

УДК 656.05

А. А. МИХАЛЬЧЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ВХОДНОГО ПОТОКА ПОЕЗДОВ НА РЕЗЕРВИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Приведены результаты исследований влияния неопределённости входного потока поездов на резервирование ресурсов железной дороги. Рассматривается результативность методического обоснования прогнозирования потока поездов для железной дороги и возможности эффективного применения имеющихся у железной дороги ресурсов, употребляемых при выполнении поездной работы, а также новые направления использования теории расписаний при формировании графика пропуска грузовых поездов на направлениях, включённых в международные транспортные коридоры.

Изменение внутреннего состояния транспортной системы, в частности железной дороги, в целом и структурных подразделений различного уровня определяется в большинстве случаев внешними воздействиями. В качестве внешних воздействий на железнодорожную систему следует рассматривать входной поток грузовых поездов. В зависимости от его величины определяется потребность необходимых ресурсов железнодорожных подсистем, направляемых на его освоение. Определяется зависимость управляющих воздействий, представленная в виде следующих векторов:

– состояния железнодорожной системы –

$$\vec{z}(t) = f(z_0(t), x(t)); \quad (1)$$

– выходного потока –

$$\vec{y}(t) = \varphi(z(t), x(t)); \quad (2)$$

– ресурсного обеспечения –

$$\vec{r}(t) = y(t), x(t), \quad (3)$$

где $f(z_0(t))$ – доходы железной дороги, которые могут быть получены при реализации выходного потока поездов исходя из начального состояния железнодорожных подсистем; $x(t)$ – входной поток поездов; $\varphi(z(t))$ – финансовые затраты, направляемые на освоение потока поездов; $y(t)$ – выходной поток поездов.

Динамика изменения входного потока поездов показана на рисунке 1, а.

Из рисунка 1, а видно, что входной поток грузовых поездов за отмеченный период существенно изменился в сторону понижения. В соответствие входному потоку грузовых поездов рассматривается потребление ресурсов на его освоение (рисунок 1, б).

Из диаграмм, приведенных на рисунке 1, б, видно, что обеспечение необходимыми ресурсами железных дорог на освоение потока поездов имеют тенденцию к уменьшению. При этом следует отметить неизменность постоянных расходов, которые составляют значительную долю в себестоимости перевозок. Снижение обеспеченности ресурсами транспортного процесса связано с кризисами 2008–2010 и 2013–2014 гг.

При определении уровня влияния неопределённости входного потока поездов на резервирование ресурсов железной дороги наиболее результативным является применение энтропийного метода анализа данных для процедуры определения наилучших доступных технологий [1].

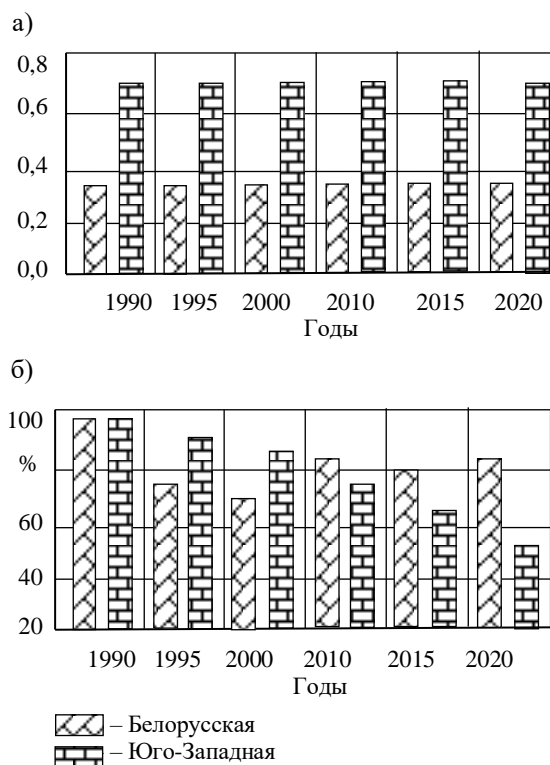


Рисунок 1 – Динамика изменения входного потока грузовых поездов на железную дорогу (а) и обеспечения ресурсами на его освоение (б)

