

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

Выпуск 2 (217)

«Эврика!»

Материалы семинара аспирантов УрГУПС

Екатеринбург
УрГУПС
2016

УДК 51:1:62:31:33:001
Э16

«Эврика!» : м-лы семинара аспирантов УрГУПС : сб. науч. тр. / [сост. Э16 и науч. ред. Б.С. Сергеев, д-р техн. наук]. — Екатеринбург : УрГУПС, 2016. — Вып. 2(217). — 101, [1] с.

УДК 51:1:62:31:33:001

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета университета*

Содержание

От составителя и научного редактора.....	4
<i>Батрашов А. Б.</i> Анализ физических свойств материала контактного провода по характеристикам железнодорожной линии	6
<i>Габдулхаев В. Ф.</i> Течение вязкого газа между двумя непроницаемыми плоскостями.....	18
<i>Гордиенко А. А.</i> Исследование амплитуд продольных горизонтальных колебаний грузов на колесном ходу при перевозке на открытом подвижном составе	30
<i>Кокшаров Д. А.</i> Расчетная оценка усталостной прочности сварных соединений с использованием метода конечных элементов	39
<i>Кольишев А. С.</i> Организация тяжеловесного и длинносоставного движения в России....	52
<i>Митраков А. С.</i> Выбор системы управления принудительным наклоном кузова перспективного отечественного подвижного состава	57
<i>Новаковский Н. С.</i> Об одном методе решения задачи безударного сильного сжатия одномерных слоёв газа в конфигурации Р. Мизеса	64
<i>Паныч Д. С.</i> О возможности использования средств беспроводной передачи электрической энергии	76
<i>Сверлов Д. С.</i> Эволюция природы смеха	82
<i>Суханова А. В.</i> Развитие тяжеловесного движения в контексте реализации клиентоориентированного подхода на железнодорожном транспорте....	92
<i>Щепин К. М.</i> Моделирование сил в контакте «колесо-рельс» при движении поезда в криволинейном участке пути	98

От составителя и научного редактора



В 2016 году исполняется пять лет со дня начала организации научных семинаров аспирантов УрГУПС. За это время проведено 45 семинаров, на которых обсуждены более ста докладов аспирантов и соискателей УрГУПС и его филиалов — практически всех общеобразовательных и профессиональных кафедр университета. За прошедшие годы авторитет семинара существенно вырос. В большинстве случаев инициаторами выступлений становились не только научные руководители, но и сами аспиранты и соискатели. В семинарах участвовали не только аспиранты, но и ведущие преподаватели университета, включая авторитетных докторов наук и профессоров. Наиболее активные участники семинара из научного и преподавательского состава университета: проф. С. П. Баутин, д-р физ.-мат. наук; проф. С. С. Титов, д-р физ.-мат. наук; проф. Г. Л. Аккерман, д-р техн. наук; проф. Н. Ф. Сирина, д-р техн. наук; В. В. Башуров, канд. физ.-мат. наук; А. В. Волынская, канд. техн. наук и ряд других.

Обсуждение докладов и высказываемые критические замечания помогли улучшить, а иногда и изменить направления научных исследований. В некоторых случаях по рекомендации семинара аспирантам была оказана материальная помощь в организации и постановке экспериментальных работ. Различие в профессиях участников семинара и выданные ими критические замечания позволили оценить работы аспирантов и соискателей с различных сторон, что послужило расширению научно-технического кругозора докладчиков. Одновременно с этим в ходе обсуждений был высказан ряд замечаний, направленных на взаимодействие профессиональных и общеобразовательных кафедр для получения более корректных научных выводов работы. В частности, в наибольшей степени этот относится к оказанию консультативной помощи техническим выпускным кафедрам от кафедры высшей и прикладной математики, так как любое научное исследование по техническим дисциплинам включает в себя создание корректного математического аппарата.

Проведение научных семинаров аспирантов является необходимым и полезным мероприятием, позволяющим повысить уровень

научных исследований за счет вынесения промежуточных результатов работы на публичное обсуждение.

