

УДК 656.2

Методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов

А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бадецкий А. П., Медведь О. А., Кукушкина Я. В. Методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 954–966. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-954-966

Аннотация

Цель: План формирования поездов является основополагающим технологическим документом, влияющим на рациональную организацию эксплуатационной работы железных дорог ОАО «РЖД». От правильности его разработки зависят объем эксплуатационных расходов, устойчивость работы станций, участков и транспортных узлов. Существующая практика предполагает использование при расчете плана формирования поездов средних значений его расчетных параметров без учета их переменного характера. В этом случае не всегда можно гарантировать оптимальность принятого решения по организации вагонопотоков. Целью статьи является описание метода учета переменного характера расчетных параметров плана формирования поездов, что позволит повысить устойчивость его отдельных назначений к неравномерности эксплуатационной работы. **Методы:** Используются методы теоретического анализа, описаны существующие аналитические зависимости, позволяющие определить расчетные параметры плана формирования поездов. Для описания переменного характера расчетных параметров использовалась теория нечетких множеств и ее естественное расширение — нечеткая математика. Для принятия оптимального решения о корректировке отдельных назначений плана формирования поездов использованы методы теории принятия решений, а именно — метод принятия решений в нечетких условиях Беллмана — Заде. **Результаты:** Получены расчетные формулы, позволяющие определить расчетные параметры плана формирования поездов в условиях неравномерности эксплуатационной работы напрямую, без использования вспомогательных таблиц и графиков, обладая информацией только о колебаниях вагонопотока отдельного назначения плана формирования. Разработан метод определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности. **Практическая значимость:** Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов при его разработке позволит повысить устойчивость его отдельных назначений, снизить эксплуатационные расходы на его реализацию в течение жизненного цикла, снизить количество оперативных корректировок.

Ключевые слова: Пороговое значение вагонопотока, нечеткие множества, неравномерность вагонопотоков, лингвистическая модель выделения струи вагонопотока.

Введение

Качественная организация эксплуатационной работы во многом зависит от того, насколько правильно разработан план формирования поездов (ПФП) и насколько он устойчив к колебаниям вагонопотоков. При этом стоит отме-

тить, что колебания вагонопотоков вызывают и изменение зависящих от них других параметров плана формирования поездов — затрат на накопление составов и экономии от проследования вагонами технической станции без пере- работки.

Для получения решений, устойчивых ко всевозможного рода изменениям входных параметров (шуму, выбросам, помехам и т. д., к которым можно отнести и колебания вагонопотоков), в последнее время все чаще начинают использовать специальные методы и алгоритмы, относящиеся к области искусственного интеллекта [1–16]. Данный подход обладает определенной эффективностью [17–21], как правило, превышающей достигнутую при использовании «классических» методов. В данной статье предлагается методика повышения устойчивости отдельных назначений плана формирования поездов с помощью нечетких множеств и методов принятия решений в неопределенных условиях.

1. Проверка на соответствие условиям выделения струи вагонопотока в поездное назначение

1.1. Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета являются:

– нечеткое число $U = (u_1, u_2, u_3)$, содержащее информацию о колебаниях отдельной струи вагонопотока и задаваемое следующей функцией принадлежности:

$$\mu_A(U) = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right), & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right), & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3. \end{cases} \quad (1)$$

– нечеткое число $cm = (cm_1, cm_2, cm_3)$, определяющее для каждого значения вагонопотока из U соответствующее ему значение затрат вагоно-часов на накопление составов. Задается функцией принадлежности следующего вида:

$$\mu(cm) = \begin{cases} 0, & cm < cm_1 \\ \left(\frac{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_1)(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_2)(3,1 + 0,014u)} \right) m, & cm_1 \leq cm \leq cm_2 \\ \left(\frac{(\sqrt{u} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_3)(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_2} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_3)(3,1 + 0,014u)} \right) m, & cm_2 \leq cm \leq cm_3 \\ 0, & cm > cm_3. \end{cases} \quad (2)$$

– нечеткое число $t_{\text{ЭК}} = (t_{\text{ЭК1}}, t_{\text{ЭК2}}, t_{\text{ЭК3}})$, характеризующее изменение значений экономии времени от проследования вагонами технической станции без переработки с учетом изменения объемов переработки станции вследствие колебаний рассматриваемой струи вагонопотока. Задается следующей функцией принадлежности:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u - u_1) + u u_1 (t_{\text{ЭК}.j}^o - t_{\text{ЭК}.j1}^o) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_2 - u_1) + u_1 u_2 (t_{\text{ЭК}.j2}^o - t_{\text{ЭК}.j1}^o) \right)}, & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_3 - u) + u u_3 (t_{\text{ЭК}.j3}^o - t_{\text{ЭК}.j}^o) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_3 - u_2) + u_2 u_3 (t_{\text{ЭК}.j3}^o - t_{\text{ЭК}.j2}^o) \right)}, & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3. \end{cases} \quad (3)$$

Более подробно нахождение нечеткого представления данных величин описано в работах [22–27].

