ОПТИМИЗАЦИЯ ПУНКТОВ ПЕРЕВАЛКИ «МОРСКОЙ ПОРТ – ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»[1]

Морозов Н. Ю.[2], Гришин Е. М.[3], Правдивец Н. А.[4]
(*ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*)
Коровкин Д. М.[5], Тюленев И. Д.[6]
(*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*)

В связи с ростом объема мультимодальных перевозок ОАО «РЖД» требуется более эффективное использование имеющихся ресурсов. В наши дни наиболее востребованной разновидностью международного грузооборота является доставка морским транспортом с последующей перегрузкой на железную дорогу для доставки до пункта назначения на материке. В настоящей статье предлагается комплексная математическая модель, включающая две подзадачи: задачу назначения причалов (BAP) и задачу формирования составов. Совместное решение этих взаимосвязанных задач позволяет учитывать в процессе решения все ограничения и находить решение, с учетом как оптимизации перегрузки в морском порте, так и с учётом технических особеннотей железной дороги. Предложенная модель позволяет получить эффективные решения для объединенной задачи пункта перевалки. Для проведения вычислительных экспериментов использован оптимизатор Gurobi. Выбор оптимизатора Gurobi связан с тем, что он позволяет получать более качественное решение по сравнению с эвристическими алгоритмами, хотя и работает в среднем дольше. Стоит заметить, что повышение эффективности работы порта, связанное с более качественно построенным расписанием, находится в приоритете относительно более продолжительного времени вычислений. Для экспериментов были сгенерированы псевдореальные данные, соответствующие инфраструктуре Дальневосточной железной дороги, размерностью до 15 причалов и 12 кораблей. В рамках проведённых вычислений с ограничением времени в 60 минут для части примеров удалось найти оптимальное решение,

---

[1] *Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» научный проект №20-38-51010.*

[2] *Николай Юрьевич Морозов, м.н.с.* (morozov.nikolay@physics.msu.ru).

[3] *Егор Максимович Гришин, инженер* (grishin.em16@physics.msu.ru).

[4] *Николай Александрович Правдивец, н.с.* (pravdivets@ya.ru).

[5] *Дмитрий Михайлович Коровкин, студент* (korovkin.dm19@physics.msu.ru).

[6] *Илья Дмитриевич Тюленев, студент* (tiulenev.id19@physics.msu.ru).

а для остальных примеров оценка погрешности полученного значения целевой функции составляет менее 10%.

Ключевые слова: дискретная оптимизация, математическое моделирование, железная дорога, пункт перевалки, морской порт.

1. Введение

С каждым годом растут объемы грузоперевозок, в том числе мультимодальных (с использованием железнодорожного и водного, автомобильного или авиатранспорта). Международные мультимодальные перевозки с использованием железнодорожного и водного транспорта являются неотъемлемой частью комплексного логистического обслуживания и составляют основу современного мирового грузооборота. Морской транспорт занимает первое место по количеству доставляемых грузов в международных перевозках. Доля железнодорожного транспорта во внутренних грузоперевозках составляет 87% и ежегодно увеличивается [5]. Комплексное логистическое обслуживание является одной из услуг компаний, входящих в холдинг «РЖД». В частности, в компании занимаются календарным планированием при международных мультимодальных перевозках [3]. Перевалочные пункты «морской порт – железная дорога» играют ключевую роль при выполнении таких перевозок.

В данной работе рассмотрена комплексная задача разгрузки прибывающих кораблей и формирования железнодорожных составов с целевой функцией минимизации суммарного взвешенного времени доставки грузов до пунктов назначения и стоимости формирования составов. В широком смысле постановку можно дать следующим образом. Известен порт и его причалы. Задан горизонт планирования, в течение которого надо для всех поступающих кораблей определить причал для разгрузки. Каждый причал может разгружать только определенные типы грузов.

Порт состоит из нескольких операционных объектов: причалы (seaside), на которых разгружаются (или загружаются) корабли; грузовой терминал (yard), являющийся буферным участком для грузов, ожидающих дальнейшую транспортировку; погрузочный терминал (landside), в котором грузы погружаются на наземный транспорт и отправляются в пункты назначения. После разгрузки кораблей все грузы необходимо назначить на поезда для их доставки в пункты назначения.

Проблема распределения кораблей по причалам, рассматриваемая в качестве первой подзадачи в данной работе, относится к классу задач Berth allocation problem (BAP). Это NP-полная задача [12]. Задачи BAP бывают статические и динамические. В статической задаче все суда уже находятся в порту, тогда как в динамической корабли прибывают в порт с течением времени, в котором уже могут находится другие корабли. Задача, рассматриваемая в данной статье, относится к динамической BAP.

На практике при решении задачи распределения причалов часто используется принцип FIFO (First In First Out, первым пришёл – первым обслужен). Недостаток подхода FIFO заключается в том, что время разгрузки судна может сильно варьироваться и простые для разгрузки суда могут долго простаивать в порту [15]. Авторами этой работы предложена модель динамической задачи дискретного распределения причалов. Существует множество исследований в области задач динамического дискретного распределения причалов, которые различаются методами решения. В качестве методов решения предлагались субградиентная Лагранжева релаксация [12], поиск переменной окрестности (variable neighborhood search) [14], гибридная метаэвристика [17], эвристический алгоритм, основанный на лямбда-оптимальном [13], поиск кластеров с моделированием отжига [10], метод роя частиц (particle swarm optimization) [24].

