

Щербаков В.

Группа ТЛ-141

Ковтанец М., к.т.н.

Кафедра железнодорожного, автомобильного транспорта

и подъемно-транспортных машин

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛ СУХОГО ЛЬДА И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА

В работе рассматривается создание имитационной математической модели, описывающей процесс движения гранул сухого льда, которая позволяет установить влияние параметров системы подачи: углы наклона сопла в разных плоскостях, производительность системы, скорость движения и физико-механические характеристики гранул сухого льда и т.п.) на динамику распределения их по ширине головки рельса в течение определенного времени. Для реализации модели был разработан специальный моделирующий алгоритм, в соответствии с которым программно вырабатывается информация, описывающая элементарные процессы исследуемой системы с учетом взаимосвязей и взаимных влияний. Система подачи гранул сухого льда может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию многочисленных случайных факторов, таких как боковой ветер, завихрения воздуха в зоне контакта и другие, поэтому использование разработанной имитационной математической модели позволяет исследовать динамику функционирования процесса в течение определенного времени, легко изменять значения параметров исследуемого процесса и его начальные условия. Проведенная серия численных экспериментов позволила установить, что наибольшую степень влияния на распределение гранул сухого льда по ширине головки рельса оказывает угол атаки потока гранул и расстояние от сопла до поверхности рельса. Менее влияющими параметрами являются скорость потока гранул и диаметр сопла.

Ключевые слова: математическая модель, моделирующий алгоритм, гранулы сухого льда, колесо, рельс.

Постановка проблемы. Значительную роль в обеспечении жизнедеятельности многоотраслевой экономики Украины занимает железнодорожный транспорт, как один из важнейших составляющих транспортной системы страны. Эффективность эксплуатации железнодорожного транспортного средства в значительной степени зависит от реализуемой силы тяги. Изменяющийся в широких пределах коэффициент сцепления колеса с рельсом существенно ограничивает эффективное использование мощности локомотива в режимах тяги и торможения.

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день проведен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований по разработке различных методов и устройств повышения реализуемой силы тяги и торможения [1, 2, 3]. Известны различные методы активного воздействия на фрикционный узел «колесо-рельс», которые обеспечивают значительное повышение тягово-сцепных и тормозных качеств локомотива за счет увеличения коэффициента сцепления, но по разным причинам они не получили широкого распространения.

В реальных условиях эксплуатации надежная работа железнодорожного транспорта достигнута исключительно за счёт применения кварцевого песка. Подача песка на рельсы перед колесами локомотива широко используется во всем мире, но наряду с неоспоримыми преимуществами (высокая эффективность, удобство использования, относительная дешевизна) имеет и явные недостатки [4]. Эти недостатки заставляют ученых и инженеров совершенствовать применяемые методы подачи песка (электризация песка, подача песчаной пасты, использование брикетов и др.) и разрабатывать новые устройства для их реализации, которые бы уменьшали негативные последствия его использования. Одним из возможных способов повышения эффективности использования сцепных качеств локомотива является разработанный новый перспективный способ повышения сцепления колес локомотива с рельсами [5, 6, 7, 8], который заключается в воздействии на поверхность рельса двухфазного потока, в котором гранулы сухого льда под действием сжатого воздуха с высоким ускорением действуют как очищающее средство и внедряются в поверхностный слой загрязнений, очищая его от поверхностных загрязнений.

Как известно, сухой лед производится путем сжижения углекислого газа (CO_2) под давлением и непременно быстрого устранения давления. Вследствие чего испаряется часть углекислого газа и вызванное резкое охлаждение приводит к глубокому замораживанию остаточного объема CO_2 с образованием снега, температурой -79°C . Спрессовывается он в гранулы сухого льда при помощи специальных матриц различного диаметра. Гранулы сухого льда подаются через сопло с высокой скоростью на очищаемую поверхность, а интенсивное очищающее действие данного метода обеспечивается тремя эффектами [9, 10]:

1. Очистка механическим воздействием – гранулы сухого льда бомбардируют поверхность подлежащую очистке с высокой скоростью.

2. Очистка за счет тепловой энергии – резкое охлаждение поверхности сухим льдом, имеющим температуру -79°C , приводит к образованию в слое загрязнения мелких трещин из-за большого перепада температур.

3. Очистка за счет сублимации – через формирующиеся трещины в загрязнениях гранулы сухого льда проникают внутрь слоя загрязнений и сублимируются в них с более чем 400-кратным расширением объема, вызывая эффект взрыва и загрязнения отрываются от поверхности.

