

*Е. Д. Псеровская, К. В. Желдак, Р. А. Овчинников*

## АЛГОРИТМ ПОДБОРА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

**Аннотация.** Статья посвящена разработке мероприятий по сокращению потерь сыпучих грузов от выдувания при перевозке в полувагонах. Проанализированы характеристики модельного ряда эксплуатируемых полувагонов, определены наиболее важные для организации подбора подвижного состава, влияющие на степень заполнения кузова грузом, а также характеристики сыпучих грузов, влияющие на высоту погрузки в полувагон. Выделены наиболее значимые, которые обуславливают как степень заполняемости кузова вагона, так и конфигурацию поверхности груза.

Разработана аэродинамическая модель процесса выдувания сыпучих грузов при перевозке в полувагонах в специализированном ПО в области исследования гидрогазодинамики (CFD). На основании результатов исследования модели разработан алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для перевозки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, при которых обеспечивается минимизация потерь груза от выдувания.

**Ключевые слова:** мелкодисперсные сыпучие грузы, открытый подвижной состав, потери от выдувания, характеристики подвижного состава, характеристики угля, алгоритм подбора.

**Для цитирования:** Псеровская, Е. Д. Алгоритм подбора подвижного состава для транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов / Е. Д. Псеровская, К. В. Желдак, Р. А. Овчинников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 94–105. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_1\_94.

### **Введение**

На сегодняшний день транспортировка мелкодисперсных сыпучих грузов на открытом подвижном составе занимает значительную долю в общем объеме грузооборота Российских железных дорог (28–36 % от общего объема погрузки по сети дорог в 2023 году [1]). При этом нельзя отрицать имеющиеся недостатки данного способа транспортировки, в частности угля, связанные с выдуванием мелких частиц груза обтекающими воздушными потоками. При перевозке на расстояние от 500 до 2000 км общие потери угля составляют от 400 до 1200 кг/вагон [2, с. 5], при этом потери от выдувания составляют 55 % общих его потерь. Важность решения данной проблемы в России была в приоритете еще в 60–70-е годы прошлого столетия, что вылилось в полномасштабные исследования ученых НВЦ «Трансгруз», при этом также рассматривался вопрос эффективности использования грузоподъемности полувагонов. Решением увеличения загрузки было применение способа перевозки угля «с шапкой» (выше стен), оптимальная обтекаемая форма которой была определена путем проведения опытных перевозок угля по сети железных дорог СССР, а также исследования в аэродинамической трубе и в эксплуатационных условиях различных моделей полувагонов (имеющих разную высоту кузова) для определения размера потерь [4]. Это было обусловлено следующими факторами:

а) характеристиками используемого для перевозки подвижного состава (соотношение грузоподъемности и объема кузова (удельная грузоподъемность), допускаемая осевая нагрузка на ж.-д. путь и др.);

б) характеристиками предъявляемого к перевозке угля (марочный и фракционный состав, объемная плотность, угол естественного откоса, влажность и др.);

в) централизованным распределением вагонов (после выгрузки), принадлежащих Перевозчику.

Анализируя сегодняшнее состояние вопроса транспортировки угля в полувагонах, можно отметить: во-первых, наличие большого числа моделей полувагонов (в том числе инновационных), имеющих разные значения удельной грузоподъемности (от 0,77 до 0,93 т/м<sup>3</sup> [5]), а также допускаемой нагрузки на ось (от 23,5 до 27 т/ось [5]), во-вторых, возросшее разнообразие марочного и фракционного состава предъявляемого к транспортировке угля, исходя из требований конкретных грузополучателей, в-третьих, применение различных технологий погрузки угля конкретным потребителям. В результате применяются способы погрузки угля в полувагон: выше стен, ниже стен, в одном уровне со стенами,

что в случае массовой погрузки угля носит скорее случайный характер. К разнообразию моделей полувагонов в сегодняшних реалиях следует добавить и наличие большого числа игроков на рынке операторов подвижного состава, когда в подавляющем большинстве случаев фактором выбора грузоотправителем тех или иных моделей полувагонов для осуществления перевозки угля становится ставка аренды полувагонов и привлекательность условий долгосрочных договоров с конкретным оператором подвижного состава.

Учитывая вышеприведенные современные особенности транспортировки угля в полувагонах, результаты фундаментальных исследований проблемы выдувания угля при его перевозке, а также современные результаты имитационного моделирования [3], показывающие значительное влияние высоты загрузки угля в полувагон на интенсивность его выдувания, следует отметить назревшую необходимость в разработке системы рационального подбора открытого подвижного состава под перевозку соответствующих его характеристикам мелкодисперсных сыпучих грузов для обеспечения оптимальной высоты загрузки, при которой возможно минимизировать потери от выдувания.

Цель исследования – разработать алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающих рациональное использование грузоподъемности при высоте погрузки, обеспечивающей минимальные потери от выдувания.

#### *Анализ характеристик модельного ряда эксплуатируемых полувагонов*

Как отмечалось ранее, наличный парк полувагонов для перевозки мелкодисперсных сыпучих грузов на сегодняшний день имеет большой разбег по моделям, что связано как с обновлением подвижного состава в результате выбытия парка по истечению срока службы, так и со стремлением производителей полувагонов привлечь долю рынка. Говоря о динамике обновления вагонного парка, можно отметить, что по состоянию на 2017–2019 годы доля инновационного подвижного состава на сети дорог составляла не более 5 %, из них инновационных полувагонов в общем парке полувагонов – 11,4 % [6, 7]. Но уже по состоянию на декабрь 2023 года доля инновационных вагонов составила 17 %, а доля инновационных полувагонов в общем парке полувагонов – 28 % [8]. Таким образом, парк полувагонов обновляется стремительными темпами не только в отношении замены типовых моделей, выработавших срок службы, но и в отношении ввода в эксплуатацию новых моделей с улучшенными характеристиками, что в большинстве случаев оказывает существенное влияние на способ загрузки мелкодисперсными сыпучими грузами.

