

4. Калихович, В. Н. Тяговые приводы локомотивов [Текст] / В. Н. Калихович. – М.: Транспорт, 1983.
5. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи [Текст] / В. Н. Кудрявцев. – М., 1957.
6. Осецкий, В. М. Прикладная механика [Текст] / В. М. Осецкий. – М.: Машиностроение, 1985.
7. Генкин, М. Д. Динамические нагрузки в передачах с косозубыми колесами [Текст] / М. Д. Генкин, В. К. Гринкевич / АН СССР. – М., 1977.
8. Абрамов, Б. М. Колебания прямозубых зубчатых колес [Текст] / Б. М. Абрамов / Харьковский гос. ун-т. – Харьков, 1968.
9. Петрусевич, А. И. Динамические нагрузки в зубчатых передачах с прямозубыми колесами [Текст] / А. И. Петрусевич, М. Д. Генкин, В. К. Гринкевич / АН СССР. – М., 1956.
10. Айрапетов, Э. Л. Исследование статики и динамики планетарных механизмов [Текст] / Э. Л. Айрапетов / Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения. – М., 1973.
11. Виброакустическая диагностика тягового привода локомотива [Текст] / З. Г. Гиоев, В. Н. Жуков и др. // Электровозостроение / ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский ин-т электровозостроения». – Новочеркасск, 1999. – Т. 39.
12. Тобе Тошими. Динамические нагрузки на зубьях прямозубых колес, вызванные ударами зубьев. Детали машин (экспресс-информация) [Текст] / Тобе Тошими, Токацу Нобуо / ВИНТИ. – М., 1973. – № 39.
13. Осецкий, В. М. Прикладная механика [Текст] / В. М. Осецкий. – М.: Машиностроение, 1977.
14. Прогнозирование параметрической виброакустической надежности тяговых зубчатых колес локомотивов по результатам испытаний [Текст] / З. Г. Гиоев, А. И. Беляев и др. // Электровозостроение / ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский ин-т электровозостроения». – Новочеркасск, 2001. – Т. 43.

УДК 629.423.33

М. А. Капралова, А. В. Мальцева

РАСЧЕТ КОНТАКТНОГО НАЖАТИЯ ТОКОПРИЕМНИКА «АИСТ» С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И РАБОЧЕЙ ВЫСОТЕ

В статье представлен расчет контактного нажатия с учетом изменения аэродинамической подъемной силы в зависимости от климатических условий (в одно- и двухфазном потоке), а также при изменении рабочей высоты токоприемника. Выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

При движении электроподвижного состава с высокими скоростями начинают существенным образом проявляться аэродинамические силы, оказывающие влияние на взаимодействие токоприемника и контактной подвески.

Воздействие набегающего потока воздуха на токоприемник можно разложить на подъемную силу, лобовое сопротивление и опрокидывающие моменты. Подъемная сила (аэродинамическая составляющая контактного нажатия) изменяет контактное нажатие. В случае положительной подъемной силы происходит увеличение отжатий контактных проводов, а отрицательная способствует отрывам полоза от контактного провода. В обоих случаях происходит интенсивный износ контактирующих элементов, повышается вероятность повреждения токосъемных устройств. Все это приводит к сокращению срока эксплуатации контактных пластин полозов токоприемников электровозов, а также к увеличенному износу контактного провода.

При исследовании системы токосъема важно правильно учесть действие аэродинамической подъемной силы. Большинство методов расчета взаимодействия токоприемника и контактной подвески основаны на решении дифференциальных уравнений при условии, что аэродинамическая сила определенного типа токоприемника является величиной постоянной для конкретной скорости движения [1]. Однако, как показывает практика, это утверждение некорректно [2], так как помимо скорости набегающего воздушного потока на величину подъемной силы влияют и другие условия: климатические факторы (температура и давление), наличие второй фазы (снег, дождь) в воздухе, рабочая высота токоприемника и расположение крышевого оборудования.

