

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ MILP К ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ СЛОЖНОЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Р.Н. Латышев¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073, Россия,
e-mail: abakan.1998@mail.ru

Аннотация: Исходя из того, что локальное планирование обычно приводит к субоптимальным решениям, данная работа направлена на решение интегрированной задачи производства, состоящей из хранения и распределения и цепей поставок в рамках сложной горнодобывающей системы. Рассматриваемая нами задача объединяет вопросы определения размера партии и распределения в многоуровневой, многопродуктовой, многопериодной производственной сети. Для её решения мы предлагаем модель MILP (смешанная целочисленная линейная программа), учитывающую локальные ограничения различных подсистем, а также глобальные ограничения, которые выражают взаимодействие между подсистемами. Эта модель предполагает план производства, хранения и транспортировки, который удовлетворяет известный спрос и при этом минимизирует общие затраты на производство, хранение и распределение. Преимущество решений, найденных в рамках данного подхода, состоит в том, что они учитывают общую согласованность решений в системе, а также распространение ограничений в различных звеньях цепи. Оригинальность работы заключается в рассмотрении многоуровневой задачи определения размера партии, объединённой с задачей железнодорожных перевозок. Модель протестирована и проверена на реальном примере горнодобывающей промышленности, предложено комплексное решение для одновременного планирования производства, хранения и распределения ресурсов в сфере горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: сопряжённое определение размеров партии, транспортировка, линейная оптимизация, горнодобывающая промышленность, планирование производства.

Для цитирования: Латышев Р.Н. Адаптация модели MILP к функционированию сложной горнодобывающей системы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 143–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_143.

Adapting the milp model to a complex mining system

R. N. Latyshev¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,
e-mail: abakan.1998@mail.ru

Abstract: assuming that local planning usually leads to sub-optimal solutions, this work aims to solve an integrated production, storage and distribution problem as part of a global supply chain system. The problem we address combines a lot sizing and distribution problem in a multilevel, multi-product, multi-period production network. To solve it, we propose a MILP

(Mix Integer Linear Program) taking into consideration the local constraints of the different subsystems, but also the global ones that express the interactions between subsystems. This model proposes simultaneously a production, storage and transport plan that satisfies a known demand while minimizing total production, storage and distribution costs. Finally, the solutions found within this approach have the advantage of considering the system's overall decisional cohesion as well as the constraints propagation in the various links of the chain. The originality of the work comes from the fact that we have addressed a multi-level lot-sizing problem, combined with a single rail transport problem. This integrated problem, to the best of our knowledge, has not been previously addressed. The model has been tested and tested on a real example of the mining industry, a comprehensive solution has been proposed for simultaneously planning the production, storage and distribution of resources in the mining industry.

Key words: integrated lot sizing, transportation, linear optimization, mining industry, planning of production.

For citation: Latyshev R. N. Adapting the milp model to a complex mining system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):143–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_143.

1. Введение

На рынке твёрдых фосфатов много компаний, занимающихся решением задачи производства, состоящей из хранения и распределения и цепей поставок в рамках сложной горнодобывающей системы. В том числе такая работа проводилась на основе технологического цикла компании Sinochem Holdings Corporation Limited (Китай), одной из ведущих компаний на рынке фосфатов. Компания обладает сложной структурой цепочки поставок ресурсов в сфере горнодобывающей промышленности, которая начинается с разработки фосфатных месторождений, и имеет потребителей по всему миру. Одно из предприятий компании Sinochem Holdings, расположенное в центральной части Китая, производит три продукта (P1, P2, P3), поставляемые двум типам клиентов: местным и международным. Предприятие Sinochem Holdings состоит из трёх заводов, соединённых конвейерными линиями. Данное исследование посвящено проблемам планирования цепочек поставок в целом. В нём рассматривается подход к планированию, при котором инте-

грируются решения по производству, изобретательству и транспортировке. Используется глобальный подход, направленный на достижение планирования потоков, учитывающего все компоненты цепочки поставок, включая их соответствующие ограничения и спецификации. Цель состоит в том, чтобы предложить единую оптимизационную модель, учитывающую (i) характеристики каждой подсистемы, составляющей глобальную производственную систему, а также (ii) различные взаимодействия, которые связывают эти подсистемы, чтобы гарантировать их связь в глобальной логистической системе. Классические модели решают задачи планирования цепей поставок последовательно или независимо друг от друга. Наиболее классический подход начинается с принятия решений по планированию производства и складирования, а последующие решения по транспортировке принимаются независимо друг от друга. Однако в настоящее время доказано, что решения о производстве и распределении являются взаимосвязанными проблемами и должны рассматриваться одновременно в инте-

грированном виде [1]. Согласно [2], интеграция этих решений приводит к значительному повышению эффективности и результативности.

