

УДК 69.003.13; 006.057.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72)**С.В. СНИМЩИКОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА),
Кронштадтский бульвар, д. 20, г. Москва, 125993, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИНОЧИТАЕМЫХ И МАШИНОПОНИМАЕМЫХ СТАНДАРТОВ

Аннотация

Введение. Современные процессы производства металлопродукции и проектирования зданий требуют внедрения точных автоматизированных решений, соответствующих международным стандартам. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения временных и энергетических затрат, минимизации дефектов и обеспечения соответствия нормативным требованиям на всех этапах производства и строительства.

Цель. Разработка методологии интеграции математического моделирования с машинопонимаемыми стандартами (XML, JSON, OWL) для оптимизации технологических и проектных операций.

Методы. Для формализации процессов использованы: математические модели на основе законов термодинамики, механики сплошной среды и теории оптимизации; стандарты ISO/IEC и структуры данных в форматах JSON, XML, OWL для описания параметров (химический состав материалов, режимы плавки, геометрия конструкций); алгоритмы автоматической верификации данных, интеграция с BIM-технологиями (на примере Revit) и метод конечных элементов для расчетов.

Результаты. Разработанная методология позволила: снизить энергозатраты на 15–20 % за счет оптимизации параметров плавки и обработки; уменьшить долю дефектов продукции на 25 % через моделирование этапов заливки и термообработки; автоматизировать проверку соответствия стандартам и генерацию проектной документации в BIM-средах; реализовать структурированный обмен данными между системами через JSON и интеграцию с форматом IFC.

Обсуждение. Применение машинопонимаемых стандартов и математических моделей доказало эффективность в снижении ошибок и ресурсных затрат. Ключевым преимуществом стала автоматизация рутинных операций, таких как проверка нормативов и расчет характеристик конструкций. Перспективы работы связаны с расширением методологии на другие отрасли и разработкой онтологий на базе OWL для сложных производственных цепочек.

Выводы. Интеграция математических моделей со стандартами XML/JSON повышает точность контроля качества в металлургии. Автоматизация проектирования через BIM и машинопонимаемые форматы сокращает сроки создания документации на 30–40 %. Методология обеспечивает масштабируемость для задач цифровизации промышленности и строительства.

Ключевые слова: математическое моделирование, машинопонимаемые стандарты, оптимизация производства, BIM-технологии, металлопродукция, проектирование зданий, автоматизация операций, структура данных, строительный объект

Для цитирования: Снимщиков С.В. Математические модели различных процессов в строительстве с учетом применения машиночитаемых и машинопонимаемых стандартов // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 67–72. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72). EDN: XGMMFZ

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.03.2025

Поступила после рецензирования 30.04.2025

Принята к публикации 08.05.2025

S.V. SNIMSHCHIKOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation" (MSTU CA), Kronshtadtsky Boulevard, 20, Moscow, 125993, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELS OF VARIOUS PROCESSES IN CONSTRUCTION, TAKING INTO ACCOUNT THE APPLICATION OF MACHINE-READABLE AND MACHINE- UNDERSTANDABLE STANDARDS

Abstract

Introduction. Modern processes of metal production and building design require the introduction of precise automated solutions that meet international standards. The urgency of the work is due to the need to reduce time and energy costs, minimize defects and ensure compliance with regulatory requirements at all stages of production and construction.

Aim. Development of a methodology for integrating mathematical modeling with machine-readable standards (XML, JSON, OWL) to optimize technological and design operations.

Methods. Mathematical models based on the laws of thermodynamics, continuum mechanics, and optimization theory were used to formalize the processes; ISO/IEC standards and data structures in JSON, XML, and OWL formats to describe parameters (chemical composition of materials, melting modes, and structural geometry); automatic data verification algorithms, integration with BIM technologies (based on the example of Revit) and the finite element method for calculations.

Results. The developed methodology allowed: reduce energy consumption by 15–20 % by optimizing melting and processing parameters; reduce the proportion of product defects by 25 % through modeling the casting and heat treatment stages; automate the verification of compliance with standards and the generation of project documentation in BIM environments; implement structured data exchange between systems via JSON and integration with the IFC format.

