

УДК 533.6.071

Исследование процессов и управляющих параметров в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта

Д.А. Филатов^а, Г.А. Пыхалов^б

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^аDrugs1989@mail.ru, ^бGrinpykh@mail.ru

Статья получена 22.07.2015, принята 9.09.2015

Предложен новый способ очистки железнодорожных стрелок, реализуемый пропуском сжатого воздуха от пневмомагистрали через вихревую трубу и ультразвуковую сирену для наиболее эффективного разрушения и топления снега и льда. В качестве генератора горячего сжатого воздуха для успешного топления снега и льда выступает вихревая труба противоточного типа, в качестве генератора ультразвука для разрушения льда — ультразвуковая статическая сирена. Предложена структурная реализация системы очистки путем комплексного взаимодействия таких устройств, как ультразвуковая статическая сирена и вихревая труба. Для наиболее детального представления процессов и параметров системы статья содержит структуру и чертеж системы очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта и ультразвука, излагается основной принцип действия приспособления. Приведены результаты экспериментального исследования процессов и управляющих параметров в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта. Анализ экспериментальных исследований подтверждает высокий уровень соответствия математической модели реальному процессу, так как степень расхождения с экспериментальными данными не превышает 1,5–4 %. Очистка с использованием вихревой трубы позволяет очистить, помимо верхнего, не утрамбованного слоя снега, нижние плотные слои снега и льда, частично полностью, до поверхности асфальта (для сравнения: очистка сжатым воздухом позволяет очистить только верхний слой не утрамбованного снега). Очистка с применением ультразвуковой сирены позволяет очистить глыбу льда от снега и отполировать обработанную часть ее поверхности.

Ключевые слова: вихревая труба; ультразвук; сирена; пневмомагистраль.

Research of processes and control parameters in the system for ultrasonic cleaning of railway switches with vortex effect used

D.A. Filatov^а, G.A. Pykhalov^б

Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

^аDrugs1989@mail.ru, ^бGrinpykh@mail.ru

Received 22.07.2015, accepted 9.09.2015

A new method of cleaning railway switches has been proposed, which is realized by transmitting compressed air from a pneumatic pipeline through a vortex pipe and an ultrasonic siren for the most effective snow-ice destruction and melt. As a generator of hot compressed air for successful snow-ice melting, a vortex pipe of counter flow type has been used. As an ultrasonic generator for ice destruction, an ultrasonic static siren has been used. Structural realization of cleaning system has been offered by doing complex interaction of such devices as an ultrasonic static siren and a vortex pipe. To present the processes and system parameters in a more detailed way, the article contains the structure and the drawing of a system for cleaning railway switches with vortex effect and ultrasound used. Functional principle has been explained. Experimental research results have been presented for the processes and control parameters in the system for ultrasonic cleaning of railway switches with vortex effect used. Experimental research analysis confirms the high level of conformity between a mathematical model and a real process as a divergence degree does not exceed 1.5-4% for experimental data. Cleaning with vortex effect used allows removing not only the top, not stamped snow layer but also the stamped snow layers and ice (in comparison with the cleaning with compressed air used which allows removing only the top layer of not stamped snow). Cleaning with an ultrasonic siren used allows removing snow from an ice block and polishing the processed part of its surface.

Key words: vortex pipe; ultrasound; siren; pneumatic pipeline.

Введение. Принято считать, что железнодорожный транспорт не зависит от условий погоды, однако некоторые природные явления могут создать затруднения и в работе железных дорог. В сибирских регионах серьезную опасность для движения поездов представляют

обильные снегопады и вызываемые ими снежные заносы. Наиболее уязвимыми элементами пути являются стрелочные переводы и в первую очередь стрелки в зоне примыкания остряков и рамных рельсов, а также шпальные ящики с переводными тягами.

В настоящее время широкое применение в сети железных дорог Российской Федерации нашла пневматическая двухпрограммная автоматическая очистка стрелочных переводов от снега. Очистка производится обдувкой межрельсового пространства сжатым воздухом, подаваемым по специальной пневмомагистрали.

В статье приведены результаты анализа зависимостей экспериментальных и расчетных данных управляющих параметров в системе ультразвуковой очистки

железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта и результаты процессов очистки.