В качестве общего критического замечания следует обратить внимание на достаточно невысокую активность участия в публикациях сборника «Эврика!» не только филиалов УрГУПС, но и аспирантов многих кафедр головного вуза. Очевидно, что значительная доля вины в этом плане лежит на научных руководителях. Поэтому хочется надеяться, что в последующих выпусках сборника «Эврика!» появится большее количество публикаций с высоким научно-техническим уровнем.

С уважением и благодарностью за выполненную работу, Б.С. Сергеев, научный руководитель семинара, научный редактор сб. «Эврика!», д-р техн. наук

Анализ физических свойств материала контактного провода по характеристикам железнодорожной линии

А.Б. Батрашов (научный руководитель – А.В. Паранин, канд. техн. наук), кафедра «Электроснабжение транспорта», Уральский государственный университет путей сообщения



Технические требования, предъявляемые к контактным проводам (КП) из меди и её сплавов, а также методы их испытаний отражены в ГОСТ Р 55647–2013 [1]. Стандарт распространяется на КП, предназначенные для контактной сети электрифицированных железных дорог.

К техническим требованиям, предъявляемым к КП, относятся: геометрические размеры и конструктивное исполнение провода, механические и электрические характеристики (временное сопротивление при растяжении, относительное удлинение, число перегибов, число скручиваний, ползучесть и электрическое сопротивление).

Испытание на скручивание производится в соответствии с ГОСТ 1545–80. Методика испытания на перегиб провода указана в ГОСТ 1579–93 для проводов сечением от 85 до 150 мм² из бронз Бр1 и Бр2, меди и низколегированной меди. Стандартами установлено число перегибов и скручиваний, равное соответственно 3 и 4.

Испытание на ползучесть КП и требование к его относительной ползучести введены в [1]. Испытания проводятся при растяжении с усилием 180 МПа при температуре 90 °С для медных и низколегированных проводов и при растяжении с усилием 210 МПа и температуре 150 °С – для бронзовых. Начальное значение длины провода l_n определяется при установившейся температуре и растягивающей нагрузке в течение 72 ч, а конечное значение длины l_k после выдержки – в течение ещё 720 ч.

Нагрев провода приводит к его разупрочнению, и свойства материала, приобретённые в результате деформирования, утрачиваются — под действием растягивающего усилия провод пластически растягивается, что свидетельствует о тепловом износе контактного провода.

Существующие требования, предъявляемые к контактным проводам по ГОСТ Р 55647—2013, не всегда удовлетворяют условиям эксплуатации на высокоскоростной линии.

При совершенствовании требований, предъявляемых к контактным проводам, целесообразно изучить нормативные документы тех стран, в которых уже развито высокоскоростное движение.

Так, в Евросоюзе (ЕС) требования к контактным проводам регламентируются стандартом [2]. Он определяет характеристики, порядок испытания и методы контроля контактных проводов, применяемых для электрифицированных железных дорог ЕС, а также их заказ и доставку. В этом документе отражены все возможные медные сплавы, применяемые для изготовления контактных проводов, определены процентные соотношения химических элементов в их составе. Состав материала регламентирован сертификатом соответствия стандарту EN 1977. Для каждого материала приведены температурные коэффициенты электрического сопротивления. В российском стандарте нет столь чёткого требования к составу материала, что затрудняет контроль качества контактных проводов.

Стандарт ЕС предписывает более жесткие требования к механическим свойствам контактных проводов. Например, число перегибов и скручиваний равно соответственно 6 и 5. Дополнительно провода испытывают трехкратной намоткой на прутки того же (для медных и легированных серебром) или удвоенного (для остальных проводов) диаметра.

В остальном методы испытания и контроля аналогичны или различаются не принципиально.

В Китае классификацию, технические требования, методы испытаний, правила проверки и приёмки, маркировки, упаковки и хранения контактных проводов для электрифицированного железнодорожного транспорта регламентирует соответствующий стандарт [3]. Этот документ определяет общую тенденцию развития в изготовлении и применении контактных проводов. Так, в нем указан приоритет в использовании проводов, легированных хром-цирконием, магнием и оловом. От медных и легированных серебром проводов, согласно китайскому нормативу, стоит отказаться. Стандарт предполагает вибрационные испытания контактных проводов на частоте

2–4 Гц с амплитудой 35 мм и повторяемостью $2 \cdot 10^6$ раз. Испытания на усталость проводятся с амплитудой 30 % от номинального растягивающего усилия при частоте 1–3 Гц и повторяемостью $5 \cdot 10^5$ раз. После испытаний на усталость и вибрационную стойкость остаточное временное сопротивление образца должно быть не менее 95 %.

