

DOI: 10.18721/JE.13605  
УДК 658.512

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Соловейчик К.А.<sup>1</sup>, Лавров А.С.<sup>2</sup>, Никифорова А.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Комитет по промышленной политике, инновациям и торговле Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> ОАО «Ленполиграфмаш», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>3</sup> ООО «Каскад технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена решению задачи подготовки данных для оперативного планирования операций термообработки на примере предприятий промышленности Санкт-Петербурга. Решение задачи планирования операций термообработки и, соответственно, подготовки данных для этого актуально, поскольку в редких случаях на предприятиях РФ применяется оперативное планирование. Если оно и применяется, то только для составления планового графика выполнения работ, для реализации которого требуется перестройка сложившейся организации производственного процесса. Зачастую планирование осуществляется в ручном режиме с помощью программ Microsoft Project или Microsoft Excel. Представленная в работе математическая модель имеет ряд допущений для уменьшения вычислительной сложности рассматриваемой задачи. Целью исследования является разработка модели и алгоритма оперативного-календарного планирования производственного процесса. Для решения поставленной задачи предложен алгоритм, который позволяет сформировать заказы таким образом, чтобы выполнялись необходимые ограничения и условия для их одновременной обработки. Апробация предложенного алгоритма производилась на данных, приближенных к реальным, в информационной системе 1С:MES «Оперативное управление производством» (далее 1С:MES), что позволило протестировать разработанный алгоритм на корректность и выполнение указанных ограничений. Разработанные математическая модель и алгоритм подготовки данных для планирования внедрены в 1С:MES и используются на одном из предприятий тяжелого машиностроения Санкт-Петербурга. С помощью полученного алгоритма на предприятии удалось повысить эффективность использования имеющегося производственного оборудования, в частности, термических печей. Информация о группах заготовок для выполнения операций по термообработке используется для планирования загрузки другого оборудования в цехах. Модель и алгоритм могут быть применены на других предприятиях, где используются термические печи и есть очередь из заготовок на обработку в печах. Это позволит снизить пролеживание заготовок и повысить эффективность использования складских или цеховых помещений. Направлениями дальнейшего исследования может стать изучение применимости разработанных инструментов для других технологических операций на предприятии и встраивание разработанного алгоритма в общую систему оперативно-календарного планирования производства.

**Ключевые слова:** термообработка, математическая модель, планирование производства, критерии формирования заготовок, свойства материалов

**Ссылка при цитировании:** Соловейчик К.А., Лавров А.С., Никифорова А.М. Математическая модель подготовки данных для оперативного планирования на предприятиях тяжелого машиностроения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 6. С. 55–65. DOI: 10.18721/JE.13605

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## MATHEMATICAL MODEL OF DATA PREPARATION FOR OPERATIONAL PLANNING IN HEAVY ENGINEERING ENTERPRISES

K.S. Soloveychik<sup>1</sup>, A.S. Lavrov<sup>2</sup>, A.M. Nikiforova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Committee for industrial policy, innovation and trade of St. Petersburg,  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> JSC "Lenpoligrafmash",  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>3</sup> Cascade Technologies LLC,  
St. Petersburg, Russian Federation

This article is devoted to solving the problem of preparing data for the operational planning of heat treatment operations using the example of industrial enterprises in St. Petersburg. Solving the problem of planning heat treatment operations and, accordingly, preparing data for this, is relevant, since in rare cases, operational planning is used at enterprises of the Russian Federation. But even if it is employed, it is only used for drawing up a planned schedule of work, for the implementation of which it is necessary to restructure the existing organization of the production process. Planning is often done “manually” using Microsoft Project or Microsoft Excel. The mathematical model presented in the work has a number of assumptions to reduce the computational complexity of the problem under consideration. The aim of the study is to develop a model and an algorithm for operational scheduling of the production process. To solve the problem, an algorithm is proposed that allows to form orders in such a way that the necessary restrictions and conditions for their simultaneous processing are fulfilled. The proposed algorithm was tested on realistic data in the 1C: MES “Operational production management” information system (hereinafter 1C: MES), which made it possible to test the developed algorithm for the correctness and implementation of the specified restrictions. The developed mathematical model and algorithm for preparing data for planning are implemented in 1C: MES and are used at one of the heavy engineering enterprises in St. Petersburg. With the help of the obtained algorithm, the enterprise managed to increase the efficiency of the existing production equipment, in particular, thermal furnaces. Also, the information on groups of blanks for performing heat treatment operations is used to plan the loading of other equipment in the workshops. The developed model and algorithm can be used at other enterprises with heat-treatment furnaces and queues of blanks for processing in furnaces. This will reduce the storage of blanks and increase the efficiency of the use of warehouse or workshop premises. The directions of further research can be the study of the applicability of the developed tools for other technological operations at the enterprise and the integration of the developed algorithm into the general system of operational scheduling of production.