Предлагаемая система (рис. 1) предназначена для железнодорожных станций, оборудованных автоматической пневмоочисткой стрелочных переводов [1]. Для реализации обдувки горячим воздухом до 350 К была выбрана вихревая труба [2–12] при входном давлении 7,875 атм, для реализации ультразвуковой очистки — ультразвуковая статическая сирена [13–19].

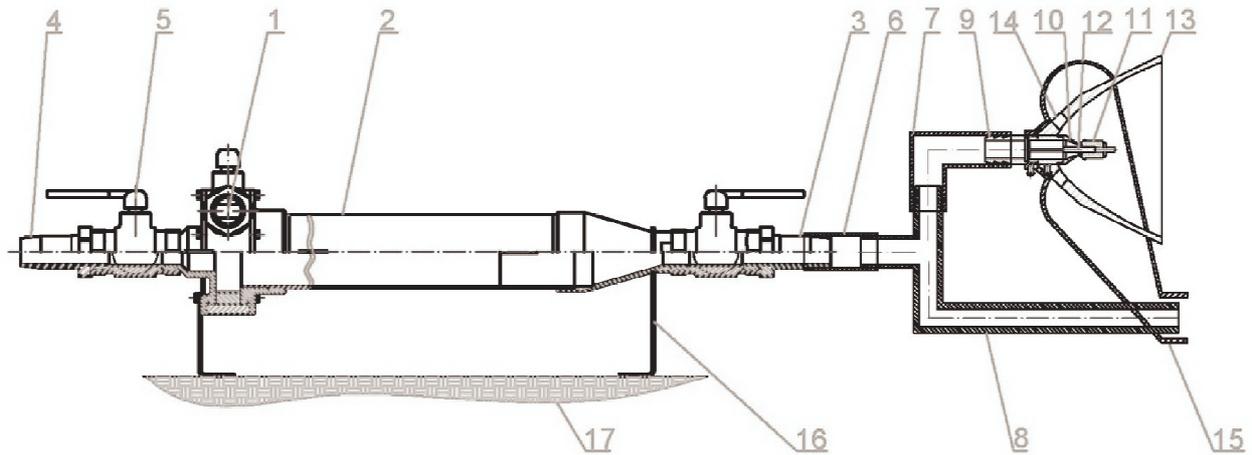


Рис. 1. Общий вид ультразвуковой системы очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта, где 1 — сопло вихревой трубы; 2 — гладкая цилиндрическая труба; 3, 4, 9 — штуцер; 5 — дроссель; 6, 7 — стыковочный элемент; 8 — пневмообдувка; 10 — сопло ультразвуковой сирены; 11 — резонатор; 12 — стержень; 13 — рефлектор; 14 — отверстия для выхода отработанного сжатого воздуха; 15 — отборная камера отработанного сжатого воздуха; 16 — элемент крепления системы; 17 — элемент рабочей поверхности

Математическое моделирование динамических процессов, протекающих в ультразвуковой системе очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта, подробно изложено в работе [20].

Математическая модель динамических процессов, протекающих в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта, состоит из комбинации классических уравнений модели вихревой трубы (ВТ), разработанной Меркуловым А.П. [3], и модели ультразвуковой сирены, разработанной Борисовым Ю.Я. [16]:

1. Уравнения движения:

$$v_{r_{вт}} \frac{\partial v_{r_{вт}}}{\partial r_{вт}} - \frac{v_{\tau}^2}{r_{вт}} = - \frac{1}{\rho_{вт}} \frac{\partial p}{\partial r_{вт}}, \quad (1)$$

$$v_{r_{вт}} \frac{\partial v_{r_{вт}}}{\partial r_{вт}} + v_{r_{вт}} \frac{v_{\tau}}{r_{вт}} = 0, \quad (2)$$

где $v_{r_{вт}}$ — радиальная скорость сжатого воздуха в ВТ, v_{τ} — тангенциальная скорость сжатого воздуха в ВТ, p — давление сжатого воздуха в ВТ, $r_{вт}$ — радиус ВТ, $\rho_{вт}$ — плотность сжатого воздуха в ВТ.