Время, затрачиваемое судами на разгрузку, также зависит и от других связанных процессов, в частности скорости вывоза разгруженных товаров железнодорожным транспортом. Таким образом, задачи планирования причалов и транспортировки груза нужно рассматривать одновременно. Некоторые авторы рассматривают дополнительную задачу распределения причальных кранов (Quay Crane Allocation Problem, QCAP) и решают задачи BAP и QCAP совместно [7, 13, 16, 18, 22]. Модель [18] направлена на минимизацию времени обработки, времени ожидания и задержки. Авторы решили эту проблему, используя гибридный генетический алгоритм, а в [7] описан метод гибридного параллельного генетического алгоритма (комбинация параллельного генетического и эвристического алгоритмов).

Выделение причалов обычно производится на длительный срок. На практике заход судна в порт происходит в фиксированный и повторяющийся во времени период (обычно каждую неделю). В [21] решена задача составления расписания разгрузки кораблей с фиксированным периодом (одна неделя). При фиксированном и повторяющемся временном горизонте планирования удобно его представление в виде цилиндра.

Для решения рассматриваемых типов задач обычно используются решатели или эвристические алгоритмы. На небольших объемах данных решатели, используемые авторами различных статьей, достаточно быстро показывают хороший результат. При рассмотрении большего количества кораблей и причалов эвристические алгоритмы работают намного быстрее. Так, в [10] авторы рассматривают в своем эксперименте 60 кораблей и 13 причалов и используют эвристический алгоритм поиска кластеров. В результатах представлена таблица, в которой сравниваются результаты работы решателя CPLEX и других эвристических алгоритмов, предложенных в [6] и [8], а также собственного алгоритма поиска кластеров. Из этих результатов видно, что CPLEX получает результат в среднем в 300 раз медленнее эвристических алгоритмов.

В [6] алгоритм GSPP был протестирован в диапазоне входных данных от 25 до 60 кораблей и от 5 до 13 причалов. Из результатов этой статьи видно, что нахождение решения с помощью CPLEX требует в среднем на два порядка больше времени, чем решение предложенными в статье приближёнными алгоритмами. В [19] представлена модель нечёткой оптимизации для комплексного решения задач распределения причалов (BAP) и распределения причальных кранов (QCAP), которая реализована в CPLEX. Для тестирования модели авторы пытались решить примеры, содержащие от 5 до 35 причалов, по 100 примеров для каждого количества причалов. Все примеры с пятью причалами были решены оптимально, среднее время решения для одного примера составило 12 секунд. Для примеров с шестью причалами за отведённый решателю промежуток времени авторам удаётся решить оптимально чуть менее половины примеров. Примеры для большего количества причалов демонстрируют непредсказуемые результаты и авторам не удаётся (за исключением отдельных примеров) получить за отведённое время (60 минут) не только их оптимальное решение, но для многих примеров вообще какое-либо решение. По результатам экспериментов авторы делают вывод, что для средних и крупных задач модель должна быть решена с помощью метаэвристических алгоритмов.

В [23] рассматривается задача выбора алгоритма (ASP) для задачи распределения причалов (BAP) в условиях ограничения времени выполнения алгоритма. Задача ASP является задачей машинного обучения. В ходе решения данной задачи авторы тестируют большое количество различных алгоритмов решения BAP и тестируют качество полученных решений при различных лимитах времени вычисления и размерах примеров. Показано, что выбор алгоритмов для решения BAP является нетривиальной задачей.

В [11] рассматривается задача распределения причалов (BAP) в автомобильном перегрузочном терминале порта Le Havre. Авторы отмечают важность комплексного рассмотрения задач распределения причалов и отправления грузов из порта. Задача с автотранспортом несколько отличается от задачи перегрузки на железнодорожный транспорт, однако проведённые авторами вычислительные эксперименты по трём моделям задачи на реальных примерах задач порта, содержащих от 6 до 22 кораблей, показали, что при помощи оптимизатора CPLEX не удалось получить решение для примеров, содержащих 12 и более кораблей, за отведённое время (6 000 секунд).

В [20] отдельно исследована задача планирования работы складского крана и распределения складских площадей на основной контейнерной площадке железнодорожного контейнерного терминала. Сформулирована модель смешанного целочисленного программирования, для решения которой сравниваются генетический алгоритм, алгоритм искусственного пчелиного роя и метаэвристический алгоритм поиска с возвратами. Результаты экспериментов показали, что последний алгоритм даёт более точное решение, что выгодно, несмотря на более длительное время вычислений.

В [9] задачи распределения причалов и распределения причальных кранов рассматриваются независимо. Приводится сравнение результатов решателя CPLEX (MILP) и генетического алгоритма для примеров задачи BAP, содержащих от 1 до 5 причалов. Время решения было ограничено 10 минутами. Показано, что для всех случаев, когда решателю не удалось найти оптимальное решение, решатель CPLEX MILP получил менее качественное решение за отведённое время, чем генетический алгоритм.

Проведённый анализ существующих исследований задачи BAP показал, что чаще рассматривают динамическую BAP, хотя большое количество исследований также посвящено и классической BAP. При этом в одних моделях рассматривается непрерывный причал с разгрузочными кранами, а в других – дискретное причальное пространство. Для решения задач BAP используют решатели (Gurobi, CPLEX и др.) или различные эвристические алгоритмы. Также встречаются гибридные методы, которые позволяют получить точное решение за более короткое время.

