

Ф. Г. Ахмадиев, А. А. Лапко, Р. А. Галимов

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕЩЕНИИ СТРОЯЩИХСЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИМ СТРОИТЕЛЬНЫХ БРИГАД

Ключевые слова. Оптимизация размещения, целочисленное программирование, частично-целочисленное программирование, транспортная задача, многокритериальная оптимизация, метод Бендерса, метод отсечения Гомори, строительные бригады, промышленные предприятия, производство строительных материалов.

Предложена информационная технология для реализации решения двухэтапной задачи оптимального размещения в строительной отрасли, объединяющая задачи оптимального размещения строящихся промышленных предприятий и оптимального распределения строительных бригад по возводимым объектам. На первом этапе решаются задачи частично-целочисленного программирования размещения строящихся промышленных предприятий и перевозок готовой продукции к потребителям, обеспечивающие минимизацию суммарных затрат на строительство и транспортировку. Для решения этой задачи частично-целочисленного программирования применен метод расчленения Бендерса, позволяющий декомпозировать исходную NP-трудную задачу на последовательность транспортных задач линейного программирования, что существенно сокращает вычислительные ресурсы по сравнению с полным перебором вариантов. На втором этапе решается многокритериальная задача распределения трудовых ресурсов с двумя противоречивыми критериями: минимизацией транспортных расходов на перевозку рабочих бригад и максимизацией полноты удовлетворения потребностей строящихся объектов в рабочей силе. При этом для решения этой задачи использованы метод главного критерия и метод построения множества Парето с формированием обобщенной целевой функции и варьированием весового параметра, что позволяет лицу, принимающему решение, осознанно выбирать компромисс между затратами и занятостью. Разработанная технология реализована в виде веб-приложения с клиентской частью на HTML/CSS/JavaScript, серверной частью на C# с использованием платформы ASP.NET Core и архитектурного паттерна MVC, а также вычислительным модулем на базе Microsoft Excel с применением надстройки «Поиск решения» и языка VBA. Представлены результаты вычислительного эксперимента на примере размещения предприятий производства строительных материалов в шести районах Республики Татарстан. Показано, что оптимальный выбор трех заводов из шести позволяет снизить затраты на 1420,1 млн у.е. (руб.) по сравнению со строительством всех потенциальных предприятий. Для многокритериальной задачи распределения бригад получено множество Парето, демонстрирующее диапазон возможных компромиссных решений.

F. G. Akhmadiev, A. A. Lapko, R. A. Galimov

INFORMATION TECHNOLOGIES WITH OPTIMAL LOCATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISES UNDER CONSTRUCTION AND DISTRIBUTION OF CONSTRUCTION TEAMS

Keywords. Placement optimization, integer programming, partial integer programming, transport problem, multi-criteria optimization, Benders method, Gomori clipping method, construction crews, industrial enterprises, production of building materials.

Abstract. Information technology is proposed to implement the solution of the two-stage problem of optimal placement in the construction industry, combining the tasks of optimal placement of industrial enterprises under construction and optimal distribution of construction teams by facilities under construction. At the first stage, the tasks of partial integer programming of the placement of industrial enterprises under construction and transportation of finished products to consumers are solved, which ensure minimization of total construction and transportation costs. To solve this problem of partial-integer programming, the Benders partition method is used, which allows decomposing the original NP-difficult problem into a sequence of linear programming transport problems, which significantly reduces computing resources compared to a complete enumeration of options. At the second stage, the multi-criteria task of allocating labor resources is solved with two contradictory criteria: minimizing transportation costs for the transportation of work crews and maximizing the completeness of meeting the labor needs of facilities under construction. To solve this problem, the method of the main criterion and the method of constructing a Pareto set are used with formation of a generalized objective function and variation of the weight parameter, which allows the decision-maker to consciously choose a compromise between costs and employment. The developed technology is implemented in the form of a web application with a client part in HTML/CSS/JavaScript, a server part in C# using the ASP.NET Core platform and the MVC architectural pattern, as well as a computing module based on Microsoft Excel using the "Solution Search" add-on and VBA language. The results of a computational experiment are presented on the example of the location of enterprises for the production of building materials in six districts of the Republic of Tatarstan. It is shown that the optimal choice of three plants out of six can reduce costs by 1420.1 million standard units (rubles) compared to the construction of all potential enterprises. For the multi-criteria brigade allocation problem, a Pareto set is obtained demonstrating the range of possible trade-offs.

