

Совершенствование методики аэродинамических испытаний токоприемника путем учета плотности воздушной среды

А. Н. СМЕРДИН¹, А. Е. ЧЕПУРКО¹, О. А. СИДОРОВ¹, Н. В. МИРОНОС²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, 644046, Россия

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Аэродинамические силы токоприемника зависят не только от конструктивных параметров, но и от метеорологических условий, определяющих скоростной напор. При проведении натурных испытаний контроль этих условий в настоящее время не осуществляется, что может сказаться на точности получаемых результатов. Объективность измерений может быть обеспечена теоретическими и экспериментальными методами учета плотности воздуха. Теоретический метод основан на расчете плотности воздушной среды при помощи данных о температуре, атмосферном давлении и относительной влажности в местности, где проводятся испытания токоприемника. Экспериментальный метод предполагает использование ультразвукового измерителя плотности воздуха. Значения плотности, определенные экспериментально, повышают точность результатов, вследствие того что регистрация производится непосредственно на крыше электровоза, где осуществляется токосъем. Показано, что зависимость вертикальной составляющей аэродинамической силы токоприемника от плотности воздуха имеет линейный характер. В статье также обосновывается необходимость учета плотности воздушной среды при сопоставлении результатов испытаний, проводившихся при различных метеословиях. Предложена методика сопоставления данных, сделаны выводы.

Ключевые слова: токоприемник электроподвижного состава; аэродинамические силы токоприемника; аэродинамические характеристики; измеритель плотности воздуха; натурные испытания токоприемника; метеорологические параметры воздушной среды

Актуальность темы исследования. Стратегией развития ОАО «РЖД» на период до 2030 г. определены основные направления развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации, в том числе повышение эффективности и конкурентоспособности холдинга [1].

В рамках модернизации подвижного состава в настоящее время идет изготовление и поставка на предприятия ОАО «РЖД» новых локомотивов и электропоездов. Как правило, на современном тяговом подвижном составе используются асимметричные токоприемники в отличие от практики прошлого века. Увеличиваются скорости движения

подвижного состава. Аэродинамическим характеристикам токоприемников уделяется все больше внимания [2].

Принятые в последние годы нормативные требования к токосъему и токоприемникам [3, 4] устанавливают порядок и методы проведения испытаний, в том числе по определению их аэродинамических показателей. Условия испытаний, установленные в стандартах, по определению аэродинамических параметров токоприемника не ограничены температурным диапазоном, давлением и влажностью воздуха, что может привести к значительному разбросу полученных значений вертикальной аэродинамической силы, как показали исследования, проведенные в ОмГУПС [5].

Накопленный за последние годы опыт, полученный при испытаниях токоприемников подвижного состава, позволяет утверждать, что:

- аэродинамическое воздействие на токоприемник при движении оказывает значительное влияние на вертикальную составляющую контактного нажатия;
- аэродинамическое воздействие надо учитывать уже при скорости выше 60 км/ч;
- значительное влияние на аэродинамическую составляющую контактного нажатия может оказывать место расположения токоприемника и форма крыши подвижного состава;
- значительное влияние на аэродинамическую составляющую контактного нажатия оказывает плотность воздуха.

Поскольку влияние на результаты испытания плотности воздуха носит случайный характер, особенно важно разработать методику и технические средства по ее учету.

Диапазон рабочих температур, относительной влажности, давлений, допускающих эксплуатацию токоприемника, широкий [3, 4]. Эти метеорологические параметры влияют на плотность воздушной среды и, соответственно, на аэродинамические силы, действующие на токоприемник [5, 6]. Плотность воздушной среды при эксплуатации токосъемных устройств

железнодорожного транспорта может изменяться более чем на 25%, что показано на рис. 1 [7].

Таким образом, необходимо контролировать и учитывать параметры окружающей среды при определении аэродинамической составляющей контактного нажатия.

Методы определения плотности воздушной среды.

Существуют расчетные и экспериментальные методы определения плотности воздушной среды с последующей цифровой обработкой данных с привязкой к месту испытаний и по времени с использованием ультразвукового измерителя плотности среды [6].

Международным комитетом мер и весов было предложено выражение для определения плотности влажного воздуха [8, 9]:

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right], \quad (1)$$

где p — давление воздуха, 10^2 -мбар; M_a — молярная масса воздуха, г/моль; Z — сжимаемость воздуха; R — газовая постоянная, равная $8,3144598 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль·К); T — термодинамическая температура по МТШ-90, К; M_v — молярная масса воды, г/моль; x_v — молярная масса водяного пара, г/моль.