**Keywords:** heat treatment, math model, production planning, criteria for the formation of load, material properties

**Citation:** K.S. Soloveychik, A.S. Lavrov, A.M. Nikiforova, Mathematical model of data preparation for operational planning in heavy engineering enterprises, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 13 (6) (2020) 55–65. DOI: 10.18721/JE.13605

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

В настоящее время наблюдается тенденция повсеместного использования на машиностроительных предприятиях информационных технологий, а также переход к автоматизированным системам управления производством, основанным на данных [1–4]. Продукцией рассматриваемых машиностроительных предприятий являются полуфабрикаты из сталей со специальными свойствами. Основным методом придания металлу необходимых свойств является термическая и химико-термическая обработка. Функционирование производства определяется в том числе решениями, принимаемыми на этапе оперативно-календарного планирования. Наряду с повышением требований к принимаемым решениям, все более жесткими становятся требования

к сокращению сроков их принятия, повышению оперативности и гибкости управления [5–8]. Предприятия выполняют как коммерческие заказы на изготовление продукции, так и государственные оборонные заказы. В обоих случаях важно выполнить заказ в согласованный с заказчиком срок [9].

Одной из главных целей большинства предприятий является получение прибыли и максимально возможное увеличение ее объема. При повышении прибыли важно не ухудшить качество продукции, так как в таком случае можно потерять внушительную часть потребителей, что приведет к снижению прибыли – диаметрально противоположному результату. В данной работе рассматривается термическая обработка металла, а в рамках термической обработки изделий можно снизить себестоимость продукции путем группировки изделий при термообработке. На текущий момент на подавляющем большинстве машиностроительных предприятий наблюдается ручное планирование, основанное на знаниях и опыте сотрудников [10]. Существующий подход замедляет переход к «умным» системам управления, основанных на данных, которые являются более гибкими и надежными системами планирования и управления производством. [11].

Так как в результате работы алгоритма получаются данные, которые можно использовать при планировании производства, для его апробации и внедрения была выбрана система 1С:MES «Оперативное управление производством». В задачи данной системы входит построение оперативного плана производства и управление им.

**Целью исследования** является разработка модели и алгоритма оперативного-календарного планирования производственного процесса.

**Объектом исследования** являются участки термообработки деталей предприятий тяжелого машиностроения, **предметом** – модели и инструментальные средства составления оперативных планов их работы.

Исследование проведено на базе ОАО «Ленполиграфмаш»<sup>1</sup>.

В нашей стране и за рубежом накоплен достаточный арсенал экономико-математических моделей и методов оперативного планирования в повторяющемся производстве, но эта проблемная область остается до сих пор недостаточно изученной [12–16]. Вместе с тем имеется ряд проблем оперативно-производственного планирования с использованием информационных технологий применительно к повторяющемуся производству; эти проблемы требуют своего решения и научного обоснования [17, 18]. В связи с этим актуальным является развитие и разработка инструментов оперативно-производственного планирования, в большей степени отражающего специфику повторяющихся процессов и в полной мере использующего потенциал информационных технологий. Это обусловило выбор темы и направления исследования.

