

УДК 656.224.053.2

Г. В. АХРАМЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; П. Г. АХРАМЕНКО, кандидат экономических наук, Международный университет ФПБ «МИТСО», Гомельский филиал

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ СНЯТИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ СКОРОСТИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Обосновывается возможность повышения скоростей движения пассажирских поездов на межрегиональных линиях небольшого протяжения. Рассматриваются методы формирования оптимальной стратегии снятия ограничений скорости, такие как метод «наискорейшего спуска», «прямого перебора», «перебора с ограничением» применительно к решению поставленной задачи. Вводятся понятия «независимые» и «взаимозависимые» ограничения скорости. Для выбора конкурентоспособных решений предлагается применить метод Парето. Применение этих оптимизационных методов иллюстрируется примером выбора эффективных решений на участке железной дороги со смешанными ограничениями скорости.

**В**ведение. Повышение скоростей пассажирских поездов – одно из приоритетных направлений научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте. В современных условиях актуальным является движение пассажирских поездов с максимальными скоростями от 140 до 350 км/ч, при следующей организации движения:

а) совмещенное движение грузовых и пассажирских поездов:

– до 140–160 км/ч – скоростное движение поездов на обычных железных дорогах после капитального ремонта пути;

– до 200 км/ч – скоростное движение поездов на реконструированных линиях;

б) движение только пассажирских поездов:

– свыше 200 км/ч – высокоскоростное движение на вновь сооруженных высокоскоростных магистралях (ВСМ).

Следует отметить, что значительное повышение скоростей движения пассажирских поездов будет носить при определенных условиях и коммерческий интерес для отрасли, так как железные дороги смогут предоставлять пассажирам конкурентоспособную по отношению к авиа- и автотранспорту услугу.

По существующим прогнозам скоростное движение в ближайшем будущем может охватить значительно более широкий сектор пассажирских перевозок, чем высокоскоростное, так как его организация не связана со строительством новых линий, хотя и требует существенных затрат на реконструкцию.

В Республике Беларусь ведется активная научно-исследовательская работа в данном направлении. Речь идет не только о повышении скорости в транспортных коридорах (II и IX), но и на линиях межрегионального сообщения, связывающих столицу с областными центрами. В настоящее время успешно курсируют поезда эконом-класса типа «Stadler» на направлениях Минск – Гомель, Минск – Молодечно, Минск – Брест и др., которые пользуются большим спросом.

Тем не менее повышение скорости не только обеспечивает экономии, но и вызывает дополнительные транспортные затраты. Их величина зависит от того, за счет каких мероприятий обеспечивается рост скоростей [1].

Анализ причин ограничения скорости пассажирских и грузовых поездов показал, что главными факто-

рами, которые сдерживают повышение скорости, являются:

– состояние верхнего строения пути (сверхнормативный износ стрелочных переводов, наличие дефектных креплений и шпал).

– план линии с недостаточными длинами переходных кривых, наличие кривых малых радиусов (500 и меньше);

– станционные устройства, которые нуждаются в модернизации или реконструкции;

– потери времени на разгон и торможение поезда для остановки на станции;

– состояние связи, СЦБ и других устройств, которые влияют на скорость движения поездов и др.

Практика показывает, что машинисты ведут поезда с максимально допустимой скоростью лишь в исключительных случаях и кратковременно, так как это сопряжено с чрезмерно напряженным режимом работы бригады, агрегатов локомотива и повышением расхода электроэнергии и топлива. Существенные поправки в фактический диапазон скоростей движения вносят погодные условия, профиль и план пути, состояние локомотива.

Повысить скорости движения поездов можно за счет [2]:

– модернизации постоянных устройств, целью которой является снятие ограничений скорости (число их зависит от рода тяги и особенно от скорости движения поездов);

– осуществления организационно-технических мероприятий.

В представленной статье рассмотрен вопрос о разработке оптимальной стратегии снятия ограничений скорости на направлениях небольшой протяженности (до 350 км), что соответствует расстояниям между г. Минск и областными центрами.

**Основная часть.** Задача ликвидации ограничений скорости сводится к разработке оптимальной программы модернизации постоянных устройств железнодорожной линии. Методы решения поставленной задачи зависят от того, существует ли взаимное влияние участков, ограничивающих скорость, на очертание кривой скорости  $v = f(S)$ .