Кроме того, в данной работе рассматривается реальная проблема в области промышленности, поставленная компанией Sinochem Holdings. Исследуемая система представляет собой сложную горнодобывающую промышленную систему, состоящую из многоуровневой, многопродуктовой цепи поставок. Эта цепочка поставок состоит из производственной системы с несколькими площадками, нескольких складских площадок и системы железнодорожных перевозок в рамках одной железной дороги. Данная железная дорога используется последовательно для перевозки пассажиров и для перевозки конечных продуктов, что накладывает фиксированные временные ограничения на перевозку конечных продуктов. В связи с этим в данной работе рассматривается задача определения размера партии с учётом ёмкости, объединённая с гибридной транспортной задачей, касающейся использования конвейеров (для межплощадочных перевозок) и одной железной дороги с временными интервалами (для доставки готовой продукции). Все ресурсы производства, хранения и транспортировки ограничены конечными мощностями. Данная статья организована следующим образом: в разделе 2 представлен обзор литературы по основным темам, рассматриваемым в работе. В разделе 3 подробно описывается предложенный алгоритм MILP для решения этой проблемы, а в разделе 4 он иллюстрируется практическим примером. В разделе 5 приводятся основные выводы.

2. Методы

Многие исследователи интересовались вопросами планирования про-

изводства и запасов с использованием задачи определения размера партии. Это привело к формированию обширной научной литературы, предлагающей разнообразные модели для решения такого рода задач. Определение размера партии является одной из ключевых задач в управлении запасами. Она заключается в определении оптимального количества товаров, которое следует производить или заказывать за один раз, чтобы минимизировать общие затраты на производство, хранение и транспортировку. Существует множество моделей и методов для решения задачи определения размера партии. Они различаются по степени сложности, точности результатов и области применения. Некоторые из них учитывают только затраты на производство и хранение, другие также включают затраты на транспортировку и штрафы за дефицит.

Выбор конкретной модели зависит от специфики задачи, доступных данных и требований к результатам. Важно провести анализ всех факторов, влияющих на размер партии, и выбрать модель, которая наилучшим образом соответствует условиям задачи.

В целом, определение размера партии является важной и актуальной задачей в управлении производством и запасами. Её решение позволяет оптимизировать процессы производства и распределения товаров, снизить издержки и повысить эффективность деятельности предприятия.

Основной целью этих моделей является определение количества продукции, которое необходимо произвести для удовлетворения спроса при минимизации затрат на производство, создание и хранение [3]. Могут быть добавлены и другие издержки, например, стоимость нехватки запасов. Одной из причин интереса к этим моделям

является их широкая область применения. Действительно, эти модели могут применяться для определения размера партии без фиксации [4], составления расписания и определения размера партии (малая ёмкость) [5] и управления потоком [6]. Они также могут быть связаны с другими проблемами планирования цепочки поставок [7], например, с проблемами распределения для формирования класса моделей Integrated lot sizing with direct shipment, или с проблемами маршрутизации для формирования класса моделей под названием Inventory Routing Problem (IRP), или даже включать все проблемы планирования цепочки поставок (производство, хранение, распределение и маршрутизацию) для создания класса задач производственной маршрутизации (PRP). Расширение моделей определения размеров партий на многоуровневую структуру цепей поставок называется многоуровневой задачей определения размеров партий (MLLSP). Базовая многоуровневая модель, называемая Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem (MLCLSP), была предложена в [8]. Её цель — связать спрос на конечную продукцию с потребностями во внутренних компонентах с помощью матрицы Гозинто. Эта матрица состоит из коэффициентов $a_{i,j}$, которые представляют собой количество изделий i , необходимых для производства изделия j , где i — непосредственный предшественник j в спецификации изделия [9].

На основе проанализированных нами исследований установлено, что проблема многоуровневого определения размера партии объединяется с проблемой транспортировки по одному железнодорожному пути с временными интервалами. Проблема переменной пропускной способности транспорта и минимального количества, которое необходимо перевезти,

ранее не уделялось внимания. В литературе по определению размеров промышленных партий в основном рассматриваются проблемы дискретного производства. Это делает планирование производства в обрабатывающей промышленности перспективной областью для новых исследований [10].

Проблема многоуровневого определения размера партии является сложной и многогранной. Она требует учёта перечня факторов, таких как стоимость производства, хранения, транспортировки и дефицита. При этом необходимо учитывать переменную пропускную способность транспорта и минимальное количество, которое необходимо перевезти [11].

Решение этой проблемы может привести к снижению издержек и повышению эффективности производства. Однако для этого необходимо провести дополнительные исследования. Таким образом, проблема многоуровневого определения размера партии является актуальной и перспективной областью для новых исследований [12].