Задача формирования железнодорожных составов, рассматриваемая отдельно от задачи планирования причалов, достаточно хорошо освещена в литературе. Так, в [4] рассматриваются задачи с похожей постановкой, а именно задача формирования составов, наряду с задачей оперативного управления движением составов, составлением расписания движения грузовых поездов и другими задачами железнодорожного планирования. Рассмотренные задачи решаются с применением методов теории расписаний. В частности, более подробно рассмотрен случай грузопотока между двумя станциями при различных условиях. В [1] рассматривается задача управления парком грузовых вагонов транспортным оператором с целью максимизации прибыли. Приведено решение задачи методом целочисленного линейного программирования. Подзадача формирования составов, рассматриваемая в настоящей работе, специфична наличием портов, в которые прибывают грузы из единственной начальной точки, в то время как в [1, 4] для грузов изначально заданы различные станции отправления, расположенные по всему графу.

Сравнивая постановки вышеупомянутых задач с нашей, можно сказать, что рассматриваемая в настоящей работе задача является классической BAP. Новизна исследования заключается в одновременном решении проблемы BAP с задачей формирования железнодорожных составов, доставляющих грузы в места их назначения. При этом мы считаем, что задачи BAP и последующего формирования железнодорожных составов нельзя рассматривать независимо друг от друга. Это связано с тем, что совместное решение задач позволяет оптимально составить расписание при наличии грузов разного типа.

В данной статье предложена математическая формулировка объединенной задачи, связанной с двумя различными структурами: морской порт и железная дорога. Такой подход позволит получать общее решение для оптимизации разгрузки кораблей и формирования составов. Целевой функцией является минимизация взвешенных затрат на доставку всех грузов до пунктов их назначения. Полученное решение в большинстве случаев будет эффективнее использовать имеющиеся ресурсы, чем композиция из решений двух независимых задач. Раздел 2 содержит детальную постановку задачи, для которой в разделе 3 приводится математическая модель. Раздел 4 содержит описание сгенерированных псевдореальных данных, соответствующих Дальневосточной железной дороге, а также результаты тестирования разработанной модели при помощи оптимизатора Gurobi. В разделе 5 приводятся краткие выводы.

2. Постановка задачи

Задача заключается в том, чтобы как можно быстрее и дешевле доставить грузы в пункт назначения. Грузы приходят в порт на кораблях, которые должны быть назначены на разгрузку на конкретный причал в конкретный момент времени, после чего должны быть сформированы грузовые составы, которые отправляются по железной дороге в пункт назначения.

Каждый причал оснащен набором погрузчиков, тип и количество которых влияет на скорость разгрузки и на множество типов грузов, которые можно на этом причале разгрузить. Каждый груз имеет определённый тип: уголь, цветные металлы и др.

Первую часть задачи можно охарактеризовать как динамическую задачу BAP с дискретным распределением причалов (на причале в каждый момент времени может находиться только один корабль) и детерминированными временами поступления кораблей и временами их разгрузки.

Вторая часть, являющаяся задачей формирования составов, может быть охарактеризована как задача кластеризации грузов на основе таких признаков как пункт назначения, тип груза, объем, время поступления и весовой коэффициент.

Времена прибытия в порт кораблей в течение периода планирования определены и известны заранее. Сформированные составы движутся к одному из пунктов назначения напрямую. Все пункты назначения являются ближайшими к порту сортировочными станциями. В обобщенной задаче возникают следующие ограничения:

1) разгрузка корабля может происходить только на одном причале;

2) в каждый момент времени на причале может разгружаться не более одного корабля;

3) разгрузка корабля на причале может быть произведена только после прибытия корабля в порт;

4) разгрузка корабля на причале может быть произведена только в интервал доступности причала (когда он освободится после предыдущего периода планирования или планового обслуживания);

5) на разгрузку на причал можно назначить только корабль с грузами, типы которых могут быть разгружены на этом причале;

6) все грузы должны быть доставлены;

7) количество вагонов в каждом поезде не должно превышать заданного максимального значения, связанного с мощностью локомотивов;

8) все грузы в составе одного поезда должны иметь одинаковый пункт назначения;

9) поезд может быть отправлен только после готовности всех грузов, входящих в состав (соответствующие грузы должны быть перегружены с корабля на железнодорожный состав);

10) одновременно по одному пути не может быть отправлено больше одного поезда, а между отправлением любых двух поез-

дов должен проходить технический интервал времени не меньше заданного.

Каждому грузу соответствует некоторый весовой коэффициент, а также имеется фиксированная стоимость формирования составов. В качестве целевой функции используется минимизация суммарных взвешенных затрат на доставку всех грузов до пунктов их назначения.

3. Математическая модель

Введем обозначения множеств, используемых в задаче:

$\mathbf{B}$ – множество всех кораблей, приходящих в порт;

$\mathbf{M}$ – множество всех причалов порта;

$\mathbf{J}$ – множество всех грузов;

$\mathbf{K}$ – множество всех типов грузов;

$\mathbf{D}$ – множество всех пунктов назначения;

$\mathbf{L}$ – множество всех поездов;

$\mathbf{T} = \{t \in \mathbb{N} \mid t \leq T/\Delta T\}$ – множество моментов времени в пределах горизонта планирования T, где ΔT – период дискретизации.

Чтобы задать ограничения, необходимо ввести обозначения для характеристик причалов, кораблей, грузов и поездов, являющихся входными данными задачи. Многие ограничения можно задать различными способами. Во многих работах, рассмотренных в разделе 1, ограничения задаются очевидным образом нелинейными выражениями, однако это существенно увеличивает время работы решателя. В математической модели, разработанной в рамках работы над настоящей статьёй, преимущественно использованы бинарные переменные и линейные ограничения. В некоторых случаях используются целочисленные переменные и квадратичные ограничения, так как их линеаризация требует большого количества вычислительных операций и оказалось эффективнее оставить их в текущем виде.

