

## Разработка автоматизированной системы поддержки принятия решений при технологической подготовке аддитивного производства

*И.А. Александров, А.П. Титова, М.С. Михайлов, Н.З. Иванов*

*Институт конструкторско-технологической информатики РАН, Москва*

**Аннотация:** В ходе подбора вариантов технологии, в соответствии с которыми будет осуществляться аддитивное производство, важно руководствоваться перечнем основных требований к изготавливаемым деталям, особенностями порошкового материала, а также диапазоном технических характеристик оборудования. Чтобы выработать наиболее эффективное решение, потребуется опытно-технологическая отработка технологии, чтобы определить предпочтительные технологические режимы, обеспечивающие требуемое качество, себестоимость и продолжительность изготовления. Соответственно, для подобных производств актуальна разработка модели, описывающей стадии аддитивного изготовления. В связи с этим, настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов оптимизации, планирования и управления технологией аддитивного производства на основе множества критериев выбора наиболее эффективной технологии, предполагающей оптимальную загрузку производственных установок. В предложенной модели введены показатели, характеризующие адаптацию и позволяющие аргументировать практическую выгоду применения технологий 3D-печати. Сравнение технологических маршрутов по этим показателям позволяет выбрать конкретный маршрут изготовления. Выбрав вариант изготовления, можно рассчитать наиболее эффективное размещение изделий на платформах, а также выработать подходящую очередность выполнения основных производственных операций, чтобы свести к минимуму издержки и временные затраты. Было установлено, что использование предложенной модели позволяет сократить время изготовления партии изделий примерно на 2,5%. Таким образом, предложенная модель может быть полезной на аддитивных производствах для снижения простоев установок и ускорения выпуска продукции.

**Ключевые слова:** организация производства, оценка продуктивности, перенастройка оборудования, загрузка станков, автоматизация, многономенклатурное производство.

### Введение

Сегодня многие преимущества современных технологий 3D-печати широко используются в таких отраслях, как: авиастроение, космическая индустрия, энергомашиностроение, приборостроение, словом там, где требуются детали, имеющие сложную конфигурацию [1, 2]. В настоящее время рассматриваемые технологии стали более доступными, что позволяет за достаточно короткое время организовать выпуск сложных изделий на действующих предприятиях, также удалось снизить уровень себестоимости и длительность изготовления продукции [3, 4].

Ключевой задачей функционирования любых производств, является необходимость обеспечить высокое качество выпускаемых деталей и высокую производительность при низкой себестоимости, причем добиться этого за строго установленный (проектный) период времени, принимая во внимание технологические ограничения и потенциал имеющихся производственных мощностей [5].

С некоторой долей условности, показатель экономической эффективности использования технологии 3D-печати, можно представить двумя основными компонентами: функциональным, а также производственным. Первый, в общем случае, соответствует оптимизации конструктивного исполнения продукции, что может быть достигнуто за счет уменьшения массы, упрощения конструкции и улучшения технических параметров будущего изделия [6]. Второй вариант сводится к сокращению длительности изготовления каждой детали, объема расходных материалов, включая минимизацию отходов, процента бракованных изделий и пр. Немаловажную роль так же играет прогноз возможных издержек, выполняемый на этапе планирования, о чем подробнее в работах [7, 8].

В ряде работ отмечено [9, 10], что при организации и технологической подготовке аддитивного производства важно принимать во внимание временные издержки, обусловленные непосредственно процессом выбора рассматриваемой технологии и организацией производства, формированием соответствующих платформ, а также печатных файлов. Одним из базовых направлений, в котором необходимо работать, чтобы увеличить загруженность установок 3D-печати, выступает совершенствование методики подбора конфигураций изделий, а также создание платформы, формирование расписаний производства каждого заказа и быстрое внесение корректив в существующий план [11].