В рамках проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема» (договор № 13.G25.31.0034 от 7 сентября 2010 г.), реализуемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в ОмГУПСе был разработан токоприемник «АИСТ». Для данной конструкции была просчитана аэродинамическая подъемная сила с учетом перечисленных выше условий обтекания токоприемника.

Железные дороги проходят через территории, где имеют место сложные метеорологические условия, сопровождающиеся штормовым ветром и присутствием в атмосферном воздухе высокой влажности или взвешенных частиц таких, как снег, капли дождя. В этих условиях набегающий поток становится многокомпонентным, а его воздействие на токоприемник электровоза усиливается. Таким образом, вопросы надежности и экономичности работы токосъемных устройств как при повышении скоростей движения электроподвижного состава, так и в сложных метеоусловиях являются актуальными.

При численном расчете токоприемника «АИСТ» были смоделированы различные условия процессов обтекания. Учет климатических факторов проведен в диапазоне температур от -40 до $+40$ °C при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. для рабочей высоты токоприемника от 0,4 до 1,8 м для углов атаки $\alpha = 1^\circ$ (последний по ходу движения токоприемник) и $\alpha = 3^\circ$ (первый по ходу движения токоприемник). Рассматривалось также присутствие второй фазы (дождь, мокрый снег) в воздухе.

В качестве примера рассмотрим влияние температуры на аэродинамическую характеристику при рабочей высоте $H = 0,8$ м (рисунок 1).

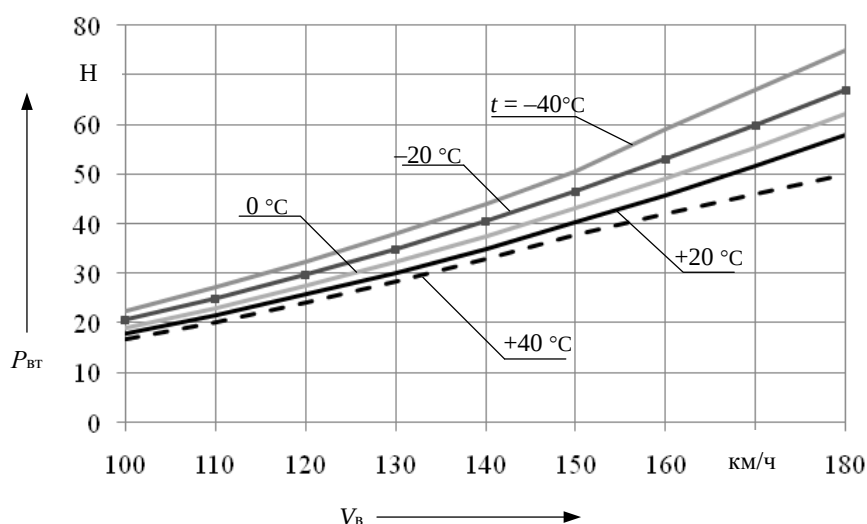


Рисунок 1 – Влияние температуры на аэродинамическую подъемную силу токоприемника «АИСТ» легкого типа при движении «коленом» назад

Как видно из графиков на рисунке 1, отрицательная температура оказывает большее влияние на аэродинамическую силу. Так, при -40 °C сила возрастает по отношению к нормальным условиям ($+20$ °C) на 23 %. Это согласуется с классической теорией газовой динамики.

При отрицательной температуре для расчета контактного нажатия необходимо использовать безразмерный поправочный коэффициент k_t аэродинамической подъемной силы, который зависит только от климатических условий окружающей среды (рисунок 2).

