

О ЗАДАЧЕ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С КРИТЕРИЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВОТ НА ВЫБРОСЫ¹

Булавчук А. М.² Семенова Д. В.³

(Сибирский федеральный университет, Красноярск)

Рассматривается новая задача календарного планирования инвестиционных проектов с критерием максимизации экономического эффекта от использования квот на выбросы. Авторами сформулирована модель задачи, учитывающая особенности формирующейся в России практики обращения с углеродными единицами. Модель предусматривает возможность реализации неизрасходованных углеродных единиц. Учтено также влияние на экономический эффект штрафов за перерасход квот. Проанализирована постановка с детерминированными характеристиками и две недетерминированные разновидности: стохастическая и нечёткая. При описании проектов считалось, что недетерминированный характер могут иметь величины выбросов. В стохастической постановке проанализирован случай, когда параметры модели независимы и имеют распределение Вейбулла – Гнеденко. Для данного случая предложен вариант сравнения расписаний с помощью стохастического доминирования I порядка. В нечёткой постановке для описания проекта использовались нечёткие трёхугольные числа. Для выбора наилучшего расписания использовалась ранжирующая функция. Для каждой постановки продемонстрированы подходы к решению на основе модификаций алгоритмов GASPIA и SASPIA. В модифицированном алгоритме GASPIA была использована новая схема скрецивания. Для условного примера проекта проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие применимость предложенных алгоритмов для решения задачи.

Ключевые слова: задача календарного планирования инвестиционных проектов, углеродные квоты, эвристические алгоритмы, стохастическое доминирование, нечёткое ранжирование.

1. Введение

Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» был принят 22 июля 2021 года [9]. Цель принятия дан-

¹ Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ (Соглашение 075-02-2024-1429).

² Александр Михайлович Булавчук, ст. преподаватель (abulavchuk@sfu-kras.ru).

³ Дарья Владиславовна Семенова, к.ф.-м.н., доцент (dvsemenova@sfu-kras.ru).

ного документа заключается в создании условий для устойчивого и сбалансированного развития экономики Российской Федерации при снижении уровня выбросов парниковых газов. Закон закрепил такие понятия, как «углеродная единица», «квота выбросов парниковых газов», «единица выполнения квоты». Кроме того, закон должен стать основой для формирования рынка квот на выбросы.

С 1 сентября 2022 года на территории Сахалинской области был начат эксперимент по ограничению выбросов парниковых газов [8]. Целью эксперимента, который продлится до 31 декабря 2028 года, является достижение углеродной нейтральности на территории Сахалинской области и других субъектов федерации, включённых в эксперимент. С 1 января 2023 года была установлена ставка платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в эквиваленте 1 тонны диоксида углерода в размере 1 тыс. рублей [6].

Таким образом, принятие указанных нормативных актов свидетельствует о важности проблемы оборота углеродных единиц и заинтересованности государства в сокращении выбросов. Закрепление количественных параметров операций с квотами создаёт основу для построения математических моделей обращения с углеродными единицами.

Оптимизация обращения с углеродными единицами – одно из актуальных направлений экономико-математического моделирования в современном мире. Например, в работе [15] рассматривается модель ценообразования при наличии ограничений на выбросы. Авторы анализируют стратегии поведения участников рынка в зависимости от того, ограничены ли для производителей и продавцов выбросы углекислого газа.

Авторы другой работы, посвящённой влиянию квот на экономику, рассматривают игровую модель взаимодействия государства и предприятий [14]. В работе делаются выводы об оптимальном поведении сторон с точки зрения эффективности государственного регулирования и устойчивого развития организаций. Работа представляет теоретический интерес с точки зрения

моделирования взаимодействия на рынке квот.

Важной задачей регулирования обращения с углеродными единицами является также нахождение оптимального способа распределения квот на выбросы. Практический аспект управления распределением квот в Китае рассматривается, например, в работе [13]. Авторы исследования анализируют уровень социально-экономического развития территорий и предлагают увязывать с ним распределение квот. Таким образом оптимизируются экологические показатели, а также выравниваются темпы развития регионов.

В ином контексте рассматривается торговля квотами в работе [12]. Обращение с углеродными единицами анализируется с точки зрения издержек и доходов, которые в связи с этим возникают. Сформулированная авторами задача является модификацией задачи календарного планирования инвестиционных проектов. Целью является нахождение расписания, минимизирующего издержки проекта. Все параметры в задаче считаются детерминированными. Для нахождения решения авторами разработан алгоритм на основе свёрточной нейронной сети.