---

В связи с вышесказанным, в настоящей работе рассмотрены актуальные проблемы, связанные с оптимизацией аддитивного производства на базе модели составления плана работы предприятия, учитывающей специфику производственных процессов. Планирование производственных процессов серийной 3D-печати открывает возможность существенного снижения трудоемкости и себестоимости выпуска каждого изделия. На примере составления плана типового технологического цикла, в соответствие с которым выполняется селективное лазерное плавление [12], в настоящей работе предложена структурная модель составления плана аддитивного производства.

### **Разработка модели планирования и организации аддитивного производства**

Зададимся основными терминами и понятиями, используемыми далее. Каждое из положений стратегии создания плана является основой подбора ключевых характеристик производственной технологии, а сканирование формирует модель перемещения лазера. В рамках работы с геометрической компьютерной моделью, процедура формирования \*.stl файла, включает: ориентирование изделия в пределах платформы, которая управляется и ориентируется проектом, установление месторасположения изделия в пределах платформы, принимая во внимание геометрические размеры изделия, вычисление расстояний между изделиями, расчет компонентов, отвечающих за поддерживание изделия, дробление модели на несколько слоев, что необходимо для установления количества проходов работающего лазера. Созданная структура \*.stl файла является перечнем входных параметров для модели плавления порошкового материала, учитывающей нагревание, плавление, последующее понижение температуры и формирование зерен.

Совокупностью правил, в соответствие с которыми создается план производства, также определяются основы управления изготовлением продукции. Лазерное плавление порошков с учетом установленных геометрических размеров изделия и особенностей выбранной технологии выполняется на основе детализовки и других производственных особенностей [13]. Заметим, что при увеличении процента изделий в индивидуальном и мелкосерийном производстве, необходимо тщательно организовывать стадию подготовки 3D-печати, о чем более подробно в [14].

Ключевой задачей, стоящей перед составлением плана аддитивного производства, выступает грамотный выбор технологического процесса производств серийного изделия, принимая во внимание точность его геометрических параметров. Чтобы оценить экономический эффект производства, введем показатель, характеризующий «аддитивность»:

$$K_A = \frac{1}{e^n \sum_{i=1}^n w_i |(x_i - p_i) / p_i|} \quad (1)$$

здесь,  $x_i$ ,  $p_i$ ,  $w_i$  являются атрибутами градиента изделия, а также его базовых характеристик. В данном случае рассматриваемые градиенты – это атрибуты детализации изделия и его основных характеристик.

Выбор окончательной технологии будем выстраивать на основе расчета пропорций применения различных технологических стратегий [15]. Исходя из этого, будут устанавливаться величины атрибутов альтернативных технологий. Когда градиент последних будет совпадать с градиентом основной зависимости, то основной градиент можно считать наилучшим. Вместе с тем достижение оптимальных характеристик одними атрибутами, далеко не всегда соответствует заданным величинам иных, ввиду чего задача становится многокритериальной [16]. Следовательно, на данном этапе требуется определить отклонения величин всех атрибутов от базового

градиента основной зависимости и установить показатель, отображающий адаптацию. В данном случае, величина  $D$  будет значением, описывающим отклонение атрибутов тех или иных альтернативных вариантов  $A_a$  от величины атрибутов основной зависимости  $A_g$ . Далее, – определим показатель, отображающий адаптацию с помощью соотношения:

$$K^d = \frac{1}{e^D} = \frac{1}{e^{|A^a - A^g|/A^g}} \quad (2)$$

Выражение  $A_a \neq A_g$ , будет справедливо тогда, когда характеристики градиента, описывающего альтернативную технологию  $A_a$  будут тождественны характеристикам градиента  $A_g$ .

Чтобы оптимально скомпоновать изделия на каждой платформе, стоит воспользоваться эвристическими правилами. В данном случае, основа усовершенствованной методики базируется на переборе изделий и формировании очередности печатания. Чтобы будущий производственный цикл соответствовал «наименьшим издержкам», зачастую формируют временную платформу применительно к индивидуальным особенностям имеющихся производственных установок.

