

Для цитирования: Лукьянов Р.А., Карельская К.А. Применение регрессионных моделей для частичной автоматизации оценки трудозатрат в ИТ-проектах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 96–102.

APPLICATION OF REGRESSION MODELS FOR PARTIAL AUTOMATION OF WORKLOAD ESTIMATION IN IT PROJECTS

R.A. LUKYANOV, Postgraduate, K.A. KARELSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: rlukyanov12@yandex.ru

The article is devoted to the study of the potential of using regression models in the context of iterative-incremental methodology of IT project management. The first section of the paper reveals the theoretical foundations and methodological approaches underlying this area. The second part focuses on practical experience, as well as practical experience in setting up and developing regression models. as well as analyzing their effectiveness in assessing labor costs and resource planning, which contributes to improving the accuracy and effectiveness of management decisions in the field of information technology. Their effectiveness in assessing labor costs and resource planning in the field of information technology is considered.

Keywords: regression model, data scaling, machine learning, automation, evaluation of machine learning metrics, flexible methodology, AGILE, IT project management.

Поступила в редакцию/received: 15.04.2026; после рецензирования/revised: 22.04.2026;
принята/accepted: 24.04.2026

УДК 519.854.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-102-110

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА МЕТОДАМИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А.В. ИВАНОВ, асп., Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lexuzieel@gmail.com

© Иванов А.В., Матвеев Ю.Н., 2026

В статье рассмотрена задача оптимального линейного раскроя металлопроката при производстве железобетонных изделий. Обоснована актуальность снижения производственных отходов в строительной отрасли. Описана трехэтапная методика, объединяющая формирование планов раскроя, применение методов целочисленного линейного программирования и процедуру выбора оптимального решения на основе нескольких решений. Приведена математическая постановка задачи целочисленного

линейного программирования и приведен прикладной пример раскроя арматурных стержней.

Ключевые слова: линейный раскрой, металлопрокат, целочисленное линейное программирование, минимизация отходов, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Металлопрокат является одним из ключевых материалов современного промышленного строительства. В России по итогам 2025 года выпуск готового проката составил около 59 млн т [1], а строительная и машиностроительная отрасли остаются крупнейшими потребителями стальной продукции – совокупный внутренний спрос в указанном году составил порядка 38–39 млн т [2].

В производстве железобетонных изделий (ЖБИ) материальные затраты на металлопрокат часто составляют не менее 50 % от общей себестоимости продукции [3]. Производственные объемы строительных металлоконструкций в России достигают 8,5 млн т/год [4].

Особую роль в формировании указанных затрат играет этап раскроя арматурных стержней. Арматура поставляется стандартными длинами (6, 9 и 12 м), тогда как производственная программа требует стержней различных размеров в строго заданных количествах. Потери при раскросе металлопроката могут достигать 7 % согласно нормативу РДС 82-202-96 [5], но на практике они, как правило, выше. При текущих ценах на арматуру А500С [6] это приводит к значительным экономическим потерям. Сокращение отходов даже на 1 % дает существенную экономию по отрасли в целом.

Дискретная природа задачи заключается в невозможности использования «дробного» количества стержней. Это, в свою очередь, приводит к математической формулировке в виде задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП). Для решения задач данного класса часто применяются метод ветвей и границ [7] и метод отсечений Гомори [8]. Однако практическое использование этих методов в условиях производства ограничено их вычислительной сложностью [9], поэтому, как правило, применяются объединяющие их комбинированные подходы.

Настоящая статья посвящена описанию методики, объединяющей технологическое планирование раскроя с применением нескольких методов ЦЛП и процедурой выбора оптимального решения. Такой комплексный подход позволяет компенсировать недостатки отдельных алгоритмов и повысить достоверность получаемого решения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА

1.1. Технологические ограничения

Процесс раскроя металлопроката в производстве ЖБИ характеризуется рядом жестких технологических ограничений, которые непосредственно определяют математическую природу задачи оптимизации [10]:

дискретность материалов: каждый прутوك либо используется целиком, либо разрезается на заранее заданные отрезки; частичное использование заготовки не допускается;

технологические припуски на рез: потери материала составляют 3...10 мм на рез в зависимости от применяемого оборудования;

ограничения производительности: план раскроя должен формироваться в рамках производственной смены с учетом длительности переналадки при смене типоразмеров;

изменчивость производственной программы: план может корректироваться в течение смены, что требует оперативного пересчета оптимального решения.

