

*П. Ю. Коновалов, И. А. Яицков*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ИСТЕЧЕНИЯ ПЕСКОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

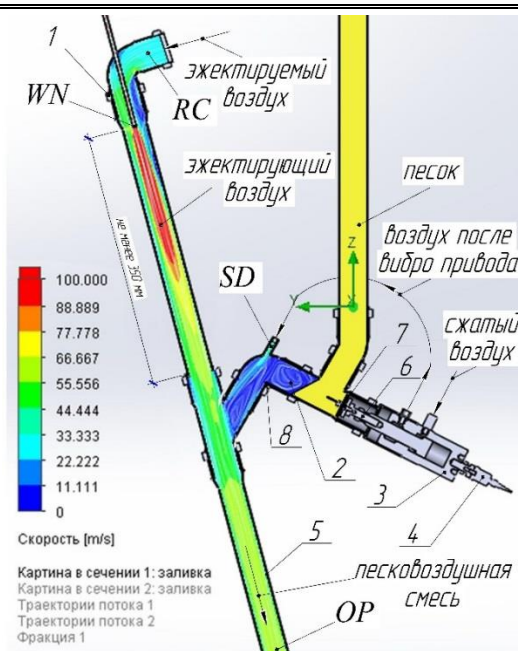
**Аннотация.** Предложена трехмерная модель конструкции усовершенствованной системы пескоподачи с применением эффекта виброоживления с помощью поршневого пневматического вибропульсатора одностороннего типа для плавного непрерывного регулирования количества песка из корпуса форсунки песочницы и использованием эжекции дополнительного количества воздуха через газоструйный инжектор для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси при раздельном независимом питании сжатым воздухом инжектора и вибропульсатора. Представлены результаты моделирования транспортировки песковоздушной смеси с целью определения зависимости скорости истечения и массового расхода сжатого воздуха от величины давления перед рабочим соплом газоструйного инжектора для двух различных диаметров проходного сечения сопла 3,9 и 5 мм. По полученным результатам для реализации регулирования скорости транспортировки песковоздушной смеси путем управления величиной давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора, с целью компенсации потерь на различные сопротивления в системе пескоподачи рациональнее использовать сопло диаметром проходного сечения 5 мм.

**Ключевые слова:** система пескоподачи, скорость истечения, песковоздушная смесь, моделирование, вычислительный эксперимент, регулирование, давление, сжатый воздух.

**Для цитирования:** Коновалов, П. Ю. Технические решения по регулированию увеличения скорости управляемого истечения песковоздушной смеси / П. Ю. Коновалов, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 241–247. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_241.

### **Введение**

На подвижном составе железных дорог для предотвращения негативного избыточного проскальзывания колес относительно рельсов в различных режимах движения (боксование в тяге и юз при торможении) применяют подачу частиц кварцевого песка повышенной твердости в зону контакта колес с рельсами [1–3]. Однако известно, что существующие системы пескоподачи имеют разнообразные конструкции основных элементов и расходные характеристики количества песка в зависимости от типа и назначения подвижного состава [4]. Так, например, применяются форсунки песочницы различных конструкций, отличается также длина и сложность пескопроводящих труб для локомотивов с двух- и трехосными тележками [5], где при наличии длинных горизонтальных участков подводят дополнительный объем воздуха для исключения слеживания песка, а для обеспечения регулирования количества песка из корпуса форсунки в зависимости от фактических условий эксплуатации и режима нагруженности локомотива по сцеплению используют импульсную подачу с различной скважностью пауз и включений [4]. С целью исключения неисправностей, приводящих к частичным или полным отказам пескоподачи, а также для повышения эксплуатационных показателей данных систем и локомотивов в целом на основе результатов, приведенных в [6–9], предлагается усовершенствованная система пескоподачи с применением эффекта виброоживления для плавного непрерывного регулирования количества песка из корпуса форсунки песочницы и использованием эжекции дополнительного количества воздуха для увеличенной скорости истечения песковоздушной смеси. Предложенная система имеет конструкцию, расчетная трехмерная модель которой показана на рис. 1.