## Методы

Опираясь на аналитические данные машиностроительных предприятий, можно сделать вывод, что предприятия, которые используют садки для выполнения термообрабатываемых операций, формирует эти садки непосредственно перед посадкой деталей в печи, а не на основе данных планового отдела. Чтобы по возможности минимизировать отличия между планируемыми и фактически выполняемыми операциями, предлагается решить следующую задачу: в информационной системе имеются данные о заготовках с их техническими параметрами и технологическими процессами. Необходимо объединить заготовки в группы так, чтобы с они могли в одно время пройти операцию по термической обработке на одном оборудовании. Задача сводится к удовлетворению ограничений. Оперативное планирование осуществляется в информационной системе 1С:MES «Оперативное управление производством».

*Математическая модель подготовки данных для выполнения операций по термообработке.*

В модели приняты следующие обозначения:

<sup>1</sup> Никифорова А.М. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы по заказу ОАО «Ленполиграфмаш». СПб, 2020. 90 с.

$z$  — индекс для заготовок;  $p$  — индекс для групп заготовок с одинаковыми параметрами «Технические условия», «Тип детали», «Марка материала»;  $s$  — индекс для групп заготовок внутри групп  $p$  со схожим сечением;  $k$  — индекс для печей.

В модели используются следующие переменные:

$G_k$  — грузоподъемность  $k$ -й печи;  $N_{zp}$  — вес  $z$ -й заготовки из группы  $p$ ;  $C_{zp}$  — сечение  $z$ -й заготовки из группы  $p$ .

Целевая функция (1) определяет принцип формирования садок из заготовок — суммарный вес заготовок в садке до термообработки не должен превышать грузоподъемность печи, в которой они будут обрабатываться.

$$F = G_k - \sum_{z=1}^{z_i} N_{zs} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Выражение (2) определяет способ сортировки заготовок в рамках каждой группы  $p$  для подготовки их к формированию в подгруппы  $s$ . Заготовки должны быть отсортированы таким образом, чтобы в рамках каждой группы  $p$  первой в списке была заготовка с наименьшим сечением, а последней — с наибольшим.

$$C_{z1p} \leq C_{z2p} \leq \dots \leq C_{zip}. \quad (2)$$

Ограничение (3) определяет условие формирования заготовок из групп  $p$  в группы  $s$ . Чтобы быть объединенными в одну садку, у заготовок сечение не должно отличаться более чем на 25%. Для удовлетворения этому условию сначала находим 25% от сечения первой заготовки из группы  $p$ , затем сравниваем с полученным значением разницу между сечением текущей заготовки и первой из группы.

$$C_{zip} - C_{z1p} \leq 0,25 * C_{z1p}. \quad (3)$$

Для выполнения ограничения (3) должно выполняться условие (4), т.е. ограничение (3) для рассматриваемой группы заготовок считается выполненным тогда, когда найдена заготовка, сечение которой отличается от первой из группы больше чем на 25% или если рассмотрены все заготовки из группы и превышений не найдено.

$$C_{zip} - C_{z1p} > 0,25 * C_{z1p}. \quad (4)$$

Выражение (5) определяет способ сортировки заготовок в рамках каждой подгруппы  $s$  для подготовки их к формированию в садки. Заготовки должны быть отсортированы таким образом, чтобы в рамках каждой группы  $s$  первой в списке была заготовка с наименьшим веса до термообработки, а последней — с наибольшим.

$$N_{z1s} \leq N_{z2s} \leq \dots \leq N_{zis}. \quad (5)$$

С целью снижения количества вычислений, прежде чем проверять каждую заготовку на вместимость в печь, следует проверить всю сформированную группу  $s$  на вместимость в печь. Для этого суммируются значения по весу до термообработки всех заготовок из группы  $s$ , затем сравнивается со значением грузоподъемности  $k$ -й печи. Выражение (6) описывает эту проверку.