По взаимному влиянию ограничения скорости можно разделить на две категории: независимые и зависи-

мые. К независимым ограничениям скорости для конкретного железнодорожного направления можно отнести такие, после снятия которых кривая скорости достигает тех же значений, что и при существующем ограничении скорости к началу торможения к следующему участку, ограничивающему скорость. В этом случае выигрыш во времени при снятии ограничений аддитивен. В аддитивных критериях целевая функция образуется путем сложения выходных параметров, преобразованных к безразмерным слагаемым. Это осуществляется с помощью введения нормирующих множителей – весовых коэффициентов. Нормирование необходимо для объединения нескольких выходных параметров, имеющих в общем случае различную физическую размерность. Тогда целевая функция имеет вид

$$f(x) = \sum_{j=1}^m \omega_j y_j(x), \quad (1)$$

где  $\omega_j$  – весовой коэффициент, определяемый самим инженером или группой экспертов [3].

В этом случае выигрыш во времени при снятии независимых ограничений скорости можно представить в следующем виде:

$$\Delta t(c_1, c_2, \dots, c_n) = \Delta t_{c1} + \Delta t_{c2} + \dots + \Delta t_{cn}, \quad (2)$$

где  $\Delta t(c_1, c_2, \dots, c_n)$  – сокращение времени хода при снятии всех ограничений скорости, мин;  $\Delta t_{c1}, \Delta t_{c2}, \dots, \Delta t_{cn}$  – сокращение времени хода при снятии ограничений  $c_1, c_2, \dots, c_n$  на один уровень в пределах расчетного периода, мин.

Смежные ограничения скорости для конкретного направления железнодорожной линии являются зависимыми, если после снятия первого по ходу движения поезда скорость движения в точке начала торможения к следующему ограничению отличается от той, которая была при действующем ограничении. В таком случае условие (2) не выполняется. Поэтому возникает необходимость применения метода, который учитывает эту особенность, но в то же время позволяет значительно упростить задачу, имеющую много переменных.

В общем случае как на участках с независимыми ограничениями скорости, так и на участках с зависимыми необходимо разработать оптимальную программу ликвидации ограничений скорости. Различие состоит в том, что в первом случае требуется построение кривой скорости только в пределах снимаемых ограничений, причем один раз, так как суммарное сокращение времени хода состоит из суммы сокращений времени хода в результате устранения каждого ограничения. Такой подход значительно облегчает и упрощает задачу определения сокращений времени хода на направлениях с независимыми ограничениями скорости. На участках с взаимозависимыми ограничениями скорости требуется построение кривой скорости для всего участка, находящегося в зоне влияния данных ограничений, причем такое построение кривой  $v = f(S)$  может повторяться  $2^n$  раз ( $n$  – число взаимозависимых ограничений скорости). Следовательно, процесс определения выигрыша во времени при снятии взаимозависимых ограничений скорости достаточно трудоемкий и требует подходов, сокращающих число вычислительных процедур и графических построений. Таким образом возникает вопрос в

выборе методов, позволяющих определить оптимальные содержание и последовательность мероприятий для увеличения скорости пассажирских поездов, в наибольшей степени учитывающих реальные условия движения.

Поставленная проблема может быть формализована как задача целочисленного программирования, так как в пределах каждого ограничения скорости возможны два состояния, т. е. ограничение снято или оставлено, что соответствует условию целочисленности.

Наиболее известным и широко применяемым методом для оптимизации на дискретных множествах является метод прямого перебора возможных вариантов решений с целью нахождения среди них оптимального [4]. Применительно к задачам малой размерности такой подход вполне оправдывает себя [5], однако задачи, содержащие большое число переменных, оказываются настолько сложными, что поиск эффективных быстродействующих алгоритмов при прямом переборе приводит к дополнительным трудностям [5].

В общем случае при наличии на железнодорожном направлении, предназначенном для повышения скоростей с целью введения ускоренных поездов межрегионального сообщения, небольшого числа ограничений скорости можно решать поставленную задачу методом прямого перебора. Использование этого метода предполагает просмотр всех возможных вариантов, которые могут существовать при различных комбинациях снятия ограничений скорости, безотносительно к тому, зависимые они или независимые. При наличии на направлении  $n$  ограничений скорости требуется проанализировать  $2^n$  вариантов решений, включая и нулевое состояние, кроме того, в случае взаимозависимых ограничений скорости столько же раз должна строиться и кривая  $v = f(S)$ , что, конечно, в некоторой степени увеличивает трудоемкость процесса вычислений.