**Рис. 1. Система пескоподачи с применением эффекта виброоживления и увеличением скорости истечения за счет эффекта эжекции до 50 м/с при диаметре рабочего сопла инжектора 3,9 мм**

1 – газоструйный инжектор; 2 – форсунка песочницы; 3 – пневматический вибропривод; 4 – датчик ускорений; 5 – подсыпной рукав; 6 – поршень вибропривода; 7 – латексная мембрана; 8 – порожек в корпусе форсунки песочницы

Особенностью приведенной на рис. 1 системы пескоподачи является наличие пневматического вибропривода 3 и газоструйного инжектора 1. Вибропривод 3 является поршневым пневматическим вибропульсатором одностороннего действия, закрепленным на корпусе форсунки песочницы 2, для реализации поосного плавного непрерывного дозирования количества песка под движущие колеса тягового подвижного состава в зависимости от фактических условий эксплуатации [10] и расположения колесной пары по направлению движения поезда в габарите одной секции или локомотива в целом. Редуктор с сервоприводом позволяет изменять давление сжатого воздуха, подводимого в корпус вибропульсатора 3, поршень 6 которого пропорционально величине давления изменяет частоту перемещения и силовое воздействие через латексную мембрану 7 на слой песка в корпусе форсунки песочницы, приводя его в псевдооживленное состояние, при котором частицы перетекают через порог 8 [6] и попадают в воздушный поток от газоструйного инжектора 1.

Воздушный поток в зависимости от диаметра рабочего сопла WN инжектора 1 достигает рассчитанных скоростей более 40 м/с [9] за счет эжекции дополнительного количества воздуха в пескопровод через сечение приемной камеры RC, как показано в [8], с возможностью реализации двойного сокращения массового расхода сжатого воздуха из пневматической системы локомотива относительно потребляемого количества штатной форсунки песочницы ОНЗ-64 при подаче песка в 1500 г/мин. Газоструйный инжектор 1 питается сжатым воздухом независимо от пневматического вибропульсатора 3 и может располагаться на борту локомотива на любом расстоянии от форсунки песочницы 2, обязательным требованием является лишь то, чтобы прямой участок после приемной камеры был не менее 350 мм, так как данный участок воздуховода является смесительной камерой инжектора, в которой происходит выравнивание профиля скоростей по сечению, что необходимо для уменьшения потерь при дальнейшей транспортировке частиц песка по подсыпному рукаву 5 под колеса подвижного состава.

Скорость транспортировки частиц песка и истечения из подсыпного рукава 5 со значениями выше 40 м/с гарантирует доставку в зону контакта колес с рельсами при воздействии бокового ветра силой до 20 м/с более 90 % количества частиц песковоздушной струи с различной запыленностью от минимального расхода в 100 г/мин до необходимых 1500 г/мин для магистральных электровозов. Раздельное независимое питание сжатым воздухом пневматического вибропульсатора 3 и газоструйного инжектора 1 позволяет осуществлять продувку пескопровода 5 как до включения системы, так и после завершения процесса пескоподачи при избыточном проскальзывании движущих колес локомотивов относительно рельсов. Продувку в системе пескоподачи на рис. 1 возможно реализовать при отклю-

ченном электропневматическом вентиле на трубопроводе, подводящем сжатый воздух к виброприводу, и при открытом клапане, отвечающем за подачу воздуха к инжектору, что исключит дозирование и подачу частиц песка в подсыпной рукав без вибрационного воздействия, а скоростной воздушный поток, проходя по пескопроводу, сдует оставшиеся частицы песка после завершения пескоподачи, исключив их слеживание и снизив вероятность закупоривания проходного сечения трубопровода 5. Также возможно проводить периодическую продувку подсыпных рукавов 5, направленных встречно по ходу движения поезда, куда в зимний период эксплуатации попадают снег и частицы льда, что является причиной закупорки концевых насадок подсыпных труб и приводит к полному отказу пескоподающей системы при смене направления движения.