$$\sum_{z=1}^{z_i} N_{zs} \leq G_k. \quad (6)$$

Если (6) выполняется, то все заготовки из группы  $s$  формируют одну садку. Если (6) не выполняется, то необходимо проверить на вместимость в  $k$ -ю печь первую, самую легкую, заготовку из отсортированной группы  $s$  с помощью выражения (7). Происходит проверка: можно ли вместить в рассматриваемую печь самую легкую заготовку из группы. Если нельзя, то остальные заготовки из группы в печь также нельзя разместить. Данный шаг позволит существенно уменьшить количество вычислений при неправильно заведенных в систему исходных данных.

$$N_{z1s} \leq G_k. \quad (7)$$

Если (7) не выполняется, то необходимо исключить все заготовки из группы  $s$  из рассмотрения. При выполнении (7) следует выполнить действия из выражения (8). Если самая легкая заготовка в печь помещается, то необходимо последовательно добавлять в садку легкие заготовки до тех пор, пока не будет найдено максимальное количество заготовок, по суммарному весу проходящих в печь.

$$N_{z1s} + N_{z(i+1)s} \leq G_k. \quad (8)$$

Если (8) выполняется, то необходимо прибавить вес следующей заготовки из группы  $s$  к результату, полученному в выражении (8). Если (8) не выполняется, то следует сформировать садку из группы заготовок, вес которых суммировался в (8), исключая последнюю добавленную заготовку.

### Результаты и обсуждение

Решение поставленных задач осуществлялось с применением принципов системного подхода, теории множеств, методов экономико-математического моделирования, в т. ч. и имитационного моделирования, статистического и логического анализа и эвристических алгоритмов.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм (см. рис. 1).

В результате образуется перечень документов «Садка» с подходящими заготовками в рамках каждого документа. Возможно появление отдельных деталей, которые не были сформированы ни в одну садку по причине того, что они не помещаются в печь.

Если в результате выполнения алгоритма выявились детали, которые не были сформированы ни в одну группу, то необходимо определить причины и принять решения по изменению условий изготовления.

Для апробации алгоритма в 1С:MES были введены исходные данные. С целью сохранения информации, являющейся коммерческой тайной предприятия, в табл. 1 представлена переработанная информация о номенклатуре, для которой необходимо сформировать садки, и ее характеристиках.

Для выполнения процедур алгоритма в информационную систему была внесена информация о грузоподъемности термических печей – 4 тонны. На основе исходных данных был апробирован разработанный алгоритм. Результаты представлены в табл. 2.

На основе полученных групп можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм при правильном введении в информационную систему исходных данных работает корректно и может формировать садки для выполнения операций по термической обработке.