Оценка входного потока поездов на железную дорогу наиболее приближённо описывается в векторной форме. Вектор входного потока поездов относится к управляющим переменным, для которых характерна наибольшая неопределённость. Он является определяющим при установлении в процессе оперативного планирования состояния транспортного объекта в течение планового периода $Z(T_{пл})$ и конечной результативности работы железной дороги – выходного потока поездов в течение планового периода

$$Y(T_{пл}) = \sum_{i=1}^K y_i(t), \quad (4)$$

где $y_i(t)$ – выходной поток поездов по i -му технологическому инфраструктурному каналу.

При этом устанавливается соотношение между входным и выходным потоками поездов. В условиях оперативного планирования поездной работы каждого инфраструктурного объекта важно знать величину неопределённости входного потока поездов на любой момент пе-

риода планирования ($t_i \in T_{пл}$). Уровень неопределённости входного потока поездов может быть установлен с учётом (1)–(3) с использованием для этих целей модели и методов управления сетевыми структурами в кризисных ситуациях или при прогнозировании долгосрочных программ развития транспортных систем [2].

Полное выяснение неопределённости входного потока поездов при значении его вероятностных характеристик, т. е. когда входной поток поездов может быть описан математической зависимостью.

На весь период планирования можно установить вероятность того, что за плановый период прибудет определённое количество поездов $N_{пл}$:

$$\omega(N_{пл}) = P(N_{пл}), \quad (5)$$

что приведёт к дискретности изучаемых вариантов по интервалам времени, неприемлемой для железной дороги. Проведены исследования входного потока поездов при различной продолжительности периода планирования (рисунок 2).

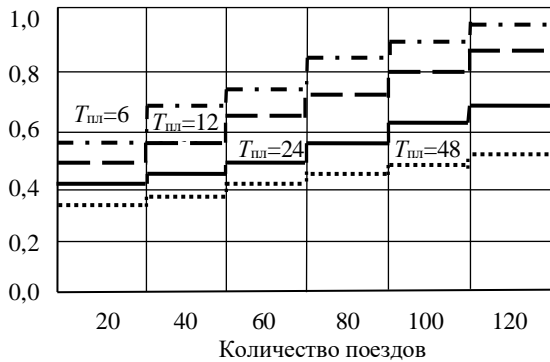


Рисунок 2 – Динамика вероятности поступления ожидаемого количества поездов по периодам планирования

Согласно диаграммам на рисунке 2 наиболее точный прогноз может быть получен на шестичасовой период и при большом входном потоке поездов. В соответствии с (1)–(3) внутреннее состояние транспортной системы объединяется известным значением входного потока поездов, ресурсов и выходного потока. Функциональная схема взаимосвязанных элементов транспортного процесса, зависящих от входного потока поездов, приведена на рисунке 3.

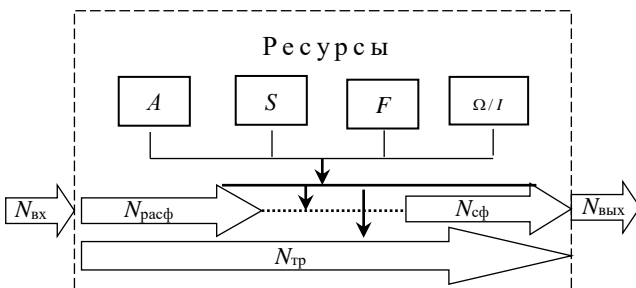


Рисунок 3 – Функциональная схема взаимосвязанных элементов транспортного процесса