2. Уравнение сплошности:

$$\frac{\partial(\rho_{вт} \cdot r_{вт} \cdot v_r)}{\partial r_{вт}} = 0. \quad (3)$$

3. Уравнение энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial r_{вт}} = \frac{1}{\rho_{вт} \cdot c_p} \frac{\partial p}{\partial r_{вт}}, \quad (4)$$

где T — температура сжатого воздуха в ВТ, c_p — изобарная теплоемкость сжатого воздуха.

4. Уравнение состояния:

$$p = g \cdot \rho_{вт} \cdot R \cdot T, \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения, R — газовая постоянная.

Уравнение пульсации температуры:

$$\partial T' = l_{пс} \left[\frac{\partial T}{\partial r_{вт}} - \left(\frac{\partial T}{\partial r_{вт}} \right)_s \right] \quad (6)$$

где $l_{пс}$ — длина пути смещения.

5. Уравнение пульсации скорости при изотропной турбулентности:

$$v' = \frac{\partial v_{\tau}}{\partial r_{вт}} \cdot l_{пс}. \quad (7)$$

6. Уравнение местной скорости звука:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho_c}\right)_s}, \quad (8)$$

где s – индекс, указывающий на изоэнтропичность процесса.

7. Уравнение длины волны пространственной осцилляции струи:

$$\Delta = A \cdot d_c \cdot \sqrt{p - A_{cp}}, \quad (9)$$

где A – коэффициент, изменяющийся для разных типов сопел ультразвукового излучателя в пределах от 0,77 до 1,22, d_c – диаметр сопла, A_{cp} – среднее значение, принятое Эмденем.

8. Уравнение частоты генерации излучателя:

$$f = \frac{c}{4 \cdot [h_p + 0,4 \cdot l_{ст} + (d_p - d_{ст}) \cdot (0,4 - 0,2 \cdot h_p / d_c)]}, \quad (10)$$

где h_p – глубина резонатора, $l_{ст}$ – длина стержня, d_p – диаметр резонатора, $d_{ст}$ – диаметр стержня.

9. Уравнение интенсивности звука:

$$I = \frac{p^2}{\rho_c \cdot c} = \frac{v_0^2 \cdot \rho_c \cdot c}{2} = 2 \cdot \pi \cdot A_0 \cdot f^2 \cdot \rho_c \cdot c = P \cdot c, \quad (11)$$

где v_0 – амплитуда колебательной скорости, A_0 – амплитуда смещения, P – радиационное давление.

10. Уравнение акустической мощности:

$$W_a = \frac{p_0^2}{\rho_c \cdot c} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \int_0^\pi \left(\frac{p_\alpha}{p_0}\right)^2 \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha. \quad (12)$$

где r_c – радиус сопла, p_α – эффективное значение звукового давления, α – угол сдвига фаз.

Согласно приведенной выше математической модели основные параметры вихревой трубы рассчитываются по следующей формуле [3]:

$$\Pi = \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta t_h}{\eta_h \cdot T_1}} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (13)$$

где Π – располагаемая степень расширения сжатого воздуха, при $\Pi = \frac{P_1}{P_c}$, Δt_h – требуемый эффект нагревания, при $\Delta t_h = T_h - T_1$, η_h – температурная эффективность горячего потока, T_1 – температура сжатого воздуха на выходе из пневмомагистрали, T_h – температура горячего сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы, k – показатель адиабаты.

На рис. 2 представлены основные зависимости давления P_1 сжатого воздуха на входе и давления сжатого воздуха P_c , P_h , P_{s1} , P_{st1} , P_{st} – соответственно на горячем и холодном выходах из вихревой трубы, на входе в

ультразвуковую сирену, на входе и выходе из пневмоочистки, [ати].