Главными преимуществами метода повышения сцепления колеса и рельса очисткой их контактирующих поверхностей гранулами сухого льда являются:

- сухой лед сублимируется с образованием углекислого газа, возвращающегося в атмосферу;
- материалы не подвергаются коррозии, отсутствует износ и эрозия;
- гранулы сухого льда практически не оказывают абразивного действия, не повреждаются очищаемые поверхности;
- экологичная технология очистки не требует применения дополнительных химических или абразивных средств.

Цель статьи. Изучение процесса движения гранул сухого льда из сопла с учетом различных факторов, обусловлено высокой сложностью получения и анализа результатов при проведении стендовых и натурных экспериментов. Поэтому целью статьи является создание математической модели, описывающей процесс движения гранул сухого льда, которая позволяет установить влияние параметров подачи (углы наклона сопла в разных плоскостях, производительность системы подачи, скорость движения и физико-механические характеристики гранул сухого льда и т.п.) на динамику распределения их по ширине головки рельса в течение определенного времени.

Изложение основного материала исследования. Для реализации модели был разработан специальный моделирующий алгоритм, блок-схема, которого представлена на рисунке 1. В соответствии с ним программно вырабатывается информация, описывающая элементарные процессы исследуемой системы с учетом взаимосвязей и взаимных влияний. При этом моделирующий алгоритм построен в соответствии с логической структурой системы, с сохранением последовательности протекающих в ней процессов и отображением основных состояний системы.

Основными этапами работы разработанной модели являются:

1. Моделирование входных и внешних воздействий.
2. Воспроизведение работы моделируемого процесса (моделирующий алгоритм).
3. Обработка результатов моделирования и их интерпретация.

На основании созданной имитационной модели была разработана специальная компьютерная программа, основана на использовании алгоритмических моделей, реализуемых на персональном компьютере, для исследования процесса движения гранул сухого льда [11, 12, 13].

Исследуемая система может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию многочисленных случайных факторов (боковой ветер, завихрения воздуха в зоне контакта и т.д.), поэтому использование разработанной математической модели позволяет исследовать динамику функционирования процесса в течение определенного времени, легко изменять значения параметров исследуемого процесса и его начальные условия.

Результаты моделирования являются важным фактором для принятия решений при проверке новой идеи, так как это позволяет исследовать большое число альтернатив (вариантов решений), проигрывать различные сценарии при любых входных данных.

Так как данный метод моделирования является численным, то результаты, полученные по завершению моделирования, соответствуют фиксированным значениям параметров исследуемого процесса и его начальных условий. Для анализа разработанного метода приходится многократно моделировать процесс его функционирования, варьируя исходными данными, набирая, таким образом, статистику результатов, которую затем можно аппроксимировать.