1.2. Определение категорий струй вагонопотоков

При учете в расчетах нечеткого характера исходных данных общее достаточное условие выделения струи вагонопотока в отдельное поездное назначение можно переписать в виде:

$$(cm_1, cm_2, cm_3) \leq (u_1 \cdot t_{\text{ЭК}1}^{\min}, u_2 \cdot t_{\text{ЭК}2}^{\min}, u_3 \cdot t_{\text{ЭК}3}^{\min}). \quad (4)$$

Тогда нечеткое значение экономии вагоно-часов $B_{\text{ЭК}}$, получившееся в результате выделения струи вагонопотока в назначение плана формирования, найденное по формуле (4), может принять следующие значения:

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (B_{\text{ЭК}1}, B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (5)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, -B_{\text{ЭК}2}, -B_{\text{ЭК}3}). \quad (6)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, -B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (7)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (8)$$

В соответствии с выражениями (5–8) струи вагонопотока распределяются по четырем категориям следующим образом:

- безусловно удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (5);
- безусловно не удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (6);
- частично удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (7);
- частично не удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (8).

Струи первой и второй категорий переносятся во все варианты плана формирования поездов без изменений и составляют их основу. Струи третьей и четвертой категорий в силу их неоднозначного поведения формируют варианты ПФП. Для определения того объема вагонопотока, при котором следует выделять их в самостоятельные поездные назначения или, наоборот, объединять с другими струями, следует обратиться к нечеткому значению пороговой мощности вагонопотока $U_{\Pi} = (u_{\Pi}^1, u_{\Pi}^2, u_{\Pi}^3)$ [28], определяемой следующим образом:

$$U_{\text{п}} = \left(\frac{cm_1}{t_{\text{эк3}}^{\min}}, \frac{cm_2}{t_{\text{эк2}}^{\min}}, \frac{cm_3}{t_{\text{эк1}}^{\min}} \right) = (u_{\text{п}}^1, u_{\text{п}}^2, u_{\text{п}}^3). \quad (9)$$

Струи этих категорий будут являться назначениями плана формирования поездов в случае, когда в результате «всплеска» мощность вагонопотока превысит пороговое значение. И наоборот, если в результате «спада» вагонопотока мощность станет меньше порогового значения, то поездное назначение следует отменять.

С учетом нечеткого характера как $U_{\text{п}}$, так и остальных расчетных параметров, следует говорить о *пороговой мощности вагонопотока, оптимальной в условиях неравномерности*. В заданных условиях нахождение ее значения полностью соответствует задаче принятия решений в нечетких условиях. Механизм постановки и решения таких задач описан Р. Беллманом и Л. Заде в работе [29] и включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение нечетких целей (*Goals, G*).
2. Наложение на нечеткие цели нечетких ограничений (*Constraint, C*).
3. Получение нечеткого решения (*Decision, D*) путем пересечения нечетких целей и ограничений.
4. Получение при необходимости четкого решения путем нахождения элемента в D , имеющего максимальную к нему степень принадлежности.

2. Лингвистическая модель определения оптимального порогового значения

2.1. Оптимальное пороговое значение для частично удовлетворяющих условиям выделения струй

Для струй вагонопотока, частично удовлетворяющих условиям выделения, лингвистическая модель определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, формулируется следующим образом: «Вагонопоток должен быть больше порогового значения и изменяться в пределах от порогового значения до своего максимального значения» (10). Здесь стоит отметить, что цель имеет составной характер и задается тремя функциями принадлежности — непосредственно вагонопоток, пороговым его значением, а также той частью, что превышает это значение.

$$\mu_D(U_{\text{п}}^{\text{опт}}) = \mu_{G1}(U) \wedge \mu_{G2}(> U_{\text{п}}) \wedge \mu_{G3}(U_{\text{п}}) \wedge \mu_C(U_{\text{п}} < u < u_{\text{max}}), \quad (10)$$

где $\mu_D(U_{\text{п}}^{\text{опт}})$ — функция принадлежности оптимального в условиях неравномерности порогового значения вагонопотока на рассматриваемом направлении;

$\mu_{G1}(U)$ — функция принадлежности первой цели (вагонопоток), определяется формулой (1);

$\mu_{G2}(> U_{\text{п}})$ — функция принадлежности второй цели (больше порогового значения);

$\mu_{G3}(U_{\text{п}})$ — функция принадлежности третьей цели, порогового значения вагонопотока. Определяется путем деления параметра накопления, найденного по формуле (2), на экономию от проследования вагонами технической станции без переработки (формула 3);

$\mu_C(U_{\text{п}} < u < u_{\text{max}})$ — функция принадлежности ограничения (в пределах от порогового значения до своего максимального значения).