В соответствии с приведенной на рисунке 3 функциональной схемой взаимодействие потока поездов и использование имеющихся в транспортной системе ресурсов описывается предикатным уравнением с рассмотрением кванторов следующего вида [3, 4]:

$$\begin{aligned} & \forall (N_{вх}) \forall (A) \forall (S) \forall (F) \forall (\Omega) [P(N_{вх}, D_k \{N_{вх}, A, S, F, \Omega\})] \\ & \text{и } N_{вых}(N_{вх}, A, S, F, \Omega) \Rightarrow \\ & \Rightarrow [P(N_{вх}, D_k \{N_{вх}, A, S, F\})] \\ & \text{и } [P(\Omega, D_k \{N_{вх}, A, S, F\})], \end{aligned} \quad (6)$$

где $N_{вых}(N_{вх}, A, S, F, \Omega)$ – заданный предикат, определенный для всех пар структурных связей между взаимосвязанными элементами транспортного процесса, обеспечивающие реализацию входного потока поездов, воздействий материального потока ($N_{вх}$), его трансформированного выхода ($N_{вых}$) при использовании имеющихся ресурсов железной дороги.

Они обеспечивают устойчивое функционирование железной дороги при трансформации входного потока. При этом ресурсы транспортной организации распределены на постоянные (не зависящие от объема перевозок) и переменные.

Распределение трудовых ресурсов, используемых для освоения входного потока поездов, имеет следующую формализацию:

$$A(N_{вх}) = \begin{cases} A(Z) = \text{const}; \\ A(T) = \text{variable}, \end{cases} \quad (7)$$

где $A(Z)$ – трудовые ресурсы железнодорожной организации, обеспечивающие функциональную деятельность инфраструктуры и управления; $A(T)$ – переменные трудовые ресурсы, связанные непосредственно с перевозочным процессом (персонал ремонтных работников, локомотивные бригады и др.).

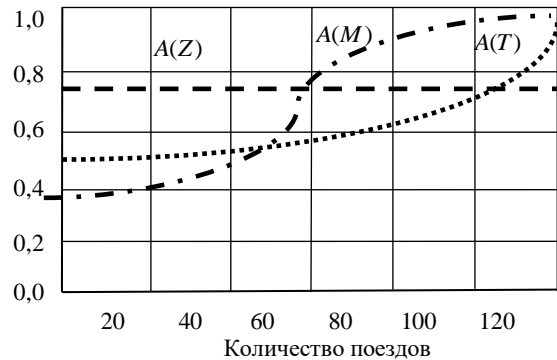


Рисунок 4 – Распределение трудовых ресурсов, направляемых на освоение входного потока поездов

В соответствии с диаграммами, приведенными на рисунке 4, можно отметить ситуацию, при которой использование трудовых ресурсов имеет следующие особенности:

- постоянный контингент административного и оперативного персонала $A(Z)$, который составляет 76,4 % (в США – 47,3 %). При входном потоке поездов, составляющем более 70 поездов, он используется полностью, при большей его величине – постоянный контингент используется более эффективно;

- переменный контингент $A(T)$ зависит от объема перевозок и составляет 23,6 % в наших условиях, при объеме перевозок 106–108 поездов используется более эффективно. Для данного контингента в ряде железнодорожных администраций используется подрядная форма организации труда, что позволяет более эффективно использовать финансовые ресурсы, направляемые на оплату труда;

– важное значение имеет использование ресурса локомотивных бригад $A(M)$. При интервале 60 поездов отмечается недостаток этого ресурса, который в данном интервале резко возрастает. Идет перерасход фонда оплаты труда.

Технологические ресурсы $S(N_{\text{вх}})$, необходимые для переработки входного потока поездов, распределяются по трём составляющим:

$$S(N_{\text{вх}}) = \begin{cases} S_r(Z) = \text{const}; \\ S(W) = \text{variable}; \\ S(E) = \text{variable}, \end{cases} \quad (8)$$

где $S_r(Z)$ – постоянная составляющая технологического ресурса железной дороги (пропускные способности участков, перерабатывающие способности станций); $S(W)$ – переменные технологические ресурсы железной дороги; $S(E)$ – энергетический ресурс для функционального поддержания технологических устройств железной дороги.