Анализ существующих «фильтрационных» методов [6] показал, что для их применения необходимо наличие критерия, обладающего свойством аддитивности. В данном случае при снятии ограничений скорости в качестве критерия принят коэффициент эффективности инвестиций ARR (учетная норма доходности), так как применение этого критерия позволяет учесть изменения в эксплуатационных расходах. Коэффициент эффективности можно определить по формуле [7]

$$ARR = \frac{P_r}{I_0}, \quad (3)$$

где  $P_r$  – среднегодовая величина чистой прибыли, в данном случае – экономия в эксплуатационных расходах, млн руб./год;  $I_0$  – инвестиции, необходимые для снятия ограничений скорости, млн руб.

Принятый критерий не обладает свойством аддитивности, что не позволяет широко применять «фильтрационные» методы для поиска оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств. В случае выбора в качестве критерия сокращение времени хода (необходимо максимизировать) или суммарные инвестиции (необходимо минимизировать) применение указанных методов вполне обоснованно и позволяет значительно облегчить трудоемкий процесс вычислений.

Таким образом, для решения задачи поиска оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств, направленной на снятие ограничений скорости, предлагается использовать методы прямого перебора. Однако в случае наличия на железнодорожном направлении только независимых ограничений скорости для поиска оптимального решения возможно применение одного из методов возможных направлений, основанного на принципах «наискорейшего спуска» [8, 9]. Общую схему алгоритмов, построенных на методах спуска, можно представить следующим образом. Пусть имеется некоторая точка  $x^k$ , полученная на  $k$ -м шаге процесса поиска максимума, тогда:

- строится направление спуска  $y^k$ ;
- определяется шаг спуска  $S^k$ ;
- точка  $x^{k+1}$  вычисляется по формуле  $x^{k+1} = x^k + S^k \cdot y^k$ .

Этот метод необходимо адаптировать применительно к специфике задачи поиска оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств. В данном случае направление спуска определяется последовательностью, ранжированной по убыванию коэффициента эффективности инвестиций аналогично методу «наискорейшего спуска».

Такой подход к решению задачи может быть применен и к направлениям, характеризующимся наличием смешанных ограничений скорости, если есть возможность локализации взаимозависимых ограничений скорости в блоки, включающие до 6–7 ограничений указанного типа. Тогда железнодорожное направление можно рассматривать как направление с независимыми ограничениями скорости, где наряду с действительно независимыми ограничениями рассматриваются в качестве независимых и блоки.

Таким образом, складываются два подхода к решению задачи поиска оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств, выбор любого из них зависит от вида ограничений на рассматриваемом направлении:

- метод прямого перебора при наличии на направлении только взаимозависимых ограничений скорости;
- метод, основанный на принципах «наискорейшего спуска» при наличии независимых ограничений скорости или при возможности локализации блоков, включающих до 6–7 взаимозависимых ограничений скорости, в пределах которых конкурентоспособные варианты определяются методом прямого перебора и являются независимыми ограничениями скорости.

В обоих подходах возможно сокращение трудоемкости вычислительных процедур путем введения следующих допущений, которые не оказывают значительного влияния на окончательный результат, но позволяют существенно упростить вычислительный процесс:

- линейная аппроксимация кривой скорости  $v = f(S)$ , значительно упрощающая определение времени хода и его сокращение в случае снятия ограничений скорости;
- локализация на участках, характеризующихся наличием смешанных ограничений скорости, взаимозависимых ограничений в блоки;
- приведение взаимозависимых ограничений скорости к условно независимым.

Выделение эффективных решений среди всех возможных может быть произведено путем построения доминирующей по критерию коэффициента эффективности инвестиций последовательности и нахождение

тех допустимых решений, у которых все критерии первого решения больше или равны соответствующим критериям второго решения, причем хотя бы один из них действительно больше. В результате такой процедуры сохраняются только эффективные (конкурентоспособные) решения, характерные тем, что ни для одного из них не существует доминирующего решения. Процедура выделения конкурентоспособных решений может осуществляться и графически с помощью метода Парето [10, 11]. Суть данного метода заключается в следующем. Предположим, что необходимо решить задачу выбора альтернативы из множества возможных по двум критериям  $w_1$  и  $w_2$ , которые требуется максимизировать. Множество  $x$  состоит из конечного числа  $n$  возможных решений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Каждому решению соответствуют определенные значения показателей  $w_1$  и  $w_2$  (рисунок 1). Множество решений может быть представлено на плоскости с координатами  $w_1, w_2$ .