Функция принадлежности второй цели задается формулой (11):

$$\mu_{G2}(> U_{\pi}) = \begin{cases} 0, & u < u_{\pi}^1 \\ \left(\frac{u - u_{\pi}^1}{(u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\pi}^1} \right), & u_{\pi}^1 \leq u \leq (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2} \right), & (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 \leq u \leq u_{\max} \\ 0, & u > u_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

Функцию принадлежности третьей цели представим в следующем виде (12):

$$\mu_{G3}(U_{\pi}) = \begin{cases} 0, & u_{\pi} < u_{\pi}^1 \\ \left(\frac{u_{\pi} - u_{\pi}^1}{u_{\pi}^2 - u_{\pi}^1} \right), & u_{\pi}^1 \leq u_{\pi} \leq u_{\pi}^2 \\ \left(\frac{u_{\pi}^3 - u_{\pi}}{u_{\pi}^3 - u_{\pi}^2} \right), & u_{\pi}^2 \leq u_{\pi} \leq u_{\pi}^3 \\ 0, & u_{\pi} > u_{\pi}^3. \end{cases} \quad (12)$$

Функция принадлежности ограничения — формулой (13):

$$\mu_C(U_{\pi} < u < u_{\max}) = \begin{cases} 0, & u < u_{\pi}^1 \\ \left(\frac{u - u_{\pi}^1}{(u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\pi}^1} \right), & u_{\pi}^1 \leq u \leq (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2} \right), & (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 \leq u \leq u_{\max} \\ 0, & u > u_{\max}. \end{cases} \quad (13)$$

Тогда выражение (10) можно переписать в следующем виде (14):

$$\mu_D(U_{\pi}^{\text{опт}}) = \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right) \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\pi}^1}{u_{\pi}^3 - u_{\pi}^1} \right) \\ 1 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u_{\pi} - u_{\pi}^1}{u_{\pi}^2 - u_{\pi}^1} \right) \\ \left(\frac{u_{\pi}^3 - u_{\pi}}{u_{\pi}^3 - u_{\pi}^2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\pi}^1}{(u_{\pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\pi}^1} \right) \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\pi}^1 + u_{\max})/2} \right) \\ 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Графическая интерпретация нахождения нечеткого решения, полученного по формуле (14), представлена на рис. 1.

2.2. Оптимальное пороговое значение для частично не удовлетворяющих условиям выделения струй

Для струй вагонопотока, частично не удовлетворяющих условиям выделения, лингвистическая модель определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, формулиру-

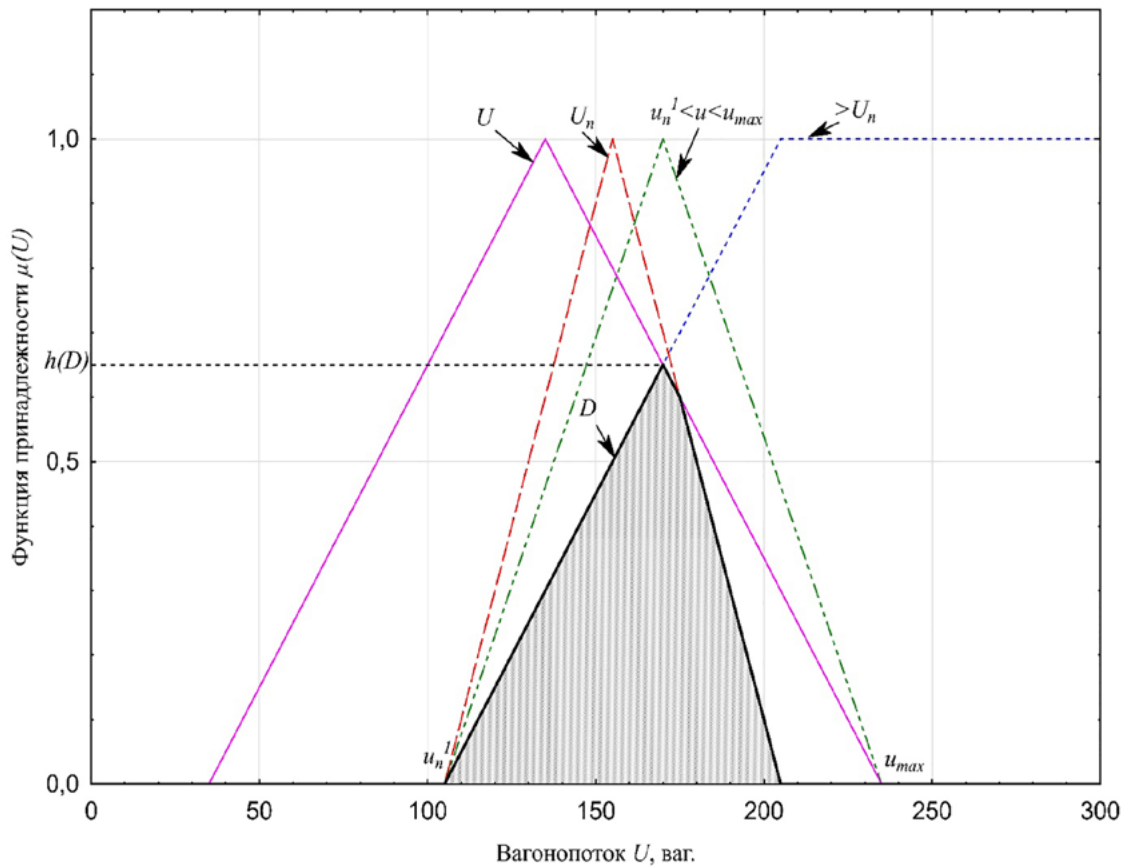


Рис. 1. Графическая интерпретация нахождения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, для струй вагонопотока, частично удовлетворяющих условиям выделения