### ***Постановка задачи***

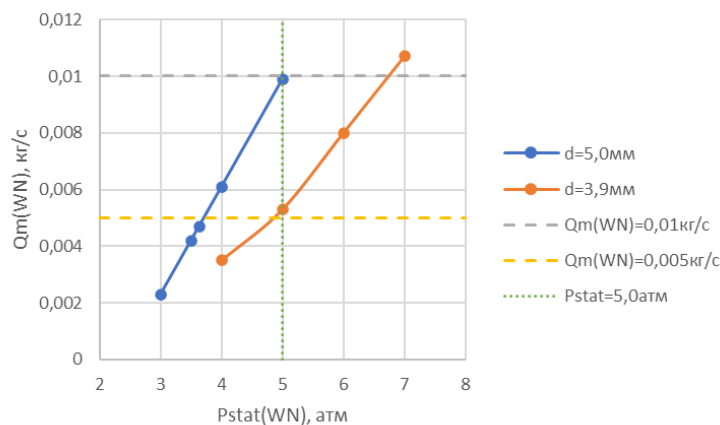
При определении потерь скорости транспортировки песковоздушной смеси по длинному пескопроводу, имеющему местные сопротивления в виде криволинейных участков, было установлено, что снижение скорости песковоздушной смеси не превышает 5 % [11]. Однако известно, что скорость движения частиц всегда меньше скорости транспортирующего потока и может составлять от 10 до 25 % в зависимости от концентрации и размера частиц твердой фракции. С учетом наихудших условий транспортировки получается, что скорость частиц может снижаться в диапазоне от 6 до 14 м/с. Данный факт может стать причиной снижения скорости истечения песковоздушной смеси ниже 40 м/с, что недопустимо с точки зрения эксплуатационных показателей системы пескоподачи, как указано в [9].

По причине того, что представленная на рис. 1 усовершенствованная система пескоподачи является универсальной для внедрения на подвижном составе различного типа и назначения со своими особенностями формы и длины пескопровода, а также количества наибольшего необходимого расхода песка на одну форсунку песочницы, возникла необходимость определения технического решения по увеличению скорости управляемого истечения песковоздушной смеси. Как указывалось, [11], имеется возможность повышения скорости транспортирующего потока путем увеличения диаметра проходного сечения рабочего сопла инжектора или приращения величины давления сжатого воздуха, подводимого через сопло с постоянным диаметром. Зависимости скорости истечения и расхода сжатого воздуха приведены в [5, 8]. На практике изменение диаметра – трудоемкий и затратный процесс, требующий определения точного значения площади проходного сечения для обеспечения корректировки и достижения необходимой скорости транспортировки при компенсации потерь падения скорости с учетом особенностей пескоподающих систем локомотивов различного типа и назначения.