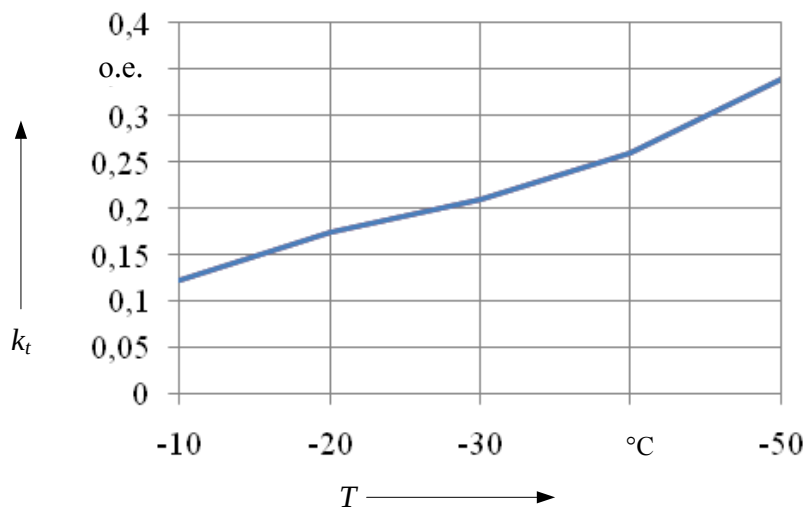


Рисунок 2 – Поправочный коэффициент аэродинамической подъемной силы

Формула для определения аэродинамической подъемной силы при отрицательной температуре имеет вид:

$$P_{\text{вт}} = P'_{\text{вт}} + \Delta P_{\text{вт}}; \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{вт}} = k_t P'_{\text{вт}}, \quad (2)$$

где $P'_{\text{вт}}$ – аэродинамическая подъемная сила в однофазном потоке, полученная при положительной температуре;

k_t – поправочный коэффициент, учитывающий плотность воздуха при различной температуре.

Снег, выпадающий при отрицательной температуре, сухой, поэтому он не задерживается на гладких стенках при интенсивном движении [3] и его влияние на аэродинамическую подъемную силу будет незначительно. Мокрый снег, выпадающий при температуре воздуха близкой к нулю, прилипает к гладким стенкам и имеет большую инерционную силу, воздействующую на токоприемник. Мокрый снег, как показывают метеорологические наблюдения, выпадает при незначительной отрицательной температуре от 0 до -3 °C. У токоприемника отложение мокрого снега образуется тем сильнее, чем больше скорость движения (рисунок 3).

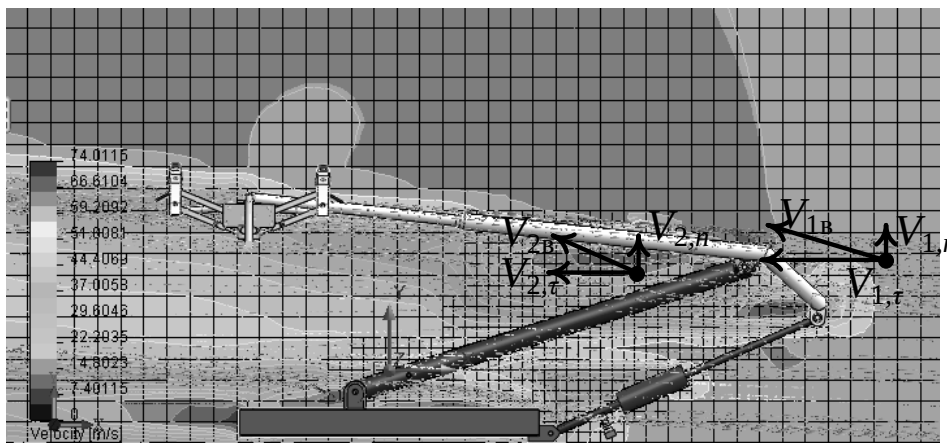


Рисунок 3 – Спектр обтекания токоприемника двухфазным потоком при движении «коленом» назад со скоростью 55 м/с

Мелкой сеткой на рисунке 3 показана зона, подверженная воздействию мокрого снега. Наибольшее налипание будет происходить в шарнирном соединении, на нижней штанге и на синхронизирующей тяге. Если нормальную скорость частицы к поверхности непосредственно перед ее соударением с этой поверхностью обозначить $V_{1,n}$, а тангенциальную скорость частицы непосредственно перед ее соударением с этой поверхностью обозначить $V_{1,\tau}$, а эти же составляющие скорости частицы сразу после ее соударения со стенкой обозначить соответственно $V_{2,n}$ и $V_{2,\tau}$, то из рисунка 3 видно, что их величина будет меняться. Так, до соударения условная частица имела результирующую скорость $V_{1в}$ 55 м/с, а после соударения скорость снизилась до 14 м/с ($V_{2в}$).