Максимальное количество поездов, необходимое для доставки всех грузов, равно количеству всех грузов, прибывающих на всех кораблях за период планирования. Тогда мощности множеств поездов $\mathbf{L}$ и грузов $\mathbf{J}$ совпадают, т.е. $|\mathbf{L}| = |\mathbf{J}|$. Каждому поезду присвоим пункт назначения следующим образом: $D_{J_i} = D_{L_i}$, где $i = 1, \dots, |\mathbf{J}|$.

Изначально будем считать все поезда «виртуальными». Для каждого виртуального поезда задан пункт назначения, но при этом не назначен ни один груз, который может быть отправлен в его составе. Если в финальном расписании на поезд назначен один или несколько грузов, то поезд перестает быть виртуальным. Если же на некоторый поезд не назначено ни одного груза, то он остается виртуальным и не включается в расписание. При этом поезд может содержать только грузы, которые должны быть доставлены в пункт назначения, в который направляется поезд. Стоимость формирования виртуального поезда, в отличие от реального, не учитывается в целевой функции, поэтому решение будет содержать минимальное число реальных составов. Введение виртуальных поездов позволяет гарантированно получить допустимое решение. Также введение виртуальных поездов и присваивание им пунктов назначения позволяет записать ограничение (8) в линейном виде вместо квадратичного.

В составе каждого поезда может быть не больше некоторого количества вагонов c (если в составе поезда 0 вагонов, значит, поезд остается виртуальным). Таким образом, для каждого виртуального поезда $L \in \mathbf{L}$ известны следующие величины:

$D_L \in \mathbf{D}$ – пункт назначения поезда L;

$c \in \mathbb{N}$ – максимальное количество вагонов в его составе;

$\Delta \in \mathbb{N}$ – минимальный интервал между отправками поездов;

$a \in \mathbb{N}$ – стоимость формирования состава.

Для каждого груза $J \in \mathbf{J}$, прибывающего на корабле $B \in \mathbf{B}$ известны следующие величины:

$\mathbf{J}^B \subseteq \mathbf{J}$ – множество всех грузов корабля B;

K_J – тип груза J;

r_B – время прибытия корабля B;

$m_J \leq c$ – объем груза J, выраженный в вагонах;

w_J – важность груза J;

$D_J \in \mathbf{D}$ – пункт назначения груза J;

d_J – время транспортировки груза J от порта до пункта назначения (находится алгоритмом Дейкстры по графу, от порта до сортировочной станции).

Для каждого причала $M \in \mathbf{M}$ известны следующие величины:

$\mathbf{K}^M \subseteq \mathbf{K}$ – множество типов груза, которые способен разгружать причал M;

r_M – время начала доступности причала $M \in \mathbf{M}$ в текущем интервале планирования;

v_M – количество груза, разгружаемого на причале M, в вагонах на единицу времени;

$p_{B,M}$ – время разгрузки корабля $B \in \mathbf{B}$ на причале $M \in \mathbf{M}$, которое расчитывается как

$$(1)\quad p_{B,M} = \begin{cases} \sum_{J \in \mathbf{J}^B} \frac{m_J}{v_M}, & K_J \in \mathbf{K}^M, \\ +\infty, & K_J \notin \mathbf{K}^M. \end{cases}$$

3.1. ПЕРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

Переменная $x(B, M, t)$ – бинарная переменная решения, которая связывает три параметра: корабль $B \in \mathbf{B}$, причал $M \in \mathbf{M}$ и момент времени $t \in \mathbf{T}$. Соответственно, всего будет задано $|\mathbf{B}| \cdot |\mathbf{M}| \cdot |\mathbf{T}|$ таких переменных. Переменная принимает значение, равное единице, $x(B, M, t) = 1$ тогда и только тогда, когда корабль B начал разгружаться на причале M в момент времени t. В противном случае переменная принимает значение 0.

Переменная $y(J, L)$ – бинарная переменная решения, заданная для каждой пары груза $J \in \mathbf{J}$ и виртуального поезда $L \in \mathbf{L}$. Переменная принимает значение 1, $y(J, L) = 1$, тогда и только тогда, когда груз j назначен на виртуальный поезд L. Так как $|\mathbf{L}| = |\mathbf{J}|$, то таких переменных необходимо ввести $|\mathbf{J}|^2$ штук.

Переменная $r_L \in \mathbb{N}$ – определяет момент отправки поезда $L \in \mathbf{L}$. Эта переменная является целочисленной, а количество таких переменных совпадает с количеством виртуальных поездов, которое, в свою очередь, равно количеству грузов на всех кораблях, т.е. $|\mathbf{J}|$.

3.2. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ

Прежде всего определим момент начала разгрузки $t^B_{start}(x)$ корабля $B \in \mathbf{B}$. Так как переменная решения $x = x(B, M, t)$ показывает, началась ли разгрузка корабля B на причале M в момент времени t, то для каждого корабля вычислим следующее выражение:

(2) $t_{start}^{B}(x) = \sum_{M \in \mathbf{M}} \sum_{t \in \mathbf{T}} t \cdot x(B, M, t), \ \forall B \in \mathbf{B}$,

где произведение $t \cdot x(B, M, t) = t$, если разгрузка корабля началась в момент времени t, и $t \cdot x(B, M, t) = 0$ в противном случае.

Аналогично (2) можно определить момент завершения разгрузки $t_{end}^{B}(x)$. Для этого к моменту начала разгрузки необходимо прибавить продолжительность разгрузки на соответствующем причале. Таким образом, окончание разгрузки корабля $B \in \mathbf{B}$ выражается следующим образом:

(3) $t_{end}^{B}(x) = t_{start}^{B}(x) + \sum_{M \in \mathbf{M}} \sum_{t \in \mathbf{T}} p_{B,M} \cdot x(B, M, t), \ \forall B \in \mathbf{B}$.