3. Результаты

Предложенная авторами многоуровневая, многопродуктовая структура цепочки поставок ресурсов в сфере горнодобывающей промышленности представлена на рис. 1. Рассматриваемая производственная сеть состоит из нескольких предприятий, производящих N продуктов, предназначенных для удовлетворения двух типов спроса: независимого конечного спроса, известного на конечном интервале, и промежуточного, когда продукт является компонентом другого продукта в цепочке поставок. Дефицит не допускается, а производимый продукт имеет общую типовую структуру. Горизонт планирования дискретный и состоит из T периодов. Один продукт может произ-

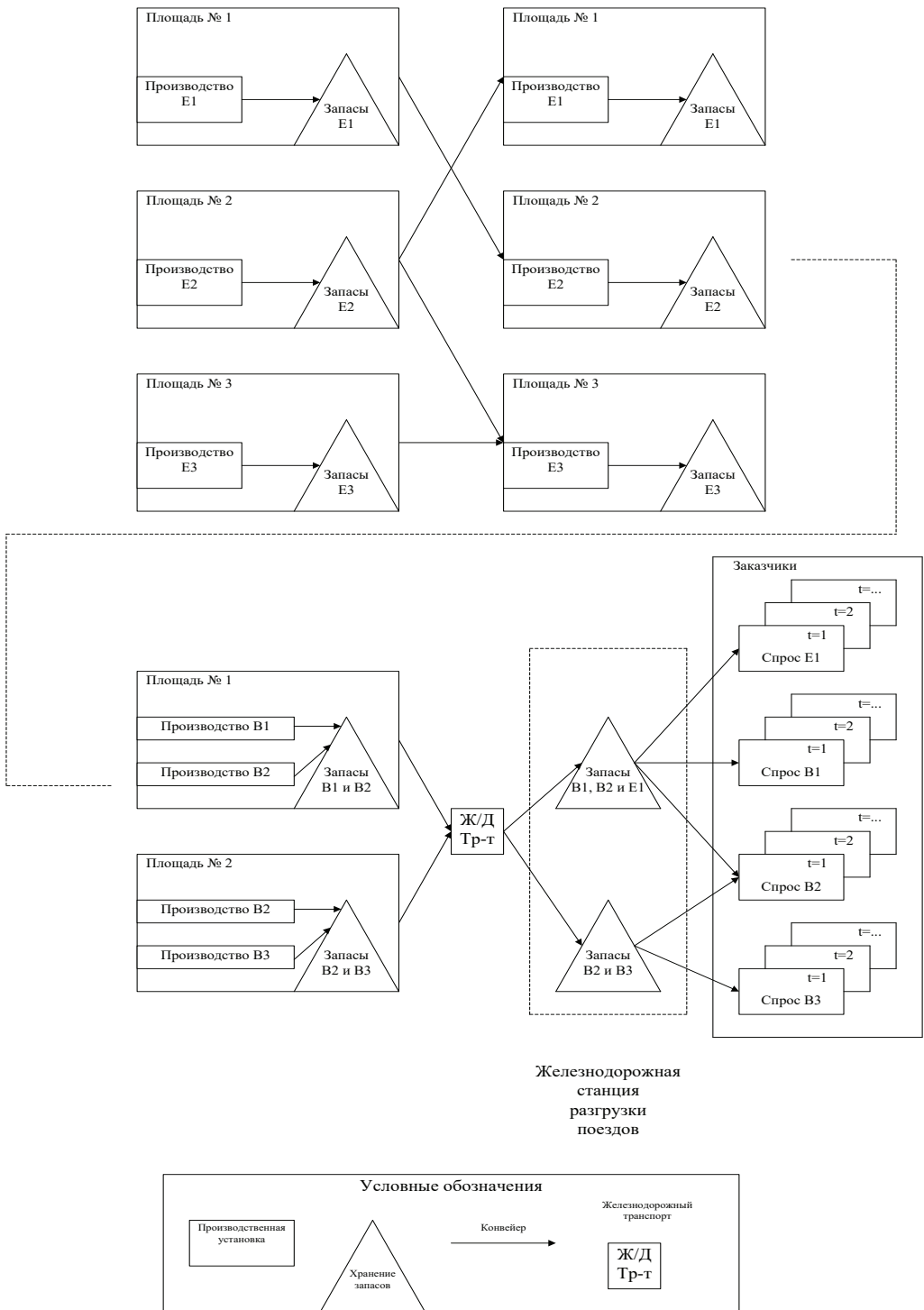


Рис. 1. Многоуровневая, многопродуктовая структура цепочки поставок
 Fig. 1. Multi-level, multi product supply chain structure