С использованием синтеза реальных опционов и метода нечетких множеств для оценки эффективности физических процессов транспортной деятельности выполняется оценка транспортных инновационных проектов [5].

С использованием данных принципов и алгоритмизации процессов принятия решений по планированию входных потоков в условиях информационной неопределенности [6] рассматривается динамика изменения технологического ресурса в зависимости от размеров входного потока поездов (рисунок 5, а).

Из диаграмм, приведенных на рисунке 5, а, видно следующее.

1 Технологический ресурс железной дороги $S_r(Z)$ при любом размере входного потока является постоянной составляющей. Однако при объеме максимального входного потока поездов, на который рассчитан данный вид ресурсов, он используется более эффективно. Наличие неопределенности входного потока снижает эффективность использования ресурса. По результатам исследований, проведенных на Белорусской и Юго-Западной железных дорогах, можно отметить следующее. При значительной неопределенности размеров входного потока поездов избыточность технологического ресурса приносит значительные убытки. Для их покрытия железнодорожной администрации приходится изыскивать кредитные ресурсы.

2 Переменная часть технологического ресурса $S(W)$ включает затраты на техническую эксплуатацию железнодорожной инфраструктуры. Значительная часть технологического ресурса относится к переменному фактору: путь, контактная сеть. Их износ и потребность в поддержании работоспособности напрямую зависят от объема пропущенных поездов.

3 Энергетический ресурс, относимый к переменной составляющей инфраструктуры, следует рассматривать по двум элементам

$$S(E) = \begin{cases} E(S) = \text{const}; \\ E(W) = \text{variable}, \end{cases} \quad (9)$$

где $E(S)$ – постоянная составляющая энергетического ресурса, направленного на электроснабжение постоянных устройств инфраструктуры железной дороги, не

зависящее от размеров движения поездов; $E(W)$ – переменная составляющая энергетического ресурса, зависящая от размеров движения поездов.

Следует учитывать, что энергетический ресурс, входящий в состав технологического ресурса, распределяется на обеспечение тяги поездов и жизнедеятельности инфраструктурных объектов.

Динамика изменения энергетического ресурса, рассматриваемого в структуре технологического ресурса, в зависимости от размеров входного потока поездов приведена на рисунке 5, б.

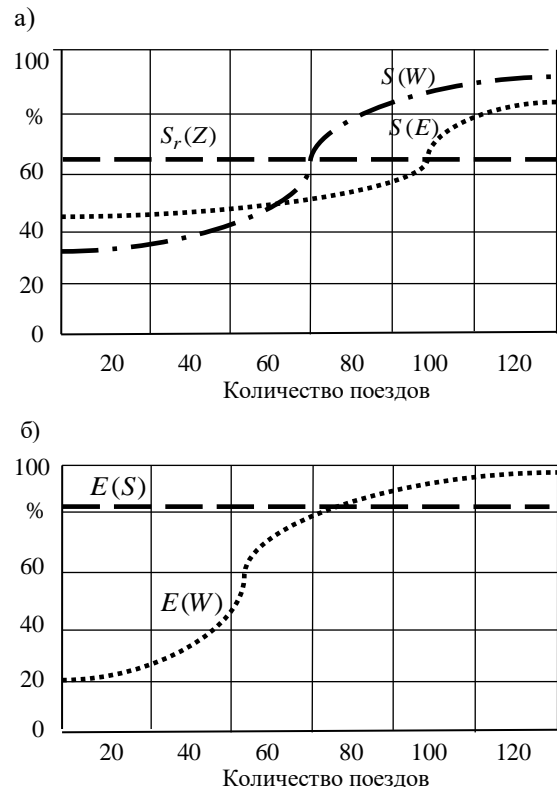


Рисунок 5 – Распределение технологических ресурсов, направляемых на освоение входного потока поездов (а) и энергетических ресурсов, направляемых на его освоение (б)

