

---

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ**

---

УДК 004.02

DOI: 10.46960/1816-210X\_2026\_1\_7

EDN WYXFEI

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ  
С УЧЕТОМ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕН ПРОЛЕЖИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ****М.С. Куликов**ORCID: 0000-0002-4777-771X e-mail: [vokil@mail.ru](mailto:vokil@mail.ru)Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия***М.Х. Прилуцкий**ORCID: 0000-0002-7694-3916 e-mail: [pril@iani.unn.ru](mailto:pril@iani.unn.ru)Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия*

Разработан программный продукт SMART-ресурс, предназначенный для решения задач распределения производственных ресурсов при автоматизации процессов изготовления высокотехнологичных изделий, собственных предприятиям машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Рассматривается задача минимизации времен межоперационного пролеживания деталей, позволяющая уменьшать запасы незавершенного производства, предотвращая тем самым рост себестоимости выпускаемой продукции. В рамках разработанного SMART-ресурса программно реализован алгоритм, позволяющий решать поставленную задачу.

**Ключевые слова:** NP-трудная задача; производственное планирование; распределение ресурсов; фронтальный алгоритм; фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью; незавершенное производство; программное средство.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Куликов, М.С. Распределение производственных ресурсов с учетом минимизации времен пролеживания деталей / М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X\_2026\_1\_7 EDN: WYXFEI

**PRODUCTION RESOURCE ALLOCATION CONSIDERING  
MINIMIZATION OF PART-WAITING TIME****M.S. Kulikov**ORCID: 0000-0002-4777-771X e-mail: [vokil@mail.ru](mailto:vokil@mail.ru)Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky  
*Nizhny Novgorod, Russia***M.Kh. Prilutskii**ORCID: 0000-0002-7694-3916 e-mail: [pril@iani.unn.ru](mailto:pril@iani.unn.ru)Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The SMART-resource software has been developed to address the challenges of production resource allocation during the automation of high-tech products manufacturing processes typical for enterprises of the Rosatom engineering division. Minimizing the part-waiting time between operations allows to reduce the stock of work in progress, thereby preventing an increase in the cost of manufactured products. The algorithm for solving the given problem is implemented in the SMART-resource.

**Key words:** NP-hard task; production planning; resource allocation; frontal algorithm; frontal algorithm with ranks and feedback; work in progress; software tool.

**FOR CITATION:** Kulikov M.S., Prilutskii M.Kh. Production resource allocation considering minimization of part-waiting time. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X\_2026\_1\_7 EDN: WYXFEI

## Введение

Вопросы решения оптимизационных задач производственного планирования широко обсуждаются в современной литературе. Эти задачи, как правило, относятся к классу NP-трудных задач, для решения которых не существует точных алгоритмов, отличных от полного перебора, который для реальных большеразмерных задач практически невозможен. Это обуславливает применение для решения реальных прикладных, большеразмерных задач эвристических процедур. Применение гибридных алгоритмов и алгоритмов, связанных с машинным обучением, обсуждается в работах [1-5]. Методы целочисленного программирования применительно к решению таких задач небольшой размерности обсуждаются в работах [6, 7]. Необходимо отметить также работы Нижегородской школы по вопросам распределения производственных ресурсов для высокотехнологичных предприятий [8-17].

### 1. Содержательное описание проблемы производственного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства

Содержательно проблема производственного планирования может быть описана следующим образом. Заданный план производства определяет множество операций, подлежащих выполнению для изготовления изделий. Задано множество используемых для выполнения взаимозависимых операций ресурсов предприятия. Технология изготовления изделий определяется ориентированным графом без петель и контуров, который задает на множестве операций частичный порядок – для каждой операции множество ей непосредственно предшествующих и непосредственно за ней следующих операций. Если для операции множество ей предшествующих операций пусто, то она является «начальной» и определяет начало изготовления соответствующего изделия. Для нее задан начальный срок изготовления, раньше которого она не может начать выполняться. Начальные сроки выполнения операций могут быть связаны с обеспеченностью операций материальными ресурсами, которые в заданные моменты поступят в систему. Если для операции множество последующих операций пусто, то она является «завершающей» и для нее задан директивный срок, который определяет время завершения этой операции, а тем самым и время, к которому соответствующее изделие должно быть изготовлено. Для каждой операции указаны ресурсы, которые используются для ее выполнения, причем операции могут выполняться с разной интенсивностью потребления ресурсов, а тем самым и с разной длительностью. Для каждой операции определена минимально и максимально возможная интенсивность расходования ресурсов и ресурсоемкость операции по каждому ресурсу, который используется для выполнения этой операции. Интенсивность потребления ресурсов связана, например, с т.н. ручными операциями, выполнение которых может потребовать нескольких исполнителей, соответственно, время выполнения операции может в силу этого меняться. Для изделий заданы «приоритеты», определяющие «важность» изделий с точки зрения возможных штрафных санкций за нарушения заданных директивных сроков изготовления изделий. Естественными условиями таких задач являются условия выполнения операций до полного изготовления без перерывов и невозможность использовать один и тот же ресурс для выполнения разных операций.