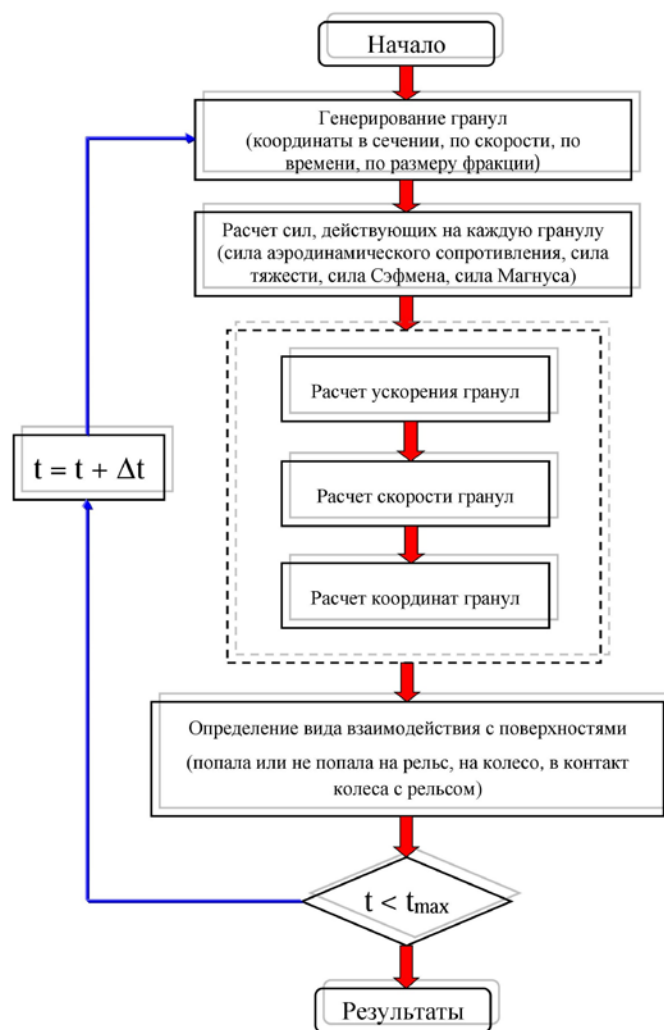


Рис. 1 Блок-схема алгоритма имитационной математической модели

В основе разработанной математической модели лежит метод частиц (дискретно-элементный), предполагающий вычисление положения и соответствующих параметров, каждой моделирующей гранулы в различные моменты времени, а также важной особенностью данного метода является возможность учета влияния большого числа разнообразных по природе факторов. Это позволяет получить детальную пространственно-временную картину распределения потока гранул на исследуемой поверхности. Модель движения двухфазного потока описывает движение гранул, учитывая их столкновения в потоке и их отражение от поверхности рельса или колеса. Выполняя численное моделирование движения потока гранул – распределение по размерам, скорости, времени и их пространственное расположение по сечению сопла (координаты каждой частицы), в начальный момент времени определяется условиями задачи, а также технологическими параметрами подающей системы. Каждая моделирующая гранула ставится в соответствие с одной реальной гранулой, число которых в вычислительном эксперименте определяется исходя из объемной концентрации потока, заданного в начальных условиях. Гранулы моделируются твердыми шарами с заданной плотностью. Расчетная схема модели движения гранул сухого льда представлена на рисунку 2.

При описании двухфазного потока (твердых гранул сухого льда в воздушном потоке) использован дискретно-траекторный подход (Эйлер-Лагранж). Это обосновано выбором метода гранул для создания модели и тем обстоятельством, что такой подход используется для моделирования двухфазных потоков с твердой фазой. При этом для гранул используется метод Лагранжа, а для воздушной фазы – метод Эйлера [14, 15, 16].