Существуют также приближенные формулы для определения плотности воздушной среды, которые обладают достаточной точностью (до десятых долей процента). Поэтому их допускается использовать для практических расчетов [6]:

$$\rho = \frac{0,34848p_1 - 0,009024(100h_r)e^{0,0612t}}{273,15 + t} \quad (2)$$

или

$$\rho = \frac{0,348444p_1 - (100h_r)(0,00252t - 0,020582)}{273,15 + t}, \quad (3)$$

где h_r — относительная влажность (в долях); t — температура воздушной среды, °C; p_1 — атмосферное давление, мбар.

Поскольку погода капризна и плотность воздуха может измениться и во время проведения измерений, учет метеорологических параметров среды (и, соответственно, плотности воздуха) может значительно осложнить процесс испытаний и внести погрешность в результаты измерений. Также недостатком расчетного метода является отсутствие возможности измерять плотность среды непосредственно рядом с токоприемником, что влияет на точность получаемых результатов. Этот недостаток отсутствует у экспериментального метода измерения плотности воздушной среды с использованием ультразвукового плотномера [5].

Основой экспериментального метода является тот факт, что скорость звука зависит от плотности среды. Таким образом, можно определить плотность воздуха,

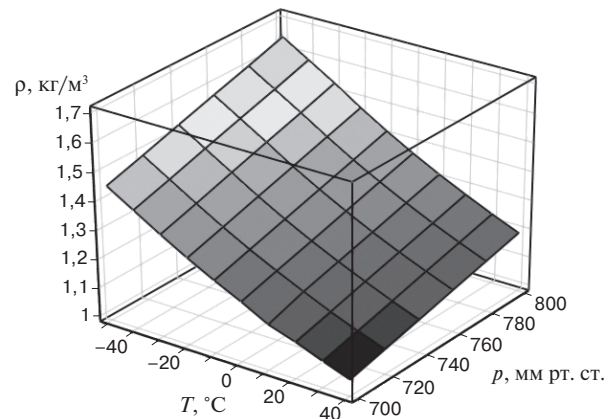


Рис. 1. Зависимость плотности воздуха от атмосферного давления и температуры при относительной влажности 58%:

p — давление воздуха, мм рт. ст.; T — температура воздуха, °C;

ρ — плотность среды, кг/м³

Fig. 1. Dependence of air density from atmospheric pressure and temperature at relative humidity of 58%:

p — air pressure, mm Hg; T — air temperature, °C; ρ — medium density, kg/m³

осуществить привязку данных по времени и месту измерения. Измерения плотности воздуха и внесение корректировки в результаты измерений можно осуществлять в постоянном режиме при проведении испытаний.

Схема проведения эксперимента показана на рис. 2. Ультразвуковой измеритель плотности должен находиться на расстоянии не менее 400 мм от элементов крышевого оборудования во избежание аэродинамического влияния от других узлов токоприемника. На данный измеритель получен патент РФ на полезную модель № 143955 от 19.03.2014 [10].

Для подтверждения совпадения экспериментальных значений плотности воздуха и плотности воздуха, полученной расчетным путем, были проведены

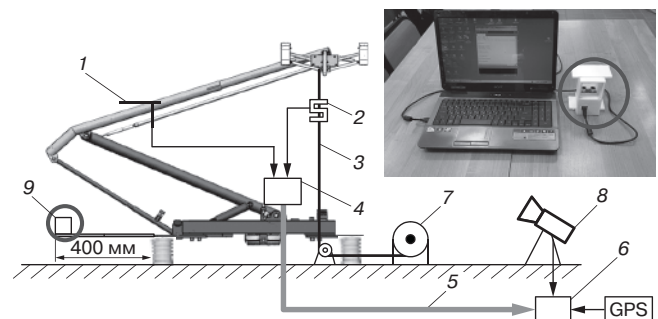


Рис. 2. Схема проведения экспериментальных исследований с использованием ультразвукового измерителя плотности:

1 — дифманометр; 2 — тензодатчик; 3 — трос; 4 — компактный ПК; 5 — оптоволоконный кабель; 6 — ноутбук; 7 — лебедка; 8 — камера; 9 — измеритель плотности среды

Fig. 2. The scheme of experimental studies using an ultrasonic density meter:

1 — differential pressure gauge; 2 — strain gauge; 3 — wire; 4 — compact PC; 5 — fiber optic cable; 6 — notebook; 7 — winch; 8 — camera; 9 — environmental density meter

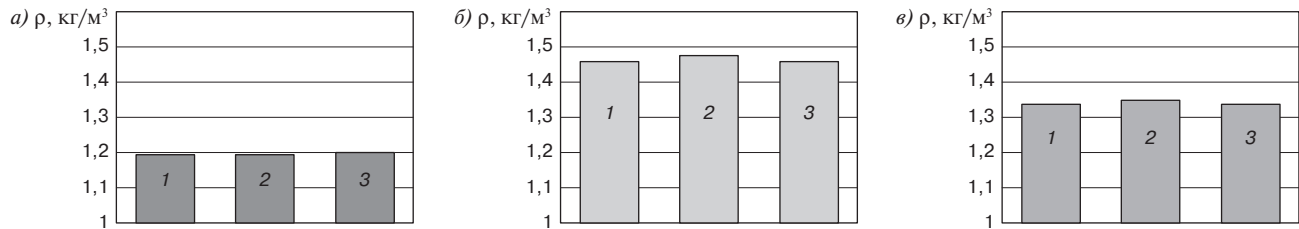


Рис. 3. Плотность воздушной среды при различных метеороусловиях:
1—объективные наблюдения; 2—экспериментальный метод; 3—расчетный метод
Fig. 3. The density of the air environment in different weather conditions:
1—objective observations; 2—experimental method; 3—calculation method

следующие исследования. С помощью формул (2) и (3), а также применения ультразвукового плотномера (экспериментальный метод) была определена плотность воздушной среды при температурах -30 , -10 и $+20^{\circ}\text{C}$, давлениях 756, 765 и 758 мм рт. ст., относительной влажности 30%, 60% и 77% (рис. 3, а, б и в соответственно). Для этих же температур приведены значения из справочника [7], которые являются данными объективных наблюдений. В расчетном методе принимались значения плотности, определенные по косвенным параметрам (по давлению, температуре, влажности), взятые как среднее значение из выражений (2) и (3). Экспериментальные данные получены при использовании ультразвукового плотномера в соответствии с методикой, приведенной в [5], разработанной с учетом теории планирования эксперимента. Перечисленные выше плотности воздушной среды

показаны на рис. 3. Расхождение данных, приведенных на рис. 3, не превысило 3%, что указывает на достаточную точность результатов при применении каждого из указанных методов.

Преимуществом экспериментального метода является обеспечение контроля плотности среды непосредственно рядом с токоприемником, что позволяет повысить точность измеряемых данных. Таким образом, наиболее перспективным является метод определения плотности воздушной среды путем анализа скорости распространения звуковой волны, полученной при помощи ультразвукового измерителя плотности.

Контроль плотности среды также необходим для корректного сопоставления данных, полученных при натурных испытаниях в различных метеороусловиях, так как требуется их приведение к одинаковому сочетанию параметров. Вертикальная составляющая аэродинамической силы зависит от конструктивных параметров (рабочей высоты и конструкции токоприемника, влияющих на площадь миделевого сечения и аэродинамический коэффициент), скорости движения и плотности среды, которые являются составляющими скоростного напора [11]. Значения вертикальной составляющей аэродинамической силы, полученные для токоприемника типа AX Faiveley Transport (рабочая высота 800 мм, скорость — 160 км/ч), даны на рис. 4.

Из приведенных результатов видно, что как при расчете методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD), так и при использовании данных экспериментальных исследований полученная зависимость вертикальной составляющей аэродинамической силы от плотности может быть аппроксимирована линейной зависимостью с точностью до 10%.

Алгоритм сопоставления результатов испытаний при различных параметрах окружающей среды. Сопоставление данных, полученных при различных метеорологических условиях и, соответственно, плотностях, может быть выполнено путем введения поправочного коэффициента, учитывающего отношение этих плотностей, определенных из линейной зависимости $P_{\text{BT}}(\rho)$:

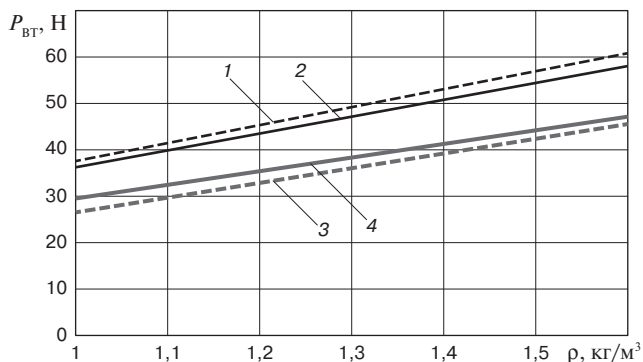


Рис. 4. Вертикальная составляющая аэродинамической силы токоприемника типа AX Faiveley Transport при скорости 160 км/ч и различных значениях плотности воздушной среды:
1—при движении «коленом» вперед, рассчитанная при помощи CFD; 2—при движении «коленом» вперед, полученная экспериментально; 3—при движении «коленом» назад, рассчитанная при помощи CFD; 4—при движении «коленом» назад, полученная экспериментально; P_{BT} — вертикальная составляющая аэродинамической силы, Н

Fig. 4. The vertical component of aerodynamic force of the AX Faiveley Transport current collector at the speed of 160 km/h and different values of air environment density:

1—when moving “leg” forward, calculated using CFD; 2—when moving “leg” forward, obtained experimentally; 3—when moving “leg” backward calculated using CFD; 4—when moving “leg” backward, obtained experimentally; P_{BT} — vertical component of the aerodynamic force, N

Рис. 5. Блок-схема алгоритма сравнения вертикальных составляющих аэродинамических сил, приведенных к метеоусловиям, соответствующим плотности ρ_0 :

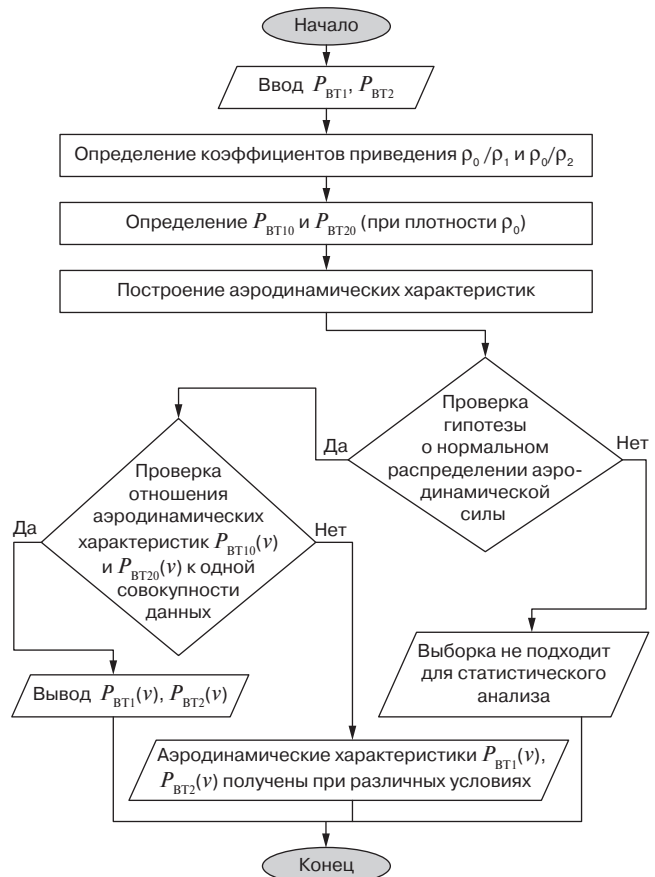
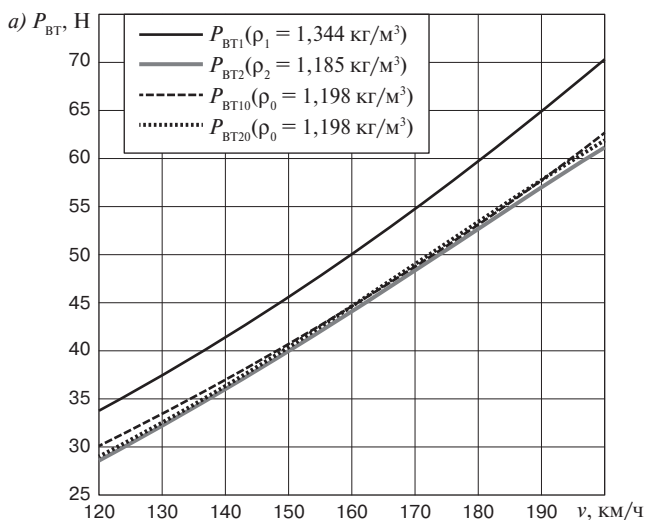
P_{BT10} , P_{BT20} — вертикальные составляющие контактного нажатия при различных метеорологических условиях и прочих одинаковых составляющих; P_{BT1} , P_{BT2} — вертикальные составляющие аэродинамических сил, полученные при натурных испытаниях, Н; ρ_0 — плотность среды при нормальных условиях (атмосферном давлении 760 мм рт. ст., температуре +20 °С, относительной влажности 58%); ρ_1 , ρ_2 — плотности при метеоусловиях на момент натурных испытаний, кг/м³