водиться на нескольких предприятиях. Каждое предприятие ограничено максимальной производственной мощностью и имеет склад, на котором может храниться произведённая продукция. Каждый склад ограничен максимальным объёмом запасов. Различные предприятия взаимосвязаны соединёнными конвейерами, характеризующимися параметрами $z_{u, u'}$, которые обозначают время, необходимое для передачи продукта с предприятия u на предприятие u' ; u' является предприятием, расположенным ниже предприятия u в структуре цепи поставок. Вся готовая продукция перевозится по одному железнодорожному пути в два разных пункта назначения: в порт, откуда продукция экспортируется международным заказчикам, и к местным заказчикам (химическим производствам). Продукция может храниться на станциях разгрузки поездов [13]. Каждый поезд может отправлять только один продукт одновременно, и ему требуется время для перемещения между производственными площадками и пунктами назначения. Существуют определённые временные интервалы (маршруты движения поездов), в которые можно перевозить готовую продукцию; в остальное время железная

дорога используется для пассажирских перевозок. Поэтому доставка готовой продукции [14] должна осуществляться с соблюдением этих графиков.

Для решения этой задачи мы предлагаем многоуровневую многопродуктовую линейную модель, в которой отправка конечной продукции на конечные склады осуществляется поездами с соблюдением временных интервалов перевозки. Цель модели — определить периоды времени, в которые происходит производство, а также выполняются объёмы производства, количество, которое необходимо хранить, и количество, которое необходимо перевозить поездами, а также временные интервалы, которые необходимо использовать. Производство включает в себя переменные производственные затраты, затраты на подготовку и время подготовки к производству, которые возникают при запуске партии продукции [15]. Затраты на содержание запасов [16] приходятся на одну единицу, хранящуюся на складе в течение периода. Рассмотренные обозначения математической модели, сформулированной авторами, приведены в табл. 1. Математическая модель сформулирована следующим образом.

Таблица 1

Параметры и переменные
Parameters and variables

Параметр	Значение
N	Количество продуктов ($i = 1 \dots N$)
T	Количество интервалов планирования ($t = 1 \dots T$)
J	Количество дней, составляющих интервалы планирования ($j = 1 \dots J$)
H	Количество учитываемых часов в день
S^p	Набор производственных площадей
S^f	Набор конечных запасов
$D_{i, t}$	Конечный спрос на продукт i в период времени t
X_u^{max}	Максимальная производственная мощность предприятия u
$a_{i, j, u}$	Количество i , необходимое для производства единицы j на предприятии: $a_{i, j, u} = 0$, если $j < i$ (j предшествует значению i)

Окончание табл. 1

Параметр	Значение
$db_{i,t,u}$	Часовая норма производства продукта i на предприятии u в период времени t
$I_{max,u}$	Максимальная вместимость склада на площадке u
Q_{max}	Максимальная пропускная способность поезда
Q_{min}	Минимальная пропускная способность поезда
λ_t	Бинарный параметр, равный 1, если в период времени t возможна перевозка поездом, 0 – в противном случае
$z_{u,u}$	Время, необходимое для отгрузки продукта с предприятия u на предприятие u
ts_i	Время установки продукта i
$\beta_{i,u}$	Бинарный параметр, равный 1, если продукт будет производиться на предприятии u , 0 – в противном случае
h_i	Стоимость хранения единицы продукта i
p_i	Стоимость производства единицы продукта i
s_i	Стоимость установки единицы продукта i
t_u	Стоимость перевозки поезда с предприятия u
M	Инвентарное количество поездов на предприятии
R	Максимальное количество поездов в день
$X_{i,t,u}$	Количество продуктов i , которое должно быть произведено на предприятии u в период времени t
$I_{i,t,u}$	Уровень запасов продуктов i на конец периода времени t для предприятия u
$Q_{i,t,u}$	Количество продуктов i , доставленных поездом с площадки u до конечных запасов в конце периода времени t
$\gamma_{i,t,u}$	Бинарная переменная, равная 1 тогда и только тогда, когда $X_{i,t,u} > 0$
$\omega_{i,t,u}$	Бинарная переменная перемещения, равная 1 тогда и только тогда, когда $Q_{i,t,u} > 0$

Минимизация параметров:

$$\sum_i \sum_u \sum_t (p_i \cdot X_{i,t,u} + s_i \cdot \gamma_{i,t,u} + h_i \cdot I_{i,t,u} + t_u \cdot \omega_{i,t,u}). \quad (1)$$

При условиях:

$$I_{i,t-1,u} + X_{i,t,u} - Q_{i,t,u} - \sum_j a_{i,j} \cdot X_{j,t} + z_{u,u}; u - I_{i,t,u} = 0 (\forall i, t, u \in S^p, u \in S^f). \quad (2)$$

$$I_{i,t,u} = I_{i,t-1,u} - D_{i,t} (\forall i, t < z_{u,u}; u \in S^f). \quad (3)$$