В дополнение к испытаниям на разрыв проводятся испытания на определение временного сопротивления на разрыв для разупрочнённого при температуре 300 °С провода. Контактные провода должны иметь хорошую износостойкость, что способствует обеспечению его безопасного использования в течение жизненного цикла.

Как показывает анализ нормативных документов, совершенствование требований к контактным проводам и методов их испытаний является актуальной задачей при внедрении и развитии высокоскоростного движения в Российской Федерации.

Требования к контактному проводу по тепловым характеристикам

С точки зрения тепловой нагрузки на провода и тросы контактной сети, можно выделить режим транзита тягового тока и режим токосъема. Максимальная токовая нагрузка на тяговую сеть происходит в случае односторонней схемы питания (рис. 1).

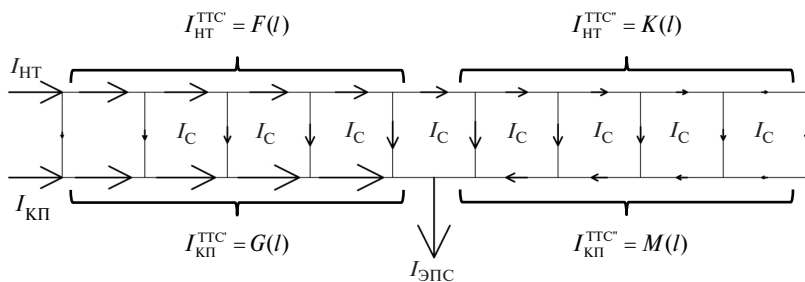


Рис. 1. Схема токораспределения при одностороннем питании

Для проводов и тросов, применяемых на железной дороге, в [4] установлены максимальные температуры нагрева в установившемся режиме, а также длительность протекания тока при температурах перегрева свыше допустимой установившейся температуры.

При транзите тяговый ток распределяется в проводах обратно пропорционально сопротивлению проводов. Токораспределение при транзите тягового тока в контактной подвеске, состоящей из несущего троса (НТ) и контактного провода (КП), можно оценить по формулам (1) и (2):

$$I_{\text{НТ}}^{\text{ТР}} = \frac{r_{\text{НТ}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{НТ}} + r_{\text{КП}}}; \quad (1)$$

$$I_{\text{КП}}^{\text{ТР}} = \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{НТ}} + r_{\text{КП}}}. \quad (2)$$

В режиме токосъема и в процессе токораспределения существенную роль играют струны и поперечные электрические соединители (ПС). Так, чем ближе струна или ПС находится к точке токосъема, тем больший ток стекает через неё из НТ в КП. Характер изменения тока в проводах контактной сети по длине до точки токосъема и после неё имеет некоторые различия, что отражено на рис.1. Формулы (3) и (4) описывают изменение тока до точки токосъема от тяговой подстанции.

$$I_{\text{НТ}}^{\text{ТТС}} = \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{-l \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_c}}} \right); \quad (3)$$

$$I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}} = I_{\text{ЭПС}} - I_{\text{НТ}}^{\text{ТТС}}, \quad (4)$$

где r_c — приведённое сопротивление струн и электросоединителей на метр длины контактной подвески, Ом·м; l — расстояние от точки токосъема, м.

Формулы (5) и (6) описывают изменение тока после точки токосъема от тяговой подстанции:

$$I_{\text{НТ}}^{\text{ТТС}''} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot e^{-l \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_c}}}; \quad (5)$$

$$I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}''} = -I_{\text{НТ}}^{\text{ТТС}''}. \quad (6)$$

Как видно из формул (5)–(6), ток в проводах подчиняется экспоненциальному закону. Согласно правила трёх сигм, практически все значения экспоненты лежат в интервале 3σ . Таким образом, зону

стекания l_s , из которой происходит основное стекание тока из несущего троса в контактный провод, можно вычислить по формуле (7):

$$l_s = \frac{3}{\sqrt{\frac{r_{\text{кп}} + r_{\text{нт}}}{r_c}}}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что чем меньше приведённое сопротивление r_c , тем меньше расстояние l_s . Из этого следует, что при высоких тяговых нагрузках применение большего числа ПС и токопроводящих струн снижает тепловую нагрузку на контактный провод в зоне токосъёма.