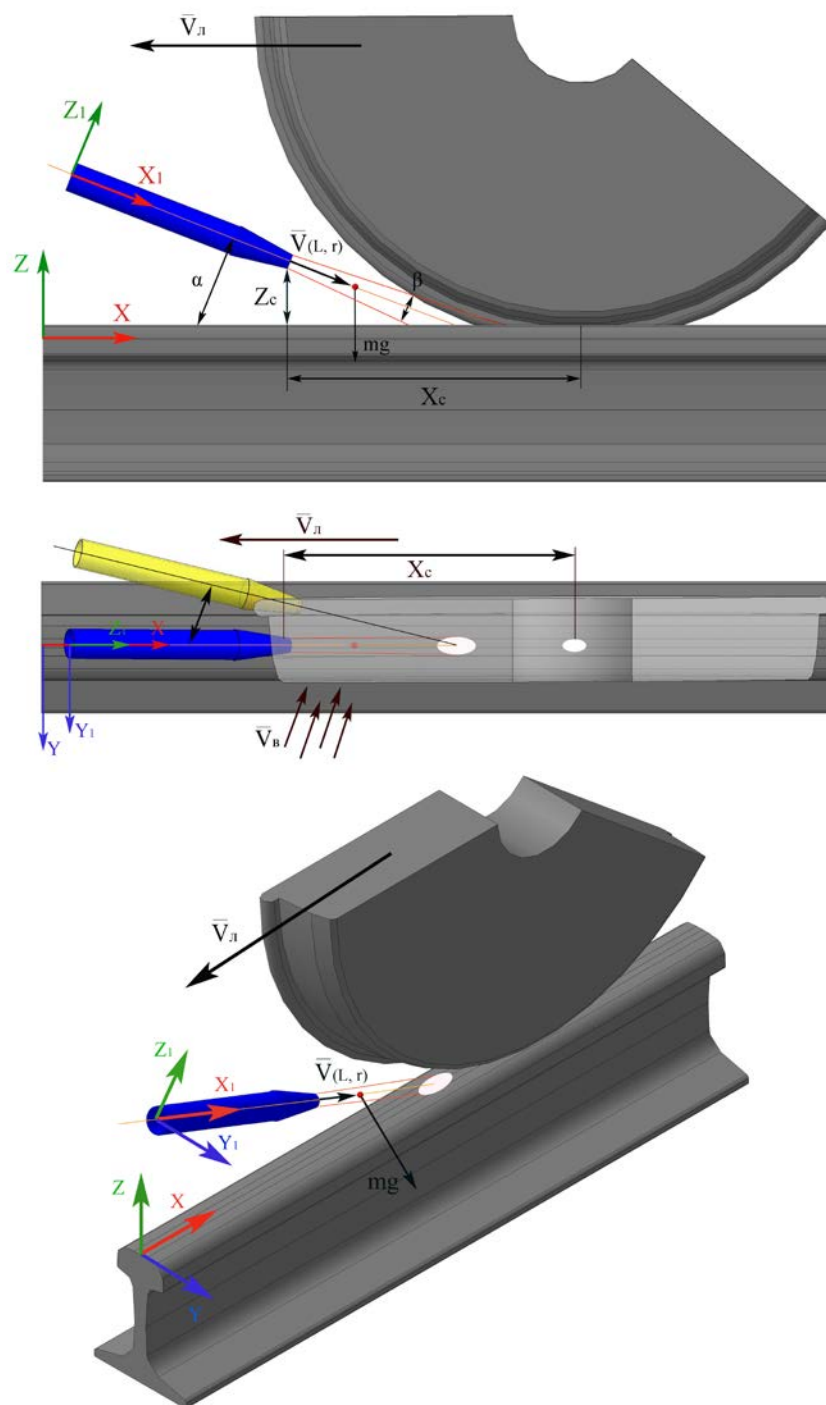


Рис. 2 Расчетная схема модели движения гранул сухого льда

Для моделирования исследуемой системы на компьютере в качестве компьютерной программы, моделирующий алгоритм (рис. 1) был записан на входном универсальном алгоритмическом языке C++ в среде Borland C++ Builder 6.0 [13]. Реализация разработанной модели производилась на персональном компьютере с высокой производительностью.

Алгоритм работы имитационной модели движения гранул сухого льда от сопла до поверхности контакта колеса и рельса (рис. 1) представляет собой следующую последовательность действий:

1. По заданному расходу гранул Q_n и математическому ожиданию размера гранул определяется производительность системы подачи (количество гранул в единицу времени). Затем, используя модель пуассоновского потока, каждой грануле «назначается» время появления t_i в интервале $0 \dots t_{\Sigma}$. Кроме того, каждой частице случайным образом задаются:

- начальные координаты (y_i, z_i) в сечении сопла;
- скорость движения на выходе из сопла в диапазоне $V_i = V_0 \pm \Delta V$, где $\Delta V = 0,05 \cdot V_0$;
- ориентацию скорости V_i ;
- угол $\beta \cdot r/r_c$ к оси потока;
- размер гранул в соответствии с распределением.

2. На каждом шаге интегрирования, по сгенерированной последовательности появления гранул, проверяется необходимость включения в расчет гранул по условию $t \geq t_i$, где t – текущее расчетное время. Если условие $t \geq t_i$ выполняется, то гранула включается в список гранул, находящихся в полете.

3. Для каждой гранулы, находящейся в полете, определяются силы, действующие на нее. Используя алгоритм Верле, осуществляется вычисление положения гранулы по ее предыдущему $\vec{r}(t - \Delta t)$ и настоящему $\vec{r}(t + \Delta t)$ местоположению. Учитывая, что первая производная по времени есть скорость $\vec{v}(t)$, а вторая – ускорение $\vec{a}(t)$, численное интегрирование уравнений движения можно записать в виде:

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\vec{a}(t)\Delta t^2 + \frac{1}{6}\vec{b}(t)\Delta t^3 + O(\Delta t^4), \quad (1)$$

$$\vec{r}(t - \Delta t) = \vec{r}(t) - \vec{v}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\vec{a}(t)\Delta t^2 - \frac{1}{6}\vec{b}(t)\Delta t^3 + O(\Delta t^4), \quad (2)$$

где t – время;

Δt – шаг интегрирования по времени;

$\vec{r}(t)$ – положение гранулы в момент времени t ;

$\vec{v}(t)$ – скорость гранулы;

$\vec{a}(t)$ – ускорение гранулы.

Сложив эти два уравнения и выразив $\vec{r}(t + \Delta t)$, получим:

$$\vec{r}(t + \Delta t) = 2\vec{r}(t) - \vec{r}(t - \Delta t) + \vec{a}(t)\Delta t^2 + O(\Delta t^4). \quad (3)$$

Поскольку интегрируем уравнения Ньютона, ускорения гранул легко считаются через силу, которая в свою очередь есть функция положения $\vec{r}(t)$:

$$\vec{a}(t) = \frac{\vec{F}(\vec{r}(t))}{m} = -\frac{1}{m}\nabla U_p(\vec{r}(t)), \quad (4)$$

где m – масса гранулы;

U_p – потенциальная энергия гранулы.

Выражение для скорости может быть получено путем вычитания уравнения (1) из уравнения (2):

$$\vec{v}(t) = \frac{1}{2}\Delta t [\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t - \Delta t)] + O(\Delta t^2). \quad (5)$$

В результате определяются новые значения ускорений, скоростей и координат гранул.