Введение

Задача оптимального размещения промышленных предприятий с учетом минимизации затрат на строительство и перевозку готовой продукции потребителям

имеет важное практическое значение с точки зрения экономики финансовых затрат. Это также особое значение имеет для объектов строительной индустрии, особенно предприятий строительных материалов.

Строительная индустрия характеризуется высокой материалоемкостью и трудоемкостью. Эффективность строительных проектов в значительной степени определяется двумя ключевыми факторами: рациональным размещением производственных мощностей (заводов по изготовлению материалов) и оптимальным распределением трудовых ресурсов (строительных бригад) по объектам. Неправильное решение этих задач ведет к значительному удорожанию проекта, увеличению сроков строительства и снижению конкурентоспособности.

Современные информационные технологии (ИТ) при этом позволяют автоматизировать процесс принятия решений, используя методы математического моделирования и математического программирования для поиска оптимальных решений. Актуальность разработки такой технологии обусловлена необходимостью оптимального размещения объектов строительства и снижения транспортных издержек, ускорения выполнения проектов строительства и повышения эффективности управления ресурсами.

Целью данной работы является создание веб-ориентированной информационной технологии, которая позволяет рассчитать оптимальное размещение строящихся промышленных предприятий в регионе и определить наилучшие схемы распределения строительных бригад по ним с реализацией вычислительного эксперимента.

Постановка и формализация задачи

Объектом исследования является процесс строительства промышленных предприятий, например, по производству строительных материалов и последующего обеспечения их рабочей силой при минимальных затратах с учетом минимальных затрат на строительство и перевозку готовой продукции к потребителям. При выборе площадки для строительства предприятий строительного комплекса (стройматериалов) необходимо учитывать близость к месторождению сырья (глины), наличие источников водоснабжения и удобные подъездные пути и др. [1, 2]. Например, технология производства кирпича включает подготовку глины, формование и обжиг, причем качество готовой продукции напрямую зависит от минерального состава исходного сырья [3, 4].

Решение задачи оптимизации осуществляется в три этапа: 1) оптимальное размещение заводов с минимальными затратами на строительство и перевозку продукции; 2) оптимальное распределение строительных бригад к строящимся заводам с учетом потребности в них и минимальными затратами на перевозку; 3) подведение итогов расчета суммарных затрат. Система адаптирована как для закрытого типа задач ($\sum_i a_i = \sum_j b_j$), так и для открытого типа ($\sum_i a_i \neq \sum_j b_j$).

Задача о размещении предприятий. Имеется n потребителей с потребностями b_j ($j = \overline{1, n}$). Требуется определить, где построить до m промышленных предприятий (заводов по производству кирпича) и каковы должны быть их производственные мощности a_i ($i = \overline{1, m}$), чтобы суммарные затраты на строительство и доставку товара к потребителям были минимальны. Стоимость строительства i -го предприятия составляет f_i , $i = \overline{1, m}$ условных единиц (у.е.), расходы на перевозку единицы товара с i -го предприятия j -му потребителю составляют c_{ij} у.е., $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$. Необходимо определить объем продукта x_{ij} , перевозимого с i -го завода к j -му потребителю и вектор $\bar{y}(y_i)$, где $y_i = \{0, 1\}$ (строится завод или нет) и минимальные суммарные затраты z_{\min} . Показателем (критерием) реализации проекта строительства служат полные затраты на строительство заводов и доставку товара потребителям. Тогда задача размещения промышленных предприятий имеет вид [5, 6, 7]:

$i = \overline{1, m}$), чтобы суммарные затраты на строительство и доставку товара к потребителям были минимальны. Стоимость строительства i -го предприятия составляет f_i , $i = \overline{1, m}$ условных единиц (у.е.), расходы на перевозку единицы товара с i -го предприятия j -му потребителю составляют c_{ij} у.е., $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$. Необходимо определить объем продукта x_{ij} , перевозимого с i -го завода к j -му потребителю и вектор $\bar{y}(y_i)$, где $y_i = \{0, 1\}$ (строится завод или нет) и минимальные суммарные затраты z_{\min} . Показателем (критерием) реализации проекта строительства служат полные затраты на строительство заводов и доставку товара потребителям. Тогда задача размещения промышленных предприятий имеет вид [5, 6, 7]:

$$\min z = \sum_{i=1}^m \left[f_i \cdot y_i + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right], \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j \quad (j = \overline{1, n}), \quad \sum_{i=1}^m a_i \cdot y_i \geq \sum_{j=1}^n b_j, \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \cdot y_i \quad (i = \overline{1, m}),$$

$$y_i = \{0, 1\}, \quad x_{ij} \geq 0, \quad (2.2)$$

где x_{ij} – объем товара, перевозимого с i -го завода i -у потребителю; $y_i = \{0, 1\}$ представляют альтернативы строительства i -го предприятия.

Перевозка кирпичных изделий осуществляется на бортовых фурах вместимостью 20 т (8160 шт. кирпичей). Регион строительства – Республика Татарстан. Тариф за 1 км пробега – 50 у.е. В связи с изменением цен в работе предусмотрено введение поправочных коэффициентов k_i и k_{ij} для учета этого факта.

Задача оптимального распределения строительных бригад. Имеется m строительных объектов с потребностью в рабочих d_i и k пунктов отправления рабочих в количестве t_j , ($j = \overline{1, k}$). Расстояние между пунктами равно l_{ij} ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, k}$), стоимость перевозки одного рабочего – r_{ij} у.е. ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, k}$). Количество рабочих, направляемых с j -й площадки в i -й объект – q_{ij} ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, k}$). Причем из каждой площадки нельзя отправить рабочих больше, чем имеется и в каждый объект нельзя направить рабочих больше, чем требуется. Задача заключается в минимизации затрат на перевозку рабочих и максимизации их количества распределения. Тогда оптимизационная модель данной задачи формулируется следующим образом [7, 8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k q_{ij}, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k r_{ij} \cdot q_{ij}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m q_{ij} \leq t_j, \sum_{j=1}^k q_{ij} \leq d_i, q_{ij} \geq 0, j = \overline{1, k}, i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Перевозку рабочих бригад можно осуществить на микроавтобусах, автобусах или больших автобусах (10–20, 30–40 и 40–55 мест соответственно). Тариф r_{ij} рассчитывается по формуле: (амортизация транспорта + (цена топлива за 1 литр \times расход топлива на 1 км)) \times расстояние, с учетом поправочного коэффициента k_{ij} ($\bar{r}_{ij} = k_{ij} \cdot r_{ij}$). Регион расчетов для примера – Республика Татарстан.

Методы численных расчетов

Для решения поставленных задач был выбран и адаптирован комплекс математических методов [6, 8]. Согласно фундаментальным работам по целочисленному программированию [6, 9], задачи с булевыми переменными (как задача размещения предприятий) относятся к классу NP-трудных, что требует применения специальных методов декомпозиции и отсечения.

Задача размещения предприятий (первый этап) относится к классу частично-целочисленного программирования, где непрерывные переменные x_{ij} отвечают за объемы перевозок, а дискретные y_i – за решение строительства объекта. Для её решения был применен метод расчленения Бендерса [6, 10], который позволяет декомпозировать исходную сложную задачу на последовательность более простых задач линейного программирования (транспортного типа). Как подчеркивают Кофман и Анри-Лабордер [6], декомпозиционные методы особенно эффективны для задач с блочной структурой, где фиксация целочисленных переменных превращает задачу в набор независимых подзадач. В отличие от прямого перебора 2^m вариантов, данный метод сводит решение к нескольким итерациям, что существенно сокращает вычислительные ресурсы.