В данной работе рассматривается модификация задачи календарного планирования инвестиционного проекта с квотами на объёмы выбросов углекислого газа. Целевой функцией выбрана величина экономического эффекта от обращения с углеродными единицами. При этом анализируется как детерминированная, так и недетерминированные постановки задачи.

2. Постановка задачи

2.1. ОСНОВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим инвестиционный проект, при реализации которого используются квоты на выбросы. Общий срок реализации проекта составляет T лет, в течение которых должны быть выполнены N работ. Технологические и организационные взаимосвязи между работами можно описать с помощью отношений частичного порядка E . Сроки реализации работ задаются целым числом лет d_j , $j \in \{1, 2, \dots, N\}$. Пусть $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ – рас-

писание проекта, компоненты которого соответствуют моментам времени начала каждой из работ. Очевидно, что $0 \leq s_j \leq T - d_j$. Кроме того, для каждой пары работ $(i, j) \in E$ должно выполняться условие $s_i + d_i \leq s_j$.

Каждую из работ в любой из моментов её реализации $\tau \in \{1, \dots, d_j\}$ можно охарактеризовать планируемой величиной выбросов парниковых газов $g_j(\tau)$. В зависимости от подхода к моделированию данные величины могут быть детерминированными или случайными. Еще одним вариантом математического представления величины выбросов является использование нечётких чисел.

Если известна ежегодная величина квоты выбросов $q(t)$, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$, то единицей выполнения квоты в год t для расписания проекта S будем называть разность

$$(1) \quad e(t, S) = q(t) - \sum_{j \in V(t)} g_j(t - s_j),$$

где $V(t)$ — множество работ, выполняемых в интервале $[t, t + 1)$. Если в какой-либо момент времени $e(t, S) < 0$, то вносится плата за превышение квоты $h(t)$. Положительное значение $e(t, S)$ соответствует неизрасходованной части квоты. Неизрасходованные единицы выполнения квоты могут быть реализованы по цене $p(t)$. Такая схема торговли квотами между источниками загрязнений предусмотрена Федеральным законом №34-ФЗ [8].

Таким образом, рассматриваемая задача календарного планирования инвестиционного проекта заключается в поиске расписания S , соответствующего ограничениям на порядок работ и предельному сроку реализации проекта, а также максимизирующего экономический эффект $R(S)$ от операций с единицами выполнения квоты. При расчёте экономического эффекта величины доходов и затрат по проекту необходимо дисконтировать [3].

Математическая модель задачи имеет вид:

$$(2) \quad R(S) = \sum_{t \in t^+} \frac{e(t, S) \cdot p(t)}{(1 + r_0)^t} + \sum_{t \in t^-} \frac{e(t, S) \cdot h(t)}{(1 + r_0)^t} \rightarrow \max_S,$$

$$(3) \quad s_i + d_i \leq s_j, (i, j) \in E,$$

$$(4) \quad 0 \leq s_j \leq T - d_j, j \in \{1, 2, \dots, N\},$$

где r_0 – годовая ставка дисконтирования; t^+ – множество моментов времени, в которые $e(t, S) \geq 0$, а t^- – множество моментов времени, в которые $e(t, S) < 0$.

Задача (2)–(4) календарного планирования с критерием оптимизации экономического эффекта от использования квот на выбросы является NP-трудной в сильном смысле даже в случае работ единичной длительности. Доказательство NP-трудности можно провести аналогично доказательству, приведённому в [7].

Для решения подобных задач успешно применяются эвристические алгоритмы оптимизации. Ранее авторами было разработано два эвристических алгоритма для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами (RCPSР) и критерием максимизации чистой приведённой стоимости [1, 10]. Модифицируем эти алгоритмы, чтобы иметь возможность применять их для решения рассматриваемой задачи.

3. Эвристические алгоритмы решения задачи

Описание алгоритмов GASPIA и SASPIA для RCPSР с критерием максимизации чистой приведённой стоимости (NPV) приведены в работе [10]. В основе обоих алгоритмов лежит генерация расписаний, допустимых для заданных условий частично-го порядка и предельного срока проекта. Отношения частично-го порядка представляются в виде взвешенного ориентированного графа. Весами графа выступают длительности проектных работ. В основе генерации допустимых расписаний лежит решение уравнения над идемпотентным полукольцом $\mathbb{R}_{\max,+}$ [5]. Теорема о достаточном условии допустимости расписания по срокам

доказана в [1]. Коэффициентами уравнения выступают элементы матрицы смежности графа.