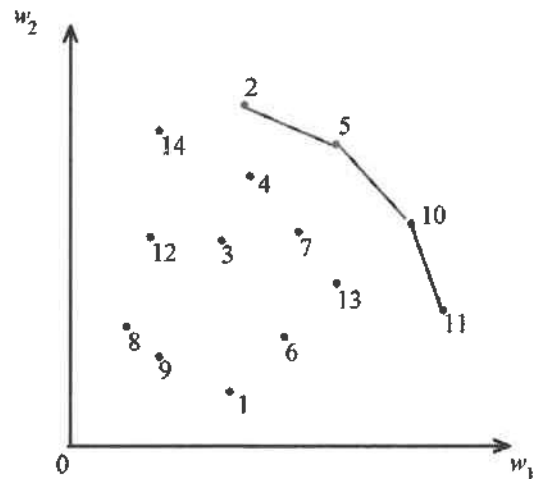


Рисунок 1 – Выделение эффективных решений с помощью метода Парето

Очевидно, что из всего множества  $x$  эффективными будут только решения  $x_2, x_5, x_{10}$  и  $x_{11}$ , лежащие на правой верхней границе области возможных решений. Для всякого другого решения существует хотя бы одно доминирующее решение, для которого либо  $w_1$ , либо  $w_2$ , либо оба больше, чем для данного. И только для решений, лежащих на правой верхней границе, доминирующих решений не существует.

Когда из множества возможных решений выделены эффективные, дальнейший выбор можно вести уже в пределах этого «эффективного» множества, что радикально упрощает решение задачи. На рисунке 1 эффективное множество образуют четыре решения:  $x_2, x_5, x_{10}$  и  $x_{11}$ , из которых  $x_{11}$  — наилучшее по критерию  $w_1$ , а  $x_2$  — по критерию  $w_2$ . Лицо, принимающее решение (ЛПР), теперь имеет возможность выбрать вариант, который для него предпочтителен по обоим критериям.

Реализацию рассмотренных методов по выявлению оптимальной последовательности снятия ограничений скорости рассмотрим применительно к примеру, приведенному на рисунке 2, на котором приводится участок железнодорожного направления протяженностью 31,25 км со смешанными ограничениями скорости (всего на участке их 8).