Fig. 5. The flowchart comparing the vertical component of the aerodynamic force set out to the weather conditions, corresponding to density ρ_0 :

P_{BT10} , P_{BT20} — vertical components of the contact pressure under different weather conditions and other similar components; P_{BT1} , P_{BT2} — vertical components of the aerodynamic forces obtained in field tests, Н; ρ_0 — environmental density under normal conditions (atmospheric pressure of 760 mm Hg and temperature of +20 °С, relative humidity of 58%); ρ_1 , ρ_2 — densities at the weather conditions at the time of full-scale tests, kg/m³

$$\begin{cases} P_{BT10} = \frac{\rho_0}{\rho_1} P_{BT1}; \\ P_{BT20} = \frac{\rho_0}{\rho_2} P_{BT2}, \end{cases}$$

где ρ_0 — плотность воздуха при нормальных условиях [12] в соответствии с ГОСТ 8.050–73 (температура 20 °С, атмосферное давление 760 мм рт. ст., относительная влажность 58%), кг/м³; ρ_1 , ρ_2 — плотности при метеоусловиях на момент натурных испытаний, кг/м³; P_{BT1} , P_{BT2} — вертикальные составляющие аэродинамических сил, полученные при натурных испытаниях, Н; P_{BT10} , P_{BT20} — вертикальные составляющие аэродинамических сил, приведенные к плотности ρ_0 , Н.



Блок-схема алгоритма сравнения вертикальных аэродинамических сил токоприемника, полученных при различных температурах, относительной влажности и атмосферном давлении, приведена на рис. 5.

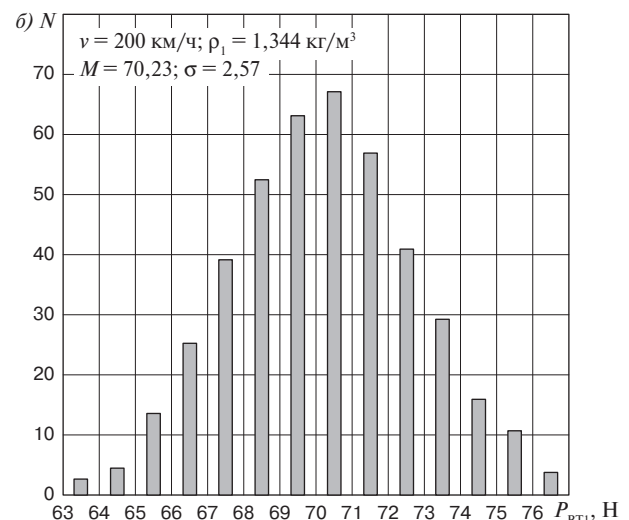


Рис. 6. Аэродинамические характеристики до и после приведения к одной плотности (а) и график плотности вероятности распределения вертикальной составляющей аэродинамической силы (б):

M — математическое ожидание; σ — среднеквадратическое отклонение

Fig. 6. Aerodynamic characteristics before and after setting out to densities (a) and a graph of the probability density distribution of the vertical component of aerodynamic force (b):

M — mathematical expectation; σ — standard deviation

Алгоритм сравнения вертикальных составляющих аэродинамических сил токоприемника включает в себя следующие этапы:

- ввод значений вертикальных составляющих аэродинамических сил, полученных при различных метеорологических условиях с допущением, что рабочая высота токоприемников, направление и скорость их движения одинаковые;
- приведение к значению плотности воздуха при нормальных условиях (ρ_0) вертикальных составляющих аэродинамических сил;
- построение аэродинамических характеристик и сравнение аэродинамических сил $P_{\text{ВТ10}}$, $P_{\text{ВТ20}}$, полученных для заданной скорости в отдельности при прочих равных эксплуатационных параметрах (рабочей высоте, направлении движения);
- оценка возможности отнесения выборок, которые соответствуют вертикальным составляющим аэродинамических сил $P_{\text{ВТ10}}$, $P_{\text{ВТ20}}$, к одной совокупности данных.