3.1. МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА GASPIA

Предложенный ранее алгоритм GASPIA предполагает моделирование эволюции популяции векторов, соответствующих допустимым расписаниям инвестиционного проекта. Модель RCPSР для задачи с критерием максимизации NPV включает также ограничения на бюджет в каждый момент времени. При отборе расписаний штрафы за нарушение этих ограничений учитывались в составе функции приспособленности. Ещё одной особенностью алгоритма является процедура скрещивания, учитывающая прибыльность работ [1]. Для применения алгоритма к решению задачи (2)–(4) необходимо скорректировать функцию приспособленности и процедуру скрещивания. Этапы генерации, мутации и отбора расписаний остаются без изменений.

В рассматриваемой задаче ограничения на бюджет проекта отсутствуют, а штраф за превышение квот на выбросы учитывается в функции (2). Данная функция может быть непосредственно использована в качестве функции приспособленности.

В генетическом алгоритме GASPIA для пары родителей v^k и v^l генотип потомка задаётся вектором $v^{k \times l}$ с компонентами

$$(5) \quad v_j^{k \times l} = \left| \min \left\{ C_0(j) \cdot v_j^k, C_0(j) \cdot v_j^l \right\} \right|,$$

где $C_0(j) = 1$ для прибыльных работ и -1 – для убыточных. В рассматриваемой задаче все работы можно рассматривать как убыточные. Дело в том, что использование квоты при выполнении определённой работы приводит к упущенному доходу от продажи соответствующей части квоты. Кроме того, превышение квоты ведёт к прямым потерям в виде величины уплачиваемого штрафа. Поэтому компоненты вектора-потомка будем вычислять по следующей формуле:

$$(6) \quad v_j^{k \times l} = \max\{v_j^k, v_j^l\}.$$

3.2. МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА SASPIA

При применении метода имитации отжига для решения оптимизационной задачи необходимо определить пространство пе-
220

ременных модели, оптимизируемую функцию, закон изменения температуры, функцию вероятности принятия и правило генерации новых значений переменных. Ранее авторами был предложен алгоритм SASPIA для RCPSР с критерием максимизации NPV , базирующийся на методах идемпотентной алгебры [10]. Для применения этого алгоритма к рассматриваемой задаче необходимо изменить некоторые его элементы. Однако переменными в обоих случаях будут векторы v из идемпотентного полумодуля \mathbb{X}^N . Каждому такому вектору соответствует единственное расписание S , значение целевой функции для которого будем искать по формуле (2).

В качестве схем изменения температуры рассмотрим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(k) &= \frac{\mathcal{T}_0}{k}, \\ \mathcal{T}(k+1) &= \delta \mathcal{T}(k), \end{aligned}$$

где \mathcal{T}_0 – начальное значение температуры, δ – параметр, отвечающий за скорость убывания, а $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ – номер шага. Предельное число шагов K является одним из параметров алгоритма. В качестве функции вероятности принятия будем использовать следующую зависимость:

$$h(\Delta R, \mathcal{T}) = \exp(\Delta R / \mathcal{T}).$$

При положительных значениях ΔR величина $h(\Delta R, \mathcal{T})$ будет больше 1. Это гарантирует переход к решению с большим значением функции $R(S(v))$. Для того чтобы получить новое решение v' , изменим случайно выбранную координату вектора v . Данное преобразование позволяет получить расписания $S(v)$, удовлетворяющие ограничениям (3)–(4).

4. Вычислительные эксперименты

Рассмотрим условный проект, состоящий из 14 работ. Проект должен быть завершён в течение 10 лет. Сетевой график про-

екта приведён на рис. 1. Метки с номерами 0 и 15 на рисунке соответствуют моментам начала и завершения проекта.

Все работы имеют единичную длительность и характеризуются одинаковой величиной выбросов g_j в размере 2 единицы. Будем считать, что квота q_t на выбросы в каждый момент времени равна 4 единицам. Штрафы h_t примем равными 10 денежным единицам за единицу выбросов, а цены p_t равными 5 денежным единицам. Для дисконтирования будем использовать ставку 10% годовых.