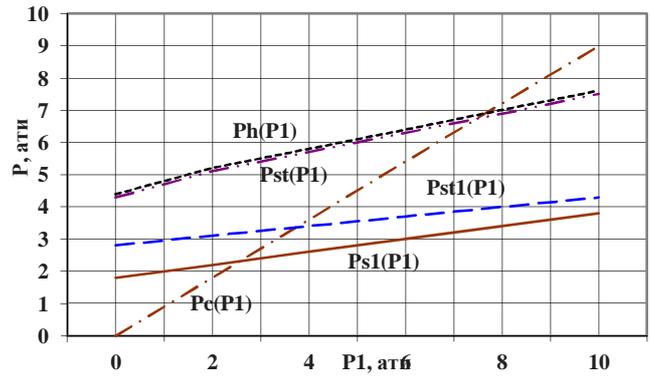


Рис. 2. Зависимость давлений сжатого воздуха P_c , P_h , P_{s1} , P_{st1} , P_{st} – соответственно на горячем и холодном выходах из вихревой трубы, на входе в ультразвуковую сирену, на входе и выходе из пневмообдувки и давления P_1 сжатого воздуха на входе в вихревую трубу.

Ультразвуковую систему очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта можно рассмотреть, как технологический процесс, состоящий из 4-х взаимодействующих модулей (рис. 3).

Система очистки (рис. 3) работает следующим образом. Сжатый воздух поступает в вихревую камеру (модуль 2) из пневмомагистрали (модуль 1) и регулируется дросселем 1. В вихревой камере сжатый воздух делится на два потока (горячий и холодный), выходит через горячий и холодный выходы из вихревой трубы и регулируется дросселем 2 на холодном выходе. Часть горячего сжатого воздуха поступает в ультразвуковую сирену, другая часть — в пневмообдувку (модули 3 и 4), горячий сжатый воздух в 3-м и 4-м модулях регулируется соответственно дросселем 3 и 4. После прохождения через ультразвуковую сирену отработанный сжатый воздух на 99 % возвращается в пневмообдувку, а сгенерированные им ультразвуковые волны в сирене наряду со сжатым горячим воздухом пневмообдувки поступают на стрелочный переход.

Основным управляющим параметром всех модулей в данном случае является давление сжатого воздуха P_1 , которое должно находиться в пределах от 6 до 8 атм на выходе из пневмомагистрали или на входе в вихревую камеру. Для 2-го, 3-го и 4-го модулей основным управляющим параметром является давление P_c сжатого воздуха на холодном выходе вихревой трубы, которое изменяется в пределах от 6 до 8 атм. Для 3-го и 4-го модулей наряду с P_1 и P_c основным управляющим параметром является давление P_h сжатого воздуха на горячем выходе вихревой трубы, которое изменяется в пределах от 6 до 8 атм.