Для решения возникающих в процессе задач линейного программирования использовался метод отсечения Гомори [6, 10], реализованный в надстройке «Поиск решения» табличного процессора. Метод Гомори позволяет последовательно добавлять линейные ограничения (отсечения), отсекающие нецелочисленные оптимальные решения полученные в результате реализации симплекс метода для решения задач линейного программирования, пока не будет найдено целочисленное решение. Это классический подход для задач целочисленного линейного программирования.

Задача распределения бригад (второй этап) является многокритериальной, что соответствует современным подходам к управлению строительными проектами [7]. Для её решения использовались два подхода [11, 12, 13]:

1. Метод главного критерия, когда один из критериев (максимизация распределения или минимизация затрат) выбирается в качестве основного, а второй переводится в разряд ограничений. Этот метод прост в реализации, но требует от ЛПР четкого определения приоритетов и формирования ограничений по другому критерию.

2. Метод построения множества Парето [12, 14], позволяет получить множество компромиссных решений. Согласно теории многокритериальной оптимизации [11, 12, 14], множество Парето содержит все неулучшаемые альтернативы: ни одно решение из этого

множества не может быть улучшено по одному критерию без ухудшения хотя бы одного другого. С помощью построения обобщенной целевой функции $P = \lambda \cdot F + (1 - \lambda) \cdot (-f)$ и варьирования параметра λ от 0 до 1 формируется множество неулучшаемых альтернатив, окончательный выбор из которого предоставляется лицу, принимающему решение (ЛПР). Такой подход рекомендуется в работах [11, 12, 14] для задач принятия решений, в частности управления строительством, где критерии эффективности часто противоречивы.

Современные исследования в области оптимизации строительных проектов, публикуемые в ведущих отраслевых журналах, подтверждают эффективность применения методов структурно-параметрической оптимизации и эволюционных алгоритмов для решения задач дискретного программирования в строительстве [15]. Вопросы адаптивного управления строительными проектами с учетом ресурсных ограничений и прогнозирования критических изменений рассматриваются в работе О.Ю. Михальченко [16]. Традиции оптимизационного подхода к проектированию отражены в исследованиях С.В. и А.В. Клюевых [17].

Архитектура и реализация информационной технологии

Разработанная информационная технология для данного исследования реализована в виде веб-приложения. Архитектура решения включает три основных компонента:

1. Фронтенд (клиентская часть): спроектирован в графическом редакторе Figma и реализован с использованием HTML, CSS, JavaScript. Интерфейс позволяет пользователю интерактивно выбирать на карте региона (Республики Татарстан) города-отправители (потенциальные места строительства заводов и места дислокации бригад) и города-получатели (потребители продукции и строящиеся объекты).

2. Бэкенд (серверная часть): разработан на языке C# с использованием платформы ASP.NET Core и архитектурного паттерна MVC. Бэкенд принимает данные от пользователя, валидирует их и инициирует процесс оптимизации.

3. Вычислительный модуль: реализован на основе табличного процессора Microsoft Excel с использованием языка Visual Basic for Applications (VBA). Данные из веб-приложения передаются в Excel, где с помощью надстройки «Поиск решения» последовательно решаются задачи первого и второго этапов.

Часть вычислений выполняется непосредственно в программе на C# для экономии времени и ресурсов производительности.

Полученные оптимальные планы перевозок и распределения бригад возвращаются обратно в приложение для визуализации. Причем, при изменении параметров математических моделей предусмотрен их учет через поправочные коэффициенты.

Вычислительный эксперимент и результаты

Апробация разработанной технологии проводилась на примере данных для Республики Татарстан. Рассматривалось шесть потенциальных районов-потребителей кирпича (Тетюшский, Пестречинский, Арский,

Зеленодольский, Верхнеуслонский, Лаишевский) и шесть потенциальных площадок для строительства заводов с различной мощностью и стоимостью строительства.

1. *Результаты решения задачи о размещении предприятий.* Задача решалась с помощью табличного процессора Excel и VBA методом расчленения Бендерса [6]. Исходные данные из веб-приложения записываются в таблицу Excel, после чего задача решается с помощью надстройки «Поиск решения».