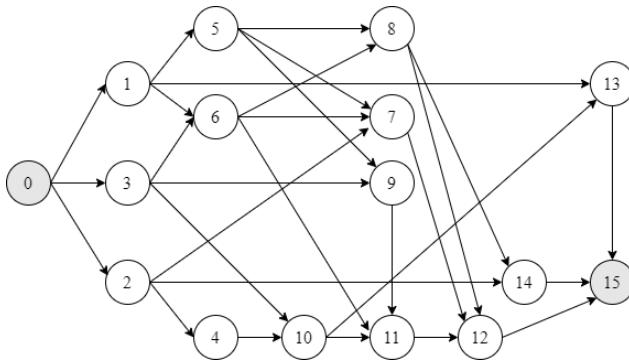


Рис. 1. Сетевой график проекта

Назовём ранним расписание проекта S_α , в котором ни для одной работы начало не может быть заменено на более раннее без нарушения условий частичного порядка и неотрицательности компонент расписания. Поздним будем называть расписание S_ω , ни одна из компонент которого не может быть увеличена. Нетрудно показать, что если цены реализации квот и штрафы за их превышение постоянны, а $e(t, S_\omega) \geq 0$ для всех $t \in \{1, 2, \dots, T\}$, то позднее расписание S_ω будет оптимальным.

Для рассматриваемого проекта раннему и позднему расписанию соответствуют векторы

$$S_\alpha = (0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 4, 5, 4), R(S_\alpha) = -8,354,$$

$$S_\omega = (4, 5, 5, 6, 6, 6, 7, 8, 8, 8, 7, 7, 8, 9, 9), R(S_\omega) = 41,531.$$

На рис. 2 для раннего и позднего расписаний в каждый момент времени приведены суммарные величины выбросов, а также размер квоты (пунктирная линия). Оба расписания предполагают реализацию проекта с уплатой штрафов за превышение квот.

Выполним поиск оптимального решения задачи, используя предложенные модификации алгоритмов GASPIA и SASPIA. Наилучшее найденное решение для обоих алгоритмов соответствует расписанию

$$S^* = (2, 5, 3, 4, 4, 6, 6, 8, 7, 7, 5, 8, 9, 9), R(S^*) = 49,054.$$

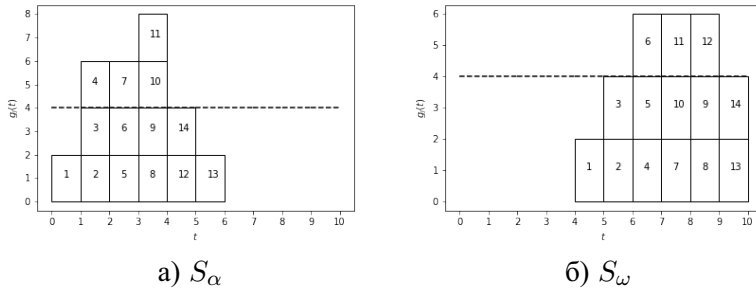


Рис. 2. Распределение выбросов во времени для раннего и позднего расписаний

На рис. 3 для расписания S^* в каждый момент времени приведены суммарные величины выбросов. В отличие от расписаний S_α и S_ω для оптимального расписания $e(t, S^*) \geq 0$ для всех $t \in \{1, 2, \dots, 14\}$ приведены результаты 100 экспериментов для модификации алгоритма SASPIA. Эксперименты показывают, что при выбранном числе шагов ($k_{max} = 1000$) рассмотренные температурные схемы обеспечивают близкое качество решения.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Температура	Среднее R	Отклонение, %
$\mathcal{T}(k) = \frac{5}{k}$	48,581	0,965
$\mathcal{T}(k + 1) = 0,9\mathcal{T}(k)$	48,584	0,959

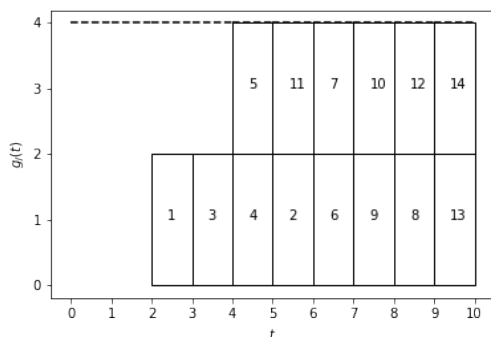


Рис. 3. Распределение выбросов для оптимального расписания S^*

Для модификации GASPIA среднее из наилучших найденных $R(S^*)$ для 100 экспериментов равно 48,848, а отклонение от наилучшего решения составляет 0,419 %.