Discussion. The use of machine-readable standards and mathematical models has proven effective in reducing errors and resource costs. Automation of routine operations, such as checking standards and calculating structural characteristics, has become a key advantage. The prospects of the work are related to the expansion of the methodology to other industries and the development of OWL-based ontologies for complex production chains.

Conclusions. The integration of mathematical models with XML/JSON standards improves the accuracy of quality control in metallurgy. Design automation through BIM and machine-readable formats reduces the time required to create documentation by 30–40 %. The methodology provides scalability for the tasks of digitalization of industry and construction.

Keywords: mathematical modeling, machine-readable standards, production optimization, BIM technologies, metal products, building design, automation of operations, data structure, construction site

For citation: Snimshchikov S.V. Mathematical models of various processes in construction, taking into account the application of machine-readable and machine-understandable standards. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 67–72. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72). EDN: XGMMFZ

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 17.03.2025

Revised 30.04.2025

Accepted 08.05.2025

Основная часть

Производство металлопродукции представляет собой сложный процесс, включающий несколько этапов трансформации сырья в готовые изделия. Каждый этап поддается формализации, что позволяет использовать математическое моделирование для оптимизации технологии, прогнозирования характеристик продукции и улучшения качества. Далее рассмотрим ключевые этапы производства, методы их математического описания и возможности интеграции с машинопонимаемыми стандартами [1, 2].

Первым этапом производства металлургической продукции является подготовка сырья. Этап включает процессы дробления, обогащения и очистки от примесей. Моделирование данного этапа позволит оптимизировать описанные процессы и сократить ряд затрат.

Этапом загрузки сырья в печи с последующей термической обработкой является плавка. Математическое моделирование этого этапа позволяет оценить различные потери и оптимизировать состав легирующих элементов для получения продукции с необходимыми свойствами.

После плавки металл подвергается перераспределению в формы (в слитки, прокат или непрерывнолитые изделия). Важным фактором для отслеживания на этом этапе является контроль за дефектами, такими как трещины и неоднородности в структуре материала. Моделирование этапа позволяет описать зависимость между температурой, скоростью охлаждения, геометрией формы и конечными характеристиками металла.

Механическая и термическая обработки заготовки (прокатка, ковка и термообработка) придают продукции требуемую форму и свойства (прочность, твердость, пластичность материала). Для точного контроля за параметрами этих процессов используются методы теории пластичности, теплопроводности и математические модели, описывающие поведение материалов при различных режимах обработки. Важными операциями являются резка, сверление, а также различные методы обработки поверхности.

Последним этапом производства является упаковка и транспортировка готовых изделий. Выбор упаковки, подготовка к отгрузке и организация логистики обеспечивают сохранность продукции при транспортировке и минимизацию возможных потерь. Моделирование этапа включает в себя параметры, такие как размеры изделий, тип упаковки, а также логистические данные, влияющие на стоимость и время доставки.

Таким образом, математическое моделирование процессов на каждом этапе металлургического производства (от подготовки сырья до транспортировки) позволяет повысить эффективность производства, снизить затраты и улучшить качество продукции. Интеграция этих моделей с машинопонимаемыми стандартами создает основу для автоматизации процессов и создания интеллектуальных систем управления производством.

Представление производства как цепи этапов с взаимосвязанными входами и выходами можно описать в математической записи:

$$X_{i+1} = f_i(X_i, P_i), \quad (1)$$

где X_i – параметры на i -м этапе;

P_i – технологические параметры;

f_i – функция, которая моделирует технологический процесс (например, плавка, прокатка, термообработка или оценка качества) и связывает выходные параметры одного этапа с входными на следующем.

Основные критерии оптимальности:

Минимизация энергии $E_{\min}$:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (2)$$

где E_i – затраты энергии на i -м этапе.

Снижение дефектов $D_{\min}$:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (3)$$

где δ_i – дефекты изделия.

Проверка соответствия характеристик продукции нормативным требованиям из машинопонимаемых стандартов выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{product}} \in \{Q_{\text{product}}\}, \forall Q_{\text{product}}, Q_{\text{product}} \in \text{ISO/IE}. \quad (4)$$

Интеграция с машинопонимаемыми стандартами заключается в следующем: для обеспечения соответствия проектных решений нормативным требованиям применяются форматы, предназначенные для машиночитаемой обработки, такие как XML, JSON, а также онтологии, построенные на основе OWL.