Не уменьшая общности, будем отождествлять проблему производственного планирования процесса изготовления изделий с проблемой эффективного распределения производственных ресурсов. Общая проблема эффективного распределения производственных ресурсов заключается в составлении производственного плана: для каждой операции определить время начала выполнения, выбрать, какие доступные ресурсы в каком количестве будут из-

расходованы для выполнения операции с целью наилучшего выполнения заданных директивных сроков изготовления изделий и с учетом минимизации времен межоперационного пролеживания деталей. Для решения этой проблемы дано содержательное описание объекта оптимизации, построена математическая модель проблемы распределения ограниченных производственных ресурсов. В рамках модели поставлена каноническая для таких предприятий оптимизационная задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий, а также актуальная оптимизационная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей, позволяющая уменьшать запасы незавершенного производства, тем самым предотвращая рост себестоимости выпускаемой продукции. Разработан и программно реализован алгоритм, позволяющий решать поставленные задачи.

## 2. Математическая модель

### 2.1. Исходные параметры математической модели

Пусть  $T = \{1, \dots, T_0\}$  – множество тактов планирования;

$I = \{1, \dots, n\}$  – множество операций всех подлежащих выполнению изделий;

$J = \{1, \dots, m\}$  – множество ресурсов, используемых для выполнения операций;

$K = \{1, \dots, k\}$  – множество заказов плана производства;

$T = \{1, \dots, T_0\}$  – множество тактов планирования;

$V_l$  – множество операций заказа  $l$ ,  $l \in K$ , при этом  $\bigcup_{l=1}^k V_l = \{1, \dots, n\}$  – множество всех операций всех заказов определяют общее множество операций;

$V_i \cap V_{i''} = \emptyset, i', i'' \in I$  и  $l' \neq l''$  – одна операция не может входить в разные заказы;

$G_l = (V_l, A_l), A_l \subseteq V_l^2$  – ориентированный граф без петель и контуров, определяющий технологию заказа  $l$ ,  $l \in K$ ;

$p_l$  – штраф за отставание на 1 такт изготовления изделия  $l$  от заданного для этого изделия директивного срока,  $l \in K$ ;

$t_i^H$  – ранее начало выполнения операции  $i$ ,  $i \in I^H$ , где  $I^H$  – множество начальных операций, для которых заданы начальные сроки;

$t_i^A$  – (директивный) срок завершения операции  $i$ ,  $i \in I^A$ , где  $I^A$  – множество завершающих операций, для которых заданы директивные сроки;

$t_i^P$  – ранее начало выполнения операции  $i$ , связанное с обеспеченностью операции материальными ресурсами,  $i \in I^P$ , где  $I^P$  – множество операций, начало выполнения которых зависит от поступления в систему материальных ресурсов, необходимых для их выполнения;

$r_{ij}$  – ресурсоемкость операции  $i$  по ресурсу  $j$ ,  $i \in I, j \in J$ ;

$W_{jt}$  – количество ресурса  $j$ , которое в такт  $t$  доступно к использованию,  $j \in J, t \in T$ ;

$m_{ij}$  и  $M_{ij}$  соответственно, минимальная и максимальная интенсивности потребления операцией  $i$  ресурса  $j$  в один такт планирования,  $i \in I, j \in J$ .

*Замечание 1.* Будем полагать, что для операций, для которых нельзя изменять интенсивность  $m_{ij} = M_{ij}, i \in I, j \in J$ .

### 2.2. Варьируемые параметры математической модели

$x_i \in T$  – время начала выполнения операции  $i$ ,  $i \in I$ .

$z_{ijt}$  – интенсивность потребления в такт  $t$  операцией  $i$  ресурса  $j$ ,  $t \in T, i \in I, j \in J$ .