Для анализа характеристик модельного ряда эксплуатируемых полувагонов были отобраны наиболее распространенные модели, у которых рассмотрено соотношение характеристик, влияющих на степень заполнения кузова грузом: удельная грузоподъемность (отношение грузоподъемности к объему кузова) и объем кузова [5]. Стоит отметить, что удельная грузоподъемность была выбрана из соображения, что по своему физическому смыслу она соответствует такой характеристике сыпучих грузов, как объемная плотность, на основании чего можно наиболее точно прогнозировать степень загрузки вагона.

На рис. 1 приведены вышеперечисленные характеристики отобранных моделей полувагонов, среди которых и инновационные (выделены оранжевым цветом), данные модели упорядочены по условию возрастания значения удельной грузоподъемности. Детальное рассмотрение полученной диаграммы позволяет отметить следующие особенности:

– наибольшему значению удельной грузоподъемности соответствуют типовые модели полувагонов с наименьшим объемом кузова при стандартной грузоподъемности (69–70 т), что оправдано обеспечением универсальности данного подвижного состава (в том числе для перевозки тяжеловесных грузов);

– инновационные полувагоны имеют большие объемы кузова в сравнении с типовыми моделями, что определяет их расширенные возможности для транспортировки легковесных сыпучих грузов, например углей рядовых фракций, имеющих меньшее значение объемной плотности.

Анализ распределения эксплуатируемых моделей типовых (рис. 3) и инновационных (рис. 4) полувагонов позволил установить, что, во-первых, характеристики большинства эксплуатируемых типовых моделей полувагонов определяются стандартным значением грузоподъемности (69,5 т) для моделей 12-132, 12-132-04 и 12-296-01 при заметном различии в значении удельной грузоподъемности: 0,79 т/м<sup>3</sup>, 0,79 т/м<sup>3</sup> и 0,91 т/м<sup>3</sup> соответственно, – что говорит о существенных различиях в загрузке данных моделей полувагонов при массовой погрузке, к примеру, каменного угля; во-вторых, эксплуатируемые модели инновационных полувагонов 12-9853, 12-196-02 и 12-9869 обладают повышенной грузоподъемностью (75, 75 и 77 т соответственно), однако значительного разбега в значении удельной грузоподъемности не наблюдается

(0,85, 0,8 и 0,84 т/м<sup>3</sup> соответственно), что свидетельствует о возможном равном заполнении кузова данных полувагонов по высоте при массовой погрузке каменного угля одинаковой марки и фракции.

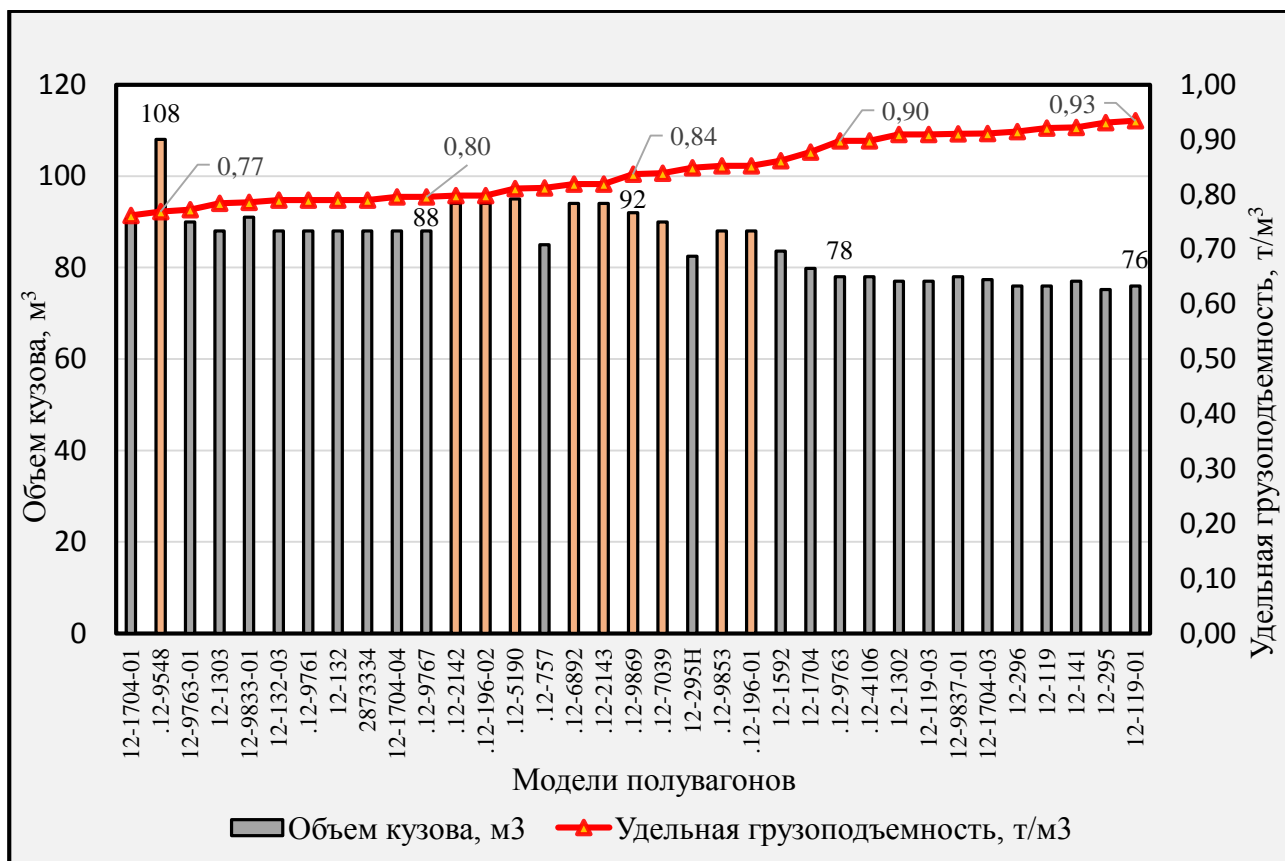


Рис. 1. Исследуемые характеристики модельного ряда эксплуатируемых полувагонов [5]