Уравнения (Asma Rakiz и Pierre Fenies):

$$I_{i,t,u} = I_{i,t-1,u} + \sum_u Q_{i,t} - z_{i,u}; u - D_{i,t} (\forall i, t \geq z_{i,u}; u \in S^f). \quad (4)$$

$$ts_i \cdot \gamma_{i,t,u} \cdot db_{i,t,u} + X_{i,t,u} \leq X_u^{\max} (\forall i, t, u). \quad (5)$$

$$\sum_i I_{i,t,u} \leq I_u^{\max} (\forall t, u). \quad (6)$$

$$X_{i,t,u} < \beta_{i,u} \cdot X_u^{\max} (\forall i, t, u). \quad (7)$$

$$I_{i,t,u} < \beta_{i,u} \cdot I_u^{\max} (\forall i, t, u). \quad (8)$$

$$Q_{i,t,u} \leq Q^{\max} \cdot \lambda_t (\forall i, t, u). \quad (9)$$

$$Q_{i,t,u} \geq Q^{\min} \cdot \omega_{i,t,u} (\forall i,t,u). \quad (10)$$

$$\sum_{i \in H} \omega_{i,t} + ((j-1) \cdot H), u \leq R (\forall i, j \in J, u). \quad (11)$$

$$X_{i,t,u} - M \cdot \gamma_{i,t,u} \leq 0 (\forall i,t,u). \quad (12)$$

$$Q_{i,t,u} - M \cdot \omega_{i,t,u} \leq 0 (\forall i,t,u). \quad (13)$$

$$I_{i,t,u} \cdot X_{i,t,u} \geq 0 (\forall i,t,u). \quad (14)$$

$$\gamma_{i,t,u}, \omega_{i,t,u} \in 0,1 (\forall i,t,u). \quad (15)$$

Целевая функция (1) минимизирует общие затраты [17]. Ограничение (2) представляет собой уравнение баланса запасов на производственных предприятиях. Ограничения (3) и (4) — это уравнения баланса конечных запасов [18]. Ограничения (5) и (6) обеспечивают соблюдение максимального объёма производства и запасов, соответственно. Ограничения (7) и (8) закрепляют продукцию, соответственно, за заводом/складом, на котором она производится/хранится. Ограничения (9) и (10) обеспечивают ограничение максимального и минимального количества для перевозки по железной дороге. Ограничение (11) ограничивает максимальное количество поездов в день. Ограничения (12)

и (13) связывают бинарные переменные с соответствующими переменными принятия решений. Ограничения (14) и (15) определяют область переменных решений [19].

На рис. 2 представлены избыточные и недостаточные дисконтированные производственные затраты в различные периоды времени. Стоимость неопределённости для единицы тонны недополученной продукции выше, чем стоимость перепроизводства. Кроме того, дисконтированная стоимость неопределённости выше в более ранние периоды времени. Основными входными параметрами для данного графика являются коэффициенты эксплуатации и перепроизводства ($C_{up}(t)$ и $C_{op}(t)$, соответственно), которые управляют частью

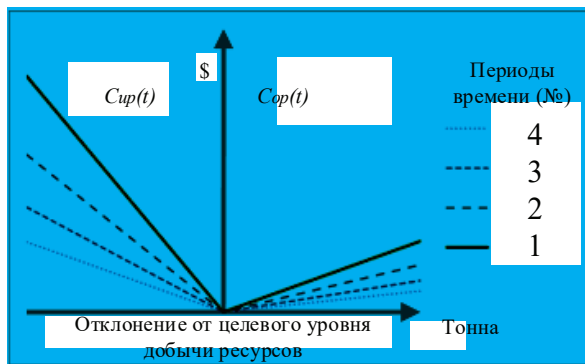


Рис. 2. Штрафная функция за сверхнормативную и недостаточную добычу ресурсов в разные периоды времени на основе коэффициента дисконтирования

Fig. 2. Penalty function for over and under production at different periods based on a discounting factor

неопределённости при выполнении задачи оптимизации. Данные параметры представляют собой дисконтированные удельные затраты на отклонение от целевой добычи ресурсов. Для всех компонентов целевой функции используется лишь один коэффициент дисконтирования.

4. Обсуждение результатов

Для иллюстрации работы модели рассмотрим численный пример. Модель решает задачу в рамках одной недели с временной сеткой в один час (168 периодов времени). Дневной спрос был преобразован в почасовой, предполагая, что он равномерно распределён в течение дня. Программа была решена за несколько минут с помощью решателя Xpress.