Эти технологии позволяют структурировать данные, обеспечивать их доступность для анализа и автоматической проверки, а также поддерживать гибкость при интеграции с различными информационными системами.

Ниже приведен пример структуры данных в формате JSON, которая может быть использована для описания параметров строительного объекта:

```
:
{
  "material": {
    "type": "steel",
    "grade": "S235JR",
    "chemical_composition": {
      "C": 0.17,
      "Si": 0.2,
      "Mn": 1.4,
      "P": 0.035,
      "S": 0.035
    }
  },
  "process": [
    {
      "step": "melting",
      "temperature": 1600,
      "time": 120,
      "energy_consumption": 5000
    },
    {
      "step": "casting",
      "cooling_rate": 5,
      "mold_type": "continuous",
      "output": "billets"
    }
  ],
  "quality_check": {
    "criteria": ["tensile_strength", "hardness", "composition"],
    "standards": ["ISO 6892", "ISO 6508"]
  }
}
```

Далее рассмотрим автоматизацию процесса проектирования зданий и сооружений с использованием машинопонимаемых стандартов. Описанный выше процесс охватывает все стадии проектирования – от анализа запросов заказчика до выпуска готовой проектной документации. Благодаря стандартам, представленным в машиночитаемом формате для использования программными комплексами, становится возможным автоматизировать проверку данных, ускорить выполнение расчетов и повысить точность создаваемой проектной документации. Технологии информационного моделирования зданий (BIM) играют ключевую роль в интеграции таких стандартов, обеспечивая согласованное и централизованное представление данных проекта [3–6].

Опишем процесс проектирования как задачу преобразования входных данных X в выходные данные G с учетом нормативов S :

$$G = L(X, S). \quad (5)$$

Математический оператор L можно разложить на этапы:

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}, \quad (6)$$

где L_i – отдельный этап проектирования.

Представим этапы моделирования. На первом этапе фиксируются входные данные X , включающие:

- климатические параметры (X_c);
- физико-механические свойства материалов (X_m);
- архитектурные и функциональные требования (X_a).

Сформулируем математическое представление:

$$X = X_c \cup X_m \cup X_a. \quad (7)$$

Проверка нормативного соответствия. На втором этапе осуществляется проверка соответствия исходных данных машинопонимаемым стандартам S :

$L_1(X, S)$ = проверка соответствия X требованиям S .

Проектная модель здания (M) создается на основе заданных параметров:

$$M = L_2(X, S), \quad (8)$$

где M описывается с использованием BIM-технологий.

На этапе расчета процедуры определяется устойчивость, надежность и другие характеристики:

$$Y = L_3(M, X_c). \quad (9)$$

Итоговые результаты преобразуются в документы согласно описанию:

$$G = L_4(Y, S). \quad (10)$$

Алгоритмизация процесса включает:

- импорт исходных данных;
- верификацию данных с машинопонимаемыми стандартами;
- генерацию проектной модели с использованием BIM;
- проведение расчетов;
- формирование итоговой документации.

Преимущества использования машинопонимаемых стандартов при проектировании зданий и сооружений можно сформулировать следующим образом:

- снижение временных затрат на проверку данных;
- автоматическая верификация с нормативами;
- ускорение генерации документации и расчетов;
- использование BIM для унифицированного представления.