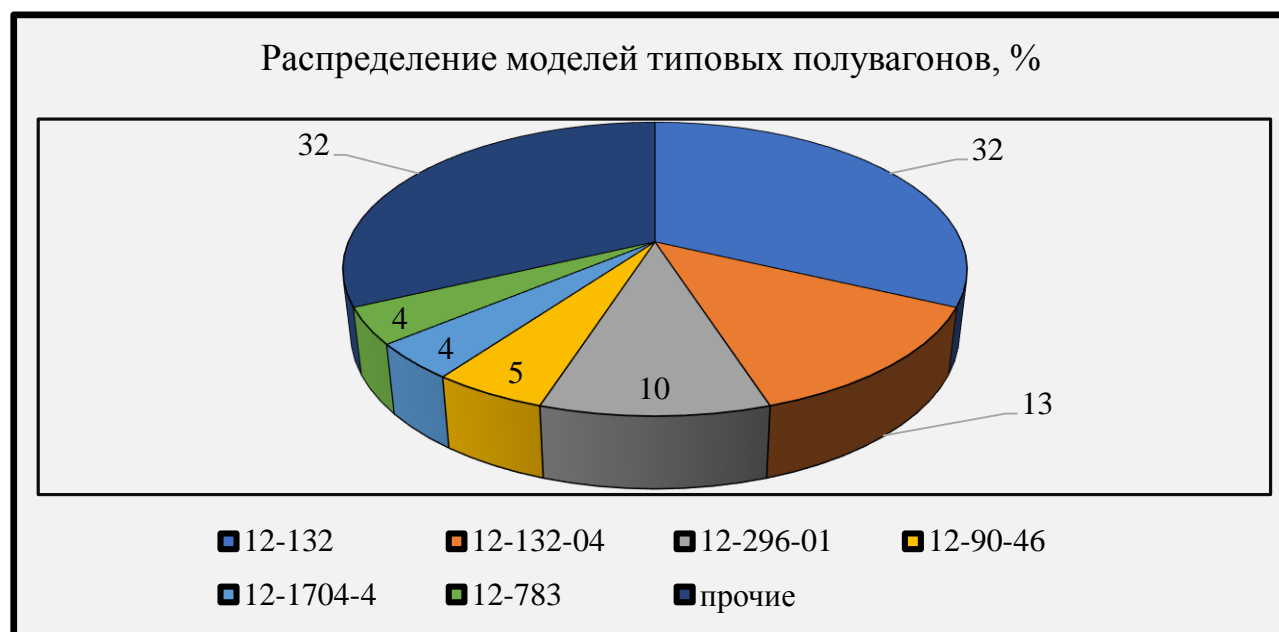
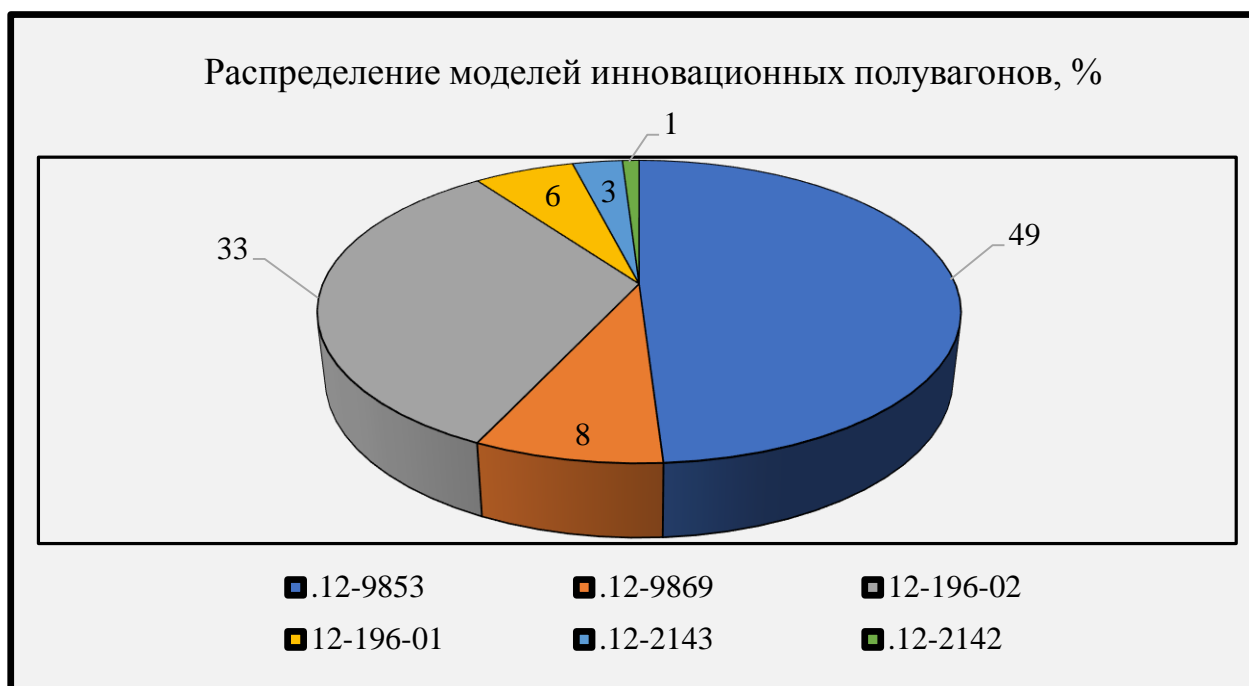


Рис. 2. Диаграмма соотношения моделей эксплуатируемых типовых полувагонов в рабочем парке [9]



**Рис. 3. Диаграмма соотношения моделей эксплуатируемых инновационных полувагонов в рабочем парке [8]**

#### *Анализ характеристик мелкодисперсных сыпучих грузов*

Среди характеристик, влияющих на высоту погрузки угля в полувагоне, выделены наиболее значимые, которые обуславливают как степень заполняемости кузова вагона, так и конфигурацию поверхности груза, с учетом полного использования грузоподъемности полувагонов. Среди них:

а) объемная плотность: для каменных углей ее значение лежит в интервале 0,68–0,96 т/м<sup>3</sup>, для бурых – 0,65–0,85 т/м<sup>3</sup>, для антрацитов – 0,85–1,15 т/м<sup>3</sup>;

б) влажность, причем влага в угле может содержаться в виде внешней и гигроскопичной (внутренней) влаги;

в) фракционный состав, представленный в табл. 1;

г) угол естественного откоса: данная характеристика угля в покое и в движении имеет различные значения: для каменного угля в среднем в покое она составляет 27–45°, а в движении 20–40°;

д) коэффициент уплотнения. Равен отношению объемов груза до и после уплотнения. Характеризует способность угля изменять объемную плотность под внешним воздействием, например катка-уплотнителя, для каменных углей он составляет 1,2–1,21.

Таблица 1

#### Деление угля по размерам кусков на сорта

Класс крупности (обозначение)	Размеры кусков, мм
Плитный (П)	100–200 (300)
Крупный (К)	50–100
Орех (О)	25–50
Мелкий (М)	13–25
Семечко (С)	6–13
Штыб (Ш)	0–6
Рядовой (Р)	0–200 (300)

Важность учета физико-механических характеристик сыпучих грузов при планировании их погрузки в полувагоны определяется и тем, что, к примеру, каменные угли имеют различные значения

объемной плотности не только вследствие различий в марочном и фракционном составе, но и ввиду различной их влажности, обусловленной особенностями технологии добычи и обогащения. Так, согласно табл. 2, для углей марки Д, фракции М, отгружаемых различными предприятиями на различных станциях отправления, имеет место разница в значениях влажности, что будет оказывать влияние на фактическое значение объемной плотности. Учитывая данный факт, стоит отметить необходимость определения фактического значения объемной плотности на каждом предприятии-грузоотправителе для наиболее точной работы предложенного алгоритма.

Таблица 2

**Значения влажности углей марки ДМ,  
отгружаемых грузоотправителями различных станций погрузки**

Станция погрузки (предприятие-грузоотправитель)	Влажность угля, %
Черногорские Копи (угольный разрез «Черногорский» ООО «СУЭК», ЦОФ «Черногорская») [10]	11
Камышта (ООО «Восточно-Бейский разрез») [11]	14,1
Ташеба (обогатительная фабрика разреза «Степной») [12]	15,5
Уссурийск (ООО «Разрез «Западный») [13]	12

С учетом вышеизложенных особенностей организации транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов в полувагонах, а именно разнообразия модельного ряда полувагонов, отличающихся по погрузочным характеристикам, а также значительной вариации физико-механических характеристик, предъявляемых к перевозке сыпучих грузов, разработан алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, при которых обеспечивается заданная высота загрузки из условия минимизации потерь груза от выдувания и максимального использования грузоподъемности. Разработка алгоритма производилась с учетом следующих условий и допущений:

а) подбор полувагонов осуществляется из условия максимального использования грузоподъемности;  
 б) фактические значения объемной плотности  $\gamma$  и влажности  $\varphi$  сыпучих грузов экспериментально определяет каждый грузоотправитель в целях обеспечения наиболее точного подбора подвижного состава;

в) учитываются результаты ранее выполненных исследований зависимости интенсивности выдувания мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке от их высоты загрузки в полувагонах в виде оптимального значения высоты возвышения стен кузова полувагона над поверхностью груза  $\Delta h_{\text{опт}}$ , причем

$$\Delta h_{\text{опт}} = H - h_{\text{гр}}^{\text{опт}}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота стены кузова полувагона, мм;  $h_{\text{гр}}^{\text{опт}}$  – оптимальная высота загрузки сыпучего груза;

г) предполагается формирование базы данных о характеристиках моделей, имеющих на рынке у операторов подвижного состава полувагонов, в форме табл. 3, а также базы данных о соответствии параметра  $\Delta h_{\text{опт}}$  каждой марке и фракции, например, каменных углей – в форме табл. 4;

д) влияние конфигурации «шапки» груза, получаемой при его загрузке в полувагон с учетом применения соответствующей технологии погрузки, а также мероприятий по разравниванию и уплотнению груза после погрузки, будет учитываться коэффициентом пропорциональности  $\alpha$ , показывающим, насколько фактический объем груза в полувагоне будет меньше в сравнении с его расчетом путем умножения площади пола на оптимальную заданную высоту загрузки  $h_{\text{гр}}^{\text{опт}}$ , то есть данный коэффициент учитывает области недогрузов вблизи торцевых и продольных стен кузова, а также недогрузки из-за образования сводов и волн на поверхности груза, что обусловлено в каждом случае местными особенностями технологии погрузки ( $\alpha$  должен определяться для каждого фронта погрузки конкретного груза).

Таблица 3

**Форма таблицы базы данных о характеристиках, имеющихся на рынке у операторов  
подвижного состава моделей полувагонов**

№ п/п, $i$	Модель полувагона	Длина кузова*, м	Ширина кузова*, м	Высота стен кузова*, м	Грузоподъемность, т
1	12-1704-01	13	2,93	2,355	69
...	...	...	...	...	...
$i$	12-....	$L_i$	$B_i$	$H_i$	$G_i$

\*примечание к таблице 3:  
Используются внутренние размеры кузова

Таблица 4

**Форма таблицы базы данных о соответствии параметра  $\Delta h_{\text{опт}}$   
каждой марке и фракции каменных углей**

№ п/п, $j$	Марка угля	Фракция угля	Угол естественного откоса, °	$\Delta h_{\text{опт}}$ , м
1	А	Ш	31	0,2
...	...	...	...	...
$j$	Б	О	37	0,05

Переходим к обоснованию теоретической базы, лежащей в основе разрабатываемого алгоритма.