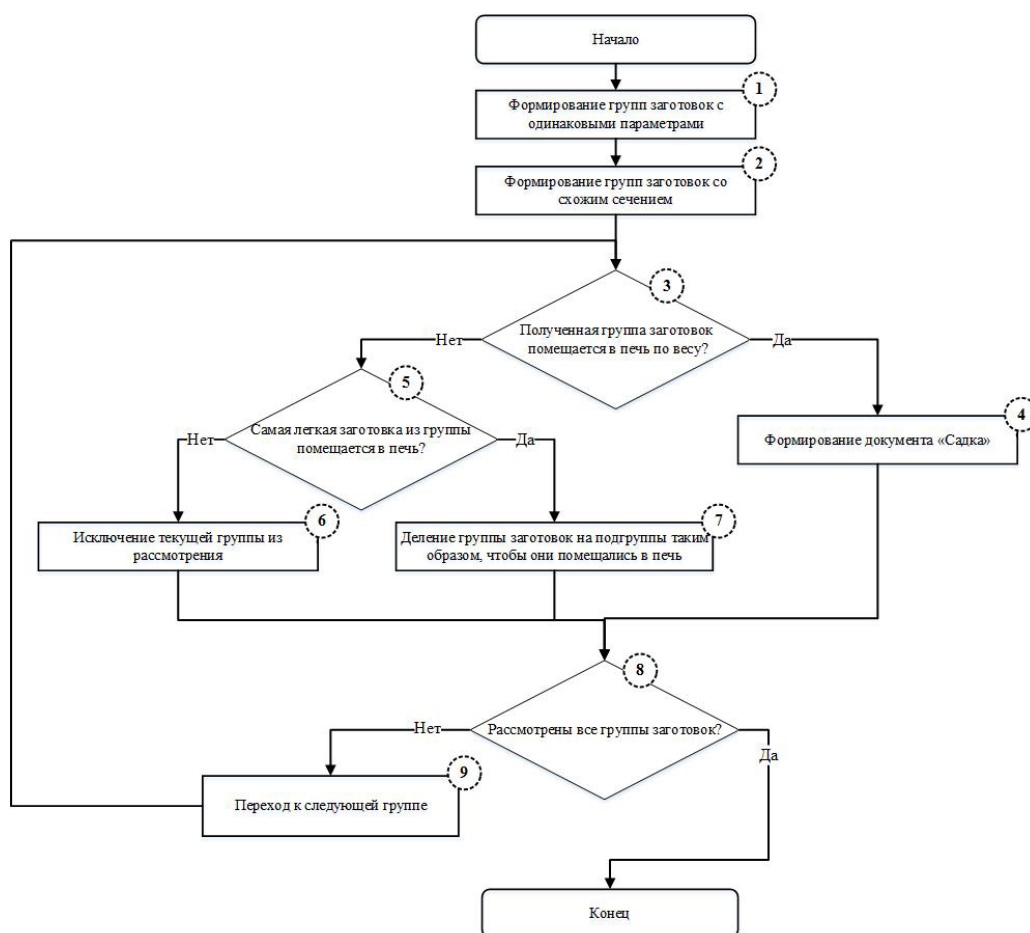


Рис. 1. Схема алгоритма формирования садок для термообработки  
 Fig. 1. Cage formation algorithm for heat treatment

**Таблица 1. Характеристики номенклатуры, формируемой в садки**  
**Table 1. Parameters of products formed in the cages**

№ детали	Тип детали	Технические условия	Марка материала	Сечение, мм	Вес перед посадкой в печь, т
1	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	400	1,52
2	Валок	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	550	0,75
3	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	300	0,5
4	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1000	1,8
5	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	750	1,1
6	Валок	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	690	0,9
7	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1100	2,35
8	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	350	0,6
9	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	450	1,7
10	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	950	1,25
11	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22Н6Т	400	0,75
12	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1300	2,2
13	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	430	0,98

Окончание таблицы

14	Ротор	ГОСТ 25054-81	30X13	910	1,35
15	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	410	0,8
16	Валок	ГОСТ 25054-81	30X13	700	1,3
17	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	510	1,75
18	Валок	ГОСТ 25054-81	30X13	650	1,5
19	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	80	1,4
20	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1200	1,85

**Таблица 2. Сформированные садки в результате выполнения алгоритма**  
**Table 2. Formed cages**

№ детали	Тип детали	Технические условия	Марка материала	Сечение, мм	Вес перед посадкой в печь, т	Вес садки, т	№ садки
13	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	430	0,98	2,5	1
1	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	400	1,52		
9	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	450	1,7	3,45	2
17	Вал гребной	ГОСТ 25054-81	30X13	510	1,75		
2	Валок	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	550	0,75	2,25	3
18	Валок	ГОСТ 25054-81	30X13	650	1,5		
6	Валок	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	690	0,9	2,2	4
16	Валок	ГОСТ 25054-81	30X13	700	1,3		
4	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1000	1,8	3,65	5
20	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1200	1,85		
7	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1100	2,35	2,35	6
12	Обечайка	ГОСТ 25054-81	30X13	1300	2,2	2,2	7
5	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	750	1,1	3,75	8
10	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	950	1,25		
19	Ротор	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	80	1,4		
14	Ротор	ГОСТ 25054-81	30X13	910	1,35	1,35	9
3	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	300	0,5	1,1	10
8	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	350	0,6		
11	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	400	0,75	1,55	11
15	Шайба	ГОСТ 25054-81	08X22H6T	410	0,8		

### Заключение

Поскольку рассматриваемые предприятия изготавливают продукцию из сталей со специальными свойствами, а их получение реализуется с помощью проведения операций по термической обработке заготовок, то следует рассмотреть условия, связанные с проведением таких операций.