ется следующим образом: «Вагонопоток должен быть меньше порогового значения и изменяться в пределах от своего минимального значения до порогового значения». В этом случае формула (10) примет вид:

$$\mu_D(U_n^{opt}) = \mu_{G1}(U) \wedge \mu_{G2}(< U_n) \wedge \mu_{G3}(U_n) \wedge \mu_C(u_{min} < u < U_n),$$

где функции принадлежности первой $\mu_{G1}(U)$ и третьей $\mu_{G3}(U_n)$ целей задаются по формулам (1) и (12) соответственно;

$\mu_{G2}(< U_n)$ — функция принадлежности второй цели (меньше порогового значения), задается формулой (15):

$$\mu_G(< U_n) = \begin{cases} 1, & u < u_n^1 \\ \left(\frac{u_n^3 - u}{u_n^3 - u_n^1} \right), & u_n^1 \leq u \leq u_n^3 \\ 0, & u > u_n^3. \end{cases} \quad (15)$$

$\mu_C(u_{min} < u < U_n)$ — функция принадлежности ограничения, задается формулой (16):

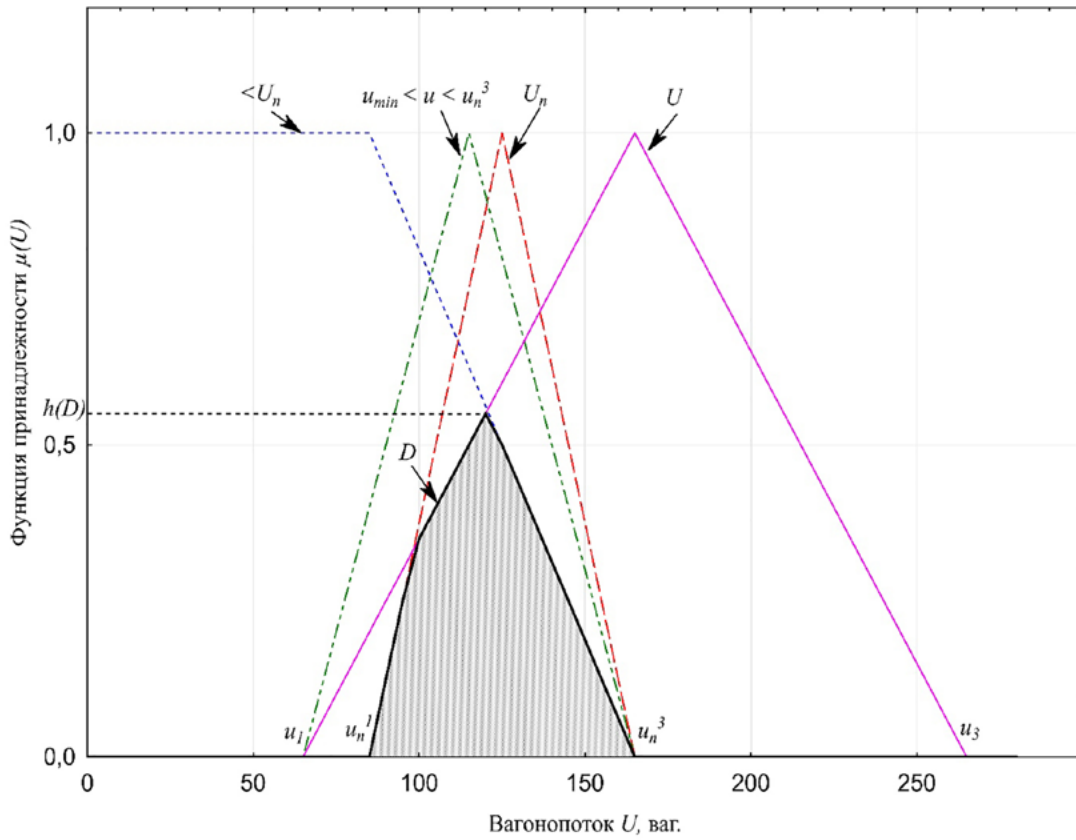


Рис. 2. Графическая интерпретация нахождения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, для струй вагонопотока, частично не удовлетворяющих условиям выделения

$$\mu_C(u_{\min} < u < U_{\Pi}) = \begin{cases} 0, & u < u_{\min} \\ \left(\frac{u - u_{\min}}{(u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2 - u_{\min}} \right), & u_{\min} \leq u \leq (u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2 \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u}{u_{\Pi}^3 - (u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2} \right), & (u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2 \leq u \leq u_{\Pi}^3 \\ 0, & u > u_{\Pi}^3. \end{cases} \quad (16)$$

Тогда нечеткое решение для струй, частично не удовлетворяющих условиям выделения, примет вид:

$$\mu_D(U_{\Pi}^{\text{опт}}) = \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right) \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 1 \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u}{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}^1} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u_{\Pi} - u_{\Pi}^1}{u_{\Pi}^2 - u_{\Pi}^1} \right) \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}}{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}^2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\min}}{(u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2 - u_{\min}} \right) \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u}{u_{\Pi}^3 - (u_{\Pi}^3 + u_{\min})/2} \right) \\ 0 \end{cases}. \quad (17)$$