4. Используя новые координаты гранул, осуществляется проверка взаимодействия гранулы с поверхностью рельса (колеса). Возможны несколько вариантов взаимодействия:

➤ гранула движется в направлении поверхности рельса → не предпринимается никаких дополнительных действий;

➤ гранула достигла поверхности → определяются параметры взаимодействия гранулы с поверхностью (скорость гранулы в момент удара, угол атаки, координаты точки поверхности, скорость с которой гранула отразилась от поверхности), информация о взаимодействии вносится в статистику взаимодействий частиц с поверхностью;

➤ гранула попала в зону контакта колеса с рельсом → информация вносится в статистику гранул попавших в контакт и гранула исключается из дальнейшего рассмотрения;

➤ гранула пересекла границы пространства, в котором возможно столкновение с поверхностью рельса (колеса) → частица исключается из дальнейшего рассмотрения.

5. Если время расчета не превысило t_x , то вычисления продолжаются, начиная со второго пункта данного алгоритма.

6. После окончания расчетов происходит обработка статистической информации о взаимодействиях гранул с поверхностью, а также о гранулах, попавших в контакт колеса с рельсом.

С помощью разработанной математической модели движения гранул сухого льда и компьютерной программы для ее реализации, проведена серия численных экспериментов с целью определения влияния параметров системы подачи гранул сухого льда на их распределение по ширине головки рельса [17, 18].

Для удобства определения координат каждой гранулы, ширина головки рельса разбивалась на 40 участков, результаты моделирования представлены на рис. 4-7.

Выводы и перспективы дальнейшего использования. Проведенная серия численных экспериментов позволила установить, что наибольшую степень влияния на распределение абразивного материала по ширине головки рельса оказывает угол атаки струйно-абразивного потока и расстояние от сопла до поверхности рельса. Менее влияющими параметрами являются скорость потока и диаметр сопла.

Полученные результаты дают возможность оценить влияние конструкционных параметров подающего устройства системы САВ на распределение абразивного материала по ширине головки рельса, а также учитывать в процессе моделирования эксплуатационные условия.

Полученные данные позволяют спрогнозировать характеристики подающего устройства системы САВ при его конструировании и управлять им в процессе эксплуатации локомотива.

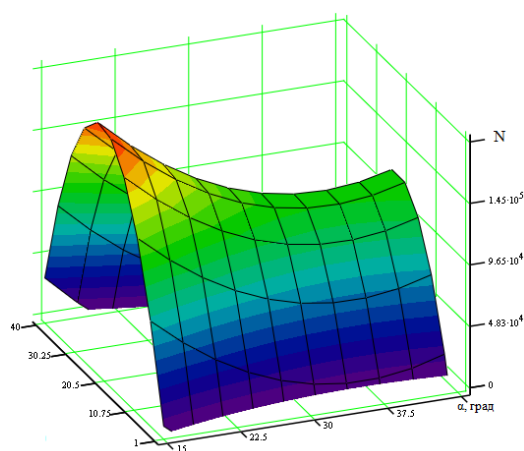


Рис. 4 Зависимость распределения гранул по ширине головки рельса при изменении угла атаки двухфазного потока

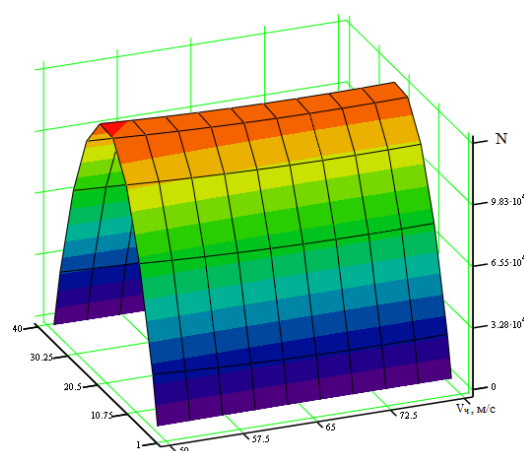


Рис. 5 Зависимость распределения гранул по ширине головки рельса при изменении скорости потока

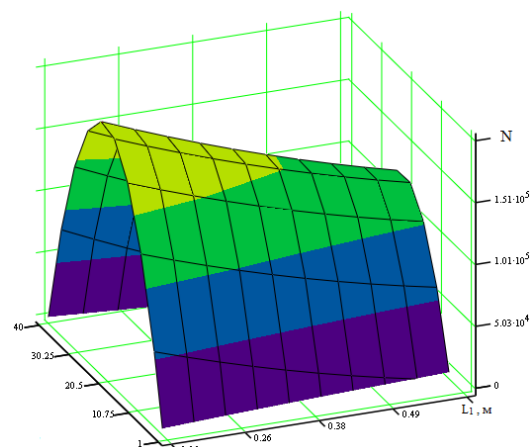


Рис. 6 Зависимость распределения гранул по ширине головки рельса при изменении расстояния от сопла до поверхности рельса