Двухфазные течения набегающего воздушного потока были смоделированы с жидкими и условно твердыми частицами. Они моделируются, как при движении этих частиц в установившемся потоке текучей среды, т. е. предполагается, что силовое и тепловое воздействие частиц на течение газовой фазы пренебрежимо мало. Это предположение верно в том случае, когда массовая доля частиц в двухфазном потоке не превышает 30 % (для снега она составляет 10 %). Объемная доля частиц снега в воздухе невелика (концентрация частиц снега на уровне двух метров составляет 50 – 100 г/м³), взвешенные частицы достаточно равномерно распределены в пространстве, поэтому характеристики воздействующего на токоприемник потока будут определяться в основном параметрами воздуха.

Для расчета воздействия такого потока на токоприемник предложен метод, основанный на расчетах для свободнодисперсной системы, где плотность набегающего потока представляет собой смесь двух сред [4]. Направление и скорость движения частиц принимаются равными направлению и скорости движения воздуха относительно токоприемника. Тогда в качестве алгоритма решения этой модели можно использовать уже известные методы, полученные для расчета аэродинамических сил, возникающих при взаимодействии однофазного потока с токоприемником [5].

При определении коэффициента сопротивления частиц предполагается, что они, как жидкие (дождь), так и твердые (мокрый снег), имеют условно сферическую форму. Наибольший размер частиц (5 мм в диаметре) достигается при нулевой температуре набегающего воздушного потока [3]. Масса частицы считается неизменной во всем потоке ($m = 2,06 \cdot 10^{-6}$ кг). Взаимодействие частиц с поверхностями твердых тел смоделировано как прилипание частиц к поверхности (свойственно каплям жидкости) при неидеальном отражении (свойственно твердым частицам).

Так как мокрый снег совмещает в себе свойства твердых (частичное отражение) и жидких (частичное налипание) частиц, то в расчетной программе зададим условия обтекания токоприемника при неидеальном отражении ($e_n < 1$ и $e_\tau < 1$) и суммарной интенсивности налипания частиц по всем поверхностям, на которые выпали частицы, по формулам [6]:

$$e_n = \left| \frac{V_{2,n}}{V_{1,n}} \right|; \quad (3)$$

$$e_\tau = \left| \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}} \right|; \quad (4)$$

$$R_{\Sigma eros} = \sum_{i=1}^N M_{pi}, \quad (5)$$

где N – число фракций частиц;

M_{pi} – расход частиц i -й фракции, выпавших на поверхности.

Для удобства расчета количество фракций примем равным единице. При выполнении численного эксперимента выбираем в программе, что набегающий воздушный поток является свободнодисперсной системой [5], отражение является неидеальным с интенсивностью налипания частиц 0,3.

По результатам расчетов можно отметить, что мелкий дождь не оказывает существенно-го влияния на аэродинамические силы, в отличие от мокрого снега, который может налипать на элементы токоприемника, тем самым увеличивая приведенную массу и создавая дополнительные силы (рисунок 4).

