

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.7:004.942

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013

## Планирование системы снабжения строительства в стесненных условиях методом динамического программирования

Ярослава Дмитриевна Агеева<sup>1</sup>, Юрий Александрович Чиркунов<sup>1</sup>,  
Азарий Абрамович Лапидус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);  
г. Новосибирск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет Московский государственный  
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Применение метода динамического программирования широко используется для решения оптимизационных задач в строительстве. В зависимости от сложности проекта и условий при возведении зданий и сооружений принятие оптимальных решений может потребовать анализа большого количества данных и вариантов. Динамическое программирование позволяет рассмотреть задачу оптимизации как последовательность подзадач, которые могут быть решены по отдельности и затем объединены в общее решение. Это позволяет упростить процесс планирования и управления проектом, что является актуальным для принятия организационно-технологических решений при материально-техническом снабжении строительства в условиях плотной городской застройки, а также для повышения эффективности и конкурентоспособности строительной отрасли в целом.

**Материалы и методы.** В исследовании применяется метод математической формализации условий, эффективного снабжения ресурсами, метод динамического программирования и метод графовой интерпретации результатов.

**Результаты.** Произведена оптимизация системы снабжения строительного производства при многопоточной организации работ, на основе результатов оптимизации было определено оптимальное распределение ресурсов и построен сетевой график движения грузопотоков на протяжении рассматриваемого этапа возведения здания. Разработан алгоритм планирования графика поставок при поточном способе доставки ресурсов на строительную площадку.

**Выводы.** При организации ресурсообеспечения строительно-монтажных работ в стесненных условиях важно учитывать ряд ограничений, вызванных данными условиями. Сокращение складских запасов является критическим условием для поддержания системы снабжения в бездефицитном положении. Кроме того, при поточном методе строительства есть риск повышения складских запасов ввиду динамики спроса на материалы и оборудование в то время, когда работы ведутся параллельно. Применение метода динамического программирования позволяет на этапе планирования избежать возникновения дефицита и превышения максимального запаса материальных ресурсов и выбрать их оптимальное распределение на рассматриваемом этапе строительно-монтажных работ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** динамическое программирование в строительстве, строительство в стесненных условиях, математическая формализация производственных ограничений, минимизация издержек снабжения, принцип оптимальности Беллмана, управление снабжением

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Агеева Я.Д., Чиркунов Ю.А., Лапидус А.А. Планирование системы снабжения строительства в стесненных условиях методом динамического программирования // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 2001–2013. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013

Автор, ответственный за переписку: Ярослава Дмитриевна Агеева, ya.ageyeva@sibstrin.ru.

## Planning of construction supply system in constrained conditions using the dynamic programming method

Yaroslava D. Ageeva<sup>1</sup>, Yuri A. Chirkunov<sup>1</sup>, Azariy A. Lapidus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin);  
Novosibirsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The application of the dynamic programming method is widely used to solve optimization problems in construction. Depending on the complexity of the project and the conditions during the construction of buildings and structures,

making optimal decisions may require the analysis of a large amount of data and options. Dynamic programming allows you to consider an optimization problem as a sequence of subproblems that can be solved separately and then combined into an overall solution. This makes it possible to simplify the process of planning and project management, which is relevant for making organizational and technological decisions in the material and technical supply of construction in dense urban areas, as well as for increasing the efficiency and competitiveness of the construction industry as a whole.

**Materials and methods.** The study uses the method of mathematical formalization of conditions, efficient supply of resources, the method of dynamic programming and the method of graph interpretation of results.

**Results.** The supply system for construction production was optimized for multi-threaded organization of work; based on the optimization results, the optimal distribution of resources was determined and a network diagram of the movement of cargo flows was constructed during the considered stage of building construction. An algorithm was developed for planning the supply schedule for the continuous method of delivering resources to the construction site.

**Conclusions.** The organization of resource support for construction and installation work in cramped conditions must take into account a number of restrictions caused by these conditions. Reducing inventory is critical to maintaining a stock-free supply chain. In addition, with the continuous construction method, there is a risk of increasing inventory due to the dynamics of demand for materials and equipment while work is carried out in parallel. The use of the dynamic programming method made it possible at the planning stage to avoid the occurrence of shortages and exceeding the maximum stock of material resources and to select their optimal distribution at the considered stage of construction and installation work.

**KEYWORDS:** dynamic programming in construction, construction in constrained conditions, mathematical formalization of production constraints, minimization of supply costs, Bellman's optimality principle, supply management

**FOR CITATION:** Ageeva Ya.D., Chirkunov Yu.A., Lapidus A.A. Planning of construction supply system in constrained conditions using the dynamic programming method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):2001-2013. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013 (rus.).

*Corresponding author:* Yaroslava D. Ageeva, ya.ageyeva@sibstrin.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших компонентов бесперебойного ведения строительно-монтажных работ (СМР) является эффективное планирование поставок материально-технических ресурсов, однако, ввиду влияния множества факторов, обусловленных спецификой строительного производства, необходимо учитывать сроки выполнения работ и доставки материалов, их качество, стоимость, а также возможные изменения в проекте, которые могут повлиять на потребность в ресурсах. Кроме того, необходимо учитывать локальные условия и доступность ресурсов в конкретном регионе, а также потенциальные риски, связанные с транспортировкой и хранением материалов.

Задача планирования поставок усложняется из-за влияния на строительное производство условий стесненности, связанных с нехваткой места для размещения строительных материалов и оборудования, и особенностей выполнения погрузочно-разгрузочных операций. В связи с этим возникает необходимость оптимизации планирования поставок материально-технических ресурсов с учетом всех ограничений, вызванных ведением работ в условиях плотной городской застройки, чтобы минимизировать риски, связанные с задержкой и некомплектной поставкой.

Экономико-математические методы могут быть применены в планировании движения грузопотоков в строительстве для оптимизации процесса и снижения затрат [1]. При создании математико-кибернетической модели необходимо своевременно оценивать ее адаптивность к поставленным задачам и влияющим факторам.

Будучи одним из крупнейших субъектов конечного потребления материальных ресурсов, строительный комплекс в наибольшей степени должен быть

заинтересован в эффективных формах их приобретения и рациональном использовании [2]. Обеспечение наиболее продуктивного управления грузопотоками является основной целью логистических процессов в строительстве, однако, ввиду отраслевых особенностей, которые вызваны локализованным характером производства, возникает потребность в большей мобильности материально-технических ресурсов в ходе возведения зданий и сооружений [3, 4].

Проблемой осуществления строительно-монтажных работ в условиях плотной городской застройки является отсутствие единых правил и норм, применимых ко всем видам строительства, это вынуждает учитывать все особенности выполнения работ на каждом отдельном строительном объекте, что, в свою очередь, ведет к увеличению издержек производства [5].