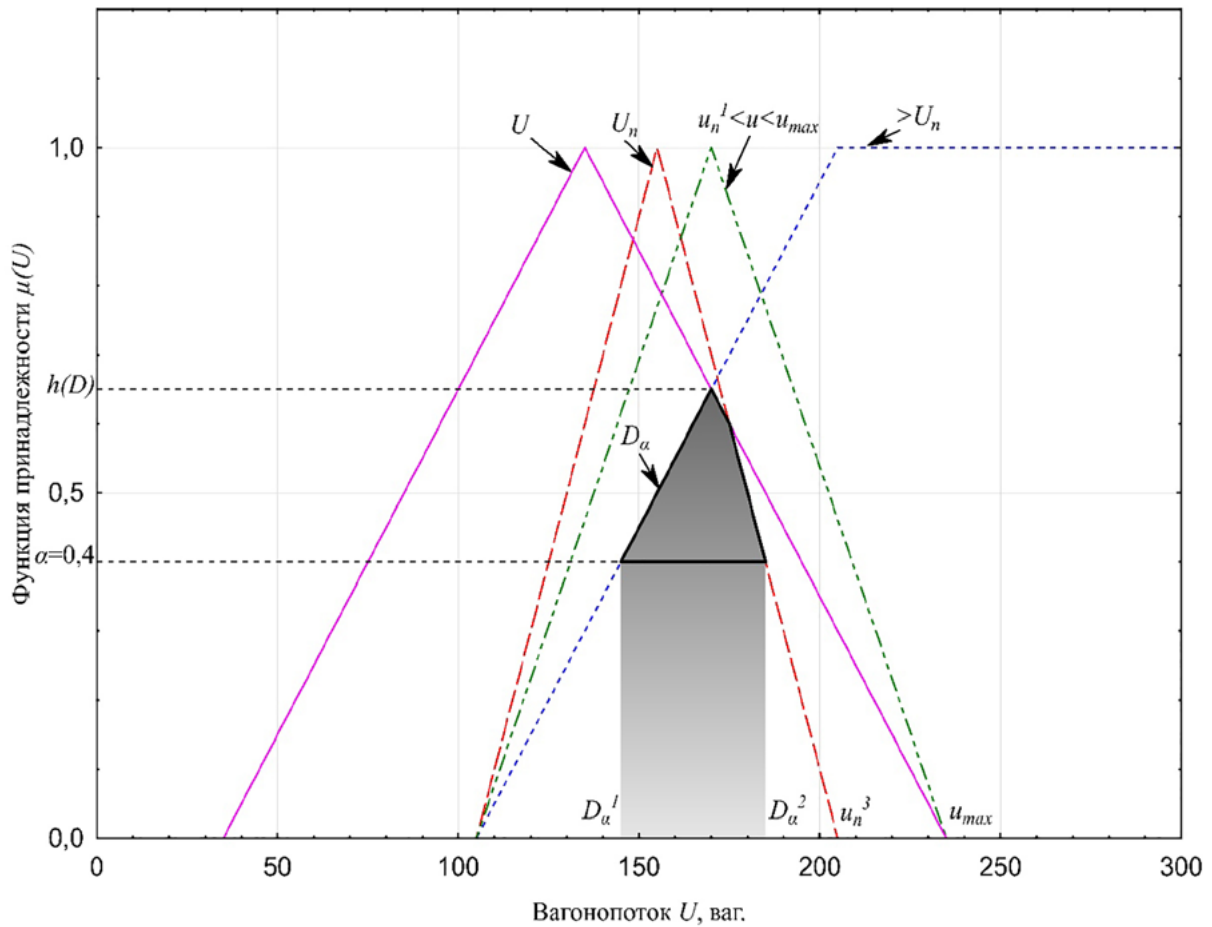


Рис. 3. Графическая интерпретация определения зоны оптимальных пороговых значений вагонопотока с использованием множества α -уровня при $\alpha = 0,4$

Графическая интерпретация нахождения нечеткого решения, полученного по формуле (17), представлена на рис. 2.

3. Интерпретация и использование результатов

Представленные на рис. 1 и 2 заштрихованные области соответствуют нечеткому решению D , соответствующему пороговому значению вагонопотока на направлении в условиях неравномерности расчетных нормативов плана формирования поездов. Стоит отметить, что данное решение представляет собой именно нечеткое множество, а не число, так как для него нарушены условия монотонности и нормальности (то есть $h(D) \neq 1$).

Множество D в целом можно рассматривать как *зону оптимальных значений* вагонопотока и производить корректировку назначения плана формирования только тогда, когда его вагонопоток выходит за эти границы. Данное решение можно обосновать, обратившись к понятию α -среза нечеткого множества (множеству α -уровня), которое для рассматриваемого примера можно определить следующим образом:

$$D_\alpha = \{u \mid \mu_D(u) \geq \alpha\}.$$

В зависимости от характера колебаний вагонопотока рассматриваемого назначения, лицо, принимающее решение (инженер по плану формирования), при необходимости может сам устанавливать значение α -уровня в соответствии со

своим опытом и навыками. Пример определения зоны оптимальных пороговых значений вагонопотока представлен на рис. 3 серой областью под множеством D_α при $\alpha = 0,4$.