Непосредственный подбор моделей полувагонов под погрузку конкретной марки и фракции угля осуществляется из расчета загружаемого объема угля в полувагон,  $V_{\text{гр}}$ , из условия максимального использования грузоподъемности,  $G$ :

$$V_{\text{гр}} = \frac{G}{\gamma}, \quad (2)$$

с другой стороны, загружаемый объем груза можно рассчитать на основании оптимальной заданной высоты загрузки

$$V_{\text{гр}} = LBh_{\text{гр}}^{\text{опт}} \alpha, \quad (3)$$

с учетом выражений (1), (2) и (3) получаем

$$\frac{G}{\gamma} = LB(H - \Delta h_{\text{опт}}) \alpha. \quad (4)$$

Таким образом, получаем выражение для осуществления подбора модели полувагона, при которой будет полностью использована грузоподъемность и обеспечена оптимальная высота загрузки. Подбор осуществляется следующим образом:

1 Грузоотправитель вводит данные о марке, фракции отгружаемого угля, значении его объемной плотности, коэффициента  $\alpha$ .

2 Программа подбора с использованием баз данных табл. 3 и 4 присваивает значения следующих параметров:  $G_i$ ,  $L_i$ ,  $B_i$ ,  $H_i$ ,  $\Delta h_{\text{опт}}$ , – тем самым начиная перебор значений характеристик различных моделей полувагонов из условия выполнения выражения (4).

3 При выполнении выражения (4) программа выводит соответствующую данным параметрам модель полувагона и переходит к расчету выражения (4) для следующей модели.

4 В случае если при параметрах данной модели полувагона выражение (4) не выполняется, программа переходит к следующей в базе данных модели, вывод данной модели пользователю не производится.

5 После каждого вывода подходящей под выражение (4) модели полувагона программа осуществляет проверку окончания списка моделей полувагонов, имеющихся у операторов подвижного состава, с которыми предполагается сотрудничество. По достижении последней в списке модели программа завершает свою работу.

Блок-схема вышеизложенного алгоритма подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающих оптимальную заданную высоту загрузки, приведена в виде рис. 4.

Разработанная аэродинамическая модель полувагона с грузом в специализированном ПО в области исследования гидрогазодинамики позволила выполнить апробацию применения алгоритма выбора подвижного состава для перевозки сыпучих грузов мелких фракций. Аэродинамическая модель представляет собой 3D-модель кузова полувагона с грузом мелкой фракции, помещенную в объем воздуха, который обтекает полувагон с грузом при движении поезда. Эксперименты на модели позволили оценить влияние высоты погрузки мелкодисперсного сыпучего груза на аэродинамические параметры обтекающих полувагон с грузом воздушных потоков, выражающиеся в распределении значений скорости, давления воздуха вблизи поверхности груза в различных ее областях, а также образовании завихрений.

В качестве примера рассмотрим погрузку угля марки АСШ, отгружаемого предприятием «ШО» и имеющего следующие объемно-массовые характеристики: объемная плотность –  $1,3 \text{ т/м}^3$ , фракция 0–13 мм, угол естественного откоса  $27^\circ$  в покое,  $23^\circ$  в движении, влажность 7 % [14]. При учете возможности заключения предприятием долгосрочных договоров на аренду полувагонов с несколькими операторами подвижного состава, эксплуатируемый парк каждого из которых состоит из определенных моделей полувагонов, был рассмотрен вариант подачи под погрузку группы полувагонов, среди которых можно выделить, к примеру, следующие модели: 12-9548, 12-295, 12-141. Учитывая, что конфигурация поверхности груза в полувагоне будет постоянной (общий вид поверхности груза при бункерной погрузке в полувагон приведен на рис. 5, а), можно установить, что высота загрузки  $H_{\text{загр}}$  будет отличаться исключительно ввиду различных характеристик полувагонов. Объем криволинейной поверхности груза был определен в САПР 3D-моделирования, выбор которого обоснован в работе [15], и составил  $13,33 \text{ м}^3$ , при этом высота сечения криволинейной поверхности груза была определена исходя из угла естественного откоса в движении и составила 380 мм. В свою очередь заполняемость объема кузова данных моделей полувагонов и высота загрузки угля были определены согласно методике, приведенной в работе [3].