В работе [6] представлено сравнение подходов линейного и обратного динамического программирования для решения задач оптимизации эксплуатации системы в течение длительного периода с учетом ряда ограничений. Было выявлено, что динамическое программирование имеет ряд преимуществ: сокращение времени вычисления, применимость для долгосрочного планирования, возможность решения более широкого круга задач.

Решение задач оптимизации методом динамического программирования было впервые предложено Р. Беллманом. Оптимальное поведение системы характеризуется тем, что, независимо от начального состояния и принятого решения в начальный момент, последующие решения должны быть оптимальными относительно состояния, возникающего после первого решения [7]. Ввиду отсутствия строгой математической формулировки в основе методологии динамического программирования данный подход

позволяет разработать оптимизационную модель, подходящую для решения конкретной пользовательской задачи [8]. При грамотном определении системообразующих показателей, переменных значений и ограничений с установкой общего параметра оптимальности (данным параметром является минимизация издержек производства) допустимо разработать оптимальную модель ресурсоснабжения строительства в условиях стесненности.

Эффективное планирование на основе модели динамического программирования во многом заключается в том, насколько точно будет предсказано поведение рассматриваемой системы в определенный момент времени на этапе планирования [9]. Это наиболее актуально для управления ресурсообеспечением строительного производства, при котором важно учитывать множество факторов и возможных сценариев развития событий.

Основная идея алгоритма динамического программирования включает в себя три аспекта [10]:

1. Оптимальная подструктура. Этот аспект означает, что оптимальное решение задачи может быть разбито на оптимальные решения ее подзадач. Другими словами, если у нас есть задача, которую мы можем разбить на более мелкие подзадачи, и оптимальное решение для всей задачи зависит от оптимальных решений этих подзадач, то говорят, что у задачи есть оптимальная подструктура.

2. Рекуррентное соотношение. Это отношение между решениями более крупных и более мелких подзадач. Рекуррентное соотношение позволяет нам выразить оптимальное решение задачи через оптимальные решения ее подзадач. Это помогает нам строить алгоритмы динамического программирования, используя рекурсивные вызовы или итеративные методы.

3. Перекрывающиеся подпроблемы. Этот аспект означает, что в процессе решения задачи возникают одни и те же подзадачи несколько раз. При использовании динамического программирования мы можем сохранять результаты уже решенных подзадач и использовать их для решения новых подзадач, чтобы избежать повторных вычислений.

Современные исследования в области динамического программирования направлены на разработку математических моделей с целью поиска наиболее оптимальной стратегии управления сложными системами, которые можно разбить на отдельные этапы. Примеры применения данного подхода в строительной отрасли отражены в исследованиях, направленных на оптимизацию планировки строительной площадки и компоновки временных сооружений [11], повышение эффективности транспортно-логистического управления при распределении ресурсов [12], контроля и управления профессиональными рисками [13], определение минимального времени выполнения работ при планировании сетевого графика

технологического процесса на основе графовой интерпретации [14, 15].

Целью исследования является разработка алгоритма планирования снабжения строительства с ограничением хранения материальных ресурсов на строительной площадке — основе применения метода динамического программирования для определения оптимальных значений параметров системы снабжения в заданных граничных условиях.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие задачи:

1. Определить факторы стесненности, которые могут выступать в роли ограничений в ходе моделирования системы управления снабжением.

2. Определить целевую функцию, отвечающую за оптимальность системы ресурсообеспечения строительного-монтажных работ.

3. Разработать алгоритм планирования снабжения на основе решения задачи минимизации затрат и определения оптимальных значений параметров системы в заданных граничных условиях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача оптимального планирования поставок сводится к определению некоторых значений объемов поставки строительных материалов за фиксированные промежутки времени, при которых запас материалов в течение всего периода становится оптимальным относительно выбранного критерия оптимальности.

Основным критерием оптимальности является поставка материалов через заданные временные интервалы в объеме, при котором состояние запасов при их потреблении не переходит в дефицит и вместе с тем не происходит накопление ресурсов на строительной площадке, что будет снижать эффективность работ ввиду стесненных условий СМР.

В задачах оптимизации с ограничениями целевая функция может быть выражена как сумма функций затрат [16]. В математической постановке задачи формулируется следующим образом: требуется найти неотрицательные значения объемов поставки и складских запасов, которые будут минимизировать функцию:

$$F(q_k^s, q_k) = \sum_{k=1}^n C_k^s \cdot q_k^s + C_k \cdot q_k \rightarrow \min, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $q_k^s$  — уровень запасов на шаге  $k$ , т;  $q_k$  — суммарный объем поставки на шаге  $k$ ;  $C_k^s$ ,  $C_k$  — затраты на поставку и хранение на шаге  $k$ , определяемые согласно тарифам оплаты труда и транспортным расходам за единицу груза, руб.

В данном исследовании рассматриваются наиболее контролируемые факторы стесненности, связанные с ограничением объемов хранения и единовременного нахождения грузовых транспортных средств на строительной площадке. Минимальный объем

хранения был принят исходя из суточного потребления ресурсов для выполнения работ. Превышение данного объема означает пополнение резервных запасов на складах вне границ строительной площадки, что позволит определить требуемые размеры площадей складов временного хранения.

На основе рассчитанных объемов поставки определяется время простоя транспортного средства под разгрузкой на строительной площадке и на каждом шаге принимается минимальное из возможных вариантов, соответствующих заданным критериям оптимальности. Простой транспортного средства, связанные с проведением погрузочно-разгрузочных операций, являются важным фактором влияния на качество снабжения [17]. Так как простои могут возникать ввиду условий внешней среды, не зависящих от деятельности грузополучателя в лице строительной компании, важно обеспечить наибольший контроль управляемыми факторами.

Таким образом были выделены следующие условия оптимальности:

$$q_{\text{сут}} \leq q_k^s \leq q_{\text{max}}^s; \quad (2)$$

$$q_k^s > q_{\text{сут}} \rightarrow q_k^g = q_k^s - (q_{\text{сут}} \cdot i_{k+1}); \quad (3)$$

$$q_k^s \leq 0 \rightarrow q_{k+1}^s = q_k^s + \Delta(q_k^s - q_{\text{сут}}) - q_{\text{сут}} T_k + q_k \cdot n_k; \quad (4)$$

$$T_k^p = H_{\text{вр}}^{\text{н-р}} \cdot q_k \cdot n_k, \quad (5)$$

где  $q_{\text{сут}}$  — суточный объем потребления ресурсов, т;  $q_{\text{max}}^s$  — максимально допустимый объем хранения, т;  $q_k^s$  — гарантийный запас, зафиксированный на шаге  $k$ , т;  $i_{k+1}$  — интервал между поставками на следующем шаге, относительно шага  $k$ , дн;  $T_k$  — продолжительность работ на шаге  $k$ , дн;  $n_k$  — число рейсов грузового транспорта, согласно заданному интервалу на шаге  $k$ , шт;  $H_{\text{вр}}^{\text{н-р}}$  — норма времени погрузочно-разгрузочных работ для заданного типа (класса) груза, чел.-час.