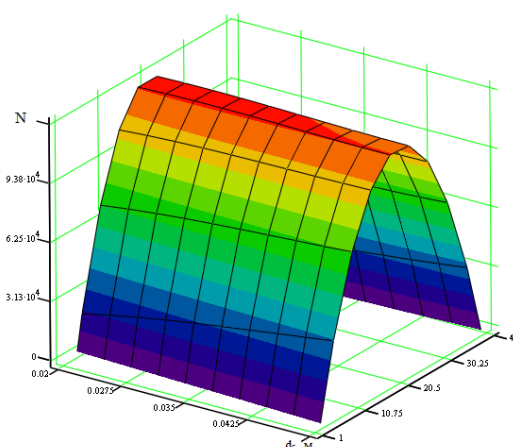


Рис. 7 Зависимость распределения гранул по ширине головки рельса при изменении диаметра сопла

Благодарность. Исследования проводились на основе научно-исследовательской работы «Создание multifunctional наукоемких методов и инструментов комплексного управления

системой «колесо-тормозная колодка-рельс» для предотвращения аварийных ситуаций, устранения риска экологических катастроф», проведенной по гранту Президента Украины по конкурсному проекту Ф70 (№ гос. регистрации 0117U006252) Государственного фонда фундаментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хлебников В.Н. Исследование способов увеличения коэффициента сцепления колес с рельсами / В.Н. Хлебников // Железнодорожный транспорт за рубежом. – М.: ЦНИИТЭИ МПС, №4(174), 1976. – С. 18-34.
2. Ковтанец М.В. Применение экспертного оценивания для принятия технического решения [Электронный ресурс] / М.В. Ковтанец, Е.А. Кравченко, Н.Н. Горбунов, Г.А. Бойко, О.В. Просви́рова // Наукові вісті Дніпровського університету: зб. наук. праць. – 2012. – № 7. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_7/Tehno/12kmvptr.pdf. – Назва з екрану.
3. Gorbunov N. Clutch control in the system of "wheel-rail" / N. Gorbunov, M. Kovtanets, O. Prosvirova, E. Garkushin // Silesian University of Technology Faculty of Transport(Poland). – Transport Problems 2011, p. 432-440
4. Kovtanets M. Increase of coupling characteristics and profitability of the locomotive modernization of system of supply of sand / Maksim Kovtanets, Nicholas Gorbunov, Olga Prosvirova, Sergei Sosnovenko, Vitali Astakhov // TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2012. – Vol. 12, No.4. – P. 90-96.
5. Patent na vinahid №94498 kl. B61C 15/10 Sposib pidvishhennja zcheplennja v zoni kontaktu kolesa z rejkoju / Golubenko O.L., Gorbunov M.I., Kashura O.L., Kostjukevich O.I., Kravchenko K.O., Popov S.V., Kovtanec' M.V., Krisanov M.A.; zajavnik i vlasnik SNU im. V.Dalja. – a200908738; zajavl. 20.08.2009; opubl. 10.05.2011, Bjul. № 9. – 3 s.
6. Borisenko A.V. Povyshenie scepnyh harakteristik koles s rel'sami primeneniem tehnologii ochistki ih poverhnostej granulami suhogo l'da / A.V. Borisenko, M.M. Logachev, M.V. Kovtanec // Majbutnij naukovec' – 2016: materiali vseukr. nauk.-prakt. konf. 2 grud. 2016 r., m. Severodonec'k. Ch. II. – Severodonec'k: Shidnoukr. nac. un-t im. V. Dalja, 2016. – S. 46-48.
7. Gorbunov N.I. Primenenija tehnologii ochistki suhim l'dom v zheleznodorozhnom transporte / N.I. Gorbunov, D.V. Sobol', M.V. Kovtanec, O.V. Prosvirova // Aktual'ni problemi suchasnogo upravlinnja v social'no-ekonomichnih, tehnicnih ta gumanitarnih sistemah: zbirnik tez konferencii, 24-26 listopada 2016 r., m. Odesa (Ukraina). – Severodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2016. – S. 43-46.
8. Gorbunov N.I. Ochistka granulami suhogo l'da kontaktirujushhih poverhnostej sistemy «koleso-rel's», kak metod uluchshenija ih scepnyh svojstv / N.I. Gorbunov, M.V. Kovtanec, D.V. Sobol' // Materialy II-j vseukrainskoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii molodyh uchenyh i studentov «Problemy i perspektivy razvitija zheleznodorozhnogo transporta» (g. Severodonec, 22 maja 2015, veb-konferencija <http://loko.snu.lg.ua>). – S. 12-14.
9. Larin R.N. Metod strujnoj ochistki sudovyh metallokonstrukcij s pomoshh'ju suhogo l'da // Sudostroenie. – 2010. – №1. s. 55-58.
10. Vasil'cov A.S. Jeksperimental'naja ustanovka kriogenного blastinga / A.S. Vasil'cov, V.N. Podvezennyj, A.G. Mal'kevich // Aktual'nye voprosy sovremennoj tehniki i tehnologii: sb. dokl. / Lipeck: IC «Gravis», 2011. – №4. – S. 86-93.11. Gorbunov N. Simulation model of abrasive material motion / Nicholay Gorbunov, Maksim Kovtanets, Rostislav Demin // TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2014. – Vol. 14, No.1. – P. 60-72.
12. Ковтанец М.В. Работа имитационной модели движения абразивного материала из сопла / М.В. Ковтанец, Н.И. Горбунов // Перспективы взаимодействия железных дорог и промышленных предприятий: тезисы 3-й Международной научно-практической конференции (27-28 февраля 2014 г.). – Д.: ДНУЖТ, 2014. – С. 45-47.
13. Свідощтво про реєстрацію авторського права на твір № 47808 від 14.02.2013. Комп'ютерна програма «Моделювання руху абразивного матеріалу в зазорі «сопло-поверхня колеса та рейки» / М.М. Горбунов, М.В. Ковтанець, О.І. Костюкевич, К.О. Кравченко, О.В. Просвірова.
14. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. / Р. Хокни, Дж. Иствуд – М.: Мир, 1987. – 640 с.
15. Вараскин А.Ю. Турбулентное течение газа с твердыми частицами / А.Ю. Вараскин – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.