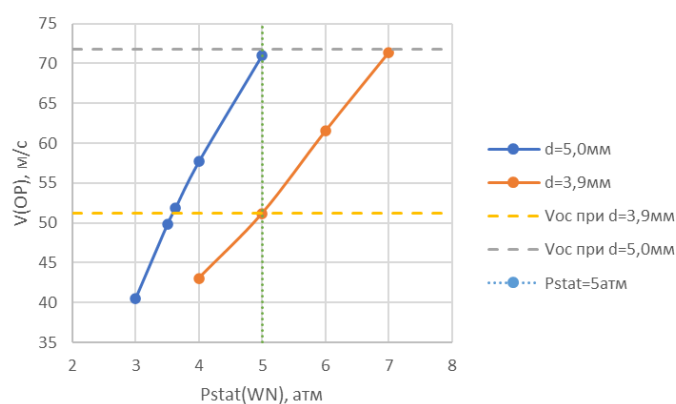
Для реализации поставленной задачи на основе твердотельной модели усовершенствованной системы пескоподачи, представленной на рис. 1, был проведен вычислительный эксперимент по определению зависимостей изменения скорости транспортировки и истечения песковоздушной смеси от величины давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора. Моделирование проводилось с неизменным максимально возможным расходом воздуха через пневматический вибропульсатор 0,001225 кг/с при рабочем давлении равном 0,6 МПа. Граничными условиями для проведения моделирования были: давление окружающей среды, равное атмосферному 101325 Па, в РС входного сечения приемной камеры инжектора и ОР выходного сечения подсыпного рукава; массовый расход сжатого воздуха через сечение форсунки песочницы SD, равный расходу через пневматический вибропульсатор 0,001225 кг/с; статическое давление сжатого воздуха, подводимое через сечение WN рабочего сопла газоструйного инжектора, варьировалось в диапазоне от 0,3 до 0,7 МПа. Моделирование проводилось для двух диаметров проходного сечения рабочего сопла инжектора 3,9 и 5 мм согласно [5, 8].

### ***Результаты моделирования***

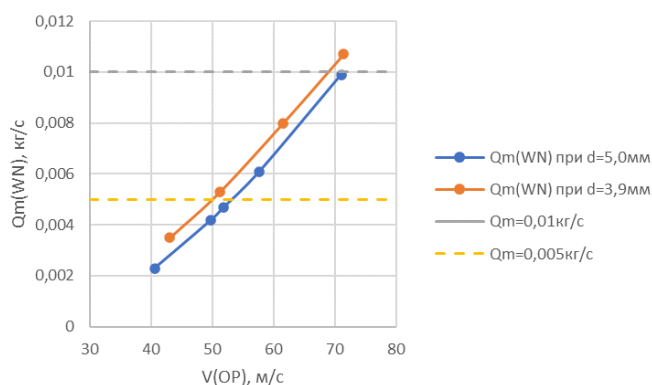
Результатом моделирования являются зависимости различных характеристик усовершенствованной системы пескоподачи от величины давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора, представленные на рис. 2–4. Стоит отметить, что на графиках построены зависимости для системы пескоподачи с газоструйными инжекторами, имеющими диаметр проходного сечения рабочего сопла 3,9 и 5 мм, которым соответствуют расчетные скорости истечения, равные 51,2 и 71,8 м/с соответственно, при постоянной величине статического давления сжатого воздуха 0,5 МПа, подаваемого через ускорительное сопло инжектора [5, 8]. Также заметим, что массовый расход сжатого воздуха через инжектор в 0,005 кг/с из [5, 8] при диаметре сопла 3,9 мм рассчитывался исходя из двукратного сокращения расхода относительно количества воздуха, затраченного серийной форсункой песочницы ОНЗ-64 при подаче 1500 г/мин количества песка. Для удобства анализа результатов моделирования указанные значения массового расхода сжатого воздуха, его давление и скорости истечения песковоздушной смеси обозначены на рис. 2–4 в виде пунктирных линий.



**Рис. 2.** Зависимость массового расхода сжатого воздуха через сечение (WN) от давления перед соплом инжектора в сечении (WN)



**Рис. 3.** Зависимость скорости истечения песковоздушной смеси через сечение (OP) от давления перед соплом инжектора в сечении (WN)



**Рис. 4.** Зависимость скорости истечения песковоздушной смеси через сечение (OP) от массового расхода сжатого воздуха через сечение (WN) рабочего сопла инжектора

### Выводы

Из графиков зависимостей, приведенных на рис. 2–4, можно сделать следующие выводы. Для реализации регулирования скорости транспортировки песковоздушной смеси путем управления величиной давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора с целью компенсации потерь на различные сопротивления в системе пескоподачи, рациональнее использовать сопло с диаметром проходного сечения 5 мм. Данный факт возможно объяснить тем, что расчеты в