Результаты представляются с помощью метода динамического планирования на каждом шаге  $k$  с последующим построением сетевого графика на основе метода графовой интерпретации математических моделей.

Потребность в строительных материалах определяется при планировании строительно-монтажных работ, на каждый из планируемых периодов, количество потребных материалов не остается неизменным от периода к периоду, поэтому спрос является детерминированным. В этом заключается нестационарность спроса. В связи с нестационарностью спроса метод дифференцирования для решения данной задачи неприменим. Для нахождения минимума функции (1) необходимо использовать методику динамического программирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для начала планирования календарный график СМР разделяется на вехи, каждая из которых будет иметь одно из следующих значений: момент увеличения количества рабочих потоков или момент перехода к следующему технологическому этапу возведения здания. Оба данных способа могут предполагать планирование графика снабжения при многономенклатурном поступлении ресурсов, однако в таком случае рекомендуется выполнять укрупненный расчет исходя из возможности совместной доставки грузов в заданном количестве через определенные временные промежутки. Разделенные этапы должны быть упорядочены или поддаваться сортировке, в противном случае задача не может быть решена, так как различные объективные ситуации, в которых развивается проблема на каждом этапе, выражаются в разных состояниях [18].

В данном исследовании рассматривается прямой метод решения задачи оптимизации с делением рассматриваемого этапа СМР согласно изменению количества потоков работ. Прямой метод решения задачи применяется в том случае, если известно состояние системы в конечный момент  $n$ , в данном случае запасы должны быть израсходованы в полном объеме [19]. Если известно состояние запасов в начальный и в конечный момент рассматриваемого этапа возведения здания, то можно использовать как прямой метод решения, так и обратный. При обратном методе определяется характер движения грузопотоков исходя из знания объема подготовительного запаса ресурсов, который нужно иметь на время начала работ.

На первом шаге функция представляет собой сумму затрат на погрузочно-разгрузочные операции, транспортировку груза и хранение на момент наступления первой вехи графика снабжения.

$$F_1^*(q_1^s) = \min\{C_1(q_0^s, q_1^s)\}, \quad (6)$$

где  $q_1^s$  — уровень запасов в момент  $k = 1$ , т;  $C_1$  — затраты на хранение и поставку в момент  $k = 1$ , определяемые согласно тарифам оплаты труда и транспортным расходам за единицу груза, руб;  $q_0^s$  — уровень запасов в момент начала работ, т;  $q_1$  — объем поставки в момент  $k = 1$ , т.

На последнем шаге условная целевая функция будет представлена как сумма значений функций затрат на шаге  $k$  и на предыдущем шаге  $k-1$ . На шаге  $k$  известен требуемый уровень запасов для удовлетворения условия полного расхода основных и резервных запасов к концу строительного процесса:

$$F_k^*(q_k^s) = \min\{f_k(q_{k-1}^s, q_k^s) + F_{k-1}^*(q_{k-1}^s)\}. \quad (7)$$

Переменные, обозначающие оптимальный размер поставки, связаны с уровнем запасов уравнением состояния, соответственно на шаге  $k-1$ , где условие расхода также привязывается к уравнению состояния, накладывая на величину уровня запасов в мо-



мент  $k-1$  условие неотрицательности (8), что, в свою очередь, ведет к ограничениям оптимального объема поставки (9). Кроме того, функция затрат (10) будет также зависеть от данного неравенства:

$$q_{k-1}^s = q_k^s - q_k + q_k^c \geq 0; \quad (8)$$

$$q_k \leq q_k^s + q_k^c; \quad (9)$$

$$C_k(q_{k-1}^s, q_k) = C_k(q_k^s - q_k + q_k^c, q_k), \quad (10)$$

где  $q_k^c$  — объем потребления ресурсов, зафиксированный в момент времени от  $k-1$  до  $k$ .

Если рассмотреть подробно каждый этап (рис. 1), становится ясно, что при переходе системы к многопоточному ведению строительства плановая интенсивность потребления увеличивается на величину, равную количеству параллельных потоков. Для того чтобы система не переходила в дефицитное состояние, было принято решение сокращать интервал между поставками таким образом, чтобы каждая очередная поставка с требуемым объемом материальных ресурсов не превышала допустимый максимальный объем хранения. Сокращение интервала между поставками, в свою очередь, приводит к повышению стоимости грузовых операций. Таким образом, дополнительной задачей оптимизации является определение такого объема  $q_k$  на границе перехода к многопоточному ведению строительства, который бы позволил обеспечить минимально возможную стоимость транспортных расходов и расходов, связанных с погрузочно-разгрузочными работами.

Применение системы снабжения с фиксированным интервалом между заказами в данном случае является затруднительным, так как если доставка ресурсов не была выполнена на границе перехода к многопоточному строительству, увеличение интенсивности потребления ведет к раннему наступлению момента расхода резервных запасов, а соответственно, к переходу системы в дефицитное состояние. При таком характере движения грузопотоков требуется включать внеплановое пополнение резервных запасов для поддержания бесперебойного ведения строительства.

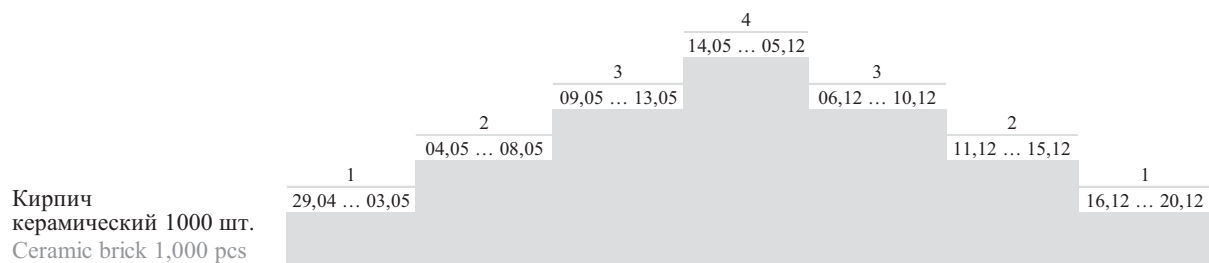
Гарантийный (страховой) объем хранения обычно не изменяется в течение этапа строительства при осуществлении поставок в срок и представляет собой количество требуемых строительных материалов и конструкций, хранимых в соответствии с особенностями складирования на строительной площадке. Однако в данном случае для каждого отдельного шага минимальный гарантийный запас умножается на количество параллельно идущих потоков. При ведении строительства в стесненных условиях данный показатель играет большую роль, так как при ограничении площадей для хранения материалов важно не превышать заданный объем резервного хранения во избежание перегрузки строительной площадки, а также в случае определения площадей складирования, получаемых путем эксплуатации дополнительных складских помещений вне границ строительного объекта. Наличие заранее определенных объемов страховых запасов позволит предупредить возникновение неритмичности поступления ресурсов на строительную площадку [20].