Для получения заданных свойств материалов важны следующие параметры:

- печь для проведения термообработки;
- режим термообработки (длительность и скорость нагрева, способ выдержки и охлаждения заготовок);
- материал заготовки и его качество;
- конфигурация и размеры заготовок.

Из перечисленных параметров можно сделать вывод – для проведения термической обработки нельзя объединять любые заготовки из тех, что есть в цехе на данный момент.

Для контроля заготовок, которые можно обрабатывать вместе, на предприятиях машиностроения используется термин «садка».

Формирование групп заготовок для проведения термической обработки позволяет сократить время изготовления продукции, снизить себестоимость продукции, увеличить срок эксплуатации оборудования, уменьшив его износ. Под оборудованием в данном случае понимаются термические печи. Также формирование садок позволяет снизить затраты на общецеховые расходы, в частности, на электричество, требуемое для нагрева печи, поддержания определенной температуры внутри нее. Так как повторно использовать печь после выполнения операции по термообработке можно только после полного ее остывания и последующего нагрева до определенной температуры (на рассматриваемых предприятиях это время исчисляется десятками часов), то экономическая выгода от формирования садок становится более очевидной.

Задача любого предприятия – поставить продукцию в сроки, обозначенные в договоре [14]. Учитывая, что в рыночных реалиях конъюнктура быстро меняется, на предприятии важно иметь достоверный план производства и возможность его оперативной корректировки.

В статье рассмотрена математическая модель и алгоритм процесса формирования групп заготовок для их последующей термической обработки в садках. Разработанный алгоритм внедрен на одном из производственных предприятий Санкт-Петербурга и прошел успешную апробацию.

В дальнейших исследованиях математическую модель планируется дополнить параметрами, которые необходимо учитывать при формировании садок, для более корректного их формирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Левенцов В.А., Радаев А.Е., Николаевский Н.Н.** Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2017. № 1. С. 19–31. DOI: 10.18721/JE.10102
2. **Babkin A.V., Kuzmina S.N., Opleznina A.V., Kozlov A.V.** Selection of tools of automation of business processes of a manufacturing enterprise. 2019 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), 2019, pp. 226–229. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928302
3. **Куприяновский В.П., Добрынин А.П.** и др. Трансформация промышленности в цифровой экономике – экосистема и жизненный цикл // International Journal of Open Information Technologies. 2017. № 1. С. 34–49.
4. **Wang S., Wan J., Li D., Zhang C.** Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, no. 12–1, 3159805. DOI: 10.1155/2016/3159805
5. **Шнитин Ю.В., Левенцов В.А.** Экономические аспекты построения календарных графиков производства // Реформирование промышленности: проблемы и решения. Сборник докладов II Межрегиональной научно-практической конференции, Барнаул, 27–28 мая 2004. Барнаул: АлтГТУ, 2004. С. 220–224.
6. **Левенцов В.А., Шнитин Ю.В.** Имитационная модель составления календарных расписаний // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 4. С. 325–331.
7. **Коваленко К.Ю., Левенцов В.А., Шнитин Ю.В.** Динамика организационно-экономических параметров при составлении календарных расписаний работы технологических участков механического цеха // XXXV Неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. VII. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 3–4.
8. **Левенцов В.А., Шнитин Ю.В.** Двухкритериальная модель составления календарных расписаний работы рабочих мест // Экономика и менеджмент современного предприятия: проблемы и перспективы. Труды IX научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 203–211.