Тогда время выполнения операции  $i$ , если она выполнялась с использованием ресурсов  $j_1, j_2, \dots, j_s$  с определенными интенсивностями, будет равно  $t_i = \max_{t \in T} \frac{r_{ij}}{\sum_{j \in J} z_{ijt}}$ , где максимум берется по всем  $j_1, j_2, \dots, j_s$ .

### 2.3. Ограничения математической модели

$x_i \in T, i = \overline{1, n}$ .

(1)

(Времена начала выполнения операций принадлежат множеству тактов планирова-

ния)

$$z_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T. \quad (2)$$

(Естественные условия неотрицательности переменных)

$$x_i \geq t_i^p, i \in I^p. \quad (3)$$

(Начала выполнения операций ограничены заданными сроками, связанными с обеспеченностью операций материальными ресурсами)

$$x_i \geq t_i^h, i \in I^h. \quad (4)$$

(Начала изготовления изделий ограничено заданными начальными сроками)

$$x_{i'} + t_{i'} \leq x_i, i': (i', i) \in A_l, i \in V_l, l \in K. \quad (5)$$

(Если операция  $i'$  предшествует операции  $i$ , то время начала выполнения операции  $i$  может наступить не раньше, чем завершит свое выполнение операция  $i'$ )

$$|\{i | r_i = j, x_i \leq t \leq x_i + t_i\}| \leq 1, t \in T, j \in J. \quad (6)$$

(Для каждой операции используемый для ее выполнения ресурс не может быть использован, пока эта операция выполняется)

$$\sum_{i \in I} z_{ijt} \leq W_{jt}, i \in I. \quad (7)$$

(Ограничения на потребление операциями необходимых для выполнения ресурсов)

### 3. Постановка задач

#### 3.1. Прямая задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий

Рассмотрим критерий:

$$F(X) = \sum_{l=1}^k p_l \max \left( 0, \max_{i \in V_l} (x_i + t_i - t_i^d) \right). \quad (8)$$

(Суммарный штраф, связанный с нарушениями заданных директивных сроков по изделиям)

Задача 1. Найти такое допустимое решение системы ограничений (1)-(7), для которого принимает минимальное значение критерий (8). Поставленная задача 1 относится к классу NP-трудных задач, т.к. к ней за полиномиальное время сводится известная классическая задача о камнях [18].

В качестве алгоритма решения поставленной задачи используется разработанный авторами фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью.

#### 3.2. Обратная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей

Задача 2 решается после решения задачи 1 при ее известном решении  $X_0$ .

Рассмотрим дополнительное ограничение математической модели:

$$F(X) \leq F(X_0). \quad (9)$$

(Значение функционала на оптимальном решении задачи 2 не должно превышать оптимум решения задачи 1)

В качестве критерия для задачи 2 рассмотрим функционал:

$$F(X) = \sum_{i \in (I^p \cup I^h)} x_i, \quad (10)$$

определяющий суммарное время начала выполнения всех начальных операций и операций, связанных с обеспеченностью их ресурсами.

Задача 2. Найти такое допустимое решение системы ограничений (1)-(7), (9), для которого принимает максимальное значение критерий (10).

Предлагаемый фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью позволяет решать поставленные задачи.

### 4. Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью

В основе фронтального алгоритма с рангами и обратной связью лежит классический фронтальный алгоритм [8-10].

#### 4.1. Классический фронтальный алгоритм

Классический фронтальный алгоритм к определенному такту времени формирует множество операций (фронт операций), любая из которых может начать выполняться, начиная с этого такта, т.е. все ей предшествующие операции уже выполнены и ресурсов для ее выполнения достаточно. Затем на множестве этих операций задается линейный порядок, преобразующий фронт операций – множество операций, в вектор операций. Компоненты вектора определяют порядок возможного включения очередной операции в строящееся расписание.