Модель рассчитала интегрированный план всех компонентов общей производственной системы. Эти планы позволили удовлетворить спрос на 100%. Для каждого периода, продукта и участка модель предлагает:

1) план производства, определяемый количеством, которое должно быть произведено за период и для каждого продукта на каждом участке. При этом учитывается тот факт, что продукт P2 может быть произведён на двух разных участках;

2) план хранения всех запасов производственной системы;

3) план перевозки, который определяет количество, которое необходимо перевезти с производственных площадок на конечные склады. В этом плане учитывается время, необходимое

Таблица 2

*Планы производства, хранения и перевозки продукта P1
Production, storage and transport plans for product P1*

Период времени	Количество продуктов	Объём запасов	Количество для перевозки поездом	Объём конечного количества запасов	Спрос
1	68	1068	0	0	0
2	91	1159	0	0	0
...
20	91	2803	0	0	0
21	91	519	2376	0	0
22	91	610	0	0	0
23	91	701	0	2376	0
24	91	793	0	2376	0
25	91	884	0	2268	108
26	91	975	0	2160	108
...
...
164	0	0	0	828	83
165	0	0	0	745	83
166	0	0	0	662	83
167	0	0	0	579	83
168	0	0	0	496	83

Таблица 3

Планы производства, хранения и перевозки продукта P2
Production, storage and transport plans for product P2

Период времени	Обжиговая установка			Сушильная установка			Объём конечного количества запасов	Спрос
	Количество продуктов	Объём запасов	Количество для перевозки поездом	Количество продуктов	Объём запасов	Количество для перевозки поездом		
1	91	1091	0	0	0	0	4583	417
2	258	1349	0	0	0	0	4166	417
3	258	1607	0	0	0	0	3749	417
4	258	1865	0	0	0	0	3332	417
5	258	2123	0	0	0	0	2915	417
6	258	2381	0	0	0	0	2498	417
7	258	2639	0	272	272	0	2081	417
8	258	2897	0	272	545	0	1664	417
9	258	1066	2089	272	817	0	1247	417
10	258	1324	0	272	1089	0	830	417
...
167	0	0	0	0	0	0	417	417
168	0	0	0	0	0	0	0	417

для перевозки продукции на конечные склады, которое составляет 2 часа.

Результаты по продуктам P1, P2, соответственно, представлены в табл. 2 и 3. Эти планы позволили удовлетворить спрос на 100%. Мы нашли удовлетворительное решение, применимое в условиях глобальной цепочки поставок.

В табл. 2 приведены параметры планов производства, хранения и перевозки продукта P1, а в табл. 3 — параметры планов производства, хранения и перевозки продукта P2, которые используются в модели производственных процессов для поиска оптимального решения с целью снижения затрат на логистику.

Этот пример показывает, как модель может быть использована для оптимизации производственных процессов

и удовлетворения спроса на продукцию. Модель учитывает различные факторы, такие как производственные мощности, запасы и время транспортировки, чтобы найти оптимальное решение [20].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что у продукта P2 выше показатели спроса, за счёт чего объём конечного количества запасов продукта P2 возрастает.

5. Заключение

В этой статье мы предлагаем метод смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) для одновременного планирования производства, хранения и перевозки в сфере горнодобывающей промышленности на конечном интервале, состоящем из дискретных периодов времени.


Это планирование осуществляется в контексте многоуровневой, многопериодной, многопродуктовой структуры цепи поставок с учётом всех различных мощностей. Метод MILP позволяет оптимизировать процессы производства, хранения и перевозки, учитывая ограничения и особенности системы, что обеспечивает эффективное использование ресурсов и снижение затрат на логистику продукции. При повышении спроса на продукцию в 5 раз объём конечного количества запасов увеличивается в 2 и более раза. Кроме того, перевозка готовой продукции обеспечивается по одному железнодорожному пути с фиксированными временными интервалами.

Это позволяет точно планировать доставку продукции потребителям и минимизировать простои транспорта. Данная модель была протестирована на системе добычи полезных ископаемых. Это позволило достичь общей оптимизации потока, учитывающей характеристики различных подсистем, их взаимодействие и наличие ограничений на всём протяжении цепи.