При решении задачи для $m=4$ (четыре потенциальных завода) методом перебора необходимо вычислить $2^4=16$ вариантов. При программной реализации методом Бендерса это число сокращается до трех вариантов. Аналогично при $m=6$ программа вместо 64 вариантов просчитала только 3. Это подтверждает эффективность декомпозиционного подхода для задач с булевыми переменными [6].

Оптимальным является строительство трех заводов (Завод 1 в Альметьевске, Завод 3 в Зеленодольске и Завод 6 в Елабуге) из шести возможных. Матрица перевозок x_{ij} (млн. шт. кирпича) имеет вид (табл. 1).

Таблица 1 - Матрица перевозок x_{ij}

Table 1 - Traffic matrix x_{ij}

Районы потребителя \ Заводы строительства	Тетюшский	Пестрчинский	Арский	Зеленодольский	Верхнеуслонский	Лаишевский
Завод 1	0	20	25	0	0	0
Завод 2	0	0	0	10	0	20
Завод 3	25	0	0	25	0	0
Завод 4	0	0	0	0	0	0
Завод 5	0	0	0	0	0	0
Завод 6	0	0	0	0	18	2

Суммарные минимальные затраты на строительство заводов и доставку товара потребителям составили 1976,5 млн у.е.

Для сравнения: при строительстве всех шести заводов затраты составляют 3396,6 млн у.е. Таким образом, экономия от оптимального размещения составляет 1420,1 млн у.е., что подтверждает экономическую нецелесообразность строительства всех потенциальных предприятий.

2. *Результаты решения задачи распределения строительных бригад.*

Сценарий 1 (закрытая модель, 200 рабочих). Города-отправители: Казань (120 чел.), Набережные Челны (80 чел.). Города-получатели: Арск (30), Чистополь (50), Альметьевск (50), Елабуга (70). Транспорт – автобус.

При решении методом главного критерия с приоритетом минимизации затрат получен следующий результат (табл.2).

Таблица 2 - Результаты расчетов (минимизация затрат)

Table 2 - Calculation Results (Cost Minimization)

Город-отправитель	Город-получатель	Кол-во рабочих	Кол-во машин	Стоимость перевозки, у.е.
Казань	Арск	30	1	1880
Казань	Чистополь	50	2	6640
Казань	Альметьевск	40	1	6396
Набережные Челны	Альметьевск	10	1	3027
Набережные Челны	Елабуга	70	2	2441
Итого:		200	7	20384

При приоритете максимизации распределения рабочих получен другой результат (табл.3).

Таблица 3 - Результаты расчетов (максимизация распределения рабочих)

Table 3 - Calculation Results (Worker Allocation Maximization)

Город-отправитель	Город-получатель	Кол-во рабочих	Кол-во машин	Стоимость перевозки, у.е.
Казань	Чистополь	50	2	12791
Казань	Елабуга	70	2	10741
Набережные Челны	Арск	30	1	5810
Набережные Челны	Альметьевск	50	2	7665
Итого:		200	7	37007

Как видно, приоритет минимизации затрат дает 20384 у.е., но рабочие распределены не полностью оптимально по объектам; приоритет максимизации занятости дает полное удовлетворение потребностей, но затраты возрастают до 37007 у.е. Это иллюстрирует классический конфликт критериев в задачах управления строительством [7].

Сценарий 2 (открытая модель, $\sum_i d_i = 130, \sum_j t_j = 200, \sum_i d_i \neq \sum_j t_j$). Города-отправители: Арск (30), Буинск (20), Зеленодольск (40), Нижнекамск (40). Города-получатели: Казань (100), Набережные Челны (50), Мамадыш (50). Транспорт – микроавтобус (в скобках приведено количество рабочих).