В этом случае если струя вагонопотока впервые пересекает любую границу множества D , то производится корректировка данного назначения. При ее дальнейших колебаниях, остающихся в границах $[D_\alpha^1, D_\alpha^2]$, корректировочные воздействия можно не применять и производить их только при выходе колебаний за данные границы.

Четкое значение множества D , являющееся в данной задаче глобальным оптимумом, определяется как элемент, имеющий максимальную степень принадлежности к данному множеству. В этом случае четкое пороговое значение вагонопотока, оптимальное в условиях неравномерности, задается следующим образом:

$$\mu_{D^M}(U_{\Pi}^{\text{опт}}) = \begin{cases} \max \mu_D(u), & u \in K \\ 0, & u \notin K, \end{cases}$$

где K — множество элементов в D , где функция μ_D достигает максимума.

Представленные варианты решений позволят повысить устойчивость как отдельных назначений, так и плана формирования поездов в целом в течение расчетного периода.

Заключение

В данной статье представлена методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов, которая позволяет получать более устойчивые решения по сравнению с расчетом по средним значениям.

Библиографический список

1. Xiao J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / J. Xiao, B. Lin // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>.

2. Yaghini M. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm / M. Yaghini, A. Foroughi, B. Nadjari // *Applied Mathematical Modelling*. — 2011. — Iss. 35. — Pp. 5579–5591. — DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.

3. Yaghini M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways / M. Yaghini, M. Momeni, M. Sarmadi et al. // *Applied Mathematical Modelling*. — 2015. — Iss. 39. — Pp. 6114–6125. — DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.

4. Кукушкина Я. В. Зависимость величины переходящего остатка от накопления смежных составов / Я. В. Кукушкина // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2010. — № 3(24). — С. 132–140.

5. Панков А. Н. О составообразовании на сортировочных станциях / А. Н. Панков, В. А. Кудрявцев, Я. В. Кукушкина и др. // *Железнодорожный транспорт*. — 2016. — № 3. — С. 45–50.

6. Zadeh L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. — 1965. — Vol. 8. — Pp. 338–353.

7. Dolgoplov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgoplov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // *Procedia Computer Science*. — 2019. — Iss. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.

8. Milenković M. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem / M. Milenković, N. Bojović // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — August 2013. — Vol. 33. — DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.

9. Yang L. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness / L. Yang, Z. Gao, K. Li // *Applied Soft Computing*. — January 2011. — Vol. 11. — Iss. 1. — DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.

10. Schneider M. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling / M. Schneider, N. Nießen // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.

11. Yang Z. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control / Z. Yang, J. Zhang, Z. Chen et al. // *Procedia Engineering*. — 2011. — Iss. 15. — Pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.

12. Бадецкий А. П. Использование самонастраивающихся нечетких моделей для принятия решений о корректировке назначений плана формирования поездов / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2016: материалы международной научно-практической конференции. — СПб.: ИПТРАН, 2016. — С. 221–224.
13. Осьминин А. Т. Модуль оперативной корректировки назначений плана формирования поездов / А. Т. Осьминин, И. И. Осьминина, А. П. Бадецкий и др. // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2016): труды пятой научно-технической конференции. — М.: НИИАС, 2016. — С. 86–89.
14. Alekseychik T. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling / T. Alekseychik, T. Bogachev, V. Bogachev et al. // *Procedia Computer Science*. — 2017. — Iss. 120. — Pp. 830–834. — DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
15. Ковалев К. Е. Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович и др. // *Автоматика на транспорте*. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 72–86
16. Рыбин П. К. Метод оптимизации структуры нейронной сети для задачи планирования подвода поездов к припортовым станциям / П. К. Рыбин, Р. В. Горин // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2017. — № 5. — С. 55–63
17. Yugrina O. Specific features of the railway polygon operation with empty car traffic / O. Yugrina, L. Zharikova, A. Bessolitsyn et al. // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia* — 2021. Vol. 2. *Lecture Notes in Networks and Systems*. — 2022. — Pp. 376–384. — DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_42.
18. Осьминин А. Т. Увеличение пропускных и провозных способностей за счет повышения эффективности перевозочного процесса и транспортного обслуживания / А. Т. Осьминин // *Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД»*. — 2018. — № 2. — С. 14–31
19. Осьминин А. Т. Реинжиниринг модели управления перевозочным процессом / А. Т. Осьминин // *РЖД-Партнер*. — 2020. — № 1-2. — С. 46–49.
20. Осьминин А. Т. Совершенствование системы планирования перевозок грузов / А. Т. Осьминин, И. Г. Белозерова // *Железнодорожный транспорт*. — 2020. — № 3. — С. 17–21.
21. Осьминин А. Т. Организация грузовых перевозок и управление товаропотоками в цепочке создания стоимости / А. Т. Осьминин // *Техник транспорта: образование и практика*. — 2020. — Т. 1. — № 2. — С. 94–105.
22. Кудрявцев В. А. Учет колебаний вагонопотоков при расчете плана формирования поездов / В. А. Кудрявцев, А. П. Бадецкий // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2012. — № 3. — С. 10–16.
23. Badetskii A. P. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // *Transportation Research Procedia, Novosibirsk*, 25–29 мая 2020 года. — Novosibirsk, 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
24. Бадецкий А. П. Разработка расчетных вагонопотоков плана формирования поездов с учетом их неравномерности / А. П. Бадецкий // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2013. — № 3. — С. 53–60.
25. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». — М., 2007. — 547 с.
26. Бадецкий А. П. Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительно интеллекта / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2023. — Вып. 3. — С. 32–45. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45
27. Бадецкий А. П. Влияние колебаний вагонопотока на параметр накопления / А. П. Бадецкий // *Транспорт России: проблемы и перспективы* — 2014: материалы международной научно-практической конференции. — СПб., 2014. — С. 191–195.