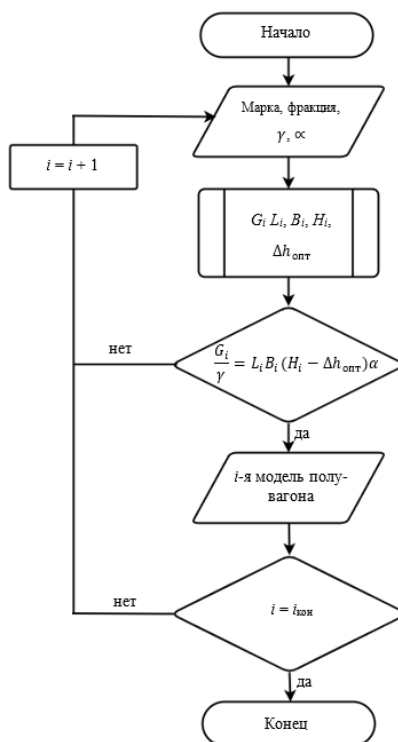
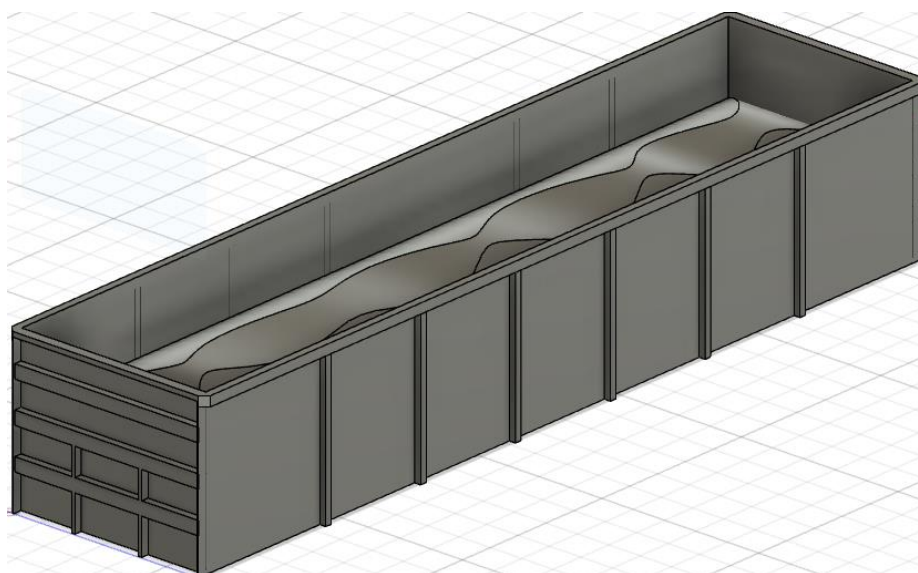
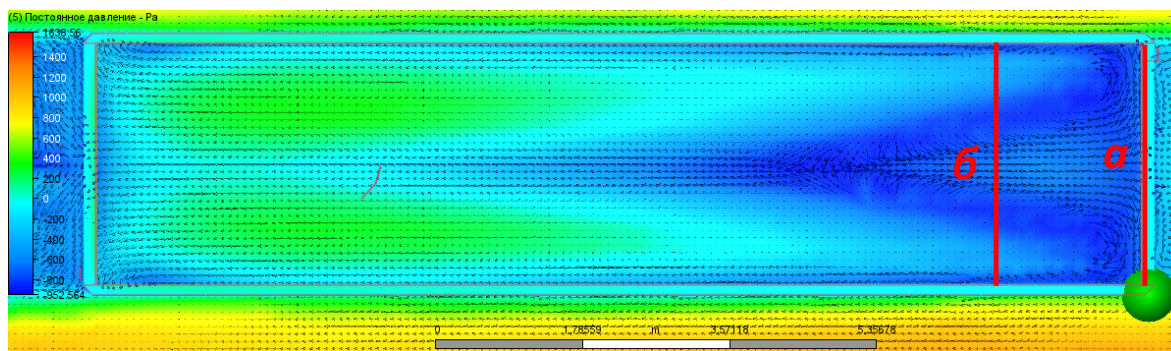


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик, используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок, и фракций сыпучих грузов



1



2

**Рис. 5. Аэродинамическая модель процесса выдувания:**

1 – общий вид конфигурации шапки груза в полувагоне модели 12-9548 при бункерной погрузке угля АСШ; 2 – общий вид (сверху) протекания воздушных потоков вблизи поверхности груза (уголь АСШ) в полувагоне модели 12-9548, исследуемые области поверхности груза

Непосредственно оценить влияние данных значений высоты загрузки угля на интенсивность его выдувания при перевозке в полувагоне возможно на основании эмпирических зависимостей секундного расхода мелких частиц угля с поверхности груза от скорости воздушных потоков вблизи нее (что соответствует определению интенсивности выдувания  $Q$  в теории эрозии), приведенных в исследовании В.И. Шапова (выражение (6)) [16]. Данные зависимости, в свою очередь, определяются значением скорости воздушных потоков вблизи поверхности груза  $v_b$ , м/с, а также ускорений вертикальных колебаний  $j_b$ , которые при скорости поезда 90 км/ч могут достигать значений 0,2g [16].

Согласно результатам исследования зависимости интенсивности выдувания угля мелких фракций при перевозке в различных моделях полувагонов при помощи разработанной аэродинамической модели наиболее оптимальная высота загрузки для угля марки АСШ (0–13 мм) составляет 400 мм ниже уровня стен. При такой высоте загрузки достигается минимизация интенсивности выдувания с поверхности груза в области между передней торцевой стеной (а) и первой по ходу движения стойкой кузова полувагона (б), подверженной действию вихрей с вертикальной осью, общий вид которых приведен на рис. 5, б.

В табл. 5 определены параметры загрузки угля марки АСШ в приведенные выше модели полувагонов и соответствующие каждому варианту загрузки значения  $v_b$  в ранее выделенных ее областях (рис. 5, б), полученные в ходе моделирования аэродинамики рассматриваемых моделей полувагонов с грузом. Значения  $Q$  были определены на основании эмпирических зависимостей, полученных в ходе массовых опытных перевозок, а также с учетом критической скорости начала выдувания частиц угля, определенной по формуле (6) [17].

Таблица 5

## Исследуемые параметры загрузки полувагонов при скорости движения поезда 90 км/ч

Модель полувагона		12-9548	12-295	12-141
Исследуемые параметры				
$H_{\text{загр}}$ , мм		1783	1660	1689
$\Delta h_{\text{загр}}$ , мм*		-885	-390	-190
$v_b$ , м/с	В области а)	3,79	4,36	8,4
	В области б)	7,05	2,48	7,07
$Q$ , г/с	В области между а) и б)	33,44	6,95	80,86
*Примечание к табл. 5: Знак «←» в значениях параметра $\Delta h_{\text{загр}}$ означает погрузку ниже уровня стен кузова полувагона				

Анализ полученных значений позволил установить, что при параметрах загрузки угля марки АСШ в полувагон модели 12-295 будет обеспечено значение  $H_{\text{загр}}$ , близкое к оптимальному для данной марки угля, при условии полного использования грузоподъемности вагона, что характеризуется значительным снижением интенсивности выдувания угля в областях, подверженных действию турбулентных воздушных потоков, где механизмы выдувания соответствуют эффекту «высасывания» частиц, обладающему наибольшей способностью к пылеуносу [18]. Кроме того, данное различие в механизмах выдувания с поверхности груза приводит и к существенной разнице в значениях так называемых критических скоростей начала массового выдувания частиц угля (для вихревой природы выдувания угля данная величина в 2–3 раза меньше, чем при ламинарном обтекании воздухом поверхности груза, чему соответствует область поверхности груза, расположенной правее отмеченных областей (а) и (б) на рис. 5, б). Данное снижение интенсивности выдувания (с допустимым ее увеличением до 10 % вследствие разбега по величине высоты погрузки до 35 мм в сторону увеличения – до 365 мм ниже уровня стен) наблюдается и для полувагонов моделей 12-1303, 12-132-03, 12-9761, 12-132, 12-9766, 12-196-02, 12-5190, которые можно считать наиболее предпочтительными для погрузки угля марки АСШ.