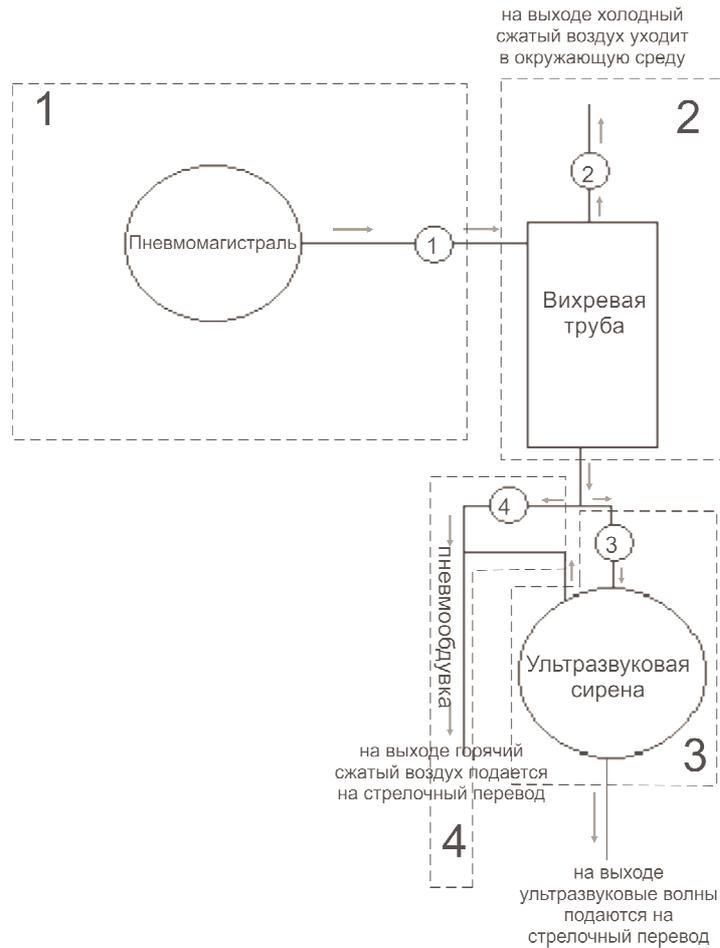


Рис. 3. Система очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта и ультразвука, где стрелками обозначено направление движения сжатого воздуха от пневмомагистрали, а цифрами — номера дросселей и технологических блоков

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования управляющих параметров ультразвуковой системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта проводились в лаборатории Иркутского государственного университета путей сообщения. Исследовались три основных параметра, характеризующие работоспособность системы для ее применения в задачах железнодорожного транспорта и промышленности:

- давление входного потока сжатого воздуха измерялось манометром, входящим в состав компрессора (фирма Fubag, модель Garden Master Kit 8213801 KOA 543);

- скорость сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы измерялась анемометром (фирма Testo, модель Testo 416);

- уровень звука измерялся анализатором шума и вибраций (фирма БайкалЭкоЛаб, модель «Ассистент SI»).

Перевод скорости в давление горячего сжатого воздуха был осуществлен согласно следующему выражению:

$$P_h = \frac{G_h \cdot V_h}{S_h}, \quad (14)$$

здесь P_h — давление горячего сжатого воздуха; G_h — секундный весовой расход горячего сжатого воздуха; V_h — скорость горячего сжатого воздуха; S_h — пло-

щадь сечения выходного сопла горячего сжатого воздуха из вихревой трубы.

Уровень звука ультразвуковой сирены был рассчитан согласно следующим выражениям:

$$N = 20 \cdot \lg \frac{P_3}{20 \cdot 10^{-6}}; \quad (15)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_{s1}^2}{2 \cdot f}}, \quad (16)$$

здесь N — уровень звука ультразвуковой сирены; P_3 — звуковое давление.

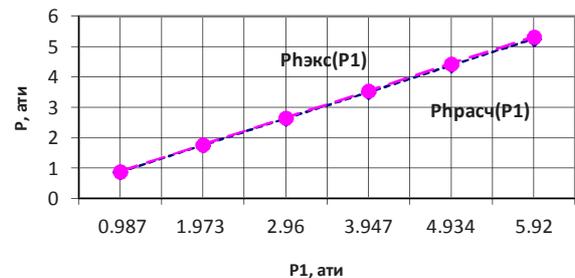


Рис. 4. Зависимость расчетного и экспериментального давления горячего сжатого воздуха от давления входного потока сжатого воздуха в вихревой трубе

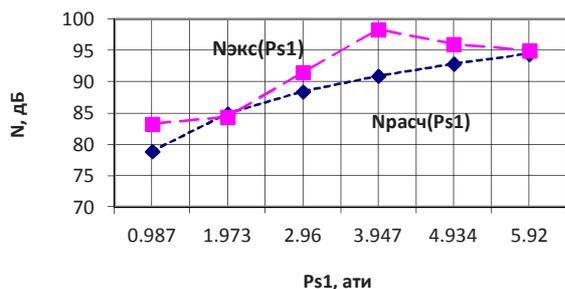


Рис. 5. Зависимость расчетного и экспериментального уровня звука от давления входного потока сжатого воздуха в ультразвуковой сирене

Анализ зависимости (рис. 4) позволяет сделать вывод о степени расхождения расчетных и экспериментальных результатов, которая не превышает 1,5 %.

Анализ зависимости (рис. 5) позволяет сделать вывод о целесообразности выбора экспериментального уровня звука близким к максимуму функциональной зависимости. Степень расхождения расчетных и экспериментальных результатов не превышает 4 %.

Экспериментальные исследования процессов ультразвуковой системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта проводились на полигоне Иркутского государственного университета путей сообщения. При исследовании производилась очистка поверхности асфальта от снега и льда с применением вихревой трубы (рис. 5), обдувки сжатым воздухом (рис. 6) и обработки глыбы льда ультразвуковой сиреной (рис. 7). Подача сжатого воздуха осуществлялась от мотор-компрессора КТ-6Эл электровоза ВЛ80.