Груз $J \in \mathbf{J}$, прибывший на корабле $B \in \mathbf{B}$, можно отправить в составе поезда только после разгрузки всех грузов с данного корабля. Это условие накладывается специфическими процедурами, которые проводятся в пунктах перевалки. Следовательно, момент поступления груза r_J совпадает с моментом завершения разгрузки соответствующего корабля:

(4) $r_J(x) = t_{end}^{B}(x), \ \forall J \in \mathbf{J}^{B}, \forall B \in \mathbf{B}$.

Зная момент поступления r_j груза, момент отправки r_L соответствующего поезда и время движение поезда от порта до пункта назначения, можно определить момент прибытия $t_{final}^{J}(r_L, y)$ груза J в пункт назначения:

(5) $t_{final}^{J}(r_L, y) = \sum_{L \in \mathbf{L}} r_L \cdot y(J, L) + d_J$,

где r_L – момент отправки поезда, $y(J, L)$ – переменная решения, определяющая, был ли груз J назначен на поезд L и d_J – время в пути до пункта назначения. Произведение $r_L \cdot y(J, L)$ устанавливает время отправки груза в составе поезда. Если груз не был назначен на поезд L, то $r_L \cdot y(J, L) = 0$.

После определения всех моментов времени можно задать целевую функцию минимизации суммарной стоимости перевозки, состоящей из затрат на доставку и стоимости формирования состава:

(6) $$F = \underbrace{\textstyle\sum_{J\in\mathbf{J}} w_J \cdot \left(\sum_{L\in\mathbf{L}} r_L \cdot y(J,L) + d_J\right)}_{\text{стоимость доставки}} + \underbrace{a \cdot \textstyle\sum_{L\in\mathbf{L}} \min\{1, \sum_{J\in\mathbf{J}} y(J,L)\}}_{\text{стоимость формирования составов}} \to \min.$$

Целевая функция состоит из двух частей. Первая – стоимость доставки, где w_J – весовой коэффициент груза, а $\sum_{L\in\mathbf{L}} r_L \cdot y(J,L) + d_J = t^J_{final}(r_L, y)$ – время прибытия груза в пункт назначения. Стоимость доставки зависит от времени доставки в силу применения штрафов за несвоевременную доставку и оплату хранения во время простоя груза. Вторая часть целевой функции – стоимость формирования всех составов, где a – стоимость формирования одного состава. Если поезд остается виртуальным (на него не назначено ни одного груза), то $\min\{1, \sum_{J\in\mathbf{J}} y(J,L)\} = 0$, и, следовательно, его стоимость формирования не учитывается.

3.3. ОГРАНИЧЕНИЯ

В разделе 2 были сформулированы ограничения 1)–10). Выразим их математическим языком:

• Разгрузка корабля осуществляется только на одном причале:

(7) $\sum_{M\in\mathbf{M}} \sum_{t\in\mathbf{T}} x(B,M,t) = 1, \ \forall B \in \mathbf{B}.$

Здесь для каждого корабля мы берем двойную сумму по всем причалам и всем моментам времени горизонта планирования от значения переменных решения x. Эта сумма равна строго 1, потому что начало разгрузки корабля происходит только один раз.

• Разгрузка осуществляется только после прихода корабля в порт в интервал доступности причала:

(8) $\forall t \in \mathbf{T}: t \le \max(r_B, r_M) \Rightarrow x(B,M,t) = 0, \ \forall B \in \mathbf{B}, \ \forall M \in \mathbf{M}.$

Если корабль еще не прибыл или причал еще недоступен, то переменная x гарантировано принимает значение 0, разгрузка не может быть начата.

• На каждом причале разгружается не больше одного корабля в каждый момент времени:

(9) $\sum_{B\in\mathbf{B}} \left(\sum_{\theta=\max\{0,t-p_{B,M}\}}^{t} x(B,M,\theta)\right) \le 1, \forall M \in \mathbf{M}, \ \forall t \in \mathbf{T}.$

Для каждого причала для каждого момента времени берётся двойная сумма по всем кораблям и по интервалам времени, в течение которых корабли могли начать разгружаться. Для каждого корабля $\max\{0, t - p_{B,M}\}$ – вероятный момент начала разгрузки. Тогда никакой другой корабль не может быть разгружен на данном причале, пока не завершится разгрузка текущего. Данное выражение запрещает пересечение любых двух интервалов разгрузки кораблей для каждого причала.

• Каждый причал разгружает только грузы доступного ему типа:

(10) $\forall B \in \mathbf{B}, \forall J \in \mathbf{J}^B,\ \forall M \in \mathbf{M}\colon\ K_J \not\subseteq \mathbf{K}^M \Rightarrow x(B, M, t) = 0,\ \forall t \in \mathbf{T}$.

Если на корабле есть такой тип груза, который не может быть разгружен на данном причале, то разгрузка этого корабля не может быть произведена на данном причале, и, следовательно, соответствующие переменные решения x принимают значения принимают нулевые значения.

• Каждый груз определен только на один поезд:

(11) $\sum_{L \in \mathbf{L}} y(J, L) = 1,\ \forall J \in \mathbf{J}$.

Каждый груз должен быть доставлен, значит, он должен быть назначен ровно на один поезд. Сумма по всем поездам от переменной решения y равна 1 для каждого груза.

• Количество вагонов в каждом поезде не превышает заданного:

(12) $\sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L) \cdot m_J \le c, \forall L \in \mathbf{L}$.