Например, изделия необходимо распределять на платформы 1-й установки, согласно требованиям, предъявляемым к качеству будущего изделия. Первое изделие имеет формат «случайного образца». После этого происходит отбор изделий в соответствии с ранее запланированным перечнем. Далее переведенное на площадку «временной платформы» изделие вычеркивается. Последующие изделия должны соответствовать величинам  $SAC_{mi}$ . Затем создается основа очередной временной платформы, а новые изделия будут учитываться в ходе создания платформ очередного станка. Иными словами, изделие будет формироваться на площадках нескольких платформ, причем должна быть обеспечена его высокая точность. Чтобы

---

решить вопрос отправки изделия на площадку той или иной платформы, используют модифицированную генетическую методику, предполагающую выбор изделия  $i$  ( $1 \dots I$ ), а также себестоимость изготовления ( $CAC_{mij}$ ) вычисляемую для станка  $m$  ( $1, 2 \dots M$ ) по соотношению:

$$CAC_{mij} = \frac{(TC_m \cdot VT_m) \cdot v_i + ST_m \cdot HC}{V_m \cdot MC_i} \quad (3)$$
$$\sum_m^M \sum_j^J \sum_i^I CAC_{mij} \rightarrow \min$$

Чтобы свести к нулю длительность изготовления заказанного изделия, необходимо сформировать иерархию изделий, которые будут печататься  $m$ -й установкой.

С этой целью применительно к каждому станку формируют временную платформу. В случае, когда текущая платформа свободна, то из перечня изделий выбирается изделие, которое требуется напечатать в первую очередь. Затем берется в работу изделие с меньшей продолжительностью формовки на  $j$ -й платформе, нежели совокупная длительность изготовления  $i$ -го изделия:

$$JPT_i \leq \min_{i \in I} (d_i) \quad (4)$$
$$d_{mj} \leq \min_{i \in I} (d_i)$$

Изделия, изготовление которых превышает установленную планом длительность (иными словами, – не удовлетворяющие условиям текущих заказов), как правило, вычеркиваются из перечня изделий  $m$ -й установки и становятся частью перечня, готовящегося к формовке  $m+1$  установкой.

Длительность работы оборудования  $j$ -х платформ – это базовая стадия, которую требуется подготовить для организации полноценного производственного цикла. Анализ этой длительности необходимо проводить

одновременно с оценкой длительности формирования платформ, учитывая запаздывание  $T_j$ :

$$JPT_j = VT_m \cdot \sum_{i \in I_{mj}} v_j + HT_m \cdot \max_{i \in I_{mj}} \{h_i\} + ST_m \quad (5)$$

здесь,  $VT_m$  – длительность формирования  $m$ -х единиц из некоторого объема сырья, мин/мм<sup>3</sup>;  $HT_m$  – длительность формирования  $m$ -х изделий по высоте, мин/мм;  $ST_m$  – длительность подготовительно цикла установок  $m$ , мин. Эти показатели рассчитываются с учетом параметров каждой установки:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J T_j &\rightarrow \min \\ T_j &= \tau_j - d_j \end{aligned} \quad (6)$$

здесь, для длительности изготовления очередного образца использовано обозначение  $d_j$ , а для периода завершения изготовления  $j$ -х платформ далее используется обозначение  $JPT_{mj}$ .

Принимая во внимание специфику рассматриваемых производственных процессов, а также необходимость повышения производительности каждой установки, была сформирована двухуровневая схема создания плана подготовительного периода. Так, учитывая особенности трехмерной модели, анализируется технологичность и подбирается определенная технология, удовлетворяющая таким требованиям, как точность и качество будущих деталей, для чего оцениваются и сопоставляются атрибуты градиентов каждого альтернативного технологического процесса. Принимая во внимание весовые величины каждого атрибута, создается перечень альтернативных типов производств, начинающийся с «0» и завершающийся «1». Остановившись на более эффективном технологическом процессе применительно к каждому изделию текущего заказа, выполняется комплектация и сортировка изделий

по каждой платформе в соответствии с методиками наименьшей себестоимости и длительности изготовления продукции. Затем создается ряд платформ к установкам, конкретизируется технологический режим одновременно с формированием файла \*.stl. Внешний вид блок-схемы формирования плана и подготовительного этапа, отображается рисунком 1.