16. Белоцерковский О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982. – 392 с.

17. Горбунов Н.И. Моделирование распределения абразивного материала по поверхности рельса при различных условиях подачи / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, О.В. Просви́рова // Логістичне управління та безпека руху на транспорті: збірник наукових праць конф., 4-6 листопада 2014 р., м. Северодонецьк. – СХУ ім. В. Даля, 2014. – С. 18-20.

18. Фомін О.В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів в якості складових елементів несучих систем напіввагонів/ О.В. Фомін // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: науковий журнал. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 6(54). – С. 146-153.

REFERENCES

1. Hlebnikov V.N. Issledovanie sposobov uvelicheniya koeficienta scepneniya koles s relsami [Study ways to increase the coefficient of friction of the wheels with the rails]. Zheleznodorozhnyj transport za rubezhom – Railway transport overseas. Moscow, 1976, issue 4(174), pp. 18-34.

2. Kovtanets M.V., Kravchenko E.A., Gorbunov N.N., Bojko G.A., Prosvirova O.V. Primenenie jekspertnogo ocenivaniya dlja prinjatija tehničeskogo reshenija (The use of expert estimation for adoption of the technical solution). Naukovi visti Dalivskogo universitetu – Science news Dahl University. 2012. issue 7. Available at: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_7/Tehno/12kmvptr.pdf

3. Gorbunov N. Clutch control in the system of "wheel-rail"/ N. Gorbunov, // Silesian University of Technology Faculty of Transport(Poland). – Transport Problems 2011, p. 432-440.

4. Kovtanets M. Increase of coupling characteristics and profitability of the locomotive modernization of system of supply of sand / Maksim Kovtanets, Nicholas Gorbunov, Olga Prosvirova, Sergei Sosnovenko, Vitali Astakhov // TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2012. – Vol. 12, No.4. – P. 90-96.

5. Патент на винахід №94498 кл. B61C 15/10 Спосіб підвищення зчеплення в зоні контакту колеса з рейкою / Голубенко О.Л., Горбунов М.І., Кашура О.Л., Костюкевич О.І., Кравченко К.О., Попов С.В., Ковтанець М.В., Крисанов М.А.; заявник і власник СХУ ім. В.Даля. – а200908738; заявл. 20.08.2009; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9. – 3 с.

6. Борисенко А.В. Повышение сцепных характеристик колес с рельсами применением технологии очистки их поверхностей гранулами сухого льда / А.В. Борисенко, М.М. Логачев, М.В. Ковтанец // Майбутній науковець – 2016: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 2 груд. 2016 р., м. Северодонецьк. Ч. II. – Северодонецьк: Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2016. – С. 46-48.

7. Горбунов Н.И. Применение технологии очистки сухим льдом в железнодорожном транспорте / Н.И. Горбунов, Д.В. Соболев, М.В. Ковтанец, О.В. Просви́рова // Актуальні проблеми сучасного управління в соціально-економічних, технічних та гуманітарних системах: збірник тез конференції, 24-26 листопада 2016 р., м. Одеса (Україна). – Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2016. – С. 43-46.