Из диаграмм, приведенных на рисунке 5, б, видно, что в зависимости от объема перевозок энергетические затраты на жизнеобеспечение практически поддерживаются на уровне 80–82 % от проектной потребности. При энергообеспечении тяги поездов практически при их поступлении до 50 поездов в сутки неопределенность дополнительного резервирования данного вида ресурсов сохраняется на уровне 40 %. При большей неопределенности входного потока поездов резерв энергетического ресурса существенно возрастает.

Энергетический ресурс может рассматриваться отдельно в предикатной зависимости, так как он оказывает активное влияние на стабильность выполнения поездной работы и тарифы.

Финансовые ресурсы, затрачиваемые при освоении входного потока поездов, рассматриваются по следующим составляющим элементам:

$$R(F) = \begin{cases} F(S) = \text{const}; \\ F(A) = \text{const}; \\ F(W) = \text{variable}, \end{cases} \quad (10)$$

где $F(S)$ – постоянная составляющая финансового ресурса, направленного на техническую эксплуатацию постоянных устройств инфраструктуры железной дороги, не зависящая от размеров движения поездов; $F(A)$, $F(W)$ – переменные составляющие финансового ресурса, зависящие от размеров входного потока поездов: административно-управленческий ресурс функциональных отраслевых хозяйств железной дороги. При этом функция $F(W)$ прямолинейно зависит от размеров входного потока поездов (расходы на эксплуатацию технических устройств, энергоснабжение).

Динамика изменения финансового ресурса в зависимости от неопределенности размеров входного потока поездов приведена на рисунке 6, а.

Из диаграмм, приведенных на рисунке 6, а, видно, что постоянные расходы при неопределенности входного потока поездов на железных дорогах СНГ составляют 68–70 %. На железных дорогах Скандинавских стран при неопределенности входного потока на уровне свыше 85 % этот вид ресурсов составляет 22–30 %. При этом финансовые ресурсы, направляемые на административные нужды обеспечения поездной работы, существенно изменяются при объеме входного потока свыше 100 поездов.

Ресурсы информационно-управленческого параметра, затрачиваемые при освоении входного потока поездов, рассматриваются по двум составляющим:

$$R(\Omega) = \begin{cases} \Omega(A) = \text{const}; \\ \Omega(I) = \text{variable}; \\ \Omega(MN) = \text{variable}, \end{cases} \quad (11)$$

где $\Omega(A)$ – постоянная составляющая финансового ресурса, направленного на информационное и управленческое обеспечение персонала; $\Omega(I)$ – переменная составляющая финансового ресурса, направленного на информационное обеспечение персонала и использование информационных технологий; $\Omega(MN)$ – переменная составляющая финансового ресурса, направленного на обеспечение ресурса по управлению перевозками.

Динамика изменения информационно-управленческого ресурса в зависимости от неопределенности входного потока поездов приведена на рисунке 6, б.

Из диаграмм, приведенных на рисунке 6, б, видно, что постоянные расходы при неопределенности входного потока поездов на железных дорогах СНГ составляют 83,2 %. Переменные ресурсы, направляемые на выполнение информационно-управленческих функций железной дороги, изменяются при неопределенности на уровне 52–70 % и объеме поступления потока поездов в размере 60–80 ед. Для переменной части ресурсов, связанных с использованием информационных технологий при организации перевозок, эти интервалы составляют соответственно 60–68 % при размерах движения 90 пар поездов.

Необходимо отметить, что распределение ресурсов в зависимости от уровня неопределенности входного потока поездов связано с изменением кванторов.