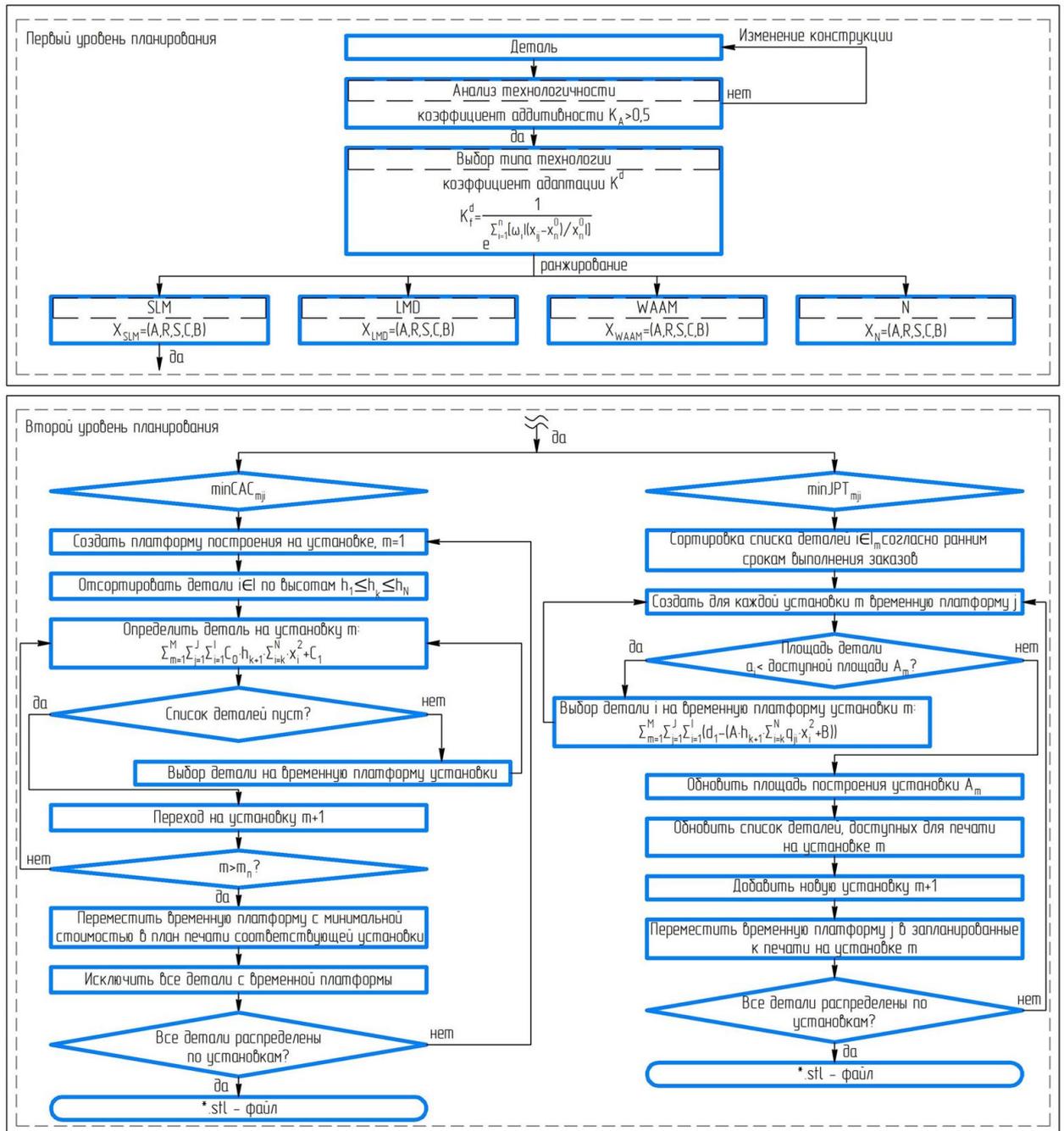


Рисунок 1. – Блок-схема модели планирования и организации аддитивного производства деталей при массовом заказе

## Заключение

Все стадии организации производства на основе предложенной модели, принимая во внимание минимальный уровень себестоимости и длительность изготовления изделия, ориентированы на снижение себестоимости и длительности изготовления изделий различной конфигурации при массовом заказе. Апробация предложенной модели показала, что длительность изготовления условного опытного изделия без применения предложенной модели равна 160 ч., что на 240 минут больше результата оптимизации, полученного при применении разработанной модели планирования.