Для решения этих задач применен метод построения множества Парето [11, 12]. Обобщенная целевая функция: $P(\bar{x}, \bar{\lambda}) = \lambda_i \cdot F_1 + (1 - \lambda_i) \cdot (-f_1)$, где $\lambda_i \in [0, 1]$, F_1 и f_1 - обезразмеренные функции для F и f . Результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4 - Образ множества Парето для задачи распределения бригад

Table 4 - The Pareto set for the crew assignment problem

λ	$F(\bar{x})$	$f(\bar{x})$	$P(\bar{x}, \bar{\lambda})$
0	100	18360	18360
0,1	90	21563	19415,7
0,2	85	22638	18127,4
0,3	70	20892	14645,4
0,4	60	19312	11611,2
0,5	54	18879	9466,5
0,6	48	17154	6890,4
0,7	40	15573	4699,9
0,8	36	14686	2966
0,9	30	12875	1314,5

По данным табл. 4 в пространстве критериев строится образ множества Парето. Решения, полученные методом главного критерия, входят в это множество как крайние значения (при $\lambda=0$ и $\lambda=1$). Изучая это множество, ЛПР может выбрать наиболее подходящий вариант, балансирующий между затратами и охватом объектов рабочими. Как отмечают в работах [6, 11, 14], такой подход позволяет лицу, принимающему решение, осознанно выбирать компромисс между противоречивыми целями.

Заключение

Разработанная информационная технология обеспечивает автоматизированное решение комплексной задачи оптимального размещения строящихся промышленных предприятий (строительной отрасли) и обеспечения их рабочей силой. Ее применение позволяет:

- снизить затраты на строительство производственных мощностей и логистику за счет выбора оптимальных локаций и маршрутов (в рассмотренном примере экономия составила более 1400 млн. у.е.);
- эффективно распределять трудовые ресурсы, находя баланс между минимизацией транспортных издержек и максимальной занятостью бригад;
- предоставить лицу, принимающему решение, набор компромиссных вариантов (множество Парето) для выбора стратегии, соответствующей текущим приоритетам проекта.

Реализация в виде веб-приложения делает информационную технологию доступной для широкого круга строительных и проектных организаций, повышая их конкурентоспособность за счет применения современных методов математического моделирования и

программирования, подробно рассмотренных в работах [6, 7, 11]. Рассмотренный пример показал эффективность информационных технологий при реализации конкретных проектов размещения промышленных предприятий и решения подобных задач.

Литература

1. Строительство завода [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://spravochnick.ru/arhitektura_i_stroitelstvo/stroitelstvo_zavoda/ (дата обращения: 15.04.2025).
2. Промышленные здания // Большая советская энциклопедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/124306/Промышленные> (дата обращения: 15.04.2025).
3. Коллинсон, Джон. Кирпичная кладка. Полное руководство / Джон Коллинсон; пер. с англ. А.Н. Гылыгина (АСТ, Москва, 2015).
4. Производство кирпича: технология изготовления, состав, виды и разновидности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kakdelayut.ru/materialy/stroitelnye-materialy/kipich/> (дата обращения: 21.04.2025).
5. А.А. Кизим, К.А. Кизим, И.Л. Еременко, Инвестиционное сопровождение логистических проектов (Наука и образование, Москва, 2013).
6. А. Кофман, А. Анри-Лабордер, Методы и модели исследования операций. Целочисленное программирование (Мир, Москва, 1977).
7. А.А. Яблонский, А.А. Кисилев, Л.В. Примак, Математические методы управления в строительстве: монография (ЯГТУ, Ярославль, 2012).
8. К.А. Гуреев, М.Л. Солдатов, Управление строительством в современных условиях развития экономики России, Журнал прикладных исследований. 8, №1, 44-49 (2022).
9. А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн, Дискретное программирование (Наука, Москва, 1969).
10. С.В. Звонарев, Основы математического моделирования: Учебное пособие (Урал. ун-т, Екатеринбург, 2019).
11. Ф.Г. Ахмадиев, Р.Ф. Гиззятов, Р.М. Гильфанов Математическое моделирование. Методы оптимизации. Вычислительный эксперимент: Учебное пособие (АН РТ, Казань, 2001).
12. П.А. Богданова, Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений, Инновационные аспекты развития науки и техники: Материалы IX Международной научно-практической конференции. 153-157 (2021).
13. Ф.Г. Ахмадиев, Некоторые задачи многокритериальной оптимизации технологических процессов, Теоретические основы химической технологии. 48, №5, 518-526 (2012).
14. Н.Н. Моисеев Математические задачи системного анализа (Наука, Москва, 1981).
15. Ф.Г. Ахмадиев, И.В. Маланичев, Популяционные алгоритмы структурно-параметрической оптимизации в строительном проектировании, Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 44, №2, 215-222 (2018).
16. О.Ю. Михальченко, Бифуркации в календарно-сетевом планировании строительных проектов: методы прогнозирования и адаптивного управления, Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 71, №1, 122-129 (2025).
17. С.В. Ключев, А.В. Ключев, Оптимальное проектирование стержневой пространственной конструкции, Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 7, №1, 17-22 (2007).