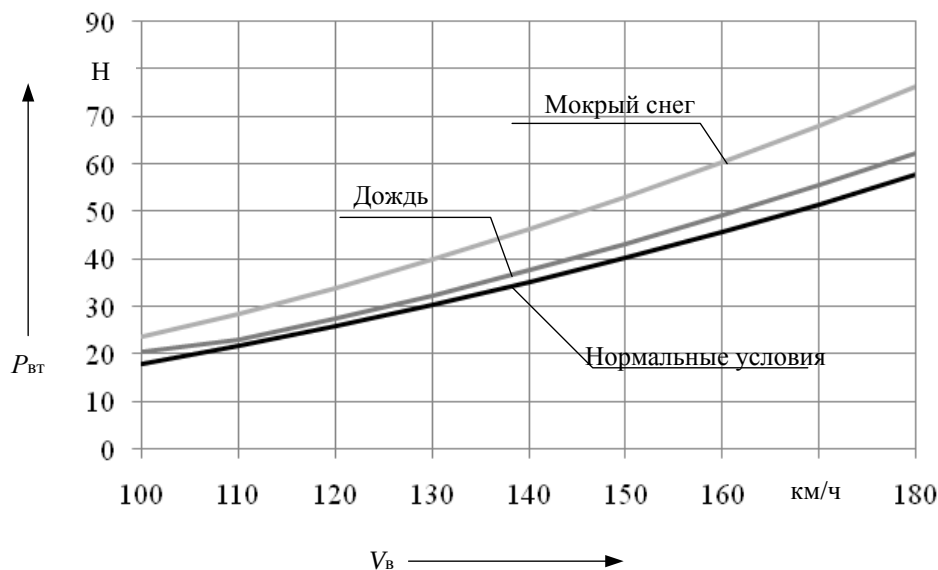


Рисунок 4 – Аэродинамические характеристики токоприемника «АИСТ» легкого типа при движении «коленом» назад при наличии второй фазы в набегающем потоке

При изменении рабочей высоты токоприемника изменяется его миделевое сечение – меняется и аэродинамическая сила (рисунок 5).

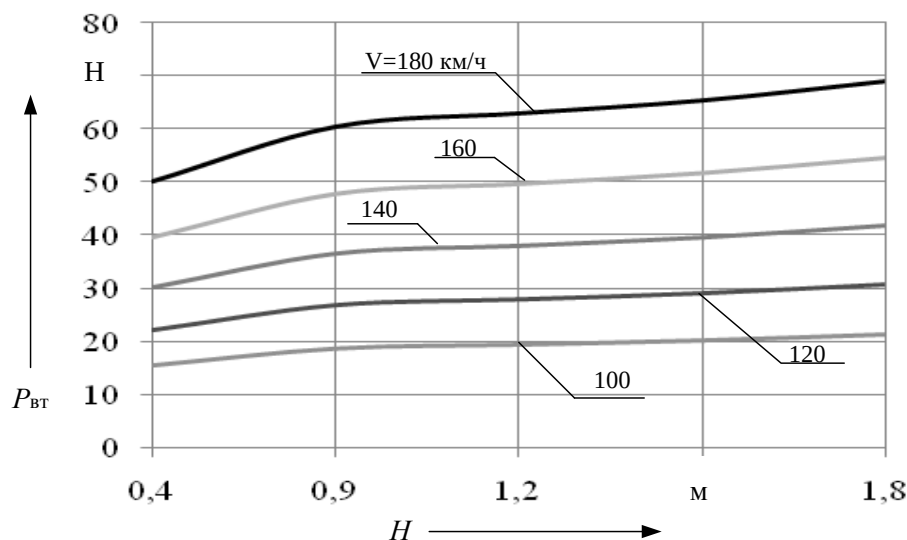


Рисунок 5 – Аэродинамические характеристики токоприемника «АИСТ» легкого типа при движении «коленом» назад в зависимости от рабочей высоты токоприемника

Аэродинамические подъемные силы в зависимости от рабочей высоты токоприемника показаны на рисунке 5. Как видно из графиков на рисунке 5, влияние рабочей высоты начинает сказываться при скоростях набегающего воздушного потока более 120 км/ч. В диапазоне рабочих высот до 0,9 м аэродинамическая подъемная сила изменяется значительно.

С учетом сказанного аэродинамическую подъемную силу можно представить в виде:

$$P_{вт} = k_H P'_{вт} + \Delta P_{вт t} + \Delta P_{вт ф}, \quad (6)$$

где k_H – поправочный коэффициент отклонения подъемной силы и при использовании токоприемника «АИСТ» на рабочей высоте (ниже 0,9 м);

$\Delta P_{\text{вт ф}}$ – вертикальная сила, возникающая от ударов частиц о поверхность токоприемника.

Для расчета взаимодействия токоприемников с контактными подвесками воспользуемся методом, предложенным А. В. Фрайфельдом [7].