Сравнение может быть проведено при помощи критерия Стьюдента при условии, что распределение вертикальных составляющих аэродинамических сил нормальное (что подтверждено экспериментально [5], рис. 6). Если анализируемые данные относятся к одной совокупности, то можно сопоставлять их приведенные значения, оценивать качество токосъема при различных метеорологических условиях. Если данные не относятся к одной совокупности, то или в процессе приведения сил к одной плотности, или при расчете допущена ошибка, или эти данные в принципе несопоставимы, поскольку получены при различных условиях (имеются различия помимо условий внешней среды, а именно расположение токоприемника на крыше подвижного состава и т. п.).

Выводы. Таким образом, представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования без контроля параметров окружающей среды не позволяют обеспечить требуемую объективность результатов;
- при проведении натурных испытаний нет необходимости измерять непосредственно метеорологические параметры, можно определить только плотность воздушной среды, используя ультразвуковой плотномер;
- предлагаемая методика позволит сопоставить данные и оценить качество токосъема не только при нормальных условиях, но и во всем диапазоне температур, относительной влажности и атмосферного давления, при которых возможна эксплуатация токоприемника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 17 июня 2008 г. № 877-р. М., 2008. 171 с.
2. Ефимов А. В., Ефимов Д. А., Паранин А. В. Оптимизация термодинамических процессов в паре трения «токоприемник — контактный провод» // Транспорт Урала. 2013. № 4. С. 79 — 83.
3. ГОСТ 32204—2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия: введен в действие 01.06.2014. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 38 с.
4. ГОСТ 32793—2014. Токосъем токоприемником железнодорожного подвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения: введен в действие 01.09.2015. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. 15 с.
5. Смердин А. Н., Чепурко А. Е., Горюнов В. Н. Совершенствование методик лабораторных и натурных испытаний токоприемника за счет контроля // Известия Транссиба. 2014. № 4. С. 46 — 54.
6. Смердин А. Н., Голубков А. С., Капралова М. А. Совершенствование аэродинамической подсистемы токоприемника // Известия Транссиба. 2013. № 4. С. 40 — 45.
7. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: справочник / под ред. С. Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: СПбГАХПТ, 1999. 320 с.
8. Davis R. S. Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91) / R. S. Davis // Metrologia, 1992, № 29. P. 67 — 70.
9. Formule pour la Determination de la Masse Volumique de l'Air Humide (1981), BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures, 1981, 49, C1 — C15.
10. Пат. РФ на полезную модель № 143955, МПК В60L 3/12. Регистратор аэродинамической характеристики токоприемника / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, А. Е. Чепурко (Россия). № 2014110582 /11; заявлено 19.03.2014; опубл. 10.08.2014 // Открытия. Изобретения. 2014. № 22.
11. Аэромеханика: учебник для студентов вузов / В. М. Гарбузов [и др.]. М.: Транспорт, 2000. 287 с.
12. ГОСТ 8.050—73. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений: введен в действие 21.02.1973. М.: Издательство стандартов, 1973. 19 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СМЕРДИН Александр Николаевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС

ЧЕПУРКО Алексей Евгеньевич,

канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС

СИДОРОВ Олег Алексеевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС

МИРОНОС Николай Васильевич,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Контактная сеть и токосъем», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 26.04.2016 г., актуализирована 30.09.2016 г., принята к публикации 10.10.2016 г.

Improved methods of aerodynamic testing of current collector by considering ambient air density