На рис. 5 приведены фотографии: слева — до обработки поверхности асфальта вихревой трубой от снега и льда, справа — после обработки. Очистка производилась подогретым сжатым воздухом температурой до +1 °С на горячем выходе вихревой трубы и давлении от 8 до 6 атм, при температуре –10 °С на входе в вихревую трубу и давлении от 9 до 7 атм в течение 23 с.

На рис. 6 приведены фотографии: слева — до обработки сжатым воздухом поверхности асфальта от снега и льда, справа — после обработки. Очистка производилась сжатым воздухом температурой –10 °С на выходе и давлении от 9 до 7 атм в течение 23 с.

На рис. 7 приведены фотографии: слева — до обработки поверхности глыбы льда ультразвуковым излучением, справа — после обработки. Очистка производилась ультразвуковым излучением частотой около 16 кГц и акустической мощностью около 7 кВт/см² в течение 77 с.

Выводы

Анализ зависимостей (рис. 4, рис. 5) подтверждает высокий уровень соответствия математической модели реальному процессу, так как степень расхождения с экспериментальными данными не превышает 1,5–4 %.

Очистка с использованием вихревой трубы (рис. 5) позволила очистить, помимо верхнего, не утрамбованного слоя снега, утрамбованные слои снега и льда,

частично — полностью, до поверхности асфальта. Очистка с использованием только сжатого воздуха (рис. 6) позволила очистить только верхний слой не утрамбованного снега по сравнению с очисткой с применением вихревой трубы. Очистка с применением ультразвуковой сирены (рис. 7) позволила очистить глыбу льда от снега и отполировать обработанную часть ее поверхности.

Литература

1. Берещанский А.Н. Автоматическая пневмоочистка стрелок. Напольное оборудование и воздухопроводная сеть. Типовые материалы для проектирования. М.: ОАО «РОС-ЖЕЛДОРПРОЕКТ», 2006. С. 1-29.
2. Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. М.: РАН, 1997. Т. 167, № 6 С. 665-687.
3. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. С. 7-64.
4. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 400 с.
5. Лойянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 310 с.
6. Мартьяновский В.С., Алексеев В.П. Вихревой эффект охлаждения и его применение. Холодильная техника. М., 1953. № 3. С. 30-45.
7. Свистунов А.В., Ситников А.А., Соловьев А.А. Вихревой эжектор // Мавлютовские чтения: сб. тр. рос. научно-техн. конф. УГАТУ Уфа, 2007. С. 86-89.
8. Соловьев А.А., Гурин С.В. Исследование возможности получения изотермического процесса при дросселировании в вихревом регуляторе давления газа // Вестн. УГАТУ. Уфа, 2006. Т. 8, № 1. С. 3-6.
9. Соловьев А.А. Численное и физическое моделирование процессов энерго и фазоразделения в вихревых трубах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2008. 18 с.
10. Соловьев А.А., Пархимович А.Ю. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора // Вестн. УГАТУ. Уфа, 2006. Т. 8, № 1. С. 13-15.
11. Соловьев А.А. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева // Сб. науч. докл. РАН IV междунар. совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М., 2004. С. 133-144.
12. Целищев В.А. Разработка многоступенчатой системы редуцирования давления магистрального газа // Наука - производству: ежегод. науч.-техн. сб. Уфа, 2006. С. 22-29.
13. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия, 1974. 503 с.
14. Агранат Б.А., Кириллов О.Д., Преображенский Л.В. Ультразвук в гидрометаллургии. М.: Металлургия, 1969. 304 с.
15. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., 1957. 727 с.
16. Каменкович В.В., Грудский К.З., Борисов Ю.Я. Исследование воздушного потока генератора звука ГСИ-4. М.: Ультразвуковая техника, ЦИНТИАМ, 1966. С. 10-22.
17. Кроуфорд А.Э. Ультразвуковая техника. М., 1958. 330 с.
18. Розенберг Л.Д. Источники мощного ультразвука. Физика и техника мощного ультразвука. М., 1967. С. 94-106.