В качестве примера рассматривается поставка кирпича полнотелого для выполнения кирпичной кладки наружных стен, согласно обоснованию ГЭСН 08-02-001<sup>1</sup>. В табл. 1 представлена калькуляция параметров системы снабжения с фиксированным объемом заказа (ФОЗ), нормативные единицы измерения соответствующих материальных ресурсов были переведены в тонны для дальнейшего определения параметров, связанных с погрузочно-разгрузочными работами и транспортировкой груза.

Для каждого шага  $k$  составляются расчетно-параметрические таблицы. Для упрощения расчета объемы хранения и поставки материальных ресурсов были сокращены на величину наибольшего общего делителя, который равен минимальному суточному потреблению.

При применении данной методики расчета допускается приведение единиц к общей системе исчисления, рассматривая движение грузопотоков по массе, количеству одновременно поступающих

<sup>1</sup> ГЭСН 08-02-001. Кладка стен из кирпича. URL: <https://cs.smetnoedelo.ru/gesn2/tabl-08-02-001/>



**Рис. 1.** График изменения объема потребления ресурсов (сроки выполнения работ по кирпичной кладке стен с 29 апреля по 20 декабря)

**Fig. 1.** The schedule of changes in the volume of resource consumption (deadlines for the brickworks on the walls from April 29th to December 20th)

Табл. 1. Калькуляция параметров системы снабжения ФОЗ при бездефицитном потреблении материальных ресурсов  
Table 1. Calculation of the parameters of a supply system with a fixed order volume with a deficit-free consumption of material resources

|                                                                          |                              |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Объем работ<br>Scope of work                                             | Обоснование<br>Justification | 08-02-001                            |
|                                                                          | Ед. изм.<br>Unit             | м³<br>m³                             |
|                                                                          | Количество<br>Quantity       | 2219,734                             |
| Класс груза<br>Class of cargo                                            |                              | 1                                    |
| Наименование ресурса<br>Resource                                         |                              | Кирпич керамический<br>Ceramic brick |
| Ед. изм.<br>Unit                                                         |                              | 1000 шт.<br>1,000 pcs                |
| Расстояние доставки<br>Delivery supply                                   | км<br>km                     | 20,00                                |
| Нормативная продолжительность хранения<br>Regulatory duration of storage | дней<br>days                 | 5,00                                 |
| Максимальный объем хранения<br>Maximum storage volume                    | Ед. изм.<br>Unit             | 26,90                                |
|                                                                          | т<br>t                       | 121,05                               |
| Продолжительность потребления<br>Duration of consumption                 | дней<br>days                 | 236,00                               |
| Минимальное суточное потребление<br>Minimum daily consumption            | Ед. изм.<br>Unit             | 5,38                                 |
|                                                                          | т<br>t                       | 24,21                                |
| Максимальное суточное потребление<br>Maximum daily consumption           | Ед. изм.<br>Unit             | 21,52                                |
|                                                                          | т<br>t                       | 96,84                                |
| Интервал между поставками<br>Interval between supply                     | дней<br>days                 | 0–5                                  |
| Плановый объем поставки<br>Planned scope of supply                       | т<br>t                       | 24,21                                |
| Погрузочно-разгрузочные работы<br>Loading-unloading operations           | руб/т<br>rub/t               | 944,48                               |
| Тариф на доставку ед. груза<br>Unit delivery cargo price                 | руб/т<br>rub/t               | 448,05                               |

на площадку или на склад временного хранения за-груженных кузовов транспортного средства и т.д.

В табл. 2 представлены результаты расчета требуемого количества рекуррентных соотношений на каждом шаге  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $n = 7$ . Для каждого значения  $q_k^s$  и  $q_k$  рассчитываются затраты на транспортировку, хранение и погрузочно-разгрузочные операции. Затраты на хранение материалов определяются на основе средневзвешенного значения объема хранения  $q_k^s$ , так как это позволяет учесть все изменения в объеме запасов материалов за период времени от шага  $k-1$  до шага  $k$ . Средневзвешенное значение учитывает как начальные, так и конечные запасы материалов, что позволяет более точно определить средний объем материалов, хранимых на складе за определенный период. В данной таблице производится условная оптимизация, после которой

на основании выбранных минимальных значений, соответствующих граничным условиям, осуществляется переход к безусловной оптимизации. Для первого шага оптимизации затраты на транспортировку и погрузочно-разгрузочные работы рассчитываются исходя из условия (9) и значения суммы уровня объема хранения и объема потребления, в данном промежутке (при условии заданного объема хранения в начале работ и объема потребления за заданный период времени) оптимальный объем поставки будет определяться по формуле:

$$q_1 = q_1^s - q_0^s + q_{0-1}^c.$$

(11)

Значение числа рейсов  $n_k$  в сторону строительной площадки округляется до целого в меньшую сторону.

При возникновении отрицательного значения уровня хранения  $q_{k+1}^s$  на этапе планирования в случае

Табл. 2. Расчет плановых параметров системы снабжения для определения условных оптимальных значений  
Table 2. Calculation of planned parameters of the supply system to determine the conditional optimal values