Суммируя значение бинарных переменных решения y по всем грузам, умноженных на объем грузов (выраженного в вагонах), можно определить количество вагонов в составе поезда, которое не должно превышать c.

• У каждого груза пункт назначения совпадает с пунктом назначения поезда, на который этот груз определен:

(13) $\forall J \in \mathbf{J}, \forall L \in \mathbf{L}\colon D_J \ne D_L \Rightarrow y(J, L) = 0$.

Так как поезда везут грузы только в один пункт назначения, то грузы не могут быть назначены на поезда, которые направляются в иное место. Следовательно, переменные решения y принимают значение 0, если пункты назначения виртуального поезда и груза не совпадают.

• Поезд отправляется не раньше чем доступны грузы, определенные на него:

(14) $r_L \geq \max_{J \in \mathbf{J}} \{ r_J(x) \cdot y(J, L) \}, \ \forall L \in \mathbf{L}$.

Выражение $r_J(x) \cdot y(J, L) = r_J(x)$, если груз J назначен на поезд L, и $r_J(x) \cdot y(J, L) = 0$ в противном случае. Чтобы определить, когда все грузы готовы к отправке, необходимо взять максимум по всем временам готовности грузов $\max_{J \in \mathbf{J}} \{ r_J(x) \cdot y(J, L) \}$. Это единственное квадратичное ограничение в данной модели.

• Между отправлениями любых двух поездов должно пройти не менее заданного интервала:

(15) $|r_{L_1} - r_{L_2}| \geq \Delta \cdot \min\{1, \sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L_1), \sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L_2)\}, \ \forall L_1, L_2 \in \mathbf{L}$.

Так как порядок отправки не определен, то берется модуль разницы между моментами отправлениями поездов. Если хотя бы один поезд виртуальный, то сумма $\sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L) = 0$, и тогда ограничение не накладывается. Если оба поезда не виртуальные, то $\min\{1, \sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L_1), \sum_{J \in \mathbf{J}} y(J, L_2)\} = 1$ и ограничение действует.

Математическая модель сформулирована. Большинство переменных решения в ней являются бинарными, а ограничения – линейными. Использовано только одно квадратичное ограничение (14). Целевая функция также является квадратичной.

4. Вычислительные эксперименты

Как было показано во введении, исследователи используют разные методы решения для различных размеров входных данных и различных постановок задач. Рассматриваются как короткие горизонты планирования продолжительностью от 6 часов, так и длинные – до нескольких месяцев и лет. Так как задача является NP-трудной, то при помощи оптимизатора невозможно получить точное решение задач большого размера. Кроме того, точное время прибытия кораблей становится известно лишь за несколько дней до прибытия. В данной работе был выбран горизонт планирования в 1 неделю, так как на таком интервале становятся известны моменты поступления кораблей, а также имеется достаточное количество времени для получения решения при помощи оптимизатора.

Мы рассматривали Дальневосточный регион, на котором расположены 4 порта: Владивосток, Ванино, Находка, Восточный, в которых 15, 13, 5 и 4 причалов соответственно. Количество поступающих кораблей зависит от порта, но варьируется от 3 до 12. Корабли могут содержать несколько типов грузов одновременно: черные и цветные металлы, уголь, лес, глинозем и контейнеры. При этом контейнеры эквивалентны одному железнодорожному вагону, а другие типы грузов измеряются в тоннах. Для унификации объема всех типов грузов всё было переведено в двадцатифутовый эквивалент (TEU, англ. twenty-foot equivalent unit) – условная единица измерения вместимости грузовых транспортных средств. Таким образом, один контейнер, TEU и стандартный железнодорожный вагон эквиваленты и соответствуют одинаковому объему груза. На каждом корабле находится от 1000 до 5000 TEU. Для маленьких портов с низкой скоростью разгрузки возможно поступление кораблей от 150 TEU. Суммарный объем грузов, прибывающих в порт за неделю, высчитывался исходя из отчетных данных за 2020 год. Скорость разгрузки кораблей на причалах различается для каждого типа груза и для каждого причала и лежит на интервале от 15 до 50 TEU за единицу времени (20-минутный интервал). В качестве пунктов назначения выбраны 7 ближайших сортировочных станций, время пути до которых от каждого порта определяется при помощи алгоритма Дейкстры. Техническая скорость движения грузовых составов принята равной 44 км/ч [2].

Длина каждого поезда не может превышать 80 вагонов. В случае если поступает груз в объеме, превышающем 80 TEU (80 железнодорожных вагонов), такой груз разбивается на несколько с одинаковыми пунктами назначения, но объем которых не превышает 80 TEU (например, 123 TEU = 80TEU + 43 TEU). Это позволяет уменьшить количество рассматриваемых грузов. Вместо рассмотрения каждого TEU в отдельности, рассматриваются сразу партии TEU с одинаковыми данными, что позволяет сократить количество используемых переменных решения. За единицу времени в модели был выбран интервал в 20 минут. Это обусловлено тем, что позволяет значительно сократить множество всех возможных моментов времени, а также хорошо соотносится с дискретизацией по времени, принятой на железной дороге и морских грузовых перевозках. Таким образом, горизонт планирования в 1 неделю эквивалентен 504 интервалам по 20 минут.

Для каждого груза задан весовой коэффициент, принимающий значение от 1 до 10, при этом для каждого типа грузов они отличаются. Например, для угля он лежит на интервале от 1 до 3, а для контейнеров – от 7 до 10. Стоимость формирования одного состава (и назначения на него локомотива) принята равной 200, что в среднем эквивалентно формированию нового поезда из 40 вагонов.