Результаты тестирования показали высокую эффективность метода MILP в планировании производства, хранения и перевозки. Это открывает новые возможности для оптимизации логистических процессов в различных отраслях промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куприянов В. В., Бондаренко И. С.* Обеспечение безопасности железнодорожных перевозок промышленных грузов на горнодобывающих предприятиях // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 4. — С. 56–62. DOI: 10.24000/0409–2961–2021–4–56–62.
2. *Раздымаха П. М., Шаферов В. И., Куйдин А. В.* Тенденции современного развития горнодобывающей промышленности России // Актуальные вопросы устойчивого развития современного общества и экономики. — 2023. — № 2. — С. 271–273.
3. *Комилов Т. О., Якибов Г. Г.* Повышение эффективности эксплуатационных показателей железнодорожного транспорта // Евразийский журнал математической теории и компьютерных наук. — 2022. — № 2 (9). — С. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5584563>.
4. *Исаходжаев Х. С., Норбутаев У. М., Азизова Г. С., & Расулева Н. М.* Экспериментальное исследование испарительной воздухоохладитель из полимерных волокон // Сборник статей LXI Международной научно-практической конференции «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS», 30 января 2022 г. — Пенза, 2022. — С. 51–53.
5. *Shishkin P. V., Efremkov E. A., Qi M.* Development of a Mathematical Model of Operation Reliability of Mine Hoisting Plants. *Mathematics*. 2024, 12, 1843. DOI: 10.3390/math12121843.
6. *Захарова, Е. Д.* Применение инновационных технологий в туристско-экскурсионной деятельности в городе Санкт-Петербург / Е. Д. Захарова // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. — 2016. — № 2. — С. 305–310. — EDN ZVFDNH.
7. *Kawalec W., Król R., Suchorab N.* Regenerative Belt Conveyor versus Haul Truck-Based Transport: Polish Open-Pit Mines Facing Sustainable Development Challenges // *Sustainability*. 2020, no. 12, p. 9215. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219215>.

8. Wheatley Greg, Rubel Robiul Islam. Analysis of conveyor drive power requirements in the mining industry // *Acta Logistica*. 2021, no. 8 (1), pp. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.22306/al.v8i1.200>.
9. *Zhironkin S., Szurgacz D.* Mining Technologies Innovative Development: Economic and Sustainable Outlook // *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8590. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248590>.
10. *Diaz K., Kammoun M. A., Hajej Z., Sefiani N., & Milazzo M. F.* Joint production, transportation, and maintenance in downstream fuel supply chain. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O // *Journal of Risk and Reliability*. 2024. DOI: [10.1177/1748006x241229518](https://doi.org/10.1177/1748006x241229518).
11. *Hilali H., Hovelaque V., & Giard V.* Integrated planning and scheduling of a multi-site mining supply chain with blending, alternative routings and co-production // *International Journal of Production Research*. 2022, vol. 61(28), pp. 1–20. DOI: [10.1080/00207543.2022.2049909](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2049909).
12. *Kalauz K., Frits M., & Bertok B.* Algorithmic model generation for multi-site multi-period planning of clean processes by P-graphs // *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, 140192. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.140192](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140192).
13. *Karimi-Zare A., Shakouri G. H., Kazemi A., & Kim E.-S.* Aggregate production planning and energy supply management in steel industry with an onsite energy generation system: A multi-objective robust optimization model // *International Journal of Production Economics*. 2024, vol. 269, 109149. DOI: [10.1016/j.ijpe.2024.109149](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109149).
14. *Li M., Ming P., Huo R., Mu H., & Zhang C.* Optimizing design and performance assessment of a sustainability hydrogen supply chain network: A multi-period model for China // *Sustainable Cities and Society*. 2023, vol. 92, 104444. DOI: [10.1016/j.scs.2023.104444](https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104444).
15. *Pérez-Perales D., Boza A., Alarcón F., & Gómez-Gasquet P.* Mathematical programming-based methodology for the evaluation of supply chain collaborative planning scenarios // *Annals of Operations Research*. 2024, vol. 337, pp. 261–312. DOI: [10.1007/s10479-024-05917-6](https://doi.org/10.1007/s10479-024-05917-6).
16. *Rakiz A., Absi N., & Fenies P.* Comparing approaches for a multi-level planning problem in a mining industry // *International Journal of Production Economics*. 2023, vol. 265, 108999. DOI: [10.1016/j.ijpe.2023.108999](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108999).
17. *Riera J. A., Lima R. M., & Knio O. M.* A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, vol. 48(37), pp. 13731–13755. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.12.242](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.242).
18. *Wu L., Zhu Z., Feng Y., & Tan W.* Economic analysis of hydrogen refueling station considering different operation modes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, vol. 52, pp. 1577–1591. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.164](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.164).
19. *Yusuf N., & Al-Ansari T.* Current and future role of natural gas supply chains in the transition to a low-carbon hydrogen economy: A comprehensive review on integrated natural gas supply chain optimisation models // *Energies*. 2023, vol. 16(22), 7672. DOI: [10.3390/en16227672](https://doi.org/10.3390/en16227672).
20. *Zaalouk A., Moon S., & Han S.* Operations planning and scheduling in off-site construction supply chain management: Scope definition and future directions // *Automation in Construction*. 2023, vol. 153, 104952. DOI: [10.1016/j.autcon.2023.104952](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104952). 