Анализ практики показывает, что при ручном планировании реальные потери материала достигают 5...8 % и выше [11], а эвристические подходы, несмотря на скорость выполнения, не гарантируют приемлемого качества решений при нестандартных соотношениях размеров деталей [12].

1.2. Математическая постановка задачи целочисленного линейного программирования

Дискретная природа переменных решений приводит к постановке задачи целочисленного линейного программирования [13]. Пусть имеется n вариантов раскроя стандартного прутка, тогда задача формулируется следующим образом:

$$\min f(x) = \sum w_j x_j, j = 1, \dots, n$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum a_{ij} x_j &\geq b_i, i = 1, \dots, m; \\ x_j &\in \mathbb{Z} \geq 0, j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Здесь x_j – количество применений j -го варианта раскроя (целочисленная неотрицательная переменная); w_j – величина отходов при j -м варианте раскроя; a_{ij} – количество фрагментов i -го типоразмера, получаемых при j -м варианте раскроя; b_i – требуемое количество фрагментов i -го типоразмера согласно производственной спецификации.

Таким образом, целевая функция минимизирует суммарные отходы металлопроката, ограничения обеспечивают выполнение производственной программы по каждому типоразмеру, а условие целочисленности отражает физическую невозможность применения «дробного» числа вариантов раскроя.

2. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РАСКРОЯ

Представляемая в данной статье методика является трехэтапным процессом, непосредственно вытекающим из структуры технологического процесса подготовки арматуры: на вход приходит спецификация арматуры, информация о наличии и стандартных длинах фрагментов. После этого составляется план линейного раскроя, решается задача оптимизации несколькими методами и производится выбор оптимального решения. Подробная схема методики дана на рис. 1.

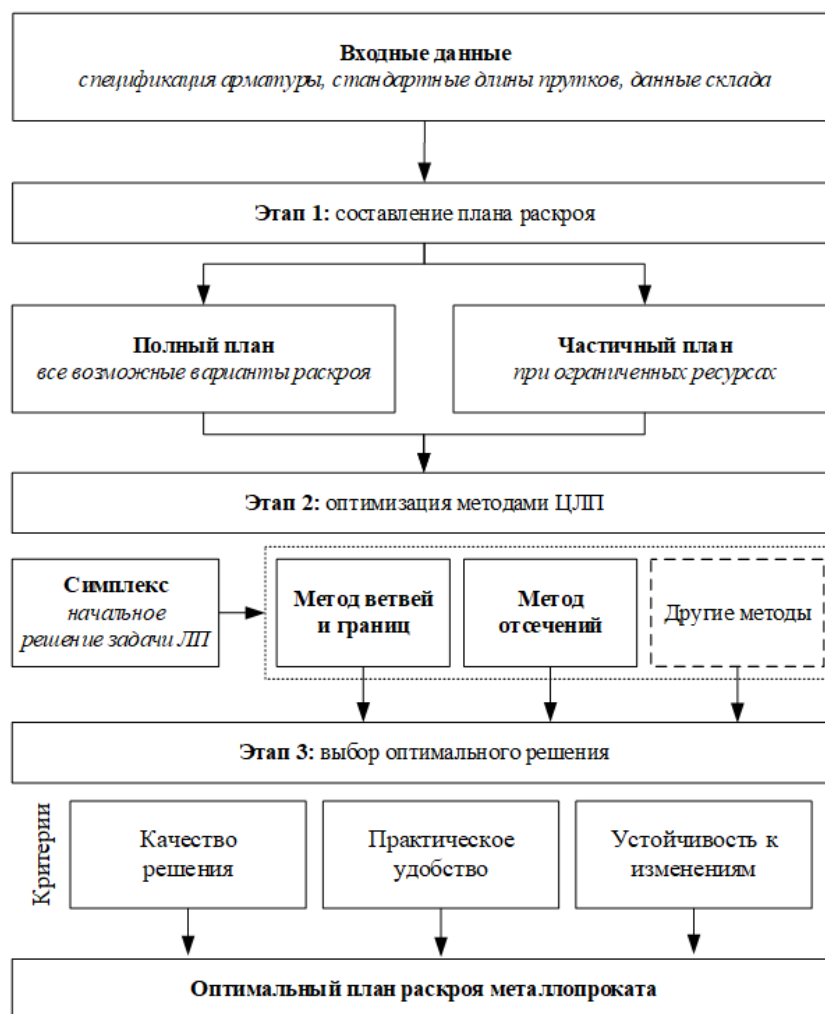


Рис. 1. Схема методики планирования и оптимизации раскроя металлопроката (ЛПП – линейное программирование)