8. Горбунов Н.И. Очистка гранулами сухого льда контактирующих поверхностей системы «колесо-рельс», как метод улучшения их сцепных свойств / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Д.В. Соболев // Материалы II-й всеукраинской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и студентов «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (г. Северодонецк, 22 мая 2015, веб-конференция <http://loko.snu.lg.ua>). – С. 12-14.

9. Ларин Р.Н. Метод струйной очистки судовых металлоконструкций с помощью сухого льда // Судостроение. – 2010. – №1. с. 55-58.

10. Васильцов А.С. Экспериментальная установка криогенного бластинга / А.С. Васильцов, В.Н. Подвезенный, А.Г. Малькевич // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докл. / Липецк: ИЦ «Гравис», 2011. – №4. – С. 86-93.

11. Gorbunov N. Simulation model of abrasive material motion / Nicholay Gorbunov, Maksim Kovtanets, Rostislav Demin // TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2014. – Vol. 14, No.1. – P. 60-72.

12. Kovtanets M.V., Gorbunov N.I. Rabota imitacionnoj modeli dvizhenija abrazivnogo materiala iz sopla [Work simulation model of the movement of the abrasive nozzle]. Tezisy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii (27.02-28.02.2014) «Perspektivy vzaimodejstvija zheleznyh dorog i promyshlennyh predpriyatij» [Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference (27.02-

28.02.2014) «Prospects of cooperation of railways and industrial enterprises»]. Dnepropetrovsk, 2014, pp. 45-47.

13. Gorbunov M.M., Kovtanets M.V., Kostjukevich O.I., Kravchenko K.O., Prosvirova O.V. Modeljuvannja ruhu abrazivnogo materialu v zazori «soplo-poverhnja kola ta rejki» [Modeling the movement of abrasive material in the gap «nozzle-surface wheels and rails»]. The certificate of registration of copyright, no. 47808, 2013.

14. Hokni R., Istvud Dzh. Chislennoe modelirovanie metodom chastic [Numerical simulation by particles]. Moscow, Mir Publ., 1987. 640 p.

15. Varaskin A.Ju. Turbulentnoe techenie gaza s tverdymi chasticami [Turbulent flow of gas and solid particles]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003. 192 p.

16. Belocerkovskij O.M., Davydov Ju.M. Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike [The method of large particles in the gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 392 p.

17. Gorbunov N.I., Kovtanets M.V., Prosvirova O.V. Modelirovanie raspredelenija abrazivnogo materiala po poverhnosti relsa pri razlichnyh uslovijah podachi [Modeling the distribution of the abrasive material on the rail surface at various feed conditions]. Zbirnik naukovih prac (04.11-06.11.2014) «Logistichne upravlinnja ta bezpeka ruhu na transporti» [Collected Works (04.11-06.11.2015) «Logistics management and traffic safety in transport»]. Severodonetsk, 2014, pp. 18-20.

18. Fomin O.V. Analiz dotsilnosti zastosuvannja shestyhannykh porozhnystykh profiliv v yakosti skladovykh elementiv nesuchykh system napivvahoniv [Analysis of the appropriateness of the use of hexagonal hollow profiles as components of the bearing systems of gondola cars] // Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana, Nauka ta prohres transportu, 2014, № 6 (54), pp. 146-153.

Shherbakov Vladislav

Group T/I-141

Department of automobile, railway transport and lifting-transport vehicles

East Ukrainian National University named after Vladimir Dal

MATHEMATICAL MODEL OF MOVEMENT GRANULES DRY ICE AND THEIR DISTRIBUTION ON THE SURFACE OF THE RELAX HEAD

The paper deals with the creation of a simulation mathematical model describing the process of motion of dry ice granules, which allows one to determine the influence of the parameters of the supply system: the angles of the nozzle slope in different planes, system performance, velocity and physical and mechanical characteristics of dry ice granules, etc.) the dynamics of their distribution along the width of the head of the rail for a certain time. To implement the model, a special modeling algorithm was developed, according to which software is developed that describes the elementary processes of the system under consideration, taking into account interconnections and mutual influences. The dry ice granule delivery system can simultaneously contain elements of continuous and discrete action, be exposed to numerous random factors such as lateral wind, air turbulence in the contact area, and others, therefore the use of the developed simulation mathematical model allows us to investigate the dynamics of the functioning of the process for a certain time, It is easy to change the values of the parameters of the investigated process and its initial conditions. The conducted series of numerical experiments made it possible to establish that the greatest degree of influence on the distribution of dry ice granules along the width of the head of the rail is the angle of attack with the flow of granules and the distance from the nozzle to the surface of the rail. Less influencing parameters are the flow rate of the granules and the diameter of the nozzle.

Key words: mathematical model, modeling algorithm, dry ice granules, wheel, rail.

Научный руководитель – профессор кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, д.т.н., проф. Горбунов Н.И.