприятиях единичного типа производства // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ*. 2005. № 1. С. 68–71.
9. **Лукинский В.С.** Моделирование временных составляющих автомобильных перевозок при реализации технологии «Точно в срок» // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 3. С. 116–120.
10. **Муханова Н.В.** Внешнеэкономическая деятельность машиностроительного предприятия: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 95 с.
11. **Муханова Г.С., Тышканбаева М.Б., Чакеева К.С., Унтупов С.К.** Задача формирования сети поставок с заданной надежностью // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2015. № 6. С. 114–115.
12. **Радаев А.Е., Кобзев В.В.** Оптимизационная модель адаптивного функционирования сети поставок промышленных предприятий // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. Экономические науки. 2013. № 4(175). С. 135–140.
13. **Санков В.Г., Голубева С.С., Степанов С.С.** Информационный фактор надежности цепей поставок в машиностроительной отрасли // *Известия Саратовского университета*. Новая серия. Экономика. Управление. Право. 2013. Т. 13. № 3-1. С. 300–306.
14. **Сулоева С.Б., Свириденко В.А.** Клиентоориентированные системы управления затратами на промышленных предприятиях // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. Экономические науки. 2013. № 4(175). С. 80–83.
15. *Теоретические основы формирования промышленной политики / Адова И.Б., Азимов Ю.И., Алетдинова А.А., Асаул А.Н., Борисов А.А., Бабкин А.В., Васильев Ю.С. и др.: моногр. / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В. Бабкина*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 462 с. ISBN 978-5-7422-5137-8.
16. **Теренина И.** Анализ неопределенностей в цепях поставок // *РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция*. 2012. № 2. С. 95–97.
17. **Шульженко Т.Г.** Исследование проблем логистической интеграции в рамках эволюционного процесса логистики и управления цепями поставок // *РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция*. 2012. № 4. С. 102–105.
18. **Юрьев В.Н., Кузьменков В.А.** Методы оптимизации в экономике и менеджменте: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 803 с.

REFERENCES

1. **Aristov V.M.** Metody otsenki bezopasnosti tsepi postavok organizatsii v usloviakh neopredelennosti i riska. *Ekonomicheskii vektor*. 2015. № 4(3). S. 6–10. (rus)
2. **Dmitriev A.V.** Mezhdunarodnaia logisticheskaiia koordinatsiia na rynke transportno-ekspeditorskikh uslug. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment*. 2015. T. 9, № 3. S. 151–158. (rus)
3. **Zaitsev E.I., Parfenov A.V., Uvarov S.A.** Protsepnaiia model' formirovaniia setei postavok. *Logistika i upravlenie tsepiami postavok*. 2012. № 2(49). S. 5–14. (rus)
4. **Ivanova N.L., Kliuchareva N.S.** Vliianie makroekonomicheskikh faktorov na riski deiatel'nosti predpriatii. *Nedelia nauki SPbGPU: mater. nauch.-prakt. konf. s Mezhdunar. uchastiem*. Inzhenerno-ekonomicheskii institut. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. S. 20–22. (rus)
5. **Il'in I.V., Naidenyshcheva E.G.** Stages of the formation of public-private partnership for the social infrastructure development. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2015, no. 4(233), pp. 91–98. DOI: 10.5862/JE.223.8 (rus)
6. **Korchagin V.A., Suvorov V.A., Chekryzhov E.A.** Matematicheskaiia model' i algoritm resheniia, povyshaiushchie effektivnost' funktsionirovaniia transportno-logisticheskikh system. *Vestnik TOGU: Transport*. 2013. № 2(29) S. 91–100. (rus)
7. **Kobzev V.V., Radaev A.E., Krivchenko A.S.** Menedzhment tsepi postavok: ucheb. posobie. Pod obsh. red. d-ra ekon. nauk, prof. V.V. Kobzeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. 319 s. (rus)
8. **Leventsov A.N., Leventsov V.A.** Problemy upravleniia zapasami na mashinostroitel'nykh predpriatiiakh edinichnogo tipa proizvodstva. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta LETI*. 2005. № 1. S. 68–71. (rus)
9. **Lukinskii V.S.** Modelirovanie vremennykh sostavliaiushchikh avtomobil'nykh perevozok pri realizatsii tekhnologii «Tochno v srok». *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. 2012. № 3. S. 116–120. (rus)
10. **Mukhanova N.V.** Vneshneekonomicheskaiia deiatel'nost' mashinostroitel'nogo predpriatii: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 95 s.
11. **Mukhanova G.S., Tyshkanbaeva M.B., Chakeeva K.S., Untupov S.K.** Zadacha formirovaniia seti postavok s zadannoi nadezhnost'iu. *Vestnik Krasnoiarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. № 6. S. 114–115. (rus)
12. **Kobzev A.E., Radaev V.V.** Optimization model for adaptive functionig of supply network including industrial enterprises. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2013, no. 4(175), pp. 135–140. (rus)
13. **Sankov V.G., Golubeva S.S., Stepanov S.S.** Informatsionnyi faktor nadezhnosti tsepei postavok v mashinostroitel'noi otrasli. *Izvestiia Saratovskogo universiteta. Novaia seriia. Ekonomika. Upravlenie. Pravo*. 2013. T. 13. № 3-1. S. 300–306. (rus)
14. **Suloeva S.B., Sviridenko V.A.** Customer-oriented cost management systems in industrial enterprises. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2013, no. 4(175), pp. 80–83. (rus)
15. **Teoreticheskie osnovy formirovaniia promyshlennoi politiki.** Adova I.B., Azimov Iu.I., Aletdinova A.A., Asaul A.N., Borisov A.A., Babkin A.V., Vasil'ev Iu.S. i dr.: monogr. Pod red. d-ra ekon. nauk, prof. A.V. Babkina. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. 462 s. ISBN 978-5-7422-5137-8.
16. **Terenina I.** Analiz neopredelennosti v tsepiakh postavok. *RISK: Resursy, informatsiia, snabzhenie, konkurentsiia*. 2012. № 2. S. 95–97. (rus)
17. **Shul'zhenko T.G.** Issledovanie problem logisticheskoi integratsii v ramkakh evoliutsionnogo protsepa logistiki i upravleniia tsepiami postavok. *RISK: Resursy, informatsiia, snabzhenie, konkurentsiia*. 2012. № 4. S. 102–105. (rus)
18. **Iur'ev V.N., Kuz'menkov V.A.** Metody optimizatsii v ekonomike i menedzhmente: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 803 s. (rus)

РАДАЕВ Антон Евгеньевич — доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат экономических наук.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: TW-inc@yandex.ru

RADAEV Anton E. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251. Politechnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: TW-inc@yandex.ru

КОБЗЕВ Владимир Васильевич — заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор экономических наук.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kobzev_vv@mail.ru

KOBZEV Anton E. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251. Politechnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: kobzev_vv@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 12.07.16

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016