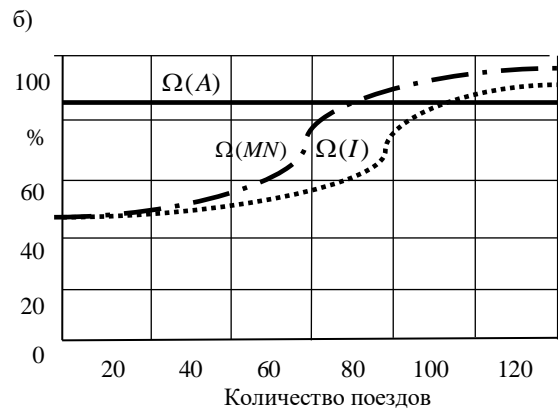
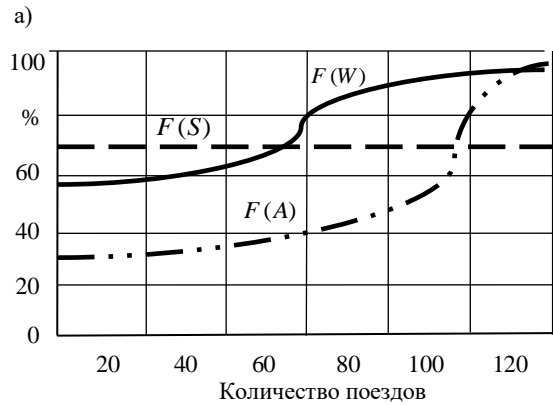


Рисунок 6 – Распределение финансовых ресурсов, направляемых на освоение входного потока поездов (а) и информационно-управленческого ресурса, направляемого на освоение входного потока поездов (б)

По результатам расчётов получаются зависимости, которые подчиняются основным положениям коммутативных законов и справедливы только для одноименных кванторов [1]. Это означает, что разноименные кванторы менять местами нельзя, так как в данном случае формируется уравнение взаимосвязи входного и выходного потоков поездов. Левое условие уравнения будет сильнее правого. Рассматривается следующее равенство:

$$\exists(N_{\text{ВХ}}) \forall(N_{\text{ВЫХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}) = \forall(N_{\text{ВЫХ}}) \exists(N_{\text{ВХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}). \quad (12)$$

Появляется несоответствие, которое может быть устранено при изменении отрицания через знак квантора, заменяемый на противоположный. С использованием закона двойного отрицания можно получить зависимости, выражающие один квантор через другой, т. е.:

$$\forall(N_{\text{ВХ}}) P(N_{\text{ВХ}}) = \exists(N_{\text{ВХ}}) P(N_{\text{ВХ}}); \quad (13)$$

$$\forall(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}) = \exists(N_{\text{ВХ}}) \forall(N_{\text{ВЫХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}); \quad (14)$$

$$\forall(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}) = \exists(N_{\text{ВЫХ}}) \forall(N_{\text{ВХ}}) P(N_{\text{ВХ}}, N_{\text{ВЫХ}}). \quad (15)$$

В целях завершения построения модели по определению уровня влияния неопределенности входного потока поездов с учётом увязки его с выходным потоком используются предикаты распознавания. Оно опреде-

ляется законами отрицания состояния элементов предикатных взаимосвязей ресурсов [4]. При этом необходимо выполнить интегрированный расчёт каждого критерия ранее рассматриваемых ресурсов железной дороги. В данной ситуации рассматривается положение, что все виды используемых при формировании модели поездной работы интегрируются относительно объёма входного потока поездов с использованием следующей формализации [7]:

$$y_{\text{то}} = \int \frac{R^n}{\sqrt[n]{R^n + n}}, \quad (16)$$

где R – сглаженное значение вида ресурсов по фактору постоянной и переменной составляющим; n – количество выделенных производственных групп ресурсов железной дороги, направляемых на освоение входного потока поездов.