| $q_0^x, \text{ т / т}$ | $q_1^x, \text{ т / т}$ | $q_{0-1}^n, \text{ т / т}$ | $q_1, \text{ т / т}$ | $i_1, \text{ дн.}$<br>days | $n_1, \text{ шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_1, \text{ т / т}$ | $\overline{q_1^x}, \text{ т / т}$ | $C_x(\overline{q_1^x}),$<br>руб. / rub | $C(q_1^x + q_{0-1}^n),$<br>руб. / rub | $F_1(q_1^x),$<br>руб. / rub      |
|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 5,00                   | 5,00                   | 5,00                       | 1,00                 | 1,00                       | 5,00                      | 5,00                        | 7,50                              | 750,00                                 | 2000,00                               | 2750,00                          |
|                        | 4,00                   |                            | 2,00                 | 2,00                       | 2,00                      | 4,00                        | 7,00                              | 700,00                                 | 1600,00                               | 2300,00                          |
|                        | 3,00                   |                            | 3,00                 | 3,00                       | 1,00                      | 3,00                        | 6,50                              | 650,00                                 | 1200,00                               | 1850,00                          |
|                        | 4,00                   |                            | 4,00                 | 4,00                       | 1,00                      | 4,00                        | 7,00                              | 700,00                                 | 1600,00                               | 2300,00                          |
|                        | 5,00                   |                            | 5,00                 | 5,00                       | 1,00                      | 5,00                        | 7,50                              | 750,00                                 | 2000,00                               | 2750,00                          |
| $q_1^x, \text{ т / т}$ | $q_2^x, \text{ т / т}$ | $q_{1-2}^n, \text{ т / т}$ | $q_2, \text{ т / т}$ | $i_2, \text{ дн.}$<br>days | $n_2, \text{ шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_2, \text{ т / т}$ | $\overline{q_2^x}, \text{ т / т}$ | $C_x(\overline{q_2^x}),$<br>руб. / rub | $C(q_2),$<br>руб. / rub               | $F_2(q_2^x, q_2),$<br>руб. / rub |
| 5,00                   | 5,00                   | 10,00                      | 1,00                 | 0,50                       | 10,00                     | 10,00                       | 10,00                             | 1000,00                                | 2000,00                               | 5750,00                          |
|                        | 4,00                   |                            | 2,00                 | 1,00                       | 5,00                      | 10,00                       | 9,00                              | 900,00                                 | 2000,00                               | 5200,00                          |
|                        | 2,00                   |                            | 3,00                 | 1,50                       | 3,00                      | 9,00                        | 7,50                              | 750,00                                 | 1800,00                               | 4400,00                          |
|                        | 2,00                   |                            | 4,00                 | 2,00                       | 2,00                      | 8,00                        | 8,00                              | 800,00                                 | 1600,00                               | 4700,00                          |
|                        | 5,00                   |                            | 5,00                 | 2,50                       | 2,00                      | 10,00                       | 10,00                             | 1000,00                                | 2000,00                               | 5750,00                          |
| $q_2^x, \text{ т / т}$ | $q_3^x, \text{ т / т}$ | $q_{2-3}^n, \text{ т / т}$ | $q_3, \text{ т / т}$ | $i_3, \text{ дн.}$<br>days | $n_3, \text{ шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_3, \text{ т / т}$ | $\overline{q_3^x}, \text{ т / т}$ | $C_x(\overline{q_3^x}),$<br>руб. / rub | $C(q_3),$<br>руб. / rub               | $F_3(q_3^x, q_3),$<br>руб. / rub |
| 5,00                   | 5,00                   | 15,00                      | 1,00                 | 0,33                       | 15,00                     | 15,00                       | 12,50                             | 1250,00                                | 3000,00                               | 10 000,00                        |
|                        | 3,00                   |                            | 2,00                 | 0,67                       | 7,00                      | 14,00                       | 11,00                             | 1100,00                                | 2800,00                               | 9100,00                          |
|                        | 2,00                   |                            | 3,00                 | 1,00                       | 5,00                      | 15,00                       | 9,50                              | 950,00                                 | 3000,00                               | 8350,00                          |
|                        | 3,00                   |                            | 3,00                 | 1,33                       | 3,00 + 1,00               | 16,00                       | 10,00                             | 1000,00                                | 3200,00                               | 8900,00                          |
|                        | 5,00                   |                            | 5,00                 | 1,67                       | 3,00                      | 15,00                       | 12,50                             | 1250,00                                | 3000,00                               | 10 000,00                        |
| $q_3^x, \text{ т / т}$ | $q_4^x, \text{ т / т}$ | $q_{3-4}^n, \text{ т / т}$ | $q_4, \text{ т / т}$ | $i_4, \text{ дн.}$<br>days | $n_4, \text{ шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_4, \text{ т / т}$ | $\overline{q_4^x}, \text{ т / т}$ | $C_x(\overline{q_4^x}),$<br>руб. / rub | $C(q_4),$<br>руб. / rub               | $F_4(q_4^x, q_4),$<br>руб. / rub |
| 00'5                   | 00'5                   | 824,00                     | 1,00                 | 0,25                       | 824,00                    | 824,00                      | 417,00                            | 41 700,00                              | 164 800,00                            | 216 500,00                       |
|                        | 00'3                   |                            | 2,00                 | 0,50                       | 412,00                    | 824,00                      | 415,00                            | 41 500,00                              | 164 800,00                            | 215 400,00                       |
|                        | 3,00                   |                            | 3,00                 | 0,75                       | 274,00 + 1,00             | 825,00                      | 414,50                            | 41 450,00                              | 165 000,00                            | 214 800,00                       |
|                        | 2,00                   |                            | 4,00                 | 1,00                       | 206,00                    | 824,00                      | 414,00                            | 41 400,00                              | 164 800,00                            | 215 100,00                       |
|                        | 00'5                   |                            | 5,00                 | 1,25                       | 164,00                    | 820,00                      | 415,00                            | 41 500,00                              | 164 000,00                            | 215 500,00                       |

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

| $q_4^x, \tau / t$ | $q_5^x, \tau / t$ | $q_{4-5}^n, \tau / t$ | $q_5, \tau / t$ | $i_5, \text{дн.}$<br>days | $n_5, \text{шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_5, \tau / t$ | $\overline{q_5^x}, \tau / t$ | $C_x(q_5^x),$<br>руб. / rub | $C(q_5),$<br>руб. / rub | $F_5(q_5^x, q_5),$<br>руб. / rub |
|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 5,00              | 5,00              | 15,00                 | 1,00            | 0,33                      | 15,00                    | 15,00                  | 12,50                        | 1250,00                     | 3000,00                 | 220 750,00                       |
| 3,00              | 2,00              |                       | 2,00            | 0,67                      | 7,00                     | 14,00                  | 10,00                        | 1000,00                     | 2800,00                 | 219 200,00                       |
| 2,00              | 2,00              |                       | 3,00            | 1,00                      | 5,00                     | 15,00                  | 9,50                         | 950,00                      | 3000,00                 | 218 750,00                       |
| 2,00              | 3,00              |                       | 4,00            | 1,33                      | 3,00 +<br>1,00           | 16,00                  | 10,00                        | 1000,00                     | 3200,00                 | 219 300,00                       |
| 1,00              | 1,00              | –                     | 5,00            | 1,67                      | 3,00                     | 15,00                  | 8,50                         | 850,00                      | 3000,00                 | 219 350,00                       |
| $q_5^x, \tau / t$ | $q_6^x, \tau / t$ | $q_{5-6}^n, \tau / t$ | $q_6, \tau / t$ | $i_6, \text{дн.}$<br>days | $n_6, \text{шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_6, \tau / t$ | $\overline{q_6^x}, \tau / t$ | $C_x(q_6^x),$<br>руб. / rub | $C(q_6),$<br>руб. / rub | $F_6(q_6^x, q_6),$<br>руб. / rub |
| 5,00              | 5,00              | 10,00                 | 1,00            | 0,50                      | 10,00                    | 10,00                  | 10,00                        | 1000,00                     | 2000,00                 | 223 750,00                       |
| 2,00              | 2,00              | –                     | 2,00            | 1,00                      | 5,00                     | 10,00                  | 7,00                         | 700,00                      | 2000,00                 | 221 900,00                       |
| 2,00              | 1,00              | –                     | 3,00            | 1,50                      | 3,00                     | 9,00                   | 6,50                         | 650,00                      | 1800,00                 | 221 200,00                       |
| 4,00              | 2,00              | –                     | 4,00            | 2,00                      | 2,00                     | 8,00                   | 7,00                         | 700,00                      | 1600,00                 | 221 600,00                       |
| 1,00              | 1,00              | –                     | 5,00            | 2,50                      | 2,00                     | 10,00                  | 6,00                         | 600,00                      | 2000,00                 | 221 950,00                       |
| $q_6^x, \tau / t$ | $q_7^x, \tau / t$ | $q_{6-7}^n, \tau / t$ | $q_7, \tau / t$ | $i_7, \text{дн.}$<br>days | $n_7, \text{шт.}$<br>pcs | $\Sigma q_7, \tau / t$ | $\overline{q_7^x}, \tau / t$ | $C_x(q_7^x),$<br>руб. / rub | $C(q_7),$<br>руб. / rub | $F_7(q_7^x, q_7),$<br>руб. / rub |
| 5,00              | 0,00              | 5,00                  | 0,00            | 0,00                      | 0,00                     | 0,00                   | 5,00                         | 500,00                      | 0,00                    | 224 250,00                       |
| 2,00              | 0,00              | –                     | 3,00            | 2,00                      | 1,00                     | 3,00                   | 3,50                         | 350,00                      | 600,00                  | 222 850,00                       |
| 1,00              | 0,00              | –                     | 4,00            | 3,00                      | 1,00                     | 4,00                   | 3,00                         | 300,00                      | 800,00                  | 222 300,00                       |
| 2,00              | 0,00              | –                     | 3,00            | 4,00                      | 1,00                     | 3,00                   | 3,50                         | 350,00                      | 600,00                  | 222 550,00                       |
| 1,00              | 0,00              | –                     | 4,00            | 5,00                      | 1,00                     | 4,00                   | 3,00                         | 300,00                      | 800,00                  | 223 050,00                       |