28. Котенко А. Г. Определение порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности / А. Г. Котенко, А. П. Бадецкий, А. С. Бессолицын // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 20–27.

29. Беллман Р. Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — С. 172–215.

Дата поступления: 27.09.2023

Решение о публикации: 22.11.2023

Контактная информация:

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович — канд. техн. наук, доц.; badetsklii@pgups.ru

МЕДВЕДЬ Оксана Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; oa.medved@yandex.ru

КУКУШКИНА Яна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; kukushkina@pgups.ru

Methodology for the Application of Variable Standards by the Development of a Train Formation Plan

A. P. Badetsky, O. A. Medved', Ya. V. Kukushkina

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Badetsky A. P., Medved' O. A., Kukushkina Ya. V. Methodology for the Application of Variable Standards by the Development of a Train Formation Plan // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 954–966. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-954-966

Summary

Purpose: The train formation plan is a fundamental technological document that affects the rational organization of the operational work of railways of JSCo “Russian Railways”. The amount of operating costs, the stability of the operation of stations, sections and transport hubs depends on its correct development. The existing practice assumes the use of the average values of its design parameters when calculating the train formation plan, without taking into account their variable nature. In this case, it is not always possible to guarantee that the optimal decision is taken on the organization of car traffic. The purpose of the article is to describe a method for taking into account the variable nature of the design parameters of the train formation plan, which will increase the stability of its individual assignments to the unevenness of operational work. **Methods:** Methods of theoretical analysis are used, existing analytical dependencies are described, which allow determining the calculated parameters of the train formation plan. Fuzzy set theory and its natural extension, fuzzy mathematics, have been used to describe the variable nature of the calculated parameters. To make an optimal decision on the adjustment of individual assignments of the train formation plan, the methods of decision-making theory have been used, namely, the Bellman-Zadeh method of decision-making in fuzzy conditions. **Results:** Calculation formulas have been obtained that allow determining the design parameters of the train formation plan in conditions of uneven operational work directly, without using auxiliary tables and graphs, having information only about the fluctuations of the car traffic of a specific purpose of the formation plan. A method has been developed for determining the threshold value of the car traffic, optimal in conditions of unevenness. **Practical significance:** Taking into account the variable nature of the design standards of the train formation plan during its development will increase the stability of its specific assignments, reduce operating costs for its implementation during the life cycle, reduce the number of operational adjustments.

Keywords: Threshold value of car traffic, fuzzy sets, unevenness of car traffic, linguistic model for extracting the train flow.

References

1. Xiao J., Lin B. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>.
2. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, Iss. 35, pp. 5579–5591. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
3. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M. et al. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, Iss. 39, pp. 6114–6125. DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
4. Kukushkina Ya. V. Zavisimost' velichiny perekhodyashchego ostatka ot nakopleniya smezhnyh sostavov [Dependence of the amount of the rolling balance on the accumulation of adjacent train composition] *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, vol. 24, Iss. 3, pp. 132–140. (In Russian)
5. Pankov A. N., Kudryavtsev V. A., Kukushkina Ya. V. et al. O sostavoobrazovanii na sortirovochnykh stantsiyah [About composition formation at marshalling yards]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway Transport]. 2016, vol. 3, pp. 45–50. (In Russian)
6. Zadeh L. A. *Fuzzy Sets, Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
7. Dolgopopol P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms, *Procedia Computer Science*, 2019, Iss. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
8. Milenković M., Bojović N. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, August 2013, vol. 33. DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*, January 2011, vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M., Nießen N. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z., Zhang J., Chen Z. et al. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control, *Procedia Engineering*, 2011, Iss. 15, pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.
12. Badetskii A. P., Medved O. A. Ispol'zovanie samonastrayvayushchihya nechetkih modelej dlya prinyatiya reshenij o korrektyrovke naznacheniya plana formirovaniya poezdov [The use of self-adjusting fuzzy models for making decisions on adjusting the assignments of the train formation plan]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2016: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport of Russia: problems and prospects — 2016: materials of the international scientific and practical conference]. Saint-Petersburg: IPT RAN Publ., 2016, vol. 2, pp. 221–224. (In Russian)
13. Os'minin A. T., Os'minina I. I., Badetskii A. P. et al. Modul' operativnoj korrektyrovki naznacheniya plana formirovaniya poezdov [Module for operational adjustment of train formation plan assignments] *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZHT-2016). Trudy pyatoy nauchno-tehnicheskoy konferencii*. [Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT-2016). Proceedings of the fifth Scientific and Technical Conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2016, pp. 86–89. (In Russian)
14. Alekseychik T., Bogachev T., Bogachev V. et al. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling, *Procedia Computer Science*, 2017, Iss. 120, pp. 830–834. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
15. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Sakovich I. L. et al. Mekhanizm diagnostiki ekspluatatsii malointensivnykh zheleznodorozhnykh linij na osnove nechetkogo modelirovaniya [Mechanism of diagnostics of operation of low-intensity railway lines based on fuzzy modeling]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 72–86. (In Russian)
16. Rybin P. K., Gorin R. V. Metod optimizatsii struktury nejronnoj seti dlya zadachi planirovaniya podvoda poezdov k priortovym stantsiyam [Method of optimizing the neural network structure for the task of planning the supply of trains to port stations] *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2017, Iss. 5, pp. 55–63. (In Russian)