Предложенная модель, в соответствии с которой осуществляется организация производственного процесса и формирование платформ для печати, позволяет планировать аддитивное производство, принимая во внимание: минимальную себестоимость изготовления либо минимальное запаздывание. Это оптимизирует загрузку установок, значительно сокращая простои оборудования. Использование показателя, характеризующего аддитивность наглядно представляет потенциальные возможности 3D-печати, включая параметры сырья, точность геометрии изделия, сложность установки и конкретную выбранную технологию. Кроме того, в случае высокой трудоемкости вычислений при оптимизации целесообразно использовать показатель адаптации.

Предложенная многофакторная модель, учитывающая себестоимость и длительность изготовления изделий позволяет минимизировать запаздывание исполнения каждого заказа и сократить себестоимость выпускаемой продукции на величину до 20%.

## Сведения о финансовой поддержке

*Представленные результаты получены в рамках работ по  
Дополнительному соглашению от 18.04.2024 г. № 075-03-2024-278/1 к*

---



*Соглашению от 22.01.2024 г. № 075-03-2024-278 между Минобрнауки России и ИКТИ РАН на выполнение государственного задания по созданию новой (молодежной) лаборатории, выполняющей исследования по теме: «Организация и управление гибридными многономенклатурными машиностроительными производствами».*

### Литература

1. Агафонцев А.С., Вовк Н.Н., Клевнов Ю.В., Колыванов А.Н., Корепанов А.В., Кошкин В.В., Лучкин Д.А., Минейчев М.В., Овсов А.В., Сергеев Д.В., Фомченко В.Н., Царев М.А. Эффективность использования аддитивных технологий как альтернативы традиционным субтрактивным технологиям при изготовлении сложных деталей из металла // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017. № 22-2. С. 228-231.
2. Semenov A.B., Fomina O.N., Muranov A.N., Kutsbakh A.A., Semenov B.I. The Modern Market of Blank Productions in Mechanical Engineering and the Problem of Standardization of New Materials and Technological Processes // Advanced Materials and Technologies. 2019. № 1. P. 3-11. doi: 10.17277/amt.2019.01.pp.003-011
3. Gungor, Z.E., Evans, S. Understanding the hidden cost and identifying the root causes of changeover impacts. Journal of Cleaner Production. 2017. V. 167, pp. 1138–1147. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.055
4. Пайдушева Д.А. Перспективы применения аддитивных технологий (АМ-технологий) в образовании // Интернаука. 2024. № 19-2(336). С. 62-63.
5. Александров И.А., Шептунов С.А., Муранов А.Н. Моделирование и организация технологической среды машиностроительных предприятий: учебно-методическое пособие. М.: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2023. 128 с.

6. Batra D., Xia W., VanderMeer D., Dutta K. Balancing Agile and Structured Development Approaches to Successfully Manage Large Distributed Software Projects: A Case Study from the Cruise Line Industry. *Communications of the Association for Information Systems*. 2010. V. 27. doi: 10.17705/1cais.02721

7. Siemiatkowski M.S., Deja M. Planning optimised multi-tasking operations under the capability for parallel machining. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. V. 61, pp. 632–645. doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.009

8. Wang F., Lu Y., Ju F. Condition-based Real-time Production Control for Smart Manufacturing Systems. *IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 2018. V.50. pp. 1052–1057 doi: 10.1109/coase.2018.8560389

9. Александров И.А. Взаимосвязь ключевых элементов автоматизированной системы с позиции концепции достижения изделием целевых свойств путём идентификации оптимальных технологических режимов изготовления // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1, № 3(39). С. 19-26.