Модель имплементирована на языке C++ и решена при помощи оптимизатора Gurobi 9.1.2 на процессоре Intel Core i9-10980HK, 32 Gb RAM. Выбор решателя Gurobi обоснован тем, что он хорошо зарекомендовал себя при решении задач BAP, имеющих масштаб, аналогичный нашей. Хотя Gurobi и работает в среднем медленнее на больших входных данных по сравнению с эвристическими алгоритмами, но получает решение, которое ближе к оптимальному. Приоритет отдаётся качеству решения, а не скорости вычислений, потому что время решения много меньше горизонта планирования. При этом продолжительность возможных задержек, возникающих в расписании в результате неточности решения, значительно превышает время решения.

Были сгенерированы наборы входных данных различной размерности, максимальная из которых включала 15 причалов и 12 кораблей. Для более репрезентативной выборки было сгенерировано по 10 примеров каждой размерности. Для поиска решения время работы оптимизатора было ограничено одним часом. Результаты экспериментов представлены в таблице 1: для каждой размерности примеров приведено среднее, минимальное и максимальное значения времени счёта и погрешности целевой функции, полученные на соответствующем наборе из 10 примеров.

Большинство примеров малой размерности были решены оптимально. Для других примеров было найдено хорошее решение достаточно быстро (за несколько минут), а остальное время оптимизатор доказывал оптимальность данного решения. Для решений, оптимальность которых доказана не была, разница между найденным значением целевой функции и нижней её оценкой не превышала 20%. Стоит отметить, что с большой долей вероятности найденные решения являются оптимальными – несмотря на то, что это не доказано. На примерах малой размерности, которые были решены оптимально, в этом можно убедиться: решения, оптимальность которых была доказана, были найдены за достаточно короткий промежуток времени. Основное время работы оптимизатора (около 90% времени) осуществлялось доказательство оптимальности, которое не всегда завершалось успешно в течение отведенного промежутка времени.

Таблица 1. Результаты экспериментов.

Причалов	Кораблей	Средн. погрешность, %	Мин. погрешность, %	Макс. погрешность, %	Средн. время, сек	Мин. время, сек	Макс. время, сек
4	3	0,0	0,0	0,0	96,3	2,7	834
4	4	0,0	0,0	0,0	48,7	1,7	328
4	5	0,0	0,0	0,0	89,3	2,0	799
5	3	2,4	0,0	7,3	934	12,0	3600
5	5	2,7	0,0	9,2	3297	1580	3600
5	7	2,1	0,0	6,4	2694	130	3600
13	6	6,9	1,5	12,	3601	3600	3602
13	8	7,4	1,3	13,1	3615	3600	3634
13	10	8,6	4,4	11,7	3608	3600	3665
15	8	10,1	9,0	13,2	3713	3600	3638
15	10	14,1	10,0	17,2	3727	3600	3961
15	12	13,4	10,2	19,7	3835	3600	4123

5. Выводы

Рассмотрена комплексная задача, возникающая в пункте перевалки грузов «морской порт – железная дорога»: назначение причалов для разгрузки кораблей и формирование составов для отправки грузов. Целевой функцией является минимизация суммарного взвешенного времени доставки до пунктов назначения. Для этих задач построена обобщенная математическая модель, позволяющая получать общее решение. Были сгенерированы псевдореальные данные, соответствующие Дальневосточной железной дороге. Модель была протестирована при помощи оптимизатора Gurobi. Погрешность целевой функции составляет менее 20%, а время счета было ограничено одним часом. В научной литературе приведено множество эвристических алгоритмов решения задачи назначения причалов, а другие связанные задачи решаются независимо. В представленной модели объединены две задачи, что позволяет получать качественные решения и использовать данный подход на практике.

Авторы выражают благодарность Лазареву А.А. и Лемтюжниковой Д.В. за помощь в проведении исследования.

Литература

1. БЕЛОУСОВ Ф.А., НЕВОЛИН И.В., ХАЧАТРЯН Н.К. *Моделирование и оптимизация планов грузовых железнодорожных перевозок, выполняемых транспортным оператором* // Бизнес-информатика. – 2020. – Т. 14. – №2. – С. 21–35.
2. *В июле 2020 года средняя скорость доставки отправки на сети РЖД выросла на 15% в годовой динамике и составила 16,8 км/ч* // Информационное агентство РЖД.ПАРТНЕР.РУ. URL: https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-iyule-2020-goda-srednyaya-skorost-dostavki-otpravki-na-seti-rzhd-vyrosla-na-15-v-godovoy-dinamike-/ (дата обращения: 20.10.21).
3. *Комплексное логистическое обслуживание ОАО «РЖД»* // Грузовые перевозки РЖД. – URL: https://cargo.rzd.ru/ru/9771 (дата обращения: 20.10.21).
4. ЛАЗАРЕВ А.А., МУСАТОВА Е.Г., ГАФАРОВ Е.Р., КВАРАЦХЕЛИЯ А.Г *Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования*. – М.: ИПУ РАН, 2012.
5. ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ *Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года* // Утверждена распоряжением правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-Р.
6. BUHRKAL K., ZUGLIAN S., ROPKE S., LARSEN J., LUSBY R. *Models for the discrete berth allocation problem: a com-*