отсутствия резервных запасов требуется внести в расчет внеплановую поставку, равную принятому объему на данном шаге. В данном случае такой вариант решения не является оптимальным, так как при фактическом использовании графика в сопровождении строительства с заранее запланированными внеплановыми поставками контроль будет осуществляться не только за их исполнением, но и за непредвиденными изменениями графика снабжения, обусловленными внешними факторами строительного производства. Поэтому при планировании требуется максимально оптимизировать график, особенно это важно при долгосрочном планировании графика снабжения в случае многоменклатурных поставок.

В графовой интерпретации вершинами графа являются события, а ребра представляют собой управленческие взаимодействия [21]. Для построения сетевого графика в качестве вершин принимается уровень хранения ресурсов в момент  $k$ . График распределен по оси ординат согласно уровню хранения, по оси абсцисс — согласно продолжительности работ от  $k$  до  $k+1$ . Ребра графика представляют собой интервал между поставками, определяемый согласно продолжительности работ от  $k$  до  $k+1$  и числу полных рейсов до строительной площадки. В вершинах графика помимо номера оптимизируемого шага

указывается уровень хранения на настоящем шаге  $k$  и на следующем  $k+1$ . Значение уровня хранения на следующем шаге, отображаемое в текущем секторе, определяется исходя из минимального, но достаточного объема потребления для обеспечения бездефицитного движения грузопотоков. В нижнем секторе вершины указывается суммарный объем поставки ресурсов на рассматриваемом временном промежутке с пометкой о необходимости организации внеплановой поставки также для обеспечения бездефицитного движения грузопотоков. Конечной вершиной графика является точка, в которой завершается рассматриваемый этап возведения здания, а уровень хранения переходит к нулю. Сетевой график с указанием оптимального варианта распределения грузопотоков представлен на рис. 2.

На основе полученных данных был разработан алгоритм планирования оптимального графика снабжения строительного производства. Ввиду отсутствия ограничений на установку условий оптимальности задачи динамического программирования данный алгоритм может широко применяться в строительной отрасли, если на основные параметры оптимизации не накладывается условие целочисленности:

1. Анализ влияния факторов стесненности (возможность или невозможность хранения ресурсов

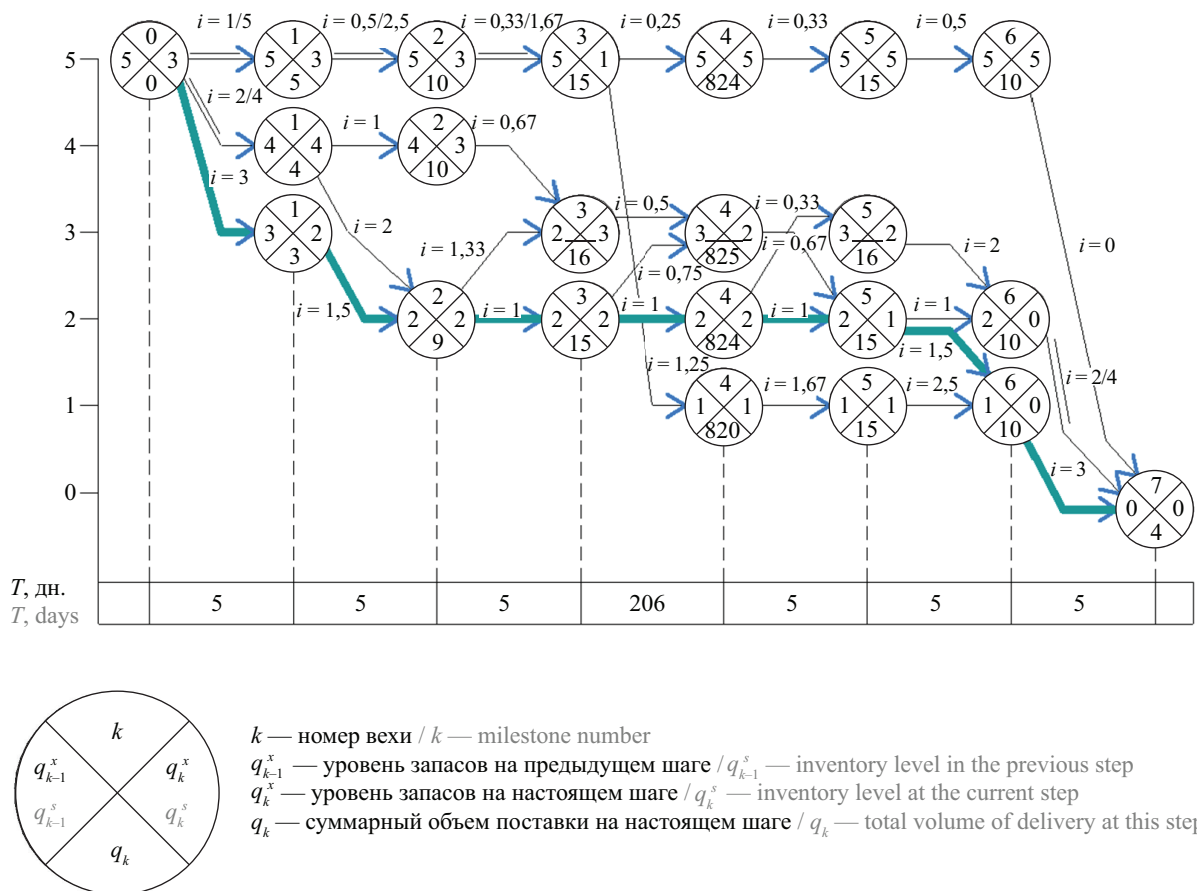


Рис. 2. Сетевой график поставки материальных ресурсов

Fig. 2. Network schedule for the supply of material resources

в границах строительной площадки и допустимый объем хранения).