17. Yugrina O., Zharikova L., Bessolitsyn A. et al. Specific features of the railway polygon operation with empty car traffic. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia* — 2021. Vol. 2. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, pp. 376–384. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_42.
18. Osminin A. T. Uvelichenie propusknyh i provoznyh sposobnostej za schet povysheniya effektivnosti perevozochnogo processa i transportnogo obsluzhivaniya [Increase in throughput and carrying capacity by increasing the efficiency of the transportation process and transport services] *Byulleten' ob'edinennogo Uchenogo soveta OAO "RZHD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"]. 2018, Iss. 2, pp. 14–31. (In Russian)
19. Osminin A. T. Reinzhiniring modeli upravleniya perevozochnym processom [Reengineering of the transportation process management model]. *RZHD-Partner* [RZD-Partner]. 2020, Iss. 1-2, pp. 46–49. (In Russian)
20. Osminin A. T., Belozerova I. G. Sovershenstvovanie sistemy planirovaniya perevozok грузов [Improving the cargo transportation planning system]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2020, Iss. 3, pp. 17–21. (In Russian)
21. Osminin A. T. Organizaciya gruzovyh perevozok i upravlenie tovaropotokami v cepochke sozdaniya stoimosti [Organization of cargo transportation and management of commodity flows in the value chain] *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2020, vol. 1, Iss. 2, pp. 94–105. (In Russian)
22. Kudryavtsev V. A., Badetskii A. P. Uchet kolebanij vagonopotovkov pri raschete plana formirovaniya poezdov [Accounting for fluctuations in railcar traffic when calculating the train formation plan] *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2012, Iss. 3, pp. 10–16. (In Russian)
23. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
24. Badetskii A. P. Razrabotka raschetnyh vagonopotovkov plana formirovaniya poezdov s uchetom ih neravnomernosti [Development of calculated car flows of the train formation plan taking into account their unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2013, Iss. 3, pp. 53–60. (In Russian)
25. *Instruktivnye ukazaniya po organizacii vagonopotovkov na zheleznyh dorogah OAO "RZHD"* [Instructional instructions on the organization of car traffic on railways of JSC "Russian Railways"]. Moscow, 2007, 547 p. (In Russian)
26. Badetskii A. P., Medved O. A., Kukushkina Ya. V. Uchet peremennogo haraktera raschetnyh normativov plana formirovaniya poezdov s ispol'zovaniem tekhnologij vychislitel'nogo intellekta [Taking into account the variable nature of the calculation standards of the train formation plan using computational intelligence technologies]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij* [Bulletin of scientific research results]. 2023, Iss. 3, pp. 32–45. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45.
27. Badetskii A. P. Vliyanie kolebanij vagonopotoka na parametr nakopleniya [The influence of fluctuations in car traffic on the accumulation parameter]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2014: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport of Russia: problems and prospects — 2014. Materials of the international scientific and practical conference]. 2014, pp. 191–195. (In Russian)
28. Kotenko A. G., Badetskii A. P., Bessolitsyn A. S. Opredelenie porogovogo znacheniya vagonopotoka, optimal'nogo v usloviyah neravnomernosti [Determination of the threshold value of the car traffic, optimal in conditions of unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2013, Iss. 4, pp. 20–27. (In Russian)
29. Bellman R., Zadeh L. Prinyatie reshenij v rasplyvchatykh usloviyah [Decision-making in vague conditions]. *Voprosy analiza i procedury prinyatiya reshenij* [Issues of analysis and decision-making procedures]. Moscow: Mir Publ., 1976, pp. 172–215. (In Russian)

Received: September 27, 2023

Accepted: November 22, 2023

Author's information:

Aleksandr P. BADETSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; badetskii@pgups.ru

Oksana A. MEDVED' — PhD in Engineering, Associate Professor; oa.medved@yandex.ru

Yana V. KUKUSHKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; kukushkina@pgups.ru