2.1. Составление плана раскроя

На первом этапе генерируется множество всех допустимых вариантов раскроя стандартного прутка на требуемые типоразмеры. Каждый вариант раскроя j задается вектором $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, где a_{ij} – количество фрагментов i -го типоразмера, и величиной отходов w_j . В зависимости от вычислительных ресурсов и требований к точности применяются два подхода:

полный план раскроя: генерируются все математически возможные варианты с учетом технологических ограничений. В этом случае обеспечивается наилучшее качество решения, однако при большом числе типоразмеров размерность задачи существенно возрастает;

частичный план раскроя: отбирается подмножество наиболее перспективных вариантов по эвристическим правилам (приоритет отдается вариантам с минимальными отходами и максимальным числом получаемых фрагментов). Применяется при ограниченных временных и вычислительных ресурсах.

2.2. Оптимизация методами целочисленного линейного программирования

На втором этапе на основе сформированного плана раскроя строится математическая модель задачи ЦЛП, которая решается несколькими методами. Одновременное использование нескольких алгоритмов является ключевой особенностью методики: это позволяет компенсировать недостатки отдельных методов и повысить надежность итогового решения.

В рамках методики применяются следующие методы:

симплекс-метод для получения нецелочисленного оптимального решения задачи ЛП, которое служит начальной точкой для методов ЦЛП. По этой причине данный метод используется всегда;

метод ветвей и границ – классический точный метод, гарантирующий нахождение оптимального целочисленного решения при достаточном вычислительном времени;

метод отсечений (метод Гомори) – поэтапно сужает область допустимых решений, добавляя дополнительные ограничения-отсечения;

итерационный алгоритм на основе минимизации Евклидова расстояния. Поиск ведется от точки нецелочисленного оптимума в глубь области допустимых решений, направление движения на каждом шаге определяется минимизацией евклидовой метрики между текущей точкой и точкой нецелочисленного решения [14]. Более подробно данный алгоритм описан в источниках [15–17].

2.3. Выбор оптимального решения

На третьем этапе выбирается решение из набора, полученного с помощью разных методов. В результате определяется наилучшее по совокупности следующих критериев:

качество решения: величина суммарных отходов металлопроката;

практическое удобство реализации: сложность плана раскроя с точки зрения производственного персонала. Например, решение с большим числом различных шаблонов требует частой переналадки оборудования и усложняет организацию рабочих мест;

устойчивость к изменениям: чувствительность решения к незначительным корректировкам производственной программы.

Если несколько методов дают одинаковое значение целевой функции, предпочтение отдается решению с наименьшим числом различных вариантов раскроя, что упрощает его практическую реализацию.

3. ДЕМОНСТРАЦИЯ НА ПРИКЛАДНОМ ПРИМЕРЕ

3.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу оптимизации раскроя арматурных стержней, типичную для строительных компаний, самостоятельно производящих ЖБИ [18]. Требуется минимизировать отходы при раскрое стержней стандартной длины 750 см для получения стержней трех типоразмеров: 250, 200 и 150 см. Производственная программа предусматривает изготовление 200 стержней длиной 250 см, 250 стержней длиной 200 см и 50 стержней длиной 150 см.

3.2. Формирование плана раскроя

На первом этапе генерируются все допустимые варианты раскроя арматурных стержней длиной 750 см:

Вариант раскроя	250 см	200 см	150 см	Отходы, см	Количество разрезов
1	3	0	0	0	3
2	2	1	0	50	3
3	2	0	1	100	3
4	1	2	0	100	3
5	1	1	2	0	4
6	1	0	3	50	4
7	0	3	1	0	4
8	0	2	2	50	4
9	0	1	3	100	4
10	0	0	5	0	5
Требуемое количество	200	250	50	—	—