Составим расчетную схему, на которой реакции связей элементов системы заменены эквивалентными силами. Не принимая во внимание отрывы токоприемника, в соответствии со вторым законом Ньютона будем иметь систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_p \frac{d^2 H_p}{dt^2} = -P_{\text{рам}} + P_{\text{к ср}} + P_{\text{вр}} + P_p; \\ (m_{\text{л}} + m_{\text{с}}) \frac{d^2 H_n}{dt^2} = -P_{\text{к ср}} + P_{\text{с}} + P_{\text{вл}}, \end{cases} \quad (7)$$

где m_p – масса рамы токоприемника, кг;

$m_{\text{л}}$ – масса верхнего узла токоприемника, кг;

$m_{\text{с}}$ – приведенная масса подвески контактной сети, кг;

H_p – высотное положение верхних шарниров рам токоприемника над уровнем головки рельса, м;

H_n – высотное положение полоза токоприемника над уровнем головки рельса, м;

t – время, с;

$P_{\text{рам}}$ – суммарная реакция связей системы подвижных рам, Н;

$P_{\text{к ср}}$ – суммарная реакция связей верхнего узла токоприемника, Н;

$P_{\text{вр}}$ – вертикальная составляющая аэродинамического воздействия на подвижные рамы токоприемника, Н;

P_p – сила нажатия подъемных пружин токоприемника, приведенная к оси верхних шарниров рам, Н;

$P_{\text{с}}$ – суммарная реакция связей подвески контактной сети, Н;

$P_{\text{вл}}$ – вертикальная составляющая аэродинамического воздействия на полз токоприемника, Н.

Решив систему уравнений относительно контактного нажатия, получим:

$$\begin{aligned} P_{\text{кт}} = & -m_{\text{л}} V_{\text{в}}^2 \frac{d^2 H_n}{dx^2} + \varepsilon_{\text{к}} \left(h_{\text{ко}} - H_n + H_p \right) - r_{\text{к в}} V_{\text{в}} \left(\frac{dH_n}{dx} - \frac{dH_p}{dx} \right) - \\ & - w_{\text{к}} \cdot \text{sign} \left(\frac{dH_n}{dx} - \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{\text{вт}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $V_{\text{в}}$ – скорость набегающего воздушного потока, м/с;

x – расстояние в пролете от опоры, м;

$r_{\text{к}}$ – коэффициент вязкого трения кареток токоприемника, кг/с;

$\varepsilon_{\text{к}}$ – суммарная жесткость кареток токоприемника, Н/м;

$h_{\text{ко}}$ – свободный ход кареток (высота кареток при их полной разгрузке), мм;

$w_{\text{к}}$ – коэффициент сухого трения кареток токоприемника, Н.

Расчет аэродинамической подъемной силы (рисунки 6, 7) и контактного нажатия для токоприемника «АИСТ» произведен по формулам (5) и (7). Температура воздуха t составляет 0 °С и присутствует вторая фаза (мелкий дождь); рабочая высота – от 0,4 до 0,8 м. Данные условия были характерны при проведении испытаний на линии Москва – Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги. Токоприемник был установлен на крыше вагона для исследования контактной сети ВИКС ЦЭ.