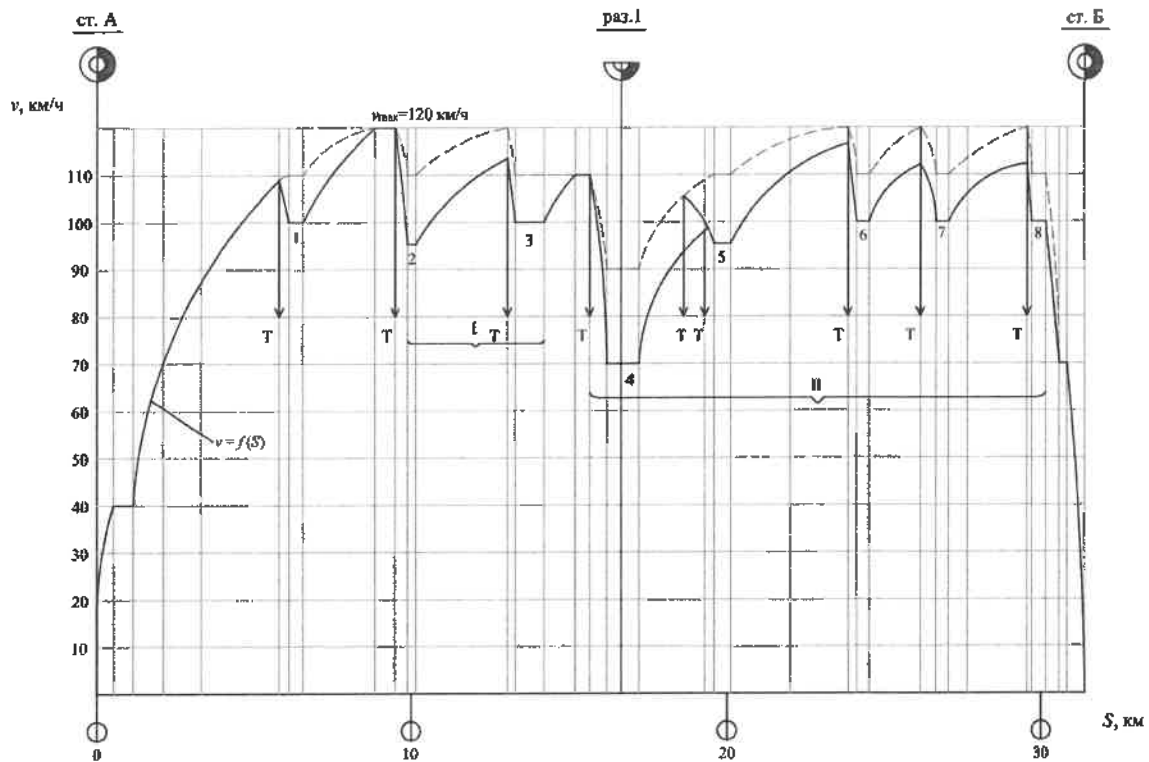


Рисунок 2 – Выделение взаимосвязанных ограничений скорости в блоки:  
 1, 2 ... 8 – существующие ограничения скорости; Т – начало торможения; I, II – локализованные блоки взаимосвязанных ограничений скорости; — – кривая  $v = f(S)$  с учетом ограничений скорости; - - - – кривая  $v = f(S)$  при снятии всех возможных ограничений скорости

Целью решения задачи является поиск оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств, в результате которой может быть достигнуто необходимое сокращение времени хода. В данном случае сокращение времени хода, которое необходимо получить в результате модернизации,  $\Delta t$ , принято равным 1 мин.

При первом подходе к решению задачи для выявления допустимых вариантов, отвечающих заданному сокращению времени хода, необходимо наметить в соответствии с методом прямого перебора  $2^8$  состояний и произвести столько же построений кривой скорости  $v = f(S)$ . Таким образом, число всех возможных вариантов составляет 256, включая и нулевое состояние. Выделение допустимых вариантов, а также ранжирование их по коэффициенту эффективности инвестиций производится при помощи алгоритмов, приведенных в [12].

В результате получено 29 допустимых вариантов, отвечающих заданному сокращению времени хода. Для выделения конкурентоспособных вариантов использован метод Парето, в результате которого получено 7 конкурентоспособных вариантов (рисунок 3): это  $z_1, z_3,$

$z_4, z_9, z_{11}, z_{20}, z_{27}$  (их характеристики представлены в таблице 1), обеспечивающих заданное сокращение времени хода.

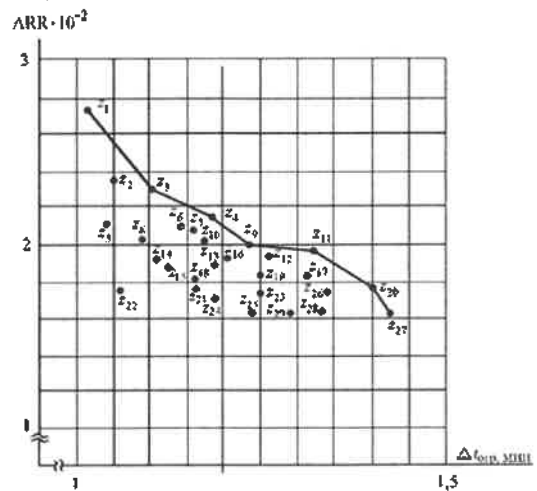


Рисунок 3 – Выделение конкурентоспособных вариантов из числа допустимых

Таблица 1 – Конкурентоспособные варианты снятия ограничений скорости при  $\Delta t = 1$  мин

Конкурентоспособные варианты	Участки, ограничивающие скорость движения								Суммарное сокращение времени хода $\Delta t_{обр}, \text{мин}$	Коэффициент эффективности инвестиций ARR
	1	2	3	4	5	6	7	8		
$z_1$	0	1	1	1	0	0	0	0	1,02	0,0272
$z_3$	1	1	1	1	0	0	0	0	1,10	0,0229
$z_4$	0	1	1	1	1	0	1	0	1,18	0,0212
$z_9$	0	1	1	1	1	1	0	0	1,23	0,0202
$z_{11}$	0	1	1	1	1	1	1	0	1,32	0,0196
$z_{20}$	1	1	1	1	1	1	1	0	1,40	0,0180
$z_{27}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1,42	0,0164

Примечание – 1 – ограничение снято; 0 – ограничение оставлено.