Таким образом, для данной задачи сформировано 10 допустимых **вариантов** раскроя. Вариант 1 (три стержня по 250 см, без отходов) и вариант 7 (три стержня по 200 см, без отходов) являются наиболее эффективными с точки зрения минимизации потерь. Выше варианты с отходами, равными 0, выделены жирным шрифтом. Очевидно, что для выбора наиболее подходящего плана требуется больше информации. На этот вопрос отвечают критерии, определяемые на третьем этапе методики. Визуализация планов раскроя, наглядно демонстрирующая различные комбинации, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Визуализация плана раскроя арматурных стержней длиной 750 см

3.3. Постановка задачи целочисленного линейного программирования

На основе приведенных в п. 3.2 вариантов раскроя арматурных стержней длиной 750 см формируется задача ЦЛП. Обозначим через x_j количество применений j -го варианта раскроя. Целевая функция – минимизация суммарных отходов:

$$\min f(x) = 0x_1 + 50x_2 + 100x_3 + 100x_4 + 0x_5 + 50x_6 + 0x_7 + 50x_8 + 100x_9 + 0x_{10}$$

при следующих ограничениях на обеспечение требуемого количества стержней каждого типоразмера:

$$\begin{aligned} 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 + x_5 + x_6 &\geq 200 && (\text{стержни 250 см}); \\ 2x_2 + 2x_4 + x_5 + 3x_7 + 2x_8 + x_9 &\geq 250 && (\text{стержни 200 см}); \\ x_3 + 2x_5 + 3x_6 + x_7 + 2x_8 + 3x_9 + 5x_{10} &\geq 50 && (\text{стержни 150 см}); \\ x_j \in \mathbb{Z} \geq 0, j &= 1, \dots, 10. \end{aligned}$$

Требование целочисленности переменных x_j обусловлено невозможностью применения «дробного» числа раскроев, поскольку каждый стержень разрезается по определенной схеме целое число раз.

3.4. Решение задачи целочисленного линейного программирования несколькими способами и выбор оптимального плана

В соответствии с разработанной методикой задача решается несколькими способами. На первом шаге симплекс-метод находит нецелочисленное оптимальное решение задачи ЛП (без ограничения целочисленности), которое служит начальной точкой для алгоритмов ЦЛП.

На втором этапе решение методом ветвей и границ, методом Гомори и другими методами дает набор допустимых целочисленных решений. Необходимость решения несколькими способами обусловлена тем, что не все методы дают оптимальное решение для каждой задачи.

Процедура выбора оптимального плана на третьем этапе основана на сравнении полученных решений по критериям минимальности отходов и практического удобства реализации, которые зависят от организации работы на конкретном предприятии.

В данном примере оптимальное решение достигается при использовании вариантов с нулевыми отходами (варианты 1, 5, 7, 10, см. п. 3.2), что обеспечивает практически безотходный раскрой, однако с практической точки зрения не все из них являются равноценными. В частности, если принять, что необходимо произвести несколько видов ЖБИ и большинство изделий требуют отрезков по 200 см, то в таком случае именно вариант 7 раскроя будет оптимальным.

Подобные критерии дают наибольший эффект для крупных промышленных объектов. Например, при полной генерации для задачи изготовления стержней длиной 2 400, 1 800, 1 200, 800, 600 мм из заготовки 6 000 мм получается 384 варианта раскроя. Однако только 45–60 из них имеют коэффициент использования материала выше 85 % и включают не более трех типоразмеров. Для проекта многоэтажного здания, где требуются тысячи стержней различных размеров, сокращение отходов даже на 2–3 % обеспечивает существенную экономию и повышает конкурентоспособность предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика планирования и оптимизации линейного раскроя металлопроката ориентирована на практические условия производства ЖБИ. Методика объединяет три этапа: формирование плана раскроя, оптимизацию несколькими методами ЦЛП и процедуру выбора оптимального решения на основе критериев.

Ключевым отличием предложенного подхода от существующих способов, улучшающих отдельные алгоритмы, является комплексность: охватывается весь цикл, от составления вариантов раскроя до выбора итогового плана, с учетом технологических ограничений реального производства. Это позволяет компенсировать недостатки отдельных методов ЦЛП и повысить надежность решений.

Практическая значимость методики подтверждена на примере задачи раскроя арматуры: при годовом потреблении металлопроката свыше 10 млн т по отрасли снижение отходов даже на 1 % обеспечивает значительную экономию.