В то же время, если рассматривать погрузку угля марки ДМО (фракции 13–50 мм), минимизация интенсивности выдувания будет обеспечиваться уже при высоте погрузки 330 мм ниже уровня стен кузова полувагона, что обуславливается значительным влиянием такого аэродинамического параметра поверхности груза, как шероховатость, оказывающего влияние на величину скорости воздуха вблизи поверхности груза. Тогда с учетом разницы в значении величины объемной плотности груза, обусловленной, во-первых, разными значениями действительной плотности двух марок угля (1,16 т/м<sup>3</sup> [11] и 1,4 т/м<sup>3</sup> [14] соответственно), и, во-вторых, разным гранулометрическим составом, влияющим на пустоты между частицами груза, наиболее предпочтительными для погрузки угля данной марки и фракции следует считать полувагоны моделей: 12-296, 12-119, 12-295, 12-1302, 12-119-03, 12-1704-03. Примечательно, что полувагон модели 12-295 соответствует указанному выше критерию оптимальности (высоте погрузки) как для угля марки АСШ, так и для угля марки ДМО, что делает его использование наиболее эффективным в отношении снижения потерь от выдувания различных марок и фракций углей.

### Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм подбора моделей полувагонов для погрузки конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающий оптимальную заданную высоту загрузки из условия минимизации потерь от выдувания и максимального использования грузоподъемности, предполагает оперативный выбор моделей полувагонов из парка оператора подвижного состава.

База данных, содержащая подобранные с использованием разработанного алгоритма для каждой марки и фракции груза модели подвижного состава, может быть сформирована заранее с учетом вышеуказанных местных особенностей отгружаемой продукции.

Использование данного алгоритма в подборе подвижного состава может быть особенно целесообразно при организации закольцованных маршрутов, а также при приобретении собственного подвижного состава.

**Список литературы**

- 1 Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте в 2023 году // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 09.01.2025).
- 2 Обеспечение сохранности грузов при железнодорожных перевозках / под ред. В. К. Бешкетто. – Новосибирск : НИИЖТ, 1971. – 103 с.
- 3 **Псеровская, Е. Д.** Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке / Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 53–61. – DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_53.
- 4 Обеспечение сохранности угля при железнодорожных перевозках / Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., Науч.-техн. о-во ж.-д. трансп. ; сост.: В. К. Бешкетто [и др.]. – Москва : Транспорт, 1972. – 47 с.
- 5 Вагон.by : сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. – URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (дата обращения: 10.01.2025).
- 6 **Глазкова, В. А.** Рынок инновационных полувагонов : государственная поддержка, производство, тарифная политика / В. А. Глазкова, Л. А. Магага // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3 (70). – С. 10–15. – ISSN 1994-831X.
- 7 **Федорович, В. О.** Современные проблемы обновления частного парка грузовых вагонов в российской федерации / В. О. Федорович, Т. В. Федорович // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2019. – № 45. – С. 88–100. – DOI 10.17223/19988648/45/6.
- 8 В 2024 году произведено более 21 тыс. инновационных вагонов. Новости ж.-д. транспорта / Информационное агентство «РЖД-Партнер». – 2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-2024-godu-proizvedeno-bolee-21-tys-innovatsionnykh-vagonov/> (дата обращения: 25.01.2025).
- 9 Анализ рынка ж.-д. перевозок. Структура парка полувагонов на сети РЖД. Январь 2022 года // Modum digital. Цифровые решения в логистике. – 2022. – Февраль. – URL: [https://modum-digital.ru/upload/pdf/6\\_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80-%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1](https://modum-digital.ru/upload/pdf/6_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80-%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1) (дата обращения: 27.01.2025).

**References**

- 1 Volume of loading of the main types of cargo by rail in 2023 // Federal State Statistics Service. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (date of access: 01/09/2025).
- 2 Ensuring the safety of cargo during rail transportation / edited by V. K. Beshketto. – Novosibirsk : Research Institute of Railway Transport, 1971. – 103 p.
- 3 **Pserovskaya, E. D.** Study of the influence of the surface shape of bulk cargo on blowing during transportation / E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov // Bulletin of the Siberian State Transport University. – 2022. – No. 4 (63). – P. 53–61. – DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_53.
- 4 Ensuring the safety of coal during rail transportation / Novosib. Institute of Railway Transport Engineers, Scientific and Technical Society of Railway Transport ; compiled by : V.K. Beshketto [et al.]. – Moscow : Transport, 1972. – 47 p.
- 5 Vagon.by : Website about the carriage fleet and the carriage facilities. – URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (date of access: 01/10/2025).
- 6 **Glazkova, V. A.** Market of innovative gondola cars : state support, production, tariff policy / V. A. Glazkova, L. A. Magaga // Transport of the Russian Federation. – 2017. – No. 3 (70). – P. 10–15. – ISSN 1994-831X.
- 7 **Fedorovich, V. O.** Modern problems of updating the private fleet of freight cars in the Russian Federation / V. O. Fedorovich, T. V. Fedorovich // Bulletin of Tomsk State University. Economy. – 2019. – No. 45. – P. 88–100. DOI 10.17223/19988648/45/6.
- 8 In 2024, more than 21 thousand innovative cars were produced. Railway Transport News / Information Agency “RZD-Partner”. – 2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-2024-godu-proizvedeno-bolee-21-tys-innovatsionnykh-vagonov/> (date of access: 01/25/2025).
- 9 Analysis of the railway transportation market. Structure of the open-top car fleet on the Russian Railways network. January 2022 // Modum digital. Digital solutions in logistics. – 2022. – February. – URL: [https://modum-digital.ru/upload/pdf/6\\_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1](https://modum-digital.ru/upload/pdf/6_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1) (date of access: 01/27/2025).