19. Филатов Д.А. Применение сирены, как ультразвукового излучателя на железной дороге // Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета ИрГУПС. Иркутск, 2012. С. 117-119.

20. Филатов Д.А. Модель динамических процессов в системе ультразвуковой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта // Перспективы разработки науки и техники - 2013: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. Польша. 2013. Вып. 36. С. 29-33.

References

1. Bereshchanskii A.N. Automatic pneumocleaning of switch. The floor equipment and airline network. Typical materials for designing: Open Society "The Russian railway project". M.: OAO "ROShELDORPROEKT", 2006. P. 1-29.

2. Gutsol A.F. Ranks effect // Uspekhi fizicheskikh nauk. M.: RAN, 1997. T. 167, № 6 P. 665-687.

3. Merkulov A.P. Vortical effect and its application in the technician. Publishing house "Mechanical engineering". M.: Mashinostroenie, 1969. P. 7-64.

4. Zhukov M.F., Koroteev A.S., Uryukov B.A. Applied dynamics of thermal plasma. Novosibirsk: Nauka, 1975. 400 p.

5. Loiyanskii L. G. Mechanics of a liquid and gas. M.: Nauka, 1987. 310 p.

6. Martynovskii V.S., Alekseev V.P. Vortical effect of cooling and its application. The refrigerating technics. M., 1953. № 3. P. 30-45.

7. Svistunov A.V., Sitnikov A.A., Solov'ev A.A. Vortical egecter // Mavlyutovskie chteniya: sb. tr. ros. nauchno-tekhn. konf. UGATU Ufa, 2007. P. 86-89.

8. Solov'ev A.A., Gurin S.V. Research of possibility of reception of isothermal process at regulation in a vortical regulator of pressure of gas // Vestn. UGATU. Ufa, 2006. T. 8, № 1. P. 3-6.

9. Solov'ev A.A. Numerical and physical modelling of processes energy and phase divisions in vortical pipes: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Ufa, 2008. 18 p.

10. Solov'ev A.A., Parkhimovich A.Yu. Research of experimental characteristics of a vortical regulator // Vestn. UGATU. Ufa, 2006. T. 8, № 1. P. 13-15.

11. Solov'ev A.A. Pressure reduction of natural gas without devices of preliminary heating // Sb. nauch. dokl. RAN IV mezhdunar. soveshchaniya po problemam energoakkumu-lirovaniya i ekologii v mashinostroenii, energetike i na transporte. M., 2004. P. 133-144.

12. Tselishchev V.A. Working out of multistage system of pressure reduction of the main gas // Nauka - proizvodstvu: ezhegod. nauch.-tekhn. sb. Ufa, 2006. P. 22-29.

13. Agranat B.A., Bashkirov V.I., Kitaigorodskii Yu.I., Khavskii N.N. Ultrasonic technology. M.: Metallurgiya, 1974. 503 p.

14. Agranat B.A., Kirillov O.D., Preobrazhenskii L.V. Ultrasound in hydrometallurgy. M.: Metallurgiya, 1969. 304 p.

15. Bergman L. Ultrasound and its application in a science and the technician. M., 1957. 727 p.

16. Kamenkovich V.V., Grudskii K.Z., Borisov Yu.Ya. Research of an air stream of the generator of a sound of GSR-4. M.: Ul'trazvukovaya tekhnika, TsINTIAM, 1966. P. 10-22.

17. Krouford A.E. The ultrasonic technics. M., 1958. 330 p.

18. Rozenberg L.D. Powerful ultrasonic source. Physics and technics of powerful ultrasound. M., 1967. P. 94-106.

19. Filatov D.A. Application of a siren, as ultrasonic radiator on the railway // Problemy transporta Vostochnoi Sibiri: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov elektromekhanicheskogo fakul'teta IrGUPS. Irkutsk, 2012. P. 117-119.

20. Filatov D.A. Model of dynamic processes in system of ultrasonic cleaning of technological environments with application of vortical effect // Perspektivy razrabotki nauki i tekhniki - 2013: materialy VIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Pol'sha. 2013. Vyp. 36. P. 29-33.