Дальнейшие исследования планируется посвятить более детальному изучению и формализации критериев и анализу сценариев их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Операционные и финансовые результаты Северстали за 4 кв. и 12 мес. 2024 года. URL: <https://severstal.com/rus/media/archive> (дата обращения: 05.09.2025).
2. Металлопотребление в РФ выросло на 7 % за счет строительства инфраструктуры и машиностроения. URL: <https://vmeste.severstal.com/expert/metallopotreblenie-v-rf-vyroslo-na-7-za-schet-stroitelstva-infrastruktury-i-mashinostroeniya/> (дата обращения: 05.09.2025).
3. Rady M., Mahfouz S.Y., Taher S. Optimal Design of Reinforced Concrete Materials in Construction // *Materials*. 2022. V. 15. № 7. С. 2625.
4. За 2018–2022 гг. производство строительных металлоконструкций в России увеличилось почти на 70 %: с 5,1 до 8,5 млн т. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14547/> (дата обращения: 05.09.2025).
5. РДС 82-202-96. Правила разработки и применения нормативов трудноустраняемых потерь и отходов материалов в строительстве. 1997. URL: <https://obratkatrub.ru/assets/img/stati/rds82.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
6. Динамика цен на арматуру А500С за последние полгода. URL: https://www.mcena.ru/metalloprokat/armatura/a500s-gost-r-52544_dinamica (дата обращения: 05.09.2025).
7. Land A.H., Doig A.G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // *Econometrica*. 1960. V. 28. № 3. Р. 497.
8. Трушков А.С. Метод отсекающих плоскостей Гомори. *Актуальные вопросы современной информатики: Материалы VII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции*. Коломна: Государственный социально-гуманитарный университет, 2017. С. 101–107.
9. Afraimovich L.G. A heuristic method for solving integer-valued decompositional multiindex problems // *Automation and Remote Control*. 2014. V. 75. № 8. Р. 1357–1368.
10. Белецкий Б.Ф. Технология и механизация строительного производства: учебник. 4-е изд., стереотип. СПб.: Лань, 2021. 752 с.
11. Kwon K., Kim D., Kim S. Cutting waste minimization of rebar for sustainable structural work: A systematic literature review // *Sustainability*. 2021. V. 13. № 11. С. 5929.
12. 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. Т. 2. № 1. С. 74–82.

13. Фурина К.О. Методы целочисленного программирования на примере задачи об оптимальном раскрое материала // *Журнал научных и прикладных исследований*. 2015. № 8. С. 97–101.

14. Амеликин С.А., Захаров А.В., Хачумов В.М. Обобщенное расстояние Евклида Махаланобиса и его свойства // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2006. № 4. С. 40–44.

15. Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Поиск решения задачи целочисленного программирования с помощью итеративного округления координат // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36. № 4. С. 539–550.

16. Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Алгоритм решения задач целочисленного программирования с применением итеративного округления координат // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 7. С. 149–152.

17. Матвеев Ю.Н., Иванов А.В. Использование метода покоординатного спуска для поиска решения задачи целочисленного программирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 53–62.

18. Brezina I., Kultan J., Pekár J. Optimization of Cutting Large Amounts of Dense Material // *TEM Journal*. 2024. V. 13. № 1. P. 26–35.

Для цитирования: Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Планирование и оптимизация линейного раскроя металлопроката методами целочисленного программирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 102–110.

PLANNING AND OPTIMIZATION OF LINEAR CUTTING OF METAL PRODUCTS USING INTEGER PROGRAMMING METHODS

A.V. IVANOV, Postgraduate, Yu.N. MATVEEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: lexuzieel@gmail.com

The article considers the problem of optimal linear cutting of metal products in the production of reinforced concrete structures. The relevance of reducing production waste in the construction industry is substantiated. A three-stage methodology is described that combines the formation of cutting plans, the application of integer linear programming methods, and a procedure for selecting the optimal solution. The mathematical formulation of the integer linear problem is given and an applied example of cutting reinforcing bars is considered. The practical significance of the developed approach for minimizing metal waste at industrial construction enterprises is shown.

Keywords: linear cutting, metal products, integer linear programming, waste minimization, optimization.

Поступила в редакцию/received: 22.04.2026; после рецензирования/revised: 24.04.2026;
принята/accepted: 29.04.2026