A. N. SMERDIN¹, A. E. CHEPURKO¹, O. A. SIDOROV¹, N. V. MIRONOS²

¹Omsk State Transport University (OmGUPS), Omsk, 644046, Russia

²Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Aerodynamic forces of current collector depend not only on the design parameters, but also on weather conditions determining the dynamic pressure. Currently, when conducting field tests, control of these conditions is not performed, this can affect the accuracy of the results. The objectivity of measurements can be provided by theoretical and experimental methods of accounting air density. A theoretical method based on the calculation of the density of air environment by using data about the temperature, atmospheric pressure and relative humidity in the area where tests of current collector was conducted. The experimental method involves the use of ultrasonic density meter of air. Density values, defined experimentally, increase the accuracy of the results due to the fact that registration takes place directly on the roof of the locomotive, where the current collection was performed. It is shown that the dependence of the vertical component of the aerodynamic forces of current collector from the air density is linear. The article also substantiates the necessity of taking into account the density of the air environment by comparison of results of tests conducted under various meteorological conditions. The method of data matching, in which there is a correction factor, is proposed and the densities are set to the value corresponding to the normal environmental conditions. Due to the lack of criteria in the normative documents for comparing two samples, set to normal conditions, it is proposed to use a statistical method – t-Student criterion. This method assumes a normal distribution of data samples, as evidenced by the results of field tests conducted earlier. Given method allows comparing the results of field tests and evaluating the quality of the current collection, not only under normal conditions, but also in the entire temperature range, relative humidity and atmospheric pressure, at which the current collector can be operated.

Keywords: current collector of electric multiple unit; aerodynamic forces of current collector; aerodynamic features; air density meter; field tests of current collector; meteorological parameters of the air environment

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-328-333>

REFERENCES

1. *Strategy of development of railway transport in the Russian Federation up to 2030*. Approved by the order of Russian Federation Government on June 17, 2008, no. 877-p. Moscow, 171 p. (in Russ.).
2. Efimov A. V., Efimov D. A., Paragin A. V. *Optimizatsiya termodynamicheskikh protsessov v pare treniya "tokopriemnik – kontaktный провод"* [Optimization of thermodynamic processes in friction pair "current collector – contact wire"]. Transport Urala [Ural region's transport], 2013, no. 4, pp. 79 – 83.
3. GOST 32204 – 2013. *Railway current collectors of electric rolling stock. General specifications*. FGUP Standartinform Publ., 2013, 83 p.

■ E-mail: alexandr.smerdin@gmail.com (A. N. Smerdin)

4. GOST 32793 – 2014. *Current collection by current collector of railway rolling stock*. Nomenclature of quality indicators and methods of its determination. FGUP Standartinform Publ., 2015, 15 p.

5. Smerdin A. N., Chepurko A. E., Gorunov V. N. *Sovershenstvovanie metodik laboratornykh i naturnykh ispytaniy tokopriemnika za schet kontrolya* [Improving laboratory methods and field tests by controlling current collector]. Izvestiya Transsiba, 2014, no. 4, pp. 46 – 54.

6. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Kapralova M. A. *Sovershenstvovanie aerodinamicheskoy podsystemy tokopriemnika* [Improving the aerodynamic subsystem of current collector]. Izvestiya Transsiba, 2013, no. 4, pp. 40 – 45.

7. Bogdanov S. N. *Kholodil'naya tekhnika. Konditsionirovanie vozdukh. Svoystva veshchestv*. Spravochnik [Refrigeration equipment. Air conditioning. Properties of materials. Reference book], 4th edition, reworked and amended. Saint-Petersburg, SPb-GAKhPT Publ., 1999, 320 p.

8. Davis R. S. *Equation for the Determination of the Density of Moist Air* (1981/91), Metrologia, 1992, no. 29, pp. 67 – 70.

9. *Formule pour la Determination de la Masse Volumique de l'Air Humide*, BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures, 1981, no. 49, pp. 1 – 15.

10. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Chepurko A. E. *Recorder of aerodynamic characteristics of current collector*. Utility patent of RF №143955, Otkrytiya. Izobreteniya Publ., 2014, no. 22. (in Russ.).

11. Garbuzov V. M., Ermakov A. L., Kublanov M. S., Tsipenko V. G. *Aeromekhanika*. Uchebnik dlya studentov vuzov [Aeromechanics. Textbook for college students]. Moscow, Transport Publ., 2000, 287 p.

12. GOST 8.050 – 73. *Normal conditions for performing linear and angular measurements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov [Standard publ.], 1973, 19 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

SMERDIN Alexander Nikolayevich,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department "Power supply of railway transport", OmGUPS.

CHEPURKO Alexey Evgen'evich,

Cand. Sci. (Eng.), Faculty Member at the Department of "Safety and Ecology", OmGUPS.

SIDOROV Oleg Alekseevich,

Professor, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department "Power supply of railway transport", OmGUPS.

MIRONOS Nikolay Vasil'evich,

Cand. Sci. (Eng.), Lying Researcher, Department "Contact network & current collecting", JSC "VNIIZhT".

Received 26.04.2016

Revised 30.09.2016

Accepted 10.10.2016