Существуют разные схемы упорядочения операций из фронта. В основном они формируют для каждой операции из фронта некоторые коэффициенты (ранги), которые и определяют процедуру упорядочения. Схема работы классического фронтального алгоритма следующая. Рассматривается фронт операций в определенный такт планирования. На множестве операций фронта задается линейный порядок, преобразующий фронт операций в вектор операций. Берется операция, соответствующая первой компоненте вектора, и включается в строящееся расписание. Так как классический фронтальный алгоритм не обладает обратной связью, включенная в строящееся расписание операция уже не может быть заменена на другую операцию. Ресурсы, которые должна использовать включенная в расписание операция, исключаются из рассмотрения, и осуществляется переход к операции, соответствующей следующей компоненте вектора. Проверяется, достаточно ли для ее выполнения ресурсов. Если да, то операция включается в расписание, а используемые ею ресурсы исключаются из рассмотрения. Если ресурсов для выполнения очередной операции недостаточно, осуществляется переход к следующей операции. Процедура повторяется, пока не будут просмотрены все операции из фронта операций. Затем рассматривается очередной такт планирования, для которого формируется фронт операций, и процедура включения операций в строящееся расписание повторяется. Простота в реализации, линейная вычислительная сложность и построение в результате работы алгоритма допустимого расписания, являются достоинствами канонического фронтального алгоритма. Однако отсутствие обратной связи, очевидно, не может гарантировать для задач большой вычислительной сложности, которыми являются задачи эффективного распределения производственных ресурсов, получение решения высокого качества. Для улучшения качества работы классического фронтального алгоритма используется его модификация, «фронтальный алгоритм с рангами и обратными связями» [15, 16].

#### 4.2. Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью

Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью основан на вычислительной схеме, включающей в себя схему классического фронтального алгоритма, схему пересчета рангов операций и схему переупорядочивания операций в зависимости от новых рангов. Построенное каноническим фронтальным алгоритмом расписание анализируется, определяются те операции, которые влияют на нарушение директивных сроков, им присваиваются новые ранги, влияющие на упорядочение операций из фронта операций. Заново применяется классический фронтальный алгоритм, и заново преобразуются ранги у определенных операций. Работа алгоритма прекращается либо по заданному числу шагов работы классического фронтального алгоритма, или в случае, если очередное полученное решение не улучшило показатели предыдущего решения.

Для решения задачи 1 используется фронтальный алгоритм с рангами. Его использование к решению задачи 2 происходит после преобразования задачи 2 к виду задачи 1 следующим образом:

- директивные сроки меняются местами с начальными сроками,
- преобразуются календари, связанные с обеспеченностью системы ресурсами и определяющие периоды, когда возможно выполнение операций,
- к преобразованной задаче 2 применяется фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью,
- полученное решение преобразуется с учетом предыдущих изменений.

### 5. Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент проводился на иллюстративном примере, приближенном к реальному объекту с параметрами, представленными в табл. 1.

*Таблица 1.*  
Характеристики примера

*Table 1.*  
Example parameters

Параметр	Значение
Количество операций	300 000
Количество изделий	30
Общее число ресурсов	800

На основании описанной стратегии сначала решалась прямая задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий. Результаты решения представлены в табл. 2.

*Таблица 2.*  
Результаты решения

*Table 2.*  
Solution results

Изделия №	Исходное решение прямой задачи 1	
	Максимальный размер нарушений директивных сроков (такты)	
1	167	
2	358	
3	320	
4	616	
5	322	
6	384	
7	579	
8	492	
9	606	
10	562	
11	1379	
12	850	
13	835	
14	826	
15	831	
16	1159	
17	682	
18	1245	
19	1245	
20	631	
21	1333	
22	1406	
23	1511	
24	937	
25	1734	
26	1110	
27	1270	
28	749	
29	663	
30	1831	

Затем решалась обратная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей.

В табл. 3 приведены различия в результатах решения задачи 1 и задачи 2 по временам межоперационного пролеживания. При этом при решении задачи 2 условия (9), гарантирующие неповышение величины штрафа, соответствующего оптимальному решению задачи 1, полностью выполнены.

*Таблица 3.*  
**Различия в результатах решения**  
*Table 3.*  
**Differences in solution results**

<b>Изделия, для которых заданы операции с признаками минимизации времен пролеживания</b>	<b>Решение задачи 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий</b>	<b>Решение задачи 2 минимизации времен межоперационного пролеживания, без деградации критерия по директивным срокам</b>
<b>№</b>	<b>Пролеживание изделий (такты)</b>	<b>Пролеживание изделий (такты)</b>
1	299	256
2	272	162
3	221	221
4	1	1
5	504	504
6	543	543
7	788	394
8	1659	829
9	534	534
Всего	4821	3444

Вывод: при решении задачи 2 контролируется основной критерий оптимизации (минимизация нарушения директивных сроков), гарантируя отсутствие деградации данного критерия при минимизации незавершенного производства. При этом суммарное время пролеживания контролируемых изделий сократилось на 28.5 %.