REFERENCES

1. Kupriyanov V. V., Bondarenko I. S. Ensuring the Safety of Railway Transportation of Industrial Cargo at Mining Enterprises. *Labor Safety in Industry*. 2021, no. 4, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409–2961–2021–4–56–62.
2. Razdymakha P. M., Shaferov V. I., Kuydin A. V. Trends in the modern development of the mining industry of Russia. *Aktual'nyye voprosy kasayutsya razvitiya sovremennogo obshchestva i ekonomiki*. 2023, no. 2, pp. 271–273. [In Russ].
3. Komilov T. O., Yakibov G. G. Improving the efficiency of operational indicators of railway transport. 2022, no. 2 (9), pp. 8–15. [In Russ]. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5584563>.
4. Isakhodjaev Kh. S., Norbutaev U. M., Azizova G. S., & Rasuleva N. M. Experimental study of an evaporative air cooler made of polymer fibers. Executive Editor, 50.5. Balovtsev S. V., Merkulova A. M. Comprehensive assessment of the reliability of buildings, structures and technical devices of mining enterprises (2022). [In Russ].
5. Shishkin P. V., Efremenkov E. A., Qi M. Development of a Mathematical Model of Operation Reliability of Mine Hoisting Plants. *Mathematics*. 2024, 12, 1843. DOI: 10.3390/math12121843.
6. Zakharova E. D. The use of innovative technologies in excursive activities on the example of St. Petersburg. *Vestnik molodykh uchenykh Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna*. — 2016. — No 2. — Pp. 305–310. [In Russ].
7. Kawalec W., Król R., Suchorab N. Regenerative Belt Conveyor versus Haul Truck-Based Transport: Polish Open-Pit Mines Facing Sustainable Development Challenges. *Sustainability*. 2020, no. 12, p. 9215. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219215>.
8. Wheatley Greg, Rubel Robiul Islam. Analysis of conveyor drive power requirements in the mining industry. *Acta Logistica*. 2021, no. 8 (1), pp. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.22306/al.v8i1.200>.
9. Zhironkin S., Szurgacz D. Mining Technologies Innovative Development: Economic and Sustainable Outlook. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8590. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248590>.
10. Diaz K., Kammoun M. A., Hajej Z., Sefiani N., & Milazzo M. F. Joint production, transportation, and maintenance in downstream fuel supply chain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O. Journal of Risk and Reliability*. 2024. DOI: 10.1177/1748006X241229518.
11. Hilali H., Hovelaque V., & Giard V. Integrated planning and scheduling of a multi-site mining supply chain with blending, alternative routings and co-production. *International Journal of Production Research*. 2022, vol. 61(28), pp. 1–20. DOI: 10.1080/00207543.2022.2049909.
12. Kalauz K., Frits M., & Bertok B. Algorithmic model generation for multi-site multi-period planning of clean processes by P-graphs. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 434, 140192. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140192.
13. Karimi-Zare A., Shakouri G. H., Kazemi A., & Kim E.-S. Aggregate production planning and energy supply management in steel industry with an onsite energy generation system: A multi-objective robust optimization model. *International Journal of Production Economics*. 2024, vol. 269, 109149. DOI: 10.1016/j.ijpe.2024.109149.
14. Li M., Ming P., Huo R., Mu H., & Zhang C. Optimizing design and performance assessment of a sustainability hydrogen supply chain network: A multi-period model for China. *Sustainable Cities and Society*. 2023, vol. 92, 104444. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104444.

15. Pérez-Perales D., Boza A., Alarcón F., & Gómez-Gasquet P. Mathematical programming-based methodology for the evaluation of supply chain collaborative planning scenarios. *Annals of Operations Research*. 2024, vol. 337, pp. 261–312. DOI: 10.1007/s10479-024-05917-6.

16. Rakiz A., Absi N., & Fenies P. Comparing approaches for a multi-level planning problem in a mining industry. *International Journal of Production Economics*. 2023, vol. 265, 108999. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108999.

17. Riera J. A., Lima R. M., & Knio O. M. A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, vol. 48(37), pp. 13731–13755. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.242.

18. Wu L., Zhu Z., Feng Y., & Tan W. Economic analysis of hydrogen refueling station considering different operation modes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, vol. 52, pp. 1577–1591. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.164.

19. Yusuf N., & Al-Ansari T. Current and future role of natural gas supply chains in the transition to a low-carbon hydrogen economy: A comprehensive review on integrated natural gas supply chain optimisation models. *Energies*. 2023, vol. 16(22), 7672. DOI: 10.3390/en16227672.

20. Zaalouk A., Moon S., & Han S. Operations planning and scheduling in off-site construction supply chain management: Scope definition and future directions. *Automation in Construction*. 2023, vol. 153, 104952. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104952.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Латышев Роман Николаевич — ассистент, младший научный сотрудник каф. Электротехнических комплексов, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, 630073, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Latyshev R. N., assistant, junior research associate of the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 630073, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728.

Получена редакцией 01.07.2024; получена после рецензии 05.10.2024; принята к печати 10.10.2024.
Received by the editors 01.07.2024; received after the review 05.10.2024; accepted for printing 10.10.2024.