[5, 8] были выполнены с запасом скорости истечения через сопло с диаметром 5 мм, что подтверждается реализацией расчетной скорости истечения выше 40 м/с при более низком значении давления в 3,63 атм относительно сопла с диаметром 3,9 мм (см. рис. 3). Причем удается достичь немногим более высоких значений скорости истечения в 51,9 м/с (см. рис. 4) при несколько более низком расходе сжатого воздуха 0,0047 кг/с относительно 0,0053 кг/с для сопла с диаметром 3,9 мм (см. рис. 2). В результате регулирования давления сжатого воздуха перед рабочим соплом газоструйного инжектора диаметром 5 мм достигается увеличение скорости управляемого истечения песковоздушной смеси с экономией количества сжатого воздуха в 11,3 %.

### Список литературы

- 1 Improving the efficiency of the path-rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V. V. Shapovalov, V. I. Kolesnikov, P. V. Kharlamov [et al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 900 (2020) 012011 – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
- 2 **Kokhanovsky, V. A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System / V. A. Kokhanovsky, D. V. Glazunov // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(6). – P. 531–537. – DOI 10.3103/S1068366620060100.
- 3 Metal Plating of Friction Surfaces of the «Wheel–Rail» Pair / V. V. Shapovalov, Y. F. Migal, A. L. Ozyabkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(4). – P. 338–346. – DOI 10.3103/s1068366620040121.
- 4 **Коновалов, П. Ю.** Улучшение противобуксовочных свойств транспортных машин на основе модернизации пневмопривода песочной системы / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_8.
- 5 **Konovalov, P. Y.** Increasing the outlet flow velocity of the locomotive sand feeding system using ejecting / P. Y. Konovalov and Y. P. Bulavin // AIP Conference Proceedings 2503, 050032 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099759> (Published Online: 13 October 2022).
- 6 **Булавин, Ю. П.** Экспериментальное исследование работы модернизированной форсунки песочницы в условиях вибрации / Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_1\_8.
- 7 **Konovalov, P. Yu.** Analysis of granular materials vibrorheology of a railway sanding system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 September 2019 year. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol : Institute of Physics Publishing, 2020. –

### References

- 1 Improving the efficiency of the path-rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V. V. Shapovalov, V. I. Kolesnikov, P. V. Kharlamov [et al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 900 (2020) 012011 – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
- 2 **Kokhanovsky, V. A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System / V. A. Kokhanovsky, D. V. Glazunov // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(6). – P. 531–537. – DOI 10.3103/S1068366620060100.
- 3 Metal Plating of Friction Surfaces of the «Wheel–Rail» Pair / V. V. Shapovalov, Y. F. Migal, A. L. Ozyabkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(4). – P. 338–346. – DOI 10.3103/s1068366620040121.
- 4 **Konovalov, P. Yu.** Improving the traction properties of transport vehicles based on the modernization of the pneumatic drive of the sand system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universitetf Putey Soobsheniya. – 2021. – No. 1(81). – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_8.
- 5 **Konovalov, P. Y.** Increasing the outlet flow velocity of the locomotive sand feeding system using ejecting / P. Y. Konovalov and Y. P. Bulavin // AIP Conference Proceedings 2503, 050032 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099759> (Published Online: 13 October 2022).
- 6 **Bulavin, Yu. P.** Experimental study of the operation of a modernized sandbox nozzle in vibration conditions / Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov, I. V. Volkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universitetf Putey Soobsheniya. – 2022. – No. 1(85). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_1\_8.
- 7 **Konovalov, P. Yu.** Analysis of granular materials vibrorheology of a railway sanding system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 September 2019 year. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol : Institute of Physics Publishing, 2020. –

P. 033093. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033093.

8 Improving the pneumatic actuator of the locomotive sand feeding system by increasing the outlet flow velocity / Y. P. Bulavin, P. Y. Konovalov, I. V. Volkov, O. N. Bessarabova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Ser. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 September 2020. Vol. 971. – BRISTOL, ENGLAND : IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042032. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042032.