### Заключение

Рассмотрена проблема эффективного распределения производственных ресурсов при планировании процесса изготовления изделий для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Построена математическая модель, в рамках которой ставятся две оптимизационные задачи по критерию минимизации отклонений от заданных директивных сроков и минимизации межоперационного пролеживания деталей. Показано, как с помощью специальных преобразований обе задачи становятся «подобными», т.е. для решения любой из них можно применить тот же самый алгоритм. Такой алгоритм – фронтальный с рангами и обратной связью – разработан и программно реализован. На иллюстративном примере, приближенном к реальному объекту, показаны результаты проведенного вычислительного эксперимента.

### Библиографический список

1. **Гладков, Л.А.** Гибридная модель решения задач оперативного производственного планирования / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова, С.А. Громов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 4(198). – С. 99-110.
2. **Шкурба, В.В.** Календарное планирование. Конструктивная оптимизация. Индустрия праксеотехники // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 10. – С. 122-132.

3. **Гераськин, М.И.** Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям / М.И. Гераськин, В.В. Егорова // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 58. – С. 179-211.
4. **Грачев, С.П.** Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилиев, В.Б. Ларюхин [и др.] // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 11. – С. 30-67.
5. **Сотсков, Ю.Н.** Область оптимальности перестановки обслуживания на одном приборе требований с неопределенными длительностями // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 60-90.
6. **Кибзун, А.И.** Модель целочисленного линейного программирования как математическое обеспечение системы оптимального планирования потокового производства на этапе оперативного графирования / А.И. Кибзун, В.А. Рассказова // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 5. – С. 113-132.
7. **Куприянов, Б.В.** Оценка и оптимизация производительности рекурсивного конвейера // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 6-25.
8. **Afraimovich, L.** Control Activities Planning Problem. / L. Afraimovich, M. Prilutskii, V. Vlasov // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2021. – Т. 729. LNEE. – С. 341-350.
9. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов, О.В. Кривошеев // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 9. – С. 650-657.
10. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 3(77). – С. 46-51.
11. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производств / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 4 (127). – С. 36-43.
12. **Кумагина, Е.А.** Задачи распределения разнородных ресурсов в сетевых канонических структурах / Е.А. Кумагина, М.Х. Прилуцкий // Известия ТРТУ. – 2001. – № 4(22). – С. 194-200.
13. **Афраймович, Л.Г.** Система производственного планирования Smart-ресурс / Л.Г. Афраймович, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин // VIII Молодежная конференция по управлению проектами: сборник тезисов докладов, Нижний Новгород, 17 ноября 2023 года. – Н. Новгород: ООО «Литера», 2023. С. 7.
14. **Афраймович, Л.Г.** Производственное планирование в условиях неполноты данных / Л.Г. Афраймович, В.Е. Костюков, М.С. Куликов [и др.] // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17-20 июня 2024 года. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1829-1834.
15. **Прилуцкий, М.Х.** Управляемый фронтальный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2008. – № 6. – С. 152-155.
16. **Куликов, М.С.** Ранговый итерационный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых системах // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 4 (46). С. 37-43.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611198 РФ. Программный модуль объемно-календарного планирования: заявл. 13.11.2024; опубли. 16.01.2025 / М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин, Л.Г. Афраймович [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
18. **Гэри, М.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон; Пер. с англ. Е.В. Левнера, М.А. Фрумкина. – М.: Мир, 1982. – 416 с.

### References

1. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A. Gibrindnaja model' reshenija zadach operativnogo proizvodstvennogo planirovanija [Hybrid model for operational production planning tasks]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki [News of the Southern Federal University. Technical Sciences]. 2018; (4(198)): 99-110 (in Russian).
2. Shkurba V.V. Kalendarnoe planirovanie. Konstruktivnaja optimizacija. Industrija prakseotehniki [Calendar planning. Constructive optimization. The industry of praxeotechnology]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]. 2010; (10): 122-132 (in Russian).