Наиболее эффективным при интегральной оценке ресурсов железной дороги, направляемых на освоение входного потока, является применение декомпозиционного метода расчета сетевых моделей транспортного обслуживания с параметрической неопределенностью [8].

С учётом того, что используется четыре вида ресурсов, для всех вариантов рассматривается решение

$$R_N = \frac{1}{16} \ln(R^n). \quad (17)$$

В результате сглаживающие функции имеют вид:

– для постоянного элемента ресурсного обеспечения –

$$R_{\text{const}} = \frac{1}{16} \ln(0,08N_{\text{вх}}^2 - 0,368N_{\text{вх}} + 1,06); \quad (18)$$

– для переменного элемента ресурсного обеспечения –

$$R_{\text{variable}} = \frac{1}{16} \ln(-0,0625N_{\text{вх}}^2 + 0,3235N_{\text{вх}} + 0,2925). \quad (19)$$

С учётом (17)–(18) проводится корректировка ресурсов в зависимости от уровня неопределенности входного потока.

Для долгосрочного периода (3–5 лет) функция (19) имеет вид

$$R_{\text{variable}} = \frac{1}{16} \ln(0,0316N_{\text{вх}}^2 - 0,2315N_{\text{вх}} + 1,131). \quad (20)$$

Получено 20.09.2021

A. A. Mikhalchenka. Influence of uncertainty of input flow of trains for reserving railway resources.

The results of studies of the influence of the uncertainty of the input flow of trains on the reservation of resources of the railway are given. The article considers the effectiveness of the methodological substantiation of forecasting the flow of trains for the railway and the possibility of effective use of the resources available at the railway, which are used when performing train work. New boundaries of the use of the theory of timetables in the formation of the schedule for the passage of freight trains on the directions included in international transport corridors are considered.

Её применение позволяет прогнозировать использование ресурсов железной дороги при выполнении государственной программы её развития.

Заключение. С учетом влияющих факторов ресурсного обеспечения освоения входного потока поездов при различных уровнях неопределённости их поступления в систему транспортного обслуживания необходимо отметить следующее:

1) постоянные ресурсы железной дороги не могут быть изменены при краткосрочном изменении входного потока поездов, но с учетом модели их использования (17) они могут быть откорректированы с минимальным отклонением в сторону дополнительных затрат;

2) модель необходимых переменных ресурсов позволяет учитывать их необходимую величину при различных значениях уровня неопределённости входного потока поездов.

Список литературы

1 Птускин, А. С. Энтропийный метод анализа данных для процедуры определения наилучших доступных технологий / А. С. Птускин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 203–212.

2 Косоруков, О. А. Модели и методы управления сетевыми структурами в кризисных ситуациях / О. А. Косоруков. – М., 2007. – 49 с.

3 Процай, Н. Т. Кванторная алгебра предикатных операций / Н. Т. Процай // Бионика интеллекта. – 2008. – № 1(68) – С. 69–73.

4 Алгебра предикатов и предикатных операций / М. Ф. Бондаренко [и др.] // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. – № 3. – С. 15–23.

5 Баранов, А. О. Синтез метода реальных опционов и метода нечетких множеств для оценки эффективности инновационных проектов / А. О. Баранов, Е. И. Музыко, В. Н. Павлов // Идеи и идеалы. – 2018. – Т. 2, № 1 (35). – С. 190–209.

6 Фомин, С. Я. Алгоритмизация процессов принятия решений по планированию входных потоков основных материалов на предприятии в условиях информационной неопределенности / С. Я. Фомин // Известия высших учебных заведений. – 2011. – № 9. – С. 58–64.

7 Кулаженко, Ю. И. Неопределённый интеграл : учеб.-метод. пособие / Ю. И. Кулаженко, А. Д. Суворова. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 52 с.

8 Гончаренко, В. А. Декомпозиционный метод расчета сетевых моделей обслуживания с параметрической неопределенностью / В. А. Гончаренко // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2017. – № 9. – С. 5–14.