Увеличим квоты на выбросы в 6, 7 и 8 периоды реализации проекта с 4 до 6 единиц. Тогда для позднего расписания S_ω единицы реализации квот будут неотрицательными в течение всего срока реализации проекта. Позднее расписание для такой постановки обеспечивает экономический эффект $R(S_\omega) = 69,607$. Оба рассматриваемых алгоритма дают такое же значение оптимума.

5. Недетерминированные варианты задачи

Рассмотренный выше пример характеризуется фиксированными величинами выбросов. Однако на практике фактический объём выбросов может отличаться от запланированного. Это, в свою очередь, может повлиять на оптимальность выбранного расписания. Данная особенность делает целесообразным рассмотрение моделей с нефиксированными параметрами. Рассмотрим две из таких моделей: модель с нечёткими выбросами и модель со случайными выбросами.

5.1. МОДЕЛЬ С НЕЧЁТКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ ВЫБРОСОВ

Пусть выбросы от каждой из работ j в момент времени τ характеризуются нечёткими треугольными числами $\tilde{g}_j(\tau)$. Воспользуемся L-R-представлением треугольных чисел [4]. Тогда выбросы будут характеризоваться тройками вида

$$\tilde{g}_j(\tau) = (m_j(\tau), a_j(\tau), b_j(\tau)),$$

где $m_j(\tau)$ – мода нечёткого числа, а $a_j(\tau)$ и $b_j(\tau)$ – коэффициенты нечёткости, задающие ожидаемую величину отклонений от моды.

Значения целевой функции в модели с нечёткими параметрами также представляют собой треугольные нечёткие числа. В процессе вычисления функции $\tilde{R}(S)$ выполняются операции сложения и вычитания треугольных нечётких чисел, а также умножение нечёткого числа на чёткое. Эти операции не меняют тип нечёткого числа [4]. Кроме того, необходимо производить сравнение нечётких чисел с нулём. Будем считать нечёткое число (m, a, b) неотрицательным, если $m - a \geq 0$. Если треугольное число, характеризующее выполнение квоты в момент времени t , неотрицательно, то при расчёте экономического эффекта мы будем учитывать его с коэффициентом $p(t)$. В противном случае будем использовать коэффициент $h(t)$ – штраф за превышение квоты.

Сравнение нечётких значений $\tilde{R}(S)$ для различных расписаний может быть произведено с помощью ранжирующих функций [11]. В качестве примера рассмотрим формулу ожидаемого значения нечёткого треугольного числа $\tilde{R}(S) = (R_m, R_a, R_b)$:

$$(7) \quad \mathbf{E}(\tilde{R}(S)) = \frac{4R_m - R_a + R_b}{4}.$$

Продемонстрируем описанный подход на примере проекта, который рассмотрен выше. Заменим чёткие значения $g_j = 2$ треугольными нечёткими числами $\tilde{g}_j = (2, 1, 1)$. Для раннего и позднего расписания имеем:

$$\tilde{R}(S_\alpha) = (6, 382, 203, 615, 101, 807), \quad \mathbf{E}(\tilde{R}(S_\alpha)) = -19,07,$$

$$\tilde{R}(S_\omega) = (47, 740, 134, 645, 67, 322), \mathbf{E}(\tilde{R}(S_\omega)) = 30,91.$$

Наилучшее найденное решение задачи в нечёткой постановке соответствует расписанию

$$S^* = (0, 5, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 8, 7, 4, 8, 9, 9), \mathbf{E}(\tilde{R}(S^*)) = 69,274.$$

На рис. 4 приведено распределение выбросов для оптимального в нечёткой постановке расписания.