3. Geras'kin M.I., Egorova V.V. Optimal'nye mekhanizmy planirovaniya pozakaznogo proizvodstva po finansovym i vremennym kriterijam [Optimal planning mechanisms for job-shop production based on financial and time criteria]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Large Systems Control: Proceedings]. 2015; (58): 179-211 (in Russian).
4. Grachev S.P., Zhilyaev A.A., Lyaryukhin V.B., et al. Metody i sredstva postroeniya intellektual'nyh sistem dlja reshenija slozhnyh zadach adaptivnogo upravlenija resursami v real'nom vremeni [Methods and tools for building intelligent systems to solve complex problems of adaptive real-time resource management]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2021; (11): 30-67 (in Russian).
5. Sotskov Y.N. Oblast' optimal'nosti perestankovki obsluzhivaniya na odnom pribore trebovanij s neopredelennymi dlitel'nostjami [Optimality region of permutation for servicing jobs with uncertain durations on a single machine]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2020; (5): 60-90 (in Russian).
6. Kibzun A.I., Rasskazova V.A. Model' celochislenno-go linejnogo programmirovaniya kak matematicheskoe obespechenie sistemy optimal'nogo planirovaniya potokovogo proizvodstva na jetape operativnogo grafikovanija [An integer linear programming model as a mathematical framework for the optimal flow-shop production planning system at the stage of operational scheduling]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2023; (5):113-132 (in Russian).
7. Kupriyanov B.V. Ocenka i optimizacija proizvoditel'nosti rekursivnogo konvejera [Performance evaluation and optimization of a recursive pipeline]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2020; (5): 6-25 (in Russian).
8. Afraimovich L., Prilutskii M., Vlasov V. Control Activities Planning Problem. *Lect Notes Electr Eng*. 2021; 729: 341-50.
9. Prilutskii M.Kh., Vlasov V.S., Krivosheev O.V. Zadachi optimal'nogo planirovaniya kak zadachi raspredelenija resursov v setevykh kanonicheskikh strukturah [Optimal planning problems as resource allocation problems in network canonical structures]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2017;23(9):650-700 (in Russian).
10. Prilutskii M.Kh., Netronin I.V. Zadachi kalendarnogo planirovaniya dlja predpriyatij s edinichnym i melkoseriinyim karakterom proizvodstva [Scheduling problems for enterprises with single-unit and small-batch production characteristics]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies]. 2019; (3(77)):46-51 (in Russian).
11. Prilutskii M.Kh., Netronin I.V. Zadachi ob"emno-kalendarnogo planirovaniya dlja predpriyatij s edinichnym i melkoseriinyim karakterom proizvodstv [Capacity scheduling problems for enterprises with single-unit and small-batch production characteristics]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2019; (4(127)):36-43 (in Russian).
12. Kumagina E.A., Prilutskii M.Kh. Zadachi raspredelenija raznorodnyh resursov v setevykh kanonicheskikh strukturah [Heterogeneous resource allocation problems in network canonical structures]. *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TRTU]. 2001;(4(22)):194-200 (in Russian).
13. Afraimovich L.G., Kulikov M.S., Prilutskii M.Kh., Starostin N.V. Sistema proizvodstvennogo planirovaniya Smart-resurs [Smart-resource production planning system]. In: VIII Molodezhnaya konferentsiya po upravleniyu proektami: sbornik tezisov dokladov, Nizhnii Novgorod, 17 noyabrya 2023 goda [VIII Youth Conference on Project Management: Abstracts, Nizhny Novgorod, November 17, 2023]. N. Novgorod: OOO «Litera»; 2023. p. 7 (in Russian).
14. Afraimovich L.G., Kostyukov V.E., Kulikov M.S., et al. Proizvodstvennoe planirovanie v usloviyah nepolnoty dannyh [Production planning under conditions of data incompleteness]. In: XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov, Moskva, 17-20 iyunya 2024 goda [XIV All-Russian Conference on Control Problems: Proceedings, Moscow, June 17-20, 2024]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN; 2024. p. 1829-1834 (in Russian).
15. Prilutskii M.Kh., Kumagina E.A. Upravlyaemyi frontal'nyi algoritm resheniya zadachi raspredeleniya resursov v setevykh kanonicheskikh strukturah [Controlled frontal algorithm for solving the resource allocation problem in network canonical structures]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Lobachevsky University of Nizhny Novgorod]. 2008;(6):152-155 (in Russian).
16. Kulikov M.S. Rangovyi iteratsionnyi algoritm resheniya zadachi raspredeleniya resursov v setevykh sistemakh [Rank iterative algorithm for solving the resource allocation problem in network systems].

Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control Systems and Information Technologies]. 2011; 4(46): 37-43 (in Russian).

17. Certificate of state registration of the computer program No. 2025611198 Russian Federation. Program module for capacity scheduling: stated 13.11.2024: published 16.01.2025 / M.Kh. Prilutskii, N.V. Starostin, L.G. Afraimovich, et al.; applicant – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod» (in Russian).
18. Garey M.R., Johnson D.S. Computability and computational complexity: machines and difficult tasks / Translation from English by E.V. Levner, M.A. Frumkin. Moscow: Mir; 1982. 416 p. (In Russian).

*Дата поступления  
в редакцию: 14.11.2025*

*Дата принятия  
к публикации: 02.02.2026*