putational comparison // Transp. Res. Part E: Log. and Transp. Rev. – 2011. – Vol. 47. – P. 461–473.
7. CHANG D., JIANG Z., YAN W., HE J. *Integrating berth allocation and quay crane assignments* // Transp. Res. Part E. – 2010. – Vol. 46, No. 6. – P. 975–990.
8. CORDEAU J.F., LAPORTE G. *Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem* // Transp. Sc. – 2005. – Vol. 39, No. 4. – P. 525–538.
9. CORRECHER J. *Models and algorithms for berth allocation problems in port terminals.* – Spain: Universitat de Valencia, 2017.
10. DE OLIVEIRA R.M., MAURI G.R., LORENA L.A.N. *Clustering search for the berth allocation problem* // Expert Syst. Appl. – 2012. – Vol. 39, No. 5. – P. 5499–5505.
11. DKHIL H., DIARRASSOUBA I., BENMANSOUR S., YASSINE A. *Modelling and solving a berth allocation problem in an automotive transshipment terminal* // J. of the Oper. Res. Soc. – 2020. – Vol. 72, No. 3. – P. 580–593.
12. FLAVIA M.M., MARCELLO S. *The Berth Allocation Problem: A Strong Formulation Solved by a Lagrangean Approach* // Transportation Science. – 2007. – Vol. 41. – P. 265–280.
13. GOLIAS M.M., BOILE M., THEOFANIS S. *A lambda-optimal based heuristic for the berth scheduling problem* // Transp. Res. Part C. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 794–806.
14. HANSEN P., OG C., MLADENOVIC N. *Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation* // Eur. J. Oper. Res. – 2008. – Vol. 191. – P. 636–649.
15. IMAI A., NISHIMURA E., PAPADIMITRIOU S. *The dynamic berth allocation problem for a container port* // Transp. Res. Part B. – 2001. – Vol. 35. – P. 401–417.
16. IMAI A., NISHIMURA E., PAPADIMITRIOU S. *Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity* // Transp. Res. – Part E. – 2008. – Vol. 44. – P. 136–151.
17. LALLA-RUIZ E., MELIAN-BATISTA B., MORENO-VEGA J.M. *Artificial intelligence hybrid heuristic based on tabu search for the dynamic berth allocation problem* // Eng. Appl. Artif. Intell. – 2012. – Vol. 25. – P. 1132–1141.

18. LIANG C., HUANG Y., YANG Y. *A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning* // Comput. Ind. Eng.2009. – Vol. 56, No. 3. – P. 1021–1028.
19. LUJAN E., VERGARA E., RODRIGUEZ-MELQUIADES J., JIMENEZ-CARRION M., SABINO-ESCOBAR C., GUTIERREZ F. A *fuzzy optimization model for the berth allocation problem and quay crane allocation problem with n quays* // J. of Mar. Sc. and Eng. – 2020. – Vol. 9. – P. 152.
20. MING Z., WENMING C., PENG G. *Modelling and metaheuristic for gantry crane scheduling and storage space allocation problem in railway container terminals* // Disc. Dyn. in Nat. and Soc. – 2017. – Vol. 12. – P. 1–13.
21. MOORTHY R., TEO C.P. *Berth management in container terminal: the template design problem* // OR Spectr. – 2006. – Vol. 28. – No. 4. – P. 495–518.
22. PENG-FEIT Z., HAI-GU K. *Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal* // Syst. Eng. – Theory Pract. – 2008. – Vol. 28, No. 1. – P. 161–169.
23. WAWRZYNIAK J., DROZDOWSKI M., SANLAVILLE E. *Selecting algorithms for large berth allocation problems* // Eur. J. of Ope. Res. – 2020. – Vol. 283, Iss. 3. – P. 844–862.
24. YANG Q., LU T., YAO T., ZHANG B. *The impact of uncertainty and ambiguity related to iteration and overlapping on schedule of product development projects* // JPMA. – 2014. – Vol. 32, No. 5. – P. 827–837.

OPTIMIZATION OF TRANSSHIPMENT POINTS SEAPORT – RAILWAY

Nikolay Morozov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, junior researcher (morozov.nikolay@physics.msu.ru).
Egor Grishin, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, engineer (grishin.em16@physics.msu.ru).
Nikolay Pravdivets, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (pravdivets@ya.ru).
Dmitry Korovkin, Lomonosov Moscow State University, Moscow, student (korovkin.dm19@physics.msu.ru).

Ilya Tiulenev, Lomonosov Moscow State University, Moscow, student (tiulenev.id19@physics.msu.ru).

Abstract: Due to the growth volumes of multimodal transportation, Russian Railways requires a more efficient use of available resources. Because of the large international cargo turnover, today the most popular type of international delivery is sea transport, followed by transshipment onto the railroad for delivery to the destination on the mainland. This article proposes a complex mathematical model that includes two subtasks: the berth assignment problem (BAP) and the task of forming trains. The joint solution of these interrelated tasks allows us to take into account all the constraints in the solution process and find a solution that is optimal both from the point of view of optimizing the seaport and the technical features of the railway. The proposed model makes it possible to obtain effective solutions for the combined task of a transshipment point. The Gurobi optimizer was used to carry out computational experiments. The choice of the Gurobi optimizer is due to the fact that it allows obtaining a better-quality solution compared to heuristic algorithms, although it works longer on average. The increase in the efficiency of the port, associated with a better-built schedule, is in priority over a longer computation time. For the experiments, pseudo-real data were generated corresponding to the infrastructure of the Far Eastern Railway, with dimensions of up to 15 berths and 12 ships. Calculations were carried out with a time limit of 60 minutes, in which for some of test examples it was possible to find the optimal solution, and for the rest of test examples, the error estimate of the obtained value of the objective function is less than 10%.

Keywords: discrete optimization, mathematical modeling, railway, transshipment point.

УДК 519.85
ББК 22.176
DOI: 10.25728/ubs.2022.99.6

Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.

Поступила в редакцию 10.12.2021.
Опубликована 30.09.2022.