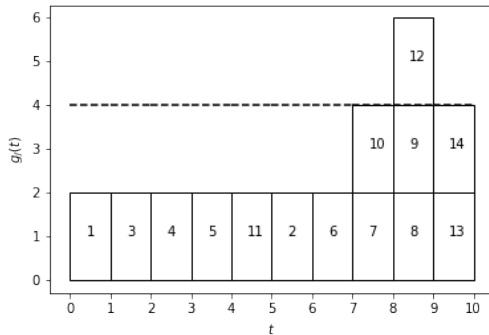


Рис. 4. Распределение выбросов для оптимального расписания S^* в нечёткой постановке

5.2. МОДЕЛЬ СО СЛУЧАЙНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ ВЫБРОСОВ

Пусть выбросы от каждой из работ j в момент времени τ характеризуются случайными величинами $g_j(\tau)$ с известными распределениями $F_{j\tau}$. Будем считать эти случайные величины независимыми. Размер экономического эффекта от использования квот тоже представляет собой случайную величину. Для одного и того же расписания эта величина будет принимать различные значения в зависимости от случайных величин выбросов для каждой из работ. Тогда каждое расписание можно характеризовать распределением экономического эффекта. Для сравнения расписаний можно использовать величину математического ожидания эффекта или вероятность отклонения эффекта от запланированного значения. Ещё один вариант выбора расписания –

226

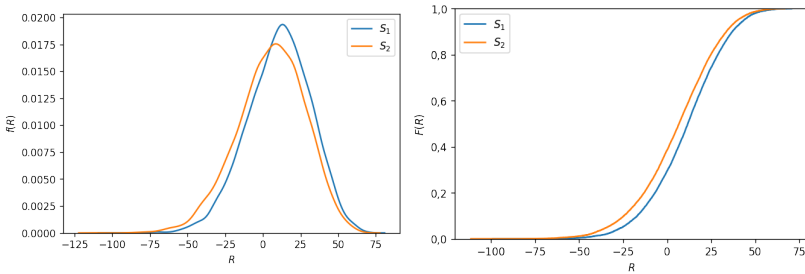
сравнение на основе стохастического доминирования [16]. Такой подход позволит выбрать расписание, которое обеспечит наилучший результат для заданных распределений случайных выбросов.

Пусть проект описывается сетевым графиком, изображённым на рис. 1. Поскольку величины выбросов должны принимать неотрицательные значения, воспользуемся для их моделирования распределением Вейбулла – Гнеденко. Параметры распределения подберём таким образом, чтобы мода распределения была равна 2. Будем считать, что для работ единичной длительности размер выбросов $g_j \sim W(2\sqrt{2}, 2)$. Сравним распределение экономического эффекта для расписаний:

$$S_1 = (2, 3, 4, 5, 5, 6, 6, 8, 7, 7, 7, 8, 9, 9),$$

$$S_2 = (1, 2, 4, 2, 5, 3, 4, 7, 8, 6, 7, 8, 9, 9).$$

На рис. 5 приведены функции плотности и распределения экономического эффекта для рассматриваемых расписаний.



а) плотность

б) функция распределения

Рис. 5. Распределение экономического эффекта

Поскольку случайные значения целевой функции можно интерпретировать как доходы, для выбора наилучшего распределения можно использовать стохастическое доминирование I рода [2]. Доминирование 1-го порядка I рода для распределений P и G означает, что для функций распределения выполняется соотношение

$$(8) \quad F_P(x) \geq F_G(x), x \in R.$$

Доминирующее распределение можно рассматривать как менее рискованное. Рис. 5 показывает, что расписание S_1 стохастически доминирует расписание S_2 . Из этого следует, что при выборе монотонной меры риска расписание S_1 будет предпочтительнее расписания S_2 .

6. Выводы и перспективы

В работе сформулирована новая модель задачи календарного планирования инвестиционных проектов, учитывающая экономические эффекты, возникающие при обращении с углеродными квотами. Рассмотрены детерминированная, стохастическая и нечёткие модификации задачи. Для всех модификаций проанализированы численные примеры и продемонстрирована возможность применения разработанных ранее алгоритмов GASPIA и SASPIA. Проведённые эксперименты для детерминированного случая демонстрируют высокое качество полученных решений. Для задач в нечёткой и стохастической постановке продемонстрирован подход к сравнению расписаний. В рамках дальнейшего исследования предполагается рассмотреть вариант многокритериальной задачи, учитывающей не только экономический эффект, но и проектные риски.