References

1. Plant Construction [Online] – Available at: https://spravochnick.ru/arhitektura_i_stroitelstvo/stroitelstvo_zavoda/ (accessed April 15, 2025).

2. Industrial Buildings // Great Soviet Encyclopedia [Electronic resource] – Access mode: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/124306/Промышленные> (accessed: 04/15/2025).
3. Collinson, John. Brickwork: A Complete Guide / John Collinson; trans. from English by A.N. Gyligina (AST, Moscow, 2015).
4. Brick Production: Manufacturing Technology, Composition, Types, and Varieties [Electronic resource] – Available at: <https://kakdelayut.ru/materialy/stroitelnye-materialy/kirpich/> (accessed: 04/21/2025).
5. A.A. Kizim, K.A. Kizim, I.L. Eremenko, Investment Support for Logistics Projects (Science and Education, Moscow, 2013).
6. A. Kofman, A. Henri-Labordère, Methods and Models of Operations Research. Integer Programming (Mir, Moscow, 1977).
7. A.A. Yablonsky, A.A. Kiselev, L.V. Primak, Mathematical Methods of Management in Construction: Monograph (YAGTU, Yaroslavl, 2012).
8. K.A. Gureev, M.L. Soldatov, Construction Management in the Context of Russia's Modern Economic Development, Journal of Applied Research. **8**, No. 1, 44–49 (2022).
9. A.A. Korbut, Yu.Yu. Finkelstein, Discrete Programming (Nauka, Moscow, 1969).
10. S.V. Zvonarev, Fundamentals of Mathematical Modeling: Textbook (Ural University, Yekaterinburg, 2019).
11. F.G. Akhmadiev, R.F. Gizzyatov, R.M. Gilfanov, Mathematical Modeling. Optimization Methods. Computational Experiment: Textbook (Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 2001).
12. P.A. Bogdanova, Review of Multi-Criteria Optimization Methods in Decision-Making Problems, Innovative Aspects of Science and Technology Development: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. 153–157 (2021).
13. F.G. Akhmadiev, Some Problems of Multi-Criteria Optimization of Technological Processes, Theoretical Foundations of Chemical Technology. **48**, No. 5, 518–526 (2012).
14. N.N. Moiseev, Mathematical Problems of System Analysis (Nauka, Moscow, 1981).
15. F.G. Akhmadiev, I.V. Malanichev, Population-based Algorithms for Structural-Parametric Optimization in Construction Design, Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. **44**, No. 2, 215–222 (2018).
16. O.Yu. Mikhailchenko, Bifurcations in Schedule-Network Planning of Construction Projects: Methods of Forecasting and Adaptive Control, Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. **71**, No. 1, 122–129 (2025). S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, Optimal Design of a Spatial Frame Structure, Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. **7**, No. 1, 17–22 (2007).

© **Ф. Г. Ахмадиев** – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Информационных систем и технологий (ИСТ), Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), Казань, Россия, Akhmadiev@kgasu.ru; **А. А. Лапко** – магистр гр. 23СМ15, КГАСУ, Akhmadiev@kgasu.ru; **Р. А. Галимов** – кандидат технических наук, доцент кафедры ИСТ, КГАСУ, iplan@list.ru.

© **F. G. Akhmadiev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the department of Information Systems and Technologies (IST), Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russia, Akhmadiev@kgasu.ru; **A. A. Lapko** - Student of group 23SM15, KSUAE, Akhmadiev@kgasu.ru; **R. A. Galimov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the IST department, KSUAE, iplan@list.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 29.04.26.

Дата принятия рукописи в печать – 10.05.26.