2. Определение возможных состояний системы (на основе объема работ и календарного графика СМР определить объем потребления ресурсов).

3. Разделение календарного графика СМР на ве-хи (согласно уменьшению или увеличению количества рабочих потоков/смен технологических этапов возведения здания).

4. Определение целевой функции и граничных условий задачи оптимизации на основе известных факторов влияния и особенностей строительного производства.

5. Разработка стратегии оптимизации поставок материальных ресурсов с учетом сокращения интервала между поставками для предотвращения дефицитного состояния и минимизации стоимости операций.

6. Определение метода решения задачи оптимизации (прямая/обратная задача).

7. Построение оптимизационной задачи с решением  $k$ -числа рекуррентных соотношений, обусловленного количеством этапов, на которые был разделен процесс (этап) возведения здания.

8. Учет возможности внепланового пополнения резервных запасов для обеспечения ритмичного осуществления СМР при изменении интенсивности потребления ресурсов.

9. Построение сетевого графика снабжения с указанием всех возможных вариантов движения грузопотоков для дальнейшего применения в сопровождении СМР в качестве автоматизированного инструмента оперативного принятия организационных решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования был разработан алгоритм применения метода динамического программирования для долгосрочного планирования графика поставки материальных ресурсов на строительную площадку в стесненных условиях. Заключительным шагом алгоритма является построение сетевого параметрического графика движения грузопотоков для определения оптимального распределения ресурсов как на этапе планирования, так и при сопровождении СМР с возможностью внесения необходимых корректировок и последовательного пересчета будущих оптимальных значений.

Одним из факторов, которым подвержено строительство в условиях стесненности, является ограничение складских, заготовительных площадей, мест под осуществление погрузочно-разгрузочных операций, а также ограничение единовременного нахождения на строительной площадке грузовых транспортных средств. При полном анализе всех контролируемых

факторов, влияющих на строительное производство, определяются граничные условия решения задачи оптимизации. Основное условие — это поддержание объема производственных запасов на минимальном, но достаточном уровне, вместе с тем не превышая границу максимального объема ресурсов. При превышении границы максимального объема хранения формируется резервный запас, с помощью которого пополняются производственные запасы в течение осуществления СМР для предотвращения возникновения дефицита. Исходя из того, какой суммарный объем резервного запаса был получен на этапе планирования, делается вывод о необходимых мощностях складов временного хранения.

За оптимальность системы снабжения в целом отвечает целевая функция затрат на погрузочно-разгрузочные работы, транспортировку груза и хранение. Вместе с тем, если при решении рекуррентного соотношения на некотором шаге оптимизации было получено значение, которому соответствует минимальная стоимость, то это не говорит об оптимальности данного значения на протяжении всего рассматриваемого этапа СМР. Переход к многопоточному ведению работ приводит к нестационарному потреблению ресурсов (до рассмотрения менее контролируемых факторов, которые также могут повлиять на интенсивность потребления ресурсов), что исключает вариант снабжения мелкими партиями. Согласно расчетам в табл. 2, для рассматриваемого типа материальных ресурсов эффективными являются средние объемы поставки, которые позволяют накапливать резервный запас на этапах с одним/двумя параллельно идущими потоками (в случае, если его пополнение не предусмотрено на подготовительном этапе), а на этапах с максимальным числом параллельно идущих потоков расходовать накопленный резервный запас без необходимости увеличения объемов поставки, что, в свою очередь, приведет либо к увеличению числа грузовых транспортных средств, либо к уменьшению интервала между поставками (что также ведет к увеличению числа единовременного нахождения грузовых транспортных средств на строительной площадке).

В дальнейшем планируется рассмотреть более сложные системы снабжения с многоименными поставками, провести анализ сценариев развития событий и разработать порядок действий для их предупреждения на этапе планирования. Вместе с тем в будущих исследованиях требуется рассмотреть возможности автоматизации процесса планирования, используя данный метод оптимизации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Болодурина И.П., Спешников Е.А. Математические и инструментальные средства обеспечения интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению грузопотоками // Прикладная матема-

тика и вопросы управления. 2023. № 2. С. 93–107. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.09. EDN HILJFN.

2. Lamekhov V., Chervotenko E. Usage of dynamic programming method in transport and logistics centers

construction and development projects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In book: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Vol. 1115. Pp. 357–366. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_35

3. Дюкова О.М. Логистика строительства: современное понимание и тенденции // *Вестник УРАО*. 2017. № 4. С. 69–73. EDN OAGRQH.

4. Карпушкин И.Д. Актуальные вопросы логистики строительства на современном этапе // *Основы ЭУП*. 2023. № 2 (37). С. 95–99. DOI: 10.51608/23058641\_2023\_2\_95. EDN RQMEER.

5. Седов Д.С. Факторы стесненности в условиях плотной городской застройки // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4 (1). С. 171–174. EDN NEJDSH

6. Putz D., Schwabeneder D., Auer H., Fina B. A comparison between mixed-integer linear programming and dynamic programming with state prediction as novelty for solving unit commitment // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. Pp. 3–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106426

7. Mizutania E., Dreyfus S. A tutorial on the art of dynamic programming for some issues concerning Bellman's principle of optimality // *ICT Express*. 2023. Vol. 9. Pp. 1144–1161. DOI: 10.1016/j.ict.2023.07.001

8. Sun J., Apornak A., Ma G. Presenting a mathematical model for reduction of delays in construction projects considering quality management criteria in uncertainty condition // *Journal of Engineering Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.021

9. Kedir F., Hall M.D. Resource efficiency in industrialized housing construction : a systematic review of current performance and future opportunities // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 286. P. 15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443

10. Zhang Y. A survey of dynamic programming algorithms // *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 35 (1). Pp. 183–189. DOI: 10.54254/2755-2721/35/20230392

11. Khaled E., Hisham S. Dynamic site layout planning using approximate dynamic programming // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2009. Vol. 23 (2). Pp. 119–127. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:2(119)

12. Шрамко А.П. Оптимизация транспортно-технологических процессов методом динамического

го программирования // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 4 (1). С. 184–194. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.050. EDN UGPEGW.

13. Басараб А. Применение динамического программирования в задачах управления профессиональными рисками в строительстве // *Безопасность в техносфере*. 2017. № 6 (6). С. 47–53. DOI: 10.12737/article\_5af024e4e17da6.63463049. EDN XNBWQP.