10. Александров И.А. Принципы автоматизация технологической подготовки производства путем нейросетевого моделирования // Инженерный вестник Дона. 2019. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5979

11. Rącz-Szabó A., Ruppert T., Bántay L., Löcklin A., Jakab L., Abonyi J. Real-Time Locating System in Production Management. *Sensors*. 2020. № 20(23), pp. 6766. doi: 10.3390/s20236766

12. Parthanadee P., Buddhakulsomsiri J. Production efficiency improvement in batch production system using value stream mapping and simulation: a case study of the roasted and ground coffee industry. *Production Planning & Control*. 2012. №25(5), pp. 425–446. doi: 10.1080/09537287.2012.702866

---

13. Simonovits A. Three economic applications of Chebyshev's algebraic inequality. *Mathematical Social Sciences*. 1995. № 30(3), pp. 207–220. doi: 10.1016/0165-4896(95)00786-5

14. Aminian E., Ribeiro R.P., Gama J. Chebyshev approaches for imbalanced data streams regression models. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2021. № 35(6), pp. 2389–2466. doi: 10.1007/s10618-021-00793-1

15. Побегайлов О.А., Шемчук А.В. Информационные системы планирования в строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1896

16. Галимова Е.Ю., Коваленко А.Н. Выбор способа тестирования как решение многокритериальной задачи // *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3756

### References

1. Agafoncev A.S., Vovk N.N., Klevnov Yu.V., Kolyvanov A.N., Korepanov A.V., Koshkin V.V., Luchkin D.A., Minejchev M.V., Ovsov A.V., Sergeev D.V., Fomchenko V.N., Carev M.A. *Trudy RFYAC-VNIIEF*. 2017. № 22-2. pp. 228-231.

2. Semenov A.B., Fomina O.N., Muranov A.N., Kutsbakh A.A., Semenov B.I. *Advanced Materials and Technologies*. 2019. № 1. pp. 3-11. doi: 10.17277/amt.2019.01.pp.003-011

3. Gungor Z.E., Evans S. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 167, pp. 1138–1147. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.055

4. Pajdusheva D.A. // *Internauka*. 2024. № 19-2(336). pp. 62-63.

5. Aleksandrov I.A., Sheptunov S.A., Muranov A.N. *Modelirovanie i organizaciya tekhnologicheskoy sredy mashinostroitel'nyh predpriyatij: Uchebno-metodicheskoe posobie [Modeling and organization of the technological environment of mechanical engineering enterprises: A teaching aid]*, 2023. 128 p.

---



6. Batra D., Xia W., VanderMeer D., Dutta K. Communications of the Association for Information Systems. 2010. V. 27. doi: 10.17705/1cais.02721
7. Siemiatkowski M.S., Deja M. (2021). Journal of Manufacturing Systems, 61, pp. 632–645. doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.009
8. Wang F., Lu Y., Ju F. IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2018. V.50. pp. 1052–1057 doi: 10.1109/coase.2018.8560389
9. Alexandrov I.A. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. Vol. 1, № 3(39). pp. 19-26
10. Alexandrov I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5979
11. Rácz-Szabó A., Ruppert T., Bántay L., Löcklin A., Jakab L., Abonyi J. Sensors. 2020. № 20(23), pp. 6766. doi: 10.3390/s20236766
12. Parthanadee P., Buddhakulsomsiri J. Production Planning & Control. 2012. №25(5), pp. 425–446. doi: 10.1080/09537287.2012.702866
13. Simonovits A. Mathematical Social Sciences. 1995. № 30(3), pp. 207–220. doi: 10.1016/0165-4896(95)00786-5
14. Aminian E., Ribeiro R.P., Gama J. Data Mining and Knowledge Discovery. 2021. № 35(6), pp. 2389–2466. doi: 10.1007/s10618-021-00793-1
15. Pobegajlov O.A., Shemchuk A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1896
16. Galimova E.Yu., Kovalenko A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3756

**Дата поступления: 20.09.2024**

**Дата публикации: 24.10.2024**