9 Анализ выходных характеристик пневмопривода системы пескоподачи транспортных машин / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков, И. А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 242–253. – ISSN 2071-6168.

10 **Волков, И. В.** Учет различных факторов при разработке системы непрерывной дозированной подачи песка / И. В. Волков, Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 261–265. – EDN PAKYEH.

11 **Булавин, Ю. П.** Исследование особенностей транспортировки песковоздушной смеси с учетом местных сопротивлений трубопровода / Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(87). – С. 26–35. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_3\_26.

P. 033093. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033093.

8 Improving the pneumatic actuator of the locomotive sand feeding system by increasing the outlet flow velocity / Y. P. Bulavin, P. Y. Konovalov, I. V. Volkov, O. N. Bessarabova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Ser. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 September 2020. Vol. 971. – BRISTOL, ENGLAND : IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042032. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042032.

7 Analysis of output characteristics of the pneumatic actuator of the transport machine's sand feeding system / P. Y. Konovalov, Y. P. Bulavin, I. V. Volkov, I. A. Yaitskov // Izvestiya TulGU. Technical sciences. – 2020. – No. 3. – P. 242–253. – ISSN 2071-6168.

10 **Volkov, I. V.** Taking into account various factors in the development of a continuous metered sand supply system / I. V. Volkov, Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov // Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 261–265. – EDN PAKYEH.

11 **Bulavin, Yu. P.** Investigation of the peculiarities of transportation of sand-air mixture taking into account local pipeline resistances / Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobsheniya. – 2022. – No. 3(87). – P. 26–35. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_3\_26.

*P. Yu. Konovalov, I. A. Yaitskov*

#### TECHNICAL SOLUTIONS FOR REGULATING THE INCREASE IN THE SPEED OF CONTROLLED OUTFLOW OF SAND-AIR MIXTURE

**Abstract.** The paper proposes three-dimensional model of the design of an improved sand supply system using the effect of vibration liquefaction using a one-way piston pneumatic vibropulsator for smooth continuous regulation of the sand amount from the sandbox nozzle body and the ejection use of an additional amount of air through a gas jet injector to increase the ejection rate of the sand-air outflow mixture with separate independent supply of compressed air to the injector. The results of modeling the transportation of a sand-air mixture in order to determine the dependence of the outflow rate and mass flow rate of compressed air on the pressure in front of the working nozzle of a gas-jet injector for two different diameters of the nozzle flow section of 3.9 and 5 mm are presented. According to the results obtained, to implement the regulation of the speed of transportation of the sand-air mixture by controlling the pressure of the compressed air supplied to the working nozzle of the gas-jet injector, in order to compensate for losses due to various resistances in the sand supply system, it is more rational to use a nozzle with a diameter of the passage section of 5 mm.

**Keywords:** and supply system, outflow velocity, sand-air mixture, modeling, computational experiment, regulation, pressure, compressed air.

**For citation:** Konovalov, P. Y. Technical solutions for regulating the increase in the speed of controlled outflow of sand-air mixture / P. Y. Konovalov, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobsheniya. – 2023. – No. 1. – P. 241–247. – DOI 10.46973/0201–727X\_2023\_1\_241.

**Сведения об авторах****Коновалов Павел Юрьевич**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Тяговый подвижной состав»,  
старший преподаватель,  
e-mail: pashafromru@yandex.ru

**Яицков Иван Анатольевич**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: yia@rgups.ru

**Information about the authors****Konovalov Pavel Yurievich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Traction Rolling Stock»,  
Senior Lecturer,  
e-mail: pashafromru@yandex.ru

**Yaitskov Ivan Anatolevich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Car and Cars Facilities»,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: yia@rgups.ru