9. **Луць В.В.** Сроки в гражданских правоотношениях // Известия Высших учебных заведений. Правоведение. 1989. № 1. С. 37–43.
10. **Аркин П.А., Муханова Н.В., Овчар Б.А.** Решение задачи оперативно производственного планирования машиностроительного предприятия с помощью «жадного» и генетического алгоритмов // Организатор производства. 2018. № 26–2. С. 17–29. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29
11. **Ингеманссон А.Р.** Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0» в современное машиностроительное производство // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. №. 7. С. 45–48.
12. **Мауэргауз Ю.Е.** Динамическое групповое планирование для многостадийного производства // Машиностроитель. 2014. № 4. С. 13–24.
13. **Соловейчик К.А., Аркин П.А.** Методические вопросы стимулирования роста глубины передела промышленной продукции субъектами Российской Федерации // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2015. № 4. С. 25–30.
14. **Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г.** Реализация методологии оптимизационных подходов при разработке системы бизнес анализа и прогнозирования для машиностроительного предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 6. С. 57–67.
15. **Золотарев А.А., Венцов Н.Н., Агибалов О.И., Деева А.С.** Оптимизация распределительных процессов на основе аналитических методов и эвристических алгоритмов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. № 1. С. 74–82.
16. **Aho A., Hopcroft J., Ullman J.** Data structures and algorithms. Addison-Wesley publishing company, 1983. 448 p.
17. **Аркин П.А., Муханова Н.В., Овчар Б.А.** Решение задачи оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия с помощью «жадного» и генетического алгоритмов // Организатор производства. 2018. № 2. С. 17–29. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29
18. **Левенцов А.Н., Левенцов В.А., Ходырев В.В.** Организационные сопротивления изменениям в условиях цифровой трансформации промышленного предприятия // Промышленная политика в цифровой экономике: проблемы и перспективы. Труды научно-практической конференции с международным участием / Под ред. А.В. Бабкина. СПб: СПбПУ, 2017. С. 420–427.
19. **Сидорин А.Б., Ликучева Л.В., Дворянкин А.М.** Методы автоматизации составления расписания занятий. Часть 2. Эвристические методы оптимизации // Известия ВолгГТУ. 2009. № 12. С. 120–123.

## REFERENCES

1. **V.A. Leventsov, A.E. Radaev, N.N. Nikolaevskiy,** The aspects of the "Industry 4.0" concept within production process design. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 2017, no. 1, pp. 19–31. (rus). DOI: 10.18721/JE.10102
2. **A.V. Babkin, S.N. Kuzmina, A.V. Oplsnina, A.V. Kozlov,** Selection of tools of automation of business processes of a manufacturing enterprise. 2019 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), 2019, pp. 226–229. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928302
3. **V. Kupriyanovsky, S. Sinyagov,** et al., Industries transformation in the digital economy – the ecosystem and life cycle. International Journal of Open Information Technologies, 2017, no. 1, pp. 34–49. (rus)
4. **S. Wang, J. Wan, D. Li, C. Zhang,** Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, no. 12–1, 3159805. DOI: 10.1155/2016/3159805
5. **Yu.V. Shnitin, V.A. Leventsov,** Ekonomicheskiye aspekty postroyeniya kalendarnykh grafikov proizvodstva [Economic aspects of building production schedules]. Reformirovaniye promyshlennosti: problemy i resheniya [Industrial reform: Problems and solutions]. Proceedings of II Interregional scientific and practical conference. Barnaul, AltGTU, 2004, pp. 220–224. (rus)
6. **V.A. Leventsov, Yu.V. Shnitin,** Imitatsionnaya model sostavleniya kalendarnykh raspisaniy [Simulation model of calendar scheduling]. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGTU, 2006, no. 4, pp. 325–331. (rus)