14. Пименов С.И. Строительная информационная модель // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (13). С. 72–84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07

15. Taghaddos M., Mousaei A., Taghaddos H., Hermann U., Mohamed Y., AbouRizk S. Optimized variable resource allocation framework for scheduling of fast-track industrial construction projects // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. P. 24. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105208

16. Essien J. Application of branch and bound and dynamic Programming in demand forecasting for supply chain optimization // *International Journal of Science and Research*. 2023. Vol. 12 (5). Pp. 2617–2623. DOI: 10.21275/SR23528175430

17. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Шепелева Е.В., Алферова И.Д. Использование маневровых транспортных средств для сокращения простоев в пункте оборота // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2018. № 3. С. 169–175. DOI: 10.14529/em180320. EDN YBJWQX.

18. Ran Y. Optimizing operations management and business analytics strategies under uncertainty: dynamic programming // *Advances in Economics Management and Political Sciences*. 2023. Vol. 49 (1). Pp. 150–156. DOI: 10.54254/2754-1169/49/20230507

19. Louadj K., Aidene M. Direct method for resolution of optimal control problem with free initial condition // *International Journal of Differential Equations*. 2012. Vol. 6. P. 18. DOI: 10.1155/2012/173634

20. Мамонтова Е.В., Воейко О.А. Применение бережливого производства при оценке качества управления отходами // *Компетентность*. 2024. № 1. С. 51–56. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-1-51-57

21. Ильюк В.В., Кузнецов О.А. Повышение эффективности управления логистическими потоками // *Вестник РМАТ*. 2023. № 2. С. 21–26. EDN WDCNDI.

Поступила в редакцию 24 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 3 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 4 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Ярослав Дмитриевна Агеева — ассистент кафедры технологии и организации строительства; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; SPIN-код: 7587-8474, ORCID: 0009-0004-5827-0238; ya.ageyeva@sibstrin.ru;

Юрий Александрович Чиркунов — доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);



630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; SPIN-код: 2688-5663, Scopus: 18433752300, ORCID: 0000-0001-7128-0757; chr102@yandex.ru;

**Азарий Абрамович Лapidус** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Bolodurina I.P., Speshilov E.A. Mathematical and instrumental means for providing an intelligent decision support system for managing cargo flows. *Applied mathematics and management issues*. 2023; 2:93-107. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.09. EDN HILJFN. (rus.).
2. Lamekhov V., Chervotenko E. Usage of Dynamic Programming Method in Transport and Logistics Centers Construction and Development Projects. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In book: *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. 2020; 1115:357-366. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_35
3. Dyukova O.M. Construction logistics: modern understanding and trends. *Bulletin of URAO*. 2017; 4:69-73. EDN OAGRQH. (rus.).
4. Karpushkin I.D. Current issues of construction logistics at the present stage. *Fundamentals of EUP*. 2023; 2(37):95-99. DOI: 10.51608/23058641\_2023\_2\_95. EDN RQMEEP. (rus.).
5. Sedov D.S. Factors of constraint in conditions of dense urban development. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2010; 4(1):171-174. EDN NEJDSH.
6. Putz D., Schwabeneder D., Auer H., Fina B. A comparison between mixed-integer linear programming and dynamic programming with state prediction as novelty for solving unit commitment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021; 125:3-12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106426
7. Mizutania E., Dreyfus S. A tutorial on the art of dynamic programming for some issues concerning Bellman's principle of optimality. *ICT Express*. 2023; 9:1144-1161. DOI: 10.1016/j.icte.2023.07.001
8. Sun J., Apornak A., Ma G. Presenting a mathematical model for reduction of delays in construction projects considering quality management criteria in uncertainty conditions. *Journal of Engineering Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.021
9. Kedir F., Hall M.D. Resource efficiency in industrialized housing construction e A systematic review of current performance and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 286:15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443
10. Zhang Y. A survey of dynamic programming algorithms. *Applied and Computational Engineering*. 2024; 35(1):183-189. DOI: 10.54254/2755-2721/35/20230392
11. Khaled E., Hisham S. Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2009; 23(2):119-127. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:2(119)
12. Shramko A.P. Optimization of transport and technological processes using the dynamic programming method. *Marine intellectual technologies*. 2021; 4(1):184-194. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.050. EDN UGPEGW. (rus.).
13. Basarab A. Application of dynamic programming in problems of managing professional risks in construction. *Safety in the technosphere*. 2017; 6(6):47-53. DOI: 10.12737/article\_5af024e4e17da6.63463049. EDN XNBWQP. (rus.).
14. Pimenov S.I. Construction information model. *Bulletin of PNIPU. Construction and architecture*. 2022; 3(13):72-84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07 (rus.).
15. Taghaddos M., Mousaei A., Taghaddos H., Hermann U., Mohamed Y., AbouRizk S. Optimized variable resource allocation framework for scheduling of fast-track industrial construction projects. *Automation in Construction*. 2024; 158:24. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105208
16. Essien J. Application of branch and bound and dynamic Programming in demand forecasting for supply chain optimization. *International Journal of Science and Research*. 2023; 12 (5):2617-2623. DOI: 10.21275/SR23528175430
17. Shepelev V.D., Almetova Z.V., Shepeleva E.V., Alferova I.D. The use of shunting vehicles to reduce downtime at the turnover point. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and management*. 2018; 3:169-175. DOI: 10.14529/em180320. EDN YBJWQX. (rus.).
18. Ran Y. Optimizing Operations Management and Business Analytics Strategies under Uncertainty: Dynamic Programming. *Advances in Economics Management and Political Sciences*. 2023; 49(1):150-156. DOI: 10.54254/2754-1169/49/20230507
19. Louadj K., Aidene M. Direct Method for Resolution of Optimal Control Problem with Free Initial Condition. *International Journal of Differential Equations*. 2012; 6:18. DOI: 10.1155/2012/173634
20. Mamontova E.V., Voeyko O.A. Application of lean production in assessing the quality of waste management. *Competence*. 2024; 1:51-56. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-1-51-57 (rus.).
21. Ilyuk V.V., Kuznetsov O.A. Increasing the efficiency of logistics flow management. *RMAT Bulletin*. 2023; 2:21-26. EDN WDCNDI. (rus.).

*Received April 24, 2024.*

*Adopted in revised form on May 3, 2024.*

*Approved for publication on September 4, 2024.*

**B I O N O T E S:** **Yaroslava D. Ageeva** — Assistant of the Department of Technology and Organization of Construction; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; SPIN-code: 7587-8474, ORCID: 0009-0004-5827-0238; ya.ageyeva@sibstrin.ru;

**Yuri A. Chirkunov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; SPIN-code: 2688-5663, Scopus: 18433752300, ORCID: 0000-0001-7128-0757; chr102@yandex.ru;

**Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru.

*Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*