Полученные конкурентоспособные варианты представляются в распоряжение ЛПР, принимающего окончательное решение, соотносясь с практической ценностью каждого из них, а также с наличием в его распоряжении выделенных инвестиций.

**Вывод.** В статье предложена методика формирования оптимальной стратегии снятия ограничений скорости, которая позволяет учесть особенности направлений малой протяженности. В качестве критерия предложен коэффициент эффективности инвестиций, позволяющий учитывать не только необходимые инвестиции, но и изменения в эксплуатационных расходах.

Предлагаемые подходы к решению задачи оптимальной стратегии модернизации постоянных устройств зависят от вида ограничений на рассматриваемом направлении. По взаимному влиянию ограничения скорости классифицированы на независимые и зависимые. При наличии на направлении только независимых ограничений поиск оптимального решения осуществляется ЛПР на основании последовательности, ранжированной по коэффициенту эффективности инвестиций, основанному на принципах «наискорейшего спуска». Если на направлении присутствуют только взаимозависимые ограничения, то выбор оптимального решения осуществляется ЛПР на основании конкурентоспособных вариантов, полученных в результате реализации метода прямого перебора. При наличии на направлении смешанных ограничений скорости выбор оптимального решения производится на основе комбинированного подхода с учетом допущений, упрощающих процесс вычислений.

#### Список литературы

1 Экономика железнодорожного транспорта : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Н. П. Терёшина [и др.] ; под ред.

Получено 04.04.2023

**G. V. Akhramenko, P. G. Akhramenko.** Formation of an optimal strategy for removing speed limits in order to increase the speed of passenger trains on interregional lines.

The possibility of increasing the speeds of passenger trains on interregional lines of small length is substantiated. The methods of forming an optimal strategy for removing speed limits are considered, such as the method of "steepest descent", "direct brute force", "brute force with restriction" in relation to solving the problem. The concepts of "independent" and "interdependent" speed limits are introduced. To select competitive solutions, it is proposed to apply the Pareto method. The application of these optimization methods is illustrated by an example of choosing effective solutions on a railway section with mixed speed limits.

Н. П. Терёшиной, Б. М. Лалидуса, М. Ф. Трихункова. – М. : УМЦ ЖДТ. – 2006.

2 **Ахраменко, Г. В.** Особливості підвищення швидкостей руху поїздів на залізничних лініях міжрегіонального сполучення / Г. В. Ахраменко, Т. О. Дубровська // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – № 182. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – С. 53–62.

3 **Бельков, В. Н.** Автоматизированное проектирование технических систем : учеб. пособие / В. Н. Бельков, В. Л. Ланшаков. – М. : Академия Естествознания, 2009. – 143 с.

4 **Лапицкая, Н. В.** Методы оптимизации. В 4 ч. Ч 1. Линейная оптимизация и ее приложения : учеб.-метод. пособие / Н. В. Лапицкая, Н. П. Можей. – Минск : БГУИР, 2018. – 179 с.

5 **Подinovский, В. В.** Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В. В. Подinovский, В. М. Гаврилов. – 2-е изд. – М. : Изд-во URSS, 2016. – 194 с.

6 **Костюкова, О. И.** Исследование операций : учеб. пособие для студ. спец. 31 03 04 «Информатика» всех форм обучения / О. И. Костюкова. – Минск : БГУИР, 2003. – 94 с.

7 **Ахраменко, Г. В.** Регрессионный анализ эффективности строительства автомобильной дороги в Припятском Полесье (Республика Беларусь) / Г. В. Ахраменко, П. Г. Ахраменко // Вестник СГУПС. – 2021. – № 3 (58). – С. 96–104.

8 **Вентцель, Е. С.** Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – 5-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2010. – 191 с.

9 **Курицкий, Б. Я.** Оптимизация вокруг нас: Как математика помогает принимать решения / Б. Я. Курицкий. – 2-е изд., доп. – М. : Изд-во URSS, 2018. – 152 с.

10 **Ахраменко, Г. В.** Оптимизация проектных решений при проектировании железных дорог / Г. В. Ахраменко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 60–64.

11 **Подinovский, В. В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подinovский, В. Д. Ногин. – М. : Физматлит, 2007. – 256 с.

12 **Кононюк, А. Е.** Основы теории оптимизации. Безусловная оптимизация / А. Е. Кононюк. – Киев : Освіта України, 2011. – 544 с.