7. **K.Yu. Kovalenko, V.A. Leventsov, Yu.V. Shnitin**, Dinamika organizatsionno-ekonomicheskikh parametrov pri sostavlenii kalendarnykh raspisaniy raboty tekhnologicheskikh uchastkov mekhanicheskogo tsekha [Dynamics of organizational and economic parameters in the preparation of calendar schedules for the operation of technological sections of a mechanical workshop]. XXXV Nedelya nauki SPbGPU [XXXV Science week of the SPbSPU]. Proceedings of the All-Russian scientific conference of students and postgraduates. Vol. VII. St. Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007, pp. 3–4. (rus)
8. **V.A. Leventsov, Yu.V. Shnitin**, Dvukhkriterialnaya model sostavleniya kalendarnykh raspisaniy raboty rabochikh mest [Two-criterion model for compiling calendar schedules of workplaces]. Ekonomika i menedzhment sovremennogo predpriyatiya: problemy i perspektivy [Economy and management of a modern enterprise: problems and prospects]. Proceedings of the IX scientific and practical conference. St. Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007, pp. 203–211. (rus)
9. **V.V. Luts**, Sroki v grazhdanskikh pravootnosheniyakh [Terms in civil legal relations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pravovedeniye, 1989, no. 1, pp. 37–43. (rus)
10. **P.A. Arkin, N.V. Mukhanova, B.A. Ovchar**, Solving the problem of operational-production planning of a machine-building manufacturing company with the help of greedy and genetic algorithms. Organizer of Production, 2018, no. 26–2, pp. 17–29. (rus). DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29
11. **A.R. Ingemansson**, Urgency of "industry 4.0" concept introduction in modern mechanical engineering. Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii, 2016, no. 7, pp. 45–48. (rus)
12. **Yu. Mauergauz**, Dynamic scheduling of multistage process manufacturing for make-to-order production mode. Mashinostroitel, 2014, no. 4, pp. 13–24. (rus)
13. **K.A. Soloveychik, P.A. Arkin**, Methodological issues of stimulating the growth of depth of industrial production process stages in subjects of the Russian Federation. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2015, no. 4, pp. 25–30. (rus)
14. **P.A. Arkin, K.A. Soloveychik, K.G. Arkina**, Implementation of the methodology of optimization approaches in developing the system of business analysis and forecasting for a machine-building enterprise. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2017, no. 6, pp. 57–67. (rus)
15. **A.A. Zolotarev, N.N. Ventsov, O.I. Agibalov, A.S. Deeva**, Distribution processes optimization based on analytical methods and heuristic algorithms. Journal of Science and Education of North-West Russia, 2016, no. 1, pp. 74–82. (rus)
16. **A. Aho, J. Hopcroft, J. Ullman**, Data structures and algorithms. Addison-Wesley publishing company, 1983. 448 p.
17. **P.A. Arkin, N.V. Mukhanova, B.A. Ovchar**, Solving the problem of operational-production planning of a machine-building manufacturing company with the help of greedy and genetic algorithms. Organizer of Production, 2018, no. 2, pp. 17–29. (rus). DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29
18. **A.N. Leventsov, V.A. Leventsov, V.V. Khodyrev**, Organizatsionnyye soprotivleniya izmeneniyam v usloviyakh tsifrovoy transformatsii promyshlennogo predpriyatiya [Organizational resistance to change in the context of the digital transformation of an industrial enterprise]. Babkin A.V. (Ed.). Promyshlennaya politika v tsifrovoy ekonomike: problemy i perspektivy [Industrial policy in the digital economy: Problems and prospects]. Proceedings of a scientific-practical conference with international participation. St. Petersburg, SPbPU, 2017, pp. 420–427. (rus)
19. **A.B. Sidorin, L.V. Likucheva, A.M. Dvoryankin**, Metody avtomatizatsii sostavleniya raspisaniya zanyatiy. Chast 2. Evristicheskiye metody optimizatsii [Methods for automating the scheduling of classes. Part 2. Heuristic optimization methods]. Izvestiya VolGTU, 2009, no. 12, pp. 120–123. (rus)

*Статья поступила в редакцию 18.11.2020.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**СОЛОВЕЙЧИК Кирилл Александрович**

E-mail: kirill.soloveychik@gmail.com

**SOLOVEYCHIK Kirill A.**

E-mail: kirill.soloveychik@gmail.com

**ЛАВРОВ Андрей Станиславович**

E-mail: aslavrov@list.ru

**LAVROV Andrey S.**

E-mail: aslavrov@list.ru

**НИКИФОРОВА Анастасия Михайловна**

E-mail: anastasia.nikiforova2017@yandex.ru

**NIKIFOROVA Anastasiya M.**

E-mail: anastasia.nikiforova2017@yandex.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020