10 СУЭК Хакасия. Структура Компании : Разрез «Черногорский». – URL: <https://www.suek-khakasia.ru/about-us/structure/> (дата обращения: 28.01.2025).

11 ООО «Восточно-Бейский разрез». – URL: <https://ugol-shop.ru/ooo-vostochno-bejskij-razrez-respublika-hakasiya/meshok-uglya-marki-do-koncentrat-25-60mm> (дата обращения: 29.01.2025).

12 Обогащительная фабрика разреза «Степной». АО «Русский уголь». – URL: <https://energybase.ru/coal-processing-plant/plant-open-pit-mine-stepnoy> (дата обращения: 29.01.2025).

13 Разрез «Западный», наша продукция. – URL: <https://www.westcoal.ru/ru/#about> (дата обращения: 29.01.2025).

14 Антрацит, производимый АО «Шахтоуправление «Обуховская». – URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (дата обращения: 29.01.2025).

15 Псеровская, Е. Д. Моделирование процесса выдувания угля при перевозке в полувагоне / Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 4 (7). – С. 23–29. – DOI 10.52170/2712-9195\_2022\_4\_23.

16 Щапов, В. И. Выдувание угля и рудных концентратов при железнодорожных перевозках / В.И. Щапов, А.Ф. Яшин // Труды НИИЖТа. – 1970. – Вып. 114.

17 Глазунов, Г. П. Математическая модель начала выдувания сухой монодисперсной почвы / Г. П. Глазунов, В. М. Гендугов // Вестник Московского университета. Серия 17 : почвоведение. – 2009. – № 1. – С. 45–50. – ISSN 0137-0944.

10 SUEK Khakassia. Company structure : Open pit "Chernogorsky". – URL: <https://www.suek-khakasia.ru/about-us/structure/> (date of access: 01/28/2025).

11 LLC "East Bay Razrez". – URL: <https://ugol-shop.ru/ooo-vostochno-bejskij-razrez-respublika-hakasiya/meshok-uglya-marki-do-koncentrat-25-60mm> (date of access: 01/29/2025).

12 Processing plant of the “Stepnoy” open-pit mine. JSC “Russian Coal”. – URL: <https://energybase.ru/coal-processing-plant/plant-open-pit-mine-stepnoy> (date of access: 01/29/2025).

13 Open-pit mine "Zapadny", our products. – URL: <https://www.westcoal.ru/ru/#about> (date of access: 01/29/2025).

14 Anthracite produced by JSC “Obukhovskaya” Mine Administration. – URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (date of access: 01/29/2025).

15 Pserovskaya, E. D. Modeling the process of coal blowing during transportation in a gondola car / E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov // Fundamental and Applied Transport Issues. – 2022. – No. 4 (7). – P. 23–29. – DOI 10.52170/2712-9195\_2022\_4\_23.

16 Shchapov, V. I. Blowing of coal and ore concentrates during railway transportation / V. I. Shchapov, A.F. Yashin // Proceedings of the Research Institute of Railway Transport. – 1970. – Issue 114.

17 Glazunov, G. P. Mathematical model of the onset of blowing out of dry monodisperse soil / G. P. Glazunov, V. M. Gendugov // Moscow University Bulletin. Series 17 : Soil Science. – 2009. – No. 1. – P. 45–50. – ISSN 0137-0944.

*E. D. Pserovskaya, K. V. Zheldak, R. A. Ovchinnikov*

#### SELECTION ALGORITHM OF ROLLING STOCK FOR FINELY DISPERSED BULK CARGO TRANSPORTATION

**Abstract.** The article is aimed to the development of measures to reduce losses of bulk cargo due to blow-out during its transportation by open-top cars. The characteristics of the model range of open-top cars in use are analyzed, and the most important ones for organizing the selection of rolling stock, which affect the degree of filling of the body with cargo, are determined. The characteristics of bulk cargo that influence on the loading height into an open-top car are analyzed, and the most significant ones are identified, which determine both the degree of filling of the car body and the configuration of the cargo surface.

An aerodynamic model of the process of blowing out bulk cargo during transportation in open-top cars has been developed using specialized software in the field of Computational fluid dynamics (CFD). Based on the results of the model study, an algorithm has been developed for selecting optimal options for combining the characteristics of open-top cars used for transportation and specific brands and fractions of bulk cargo, which ensures minimization of cargo losses from blowing out.

**Keywords:** finely dispersed bulk cargo, open-top rolling stock, losses due to blow-out, rolling stock characteristics, coal characteristics, selection algorithm.

**For citation:** Pserovskaya, E. D. Selection algorithm of rolling stock for finely dispersed bulk cargo transportation / E. D. Pserovskaya, K. V. Zheldak, R. A. Ovchinnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 94–105. – DOI 10.46973/0201–727X\_2025\_1\_94.

#### Сведения об авторах

**Псеровская Елена Дмитриевна**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),  
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой,  
e-mail: eldp-55@yandex.ru

**Желдак Константин Валентинович**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),  
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: podviznoy\_sostav@mail.ru

**Овчинников Роман Андреевич**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),  
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,  
аспирант, преподаватель,  
e-mail: roma.r1999@mail.ru

#### Information about the authors

**Pserovskaya Elena Dmitrievna**

Siberian State Transport University (STU),  
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Head of The Chair,  
e-mail: eldp-55@yandex.ru

**Zheldak Konstantin Valentinovich**

Siberian State Transport University (STU),  
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: podviznoy\_sostav@mail.ru

**Ovchinnikov Roman Andreevich**

Siberian State Transport University (STU),  
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,  
Postgraduate Student, Lecturer,  
e-mail: roma.r1999@mail.ru