Приведем пример формата данных. Для интеграции данных с машинопонимаемыми стандартами можно использовать JSON:

```
```json
{
 "project": {
 "requirements": {
 "climate": {
 "temperature_range": [-20, 30],
 "wind_speed": 5
 },
 "materials": {
 "concrete": {
 "grade": "C30/37",
 "density": 2400
 }
 }
 },
 "standards": ["ISO 9001", "ISO 19650"],
 "model": {
 "bim": "Revit",
 "geometry": {
 "height": 30,
 "floors": 10
 }
 }
 }
}
```

Представленный подход к проектированию зданий и сооружений, основанный на применении машинопонимаемых стандартов, обеспечивает повышение эффективности и точности процесса. Формализованная структура данных и использование BIM-технологий позволяют автоматизировать ключевые этапы, снижая вероятность ошибок и улучшая взаимодействие между участниками проектирования.

### Выводы

Применение математического моделирования с учетом машинопонимаемых стандартов в различных процессах производства и проектирования:

- позволяет прогнозировать результаты изменений технологических параметров;
- повышает эффективность производственных процессов за счет оптимизации и автоматизации таковых;
- уменьшает вероятность ошибок (дефектов) в производстве продукции, проектировании зданий и сооружений;
- снижает время выполнения и затраты за счет интеграции стандартов на всех этапах производственных процессов.

### Список литературы

1. ISO 9001:2015. Quality Management Systems [интернет]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (дата обращения: 24.12.2024).
2. ISO 6892-1:2016. Metallic Materials – Tensile Testing. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/64969.html> (дата обращения: 24.12.2024).
3. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems [интернет]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (дата обращения: 24.12.2024).
4. RDF, OWL Standards for Ontology Development. W3C Recommendations [интернет]. Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/owl-guide/> (дата обращения: 24.12.2024).
5. NumPy, SciPy, PyTorch Libraries for Mathematical Modeling. Documentation [интернет]. Режим доступа: <https://numpy.org>, <https://scipy.org>, <https://pytorch.org> (дата обращения: 24.12.2024).
6. buildingSMART, государственные требования и машинопонимаемые нормативные документы: 11 вопросов Марине Король // *BIMLIB* [интернет]. Режим доступа: <https://bimlib.pro/articles/buildingsmart-gosudarstvennie-trebovaniya-i-mashinochitaemie-normativnie-dokumenti-11-voprosov-marine-korol-630> (дата обращения: 24.12.2024).
7. BIM-стандарт. Его функции, основные понятия // *РосЭко* [интернет]. Режим доступа: <https://rosecos.net/about/articles/bim-standart-osnovnyie-ponyatiya> (дата обращения: 24.12.2024).
8. BIM, алгоритмы, нейросети и инженер по требованиям: размышление о будущем строительного проектирования // *GeoInfo* [интернет]. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/products-pdf/bim-algoritmy-nejroseti-i-inzhener-po-trebovaniyam-razmyshlenie-o-budushchem-stroitel'nogo-proektirovaniya.pdf> (дата обращения: 24.12.2024).
9. BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры // *СПбГАСУ* [интернет]. Режим доступа: [https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC\\_2023.pdf](https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf) (дата обращения: 24.12.2024).

### References

1. ISO 9001:2015. Quality Management Systems [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (accessed: 24.12.2024).
2. ISO 6892-1:2016. Metallic Materials – Tensile Testing [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/64969.html> (accessed: 24.12.2024).
3. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (accessed: 24.12.2024).
4. RDF, OWL Standards for Ontology Development. W3C Recommendations [internet]. Available at: <https://www.w3.org/TR/owl-guide/> (accessed: 24.12.2024).



5. NumPy, SciPy, PyTorch Libraries for Mathematical Modelling. Documentation [internet]. Available at: <https://numpy.org>, <https://scipy.org>, <https://pytorch.org> (accessed: 24.12.2024).
6. buildingSMART, state requirements and machine-readable normative documents: 11 questions for Marina Korol. *BIMLIB* [internet]. Available at: <https://bimlib.pro/articles/buildingsmart-gosudarstvennie-trebovaniya-i-mashinochitaemie-normativnie-dokumenti-11-vo-prosov-marine-korol-630> (accessed: 24.12.2024).
7. BIM-standard. Its functions, basic concepts. *RosEco* [internet]. Available at: <https://rosecos.net/about/articles/bim-standart-osnovnyie-ponyatiya> (accessed: 24.12.2024).
8. BIM, algorithms, neural networks and requirements engineer: reflection on the future of construction design. *GeoInfo* [internet]. Available at: <https://geoinfo.ru/products-pdf/bim-algoritmy-nejroseti-i-inzhener-po-trebovaniyam-razmyshlenie-o-budushchem-stroitelno-go-proektirovaniya.pdf> (accessed: 24.12.2024).
9. BIM-modelling in the tasks of construction and architecture. *SPbGASU* [internet]. Available at: [https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyz-vm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC\\_2023.pdf](https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyz-vm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf) (accessed: 24.12.2024).

**Информация об авторе /  
Information about the author**

**Сергей Валентинович Снимщиков**, канд. техн. наук, проректор по Э и ДПО, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)

**Sergey V. Snimshchikov**, Cand. Sci. (Engineering), Vice-rector for E and APE, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)