Литература

1. БУЛАВЧУК А.М., СЕМЕНОВА Д.В. *Применение методов идемпотентной алгебры в генетическом алгоритме для решения задачи календарного планирования* // Прикладная дискретная математика. – 2022. – №58. – С. 112–124.
2. ВАРОЧКИНА Т.С., НОВОСЕЛОВ А.А. *Стохастическое доминирование I и II рода* // Вестник Красноярского государственного университета. Физико-математические науки. – 2004. – №5(2). – С. 15–21.
3. ВИЛЕНСКИЙ П.Л., ЛИВШИЦ В.Н., СМОЛЯК С.А. *Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика*. – М.: Поли Принт Сервис, 2015. – 1300 с.

4. КОФМАН А. *Введение в теорию нечетких множеств*. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
5. ЛИТВИНОВ Г.Л., МАСЛОВ В.П., СОБОЛЕВСКИЙ А.Н. *Идемпотентная математика и интервальный анализ // Вычислительные технологии*. – 2001. – Т. 6, №6. – С. 47–70.
6. *Постановление Правительства Российской Федерации №1441 «О ставке платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области»*. – 18.08.2022.
7. СЕРВАХ В.В., ЩЕРБИНИНА Т.А. *О сложности задачи календарного планирования проектов // Вестн. НГУ. Сер. Математика, механика, информатика*. – 2008. – Т. 8, Вып. 3. – С. 105–111.
8. *Федеральный закон №34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации»*. – 06.03.2022.
9. *Федеральный закон №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»*. – 02.07.2021.
10. BULAVCHUK A.M., SEMENOVA D.V. *Two heuristic algorithms for RCPSP with NPV criterion // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2023. – Vol. 16(5). – P. 639–650.
11. LIU B. *Theory and practice of uncertain programming*. – Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009. – 213 p.
12. LIU H., ZHANG J., ZHANG X. et al. *A new resource-constrained project scheduling problem with ladder-type carbon trading prices and its algorithm based on deep reinforcement learning // Expert Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 255. – P. 1–15.
13. TAO B., WU F., WANG X. et al. *Progressive optimization allocation model for carbon emission quotas: An empirical study of Jiangsu cities // Helyon*. – 2024. – Vol. 10, Iss. 13. – P. 1–14.

14. WANG H., FU X. *The impacts of regulatory approaches to carbon quotas on third-party logistics low-carbon financing strategies and emission reduction effects* // MDPI – 2024. – Vol. 16(15). – P. 1–27.
15. WANG J., SI F. *Research on supply chain pricing strategies under carbon emission quota constraints* // Academic Journal of Science and Technology. – 2023. – Vol. 7, No. 3. – P. 292–296.
16. WANG S. *Premium calculation by transforming the layer premium density* // ASTIN Bulletin. – 1996. – Vol. 26, Iss. 1. – P. 1–14.

ON THE PROJECT SCHEDULING PROBLEM WITH THE CRITERION FOR OPTIMIZING THE ECONOMIC EFFECT FROM THE USE OF EMISSION QUOTAS

Alexander Bulavchuk, Siberian Federal University, Krasnoyarsk (abulavchuk@sfu-kras.ru).

Daria Semenova, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Cand.Sc., associate professor (dvsemenova@sfu-kras.ru).

Abstract: The paper considers a new project scheduling problem with the criterion of maximizing the economic effect of using emission quotas. The authors formulated a problem model that takes into account the peculiarities of the emerging practice of handling carbon units in Russia. The model provides for the possibility of selling unspent carbon units. The impact on the economic effect of fines for overspending quotas is also taken into account. The statement with deterministic characteristics and two non-deterministic varieties – stochastic and fuzzy – are analyzed. When describing projects, it was believed that emission values could be non-deterministic. In the stochastic statement, the case is analyzed when the model parameters are independent and have a Weibull – Gnedenko distribution. For this case, a variant of comparing schedules using first-order stochastic dominance is proposed. In the fuzzy statement, fuzzy triangular numbers were used to describe the project. A ranking function was used to select the best schedule. For each statement, approaches to solving the problem based on modifications of the GASPIA and SASPIA algorithms are demonstrated. The modified GASPIA algorithm used a new crossing scheme. For a conditional example of the project, computational experiments were conducted demonstrating the applicability of the proposed algorithms to solving the problem.

Keywords: project scheduling problem, carbon quotas, heuristic algorithms, stochastic dominance, fuzzy ranking.

УДК 519.85

ББК 22.18

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Г.А. Угольницким.*

Поступила в редакцию 14.10.2024.

Дата опубликования 31.01.2025.