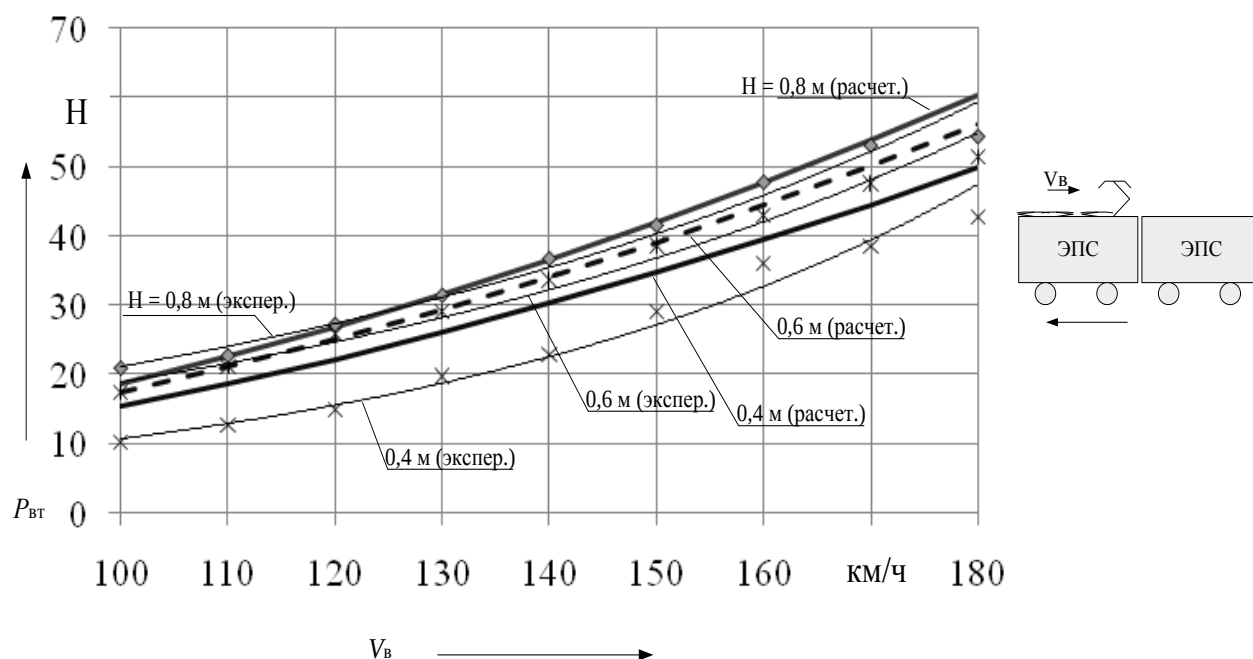


Рисунок 6 – Экспериментальные и расчетные аэродинамические характеристики подъемной силы при движении токоприемника легкого типа «коленом» назад

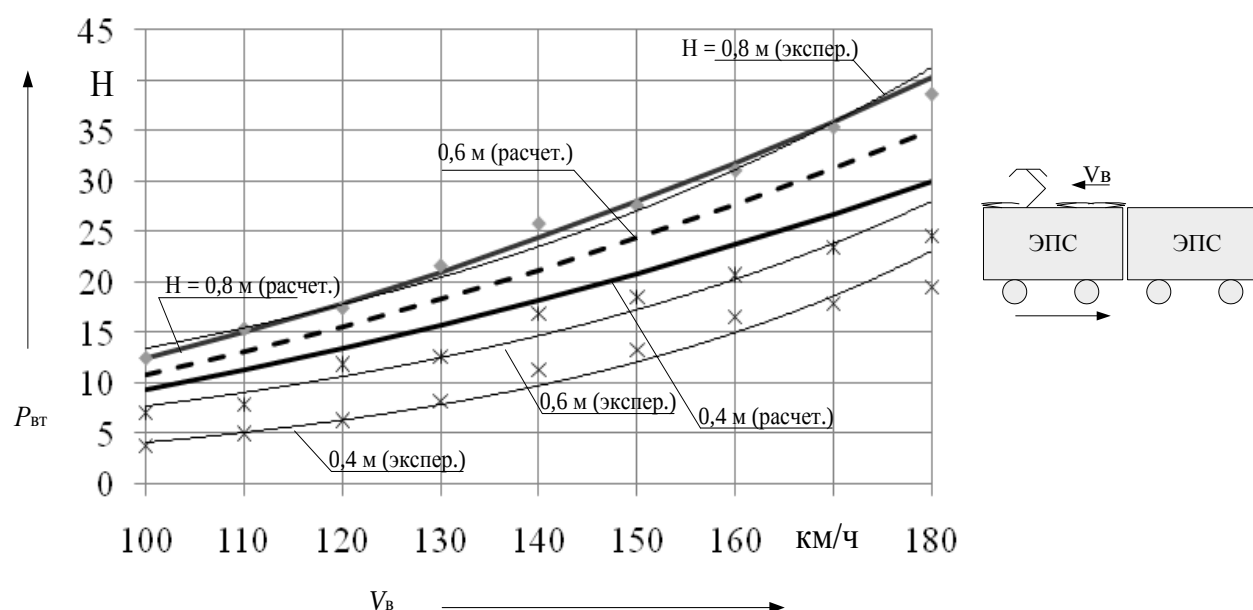


Рисунок 7 – Экспериментальные и расчетные аэродинамические характеристики подъемной силы при движении токоприемника легкого типа «коленом» вперед

Как видно из рисунка 7, характеристика, полученная при испытаниях токоприемника при рабочей высоте 0,4 м, отличается от расчетной. Это обусловлено наличием оборудования, установленного на крыше локомотива (оно не учитывалось при моделировании). При движении «коленом» вперед из-за большего удаления токоприемника от лобовой стенки локомотива влияние крышевого оборудования начинает сказываться уже при высоте от 0,6 м. Такие же зависимости наблюдаются и для токоприемника тяжелого типа.

Расчетное среднее значение контактного нажатия по длине пролета при рабочей высоте 0,8 м составило 135,8 Н при скорости 160 км/ч, тогда как экспериментальное измерение равно 131,5 Н, что говорит о высокой точности расчета.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

При расчете аэродинамической подъемной силы необходимо учитывать изменение температуры окружающей среды и присутствие второй фазы. При расчете контактного нажатия учет этих факторов возможен при помощи поправочного коэффициента k_t и дополнительной вертикальной силы, возникающей от ударов частиц о поверхность токоприемника. Изменение рабочей высоты учитываются поправочным коэффициентом k_H .

Следует отметить также, что при низкой рабочей высоте токоприемника значительное влияние на аэродинамическую подъемную силу оказывает крышное оборудование локомотива, а в зависимости от его расположения и типа локомотива влияние это будет различно.

Список литературы

1. Беляев, И. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети [Текст] / И. А. Беляев, В. А. Вологин. – М.: Транспорт, 1983. – 191 с.
2. Капралова, М. А. Взаимодействие токосъемных устройств при аэродинамическом воздействии на токоприемник в различных метеоусловиях [Текст] / М. А. Капралова // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 83 – 88.
3. Андреев, Ю. Н. К вопросу о физико-метеорологических условиях образования гололеда [Текст] / Ю. Н. Андреев // Труды / Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. – Санкт-Петербург, 1947. – Вып. 2. – С. 23.
4. Маслов, Г. П. Взаимодействие токоприемника с двухфазным воздушным потоком [Текст] / Г. П. Маслов, А. П. Стариков // Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2000. – Ч. 3. – С. 388 – 390.
5. Долгоносков, Б. М. Равновесное распределение частиц в дисперсной системе с коагуляцией и распадом агрегатов [Текст] / Б. М. Долгоносков // Коллоидный журнал. – М., 2001. – Т. 63. – № 1. – С. 32 – 38.
6. Капралова, М. А. Расчет аэродинамических характеристик токоприемника электрического подвижного состава [Текст] / М. А. Капралова // Казанская наука. – Казань: Казанский издательский дом, 2010. – Вып. 1. – № 8. – С. 123 – 126.
7. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин и др. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
8. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

УДК 531.1

С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, Е. В. Пономарев, И. Л. Евсеев

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНТАКТИРУЕМЫХ ТЕЛ

В статье представлены результаты математического моделирования определения характера и закона изменения сил и напряжений, возникающих в области контакта взаимодействующих тел на примере динамического контакта при соударении упругого шара о неподвижную, абсолютно жесткую плиту при его плоском движении. Полученные результаты могут быть использованы при расчете контактных сил и напряжений материала в металлоконструкциях при ударных воздействиях.

Работоспособность технического объекта во многом определяется поведением материала в конструкции, которое зависит не только от его механических свойств, но от технологического выполнения узлов и деталей и условий эксплуатации. Деформация как проявление ме-