При оценке нагрева провода необходимо знать функцию тока в точке КП. Зависимость тока в точке КП от времени описывается системой уравнений (8).

$$I_{\text{кп}}(t) = \begin{cases} I_{\text{эпс}} - \frac{r_{\text{кп}} \cdot I_{\text{эпс}}}{r_{\text{кп}} + r_{\text{нт}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{\frac{(t \cdot v - L_x) \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{кп}} + r_{\text{нт}}}{r_c}}}{2}} \right), & (t \cdot v - L_x) \leq 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{кп}} \cdot I_{\text{эпс}}}{r_{\text{кп}} + r_{\text{нт}}} \cdot e^{\frac{(t \cdot v - L_x) \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{кп}} + r_{\text{нт}}}{r_c}}}{2}}, & (t \cdot v - L_x) > 0, \end{cases} \quad (8)$$

где t — время движения ЭПС по рассчитываемому участку, с; v — скорость движения ЭПС, м/с; L_x — положение точки контактного провода на участке, м.

Для решения уравнения теплового баланса необходимо определить значение тока и время его действия. Так как функция тока подчиняется экспоненциальному закону, то следует определить эффективное значение тока. Расчётная скорость электровоза выбирается на основании токовой характеристики электровоза и соответствует максимальному значению выделяемой энергии на единицу длины контактного провода.

Для оценки значения выделяемой энергии на единицу длины контактного провода строится график коэффициента выделения тепловой энергии на метр длины от скорости движения ЭПС по формуле (9) и определяется скорость, при которой выделение тепловой энергии максимально:

$$k_{\text{э}}(v) = \frac{I_{\text{эпс}}^2(v)}{v}. \quad (9)$$

Эффективные значения тока $I_{\text{эпс}}^{\text{ТТС}}$ до прохода ЭПС точки контактного провода и после неё $I_{\text{эпс}}^{\text{ТТС"}}$ в общем случае можно определить по формуле (10):

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{эфф}}} I_{\text{кп}}^2(t) dt}{t_{\text{эфф}}}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{эфф}}$ — время протекания эффективного тока, с.

На основании рассчитанных эффективных токов, с помощью нестационарного уравнения теплового баланса [5–7], определяется температура перегрева провода над температурой окружающей среды (11):

$$\vartheta_t = \vartheta_{\text{уст}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (11)$$

Требования к материалу контактного провода в зависимости от параметров железнодорожной линии основаны на расчётах (1)–(11).

Основываясь на уравнении теплового баланса нестационарного теплообмена, пренебрегая охлаждением провода, можно вывести соотношение между свойствами материала провода и характеристиками железнодорожной линии (12):

$$\frac{\rho_T}{c \cdot \rho} \leq \frac{\Delta\theta \cdot S_{\text{кп}}^2}{t_{\text{эфф}} \cdot I_{\text{эфф}}^2}, \quad (12)$$

где ρ_T — удельное сопротивление провода при максимальной допустимой температуре, Ом · м²/м; $\Delta\theta$ — температура перегрева материала над максимальной допустимой, °С; c — теплоёмкость материала контактного провода, Вт·с/(°С · кг); ρ — плотность материала контактного провода, кг/м³; $S_{\text{кп}}$ — площадь поперечного сечения контактного провода, м²; $I_{\text{эфф}}$ — эффективный ток при токосъёме, А.

Рассмотрим пример расчёта по указанной выше методике. Оценим возможность применения контактной подвески 2МФ-100+М-120,

с звеньевыми струнами БСМ-4, поперечными соединителями М-95 и средней анкеровкой ПБСМ-95 для локомотива ВЛ-10. Токовая характеристика электровоза и коэффициент выделения тепловой энергии на метр длины от скорости движения ЭПС представлены на рис. 2.

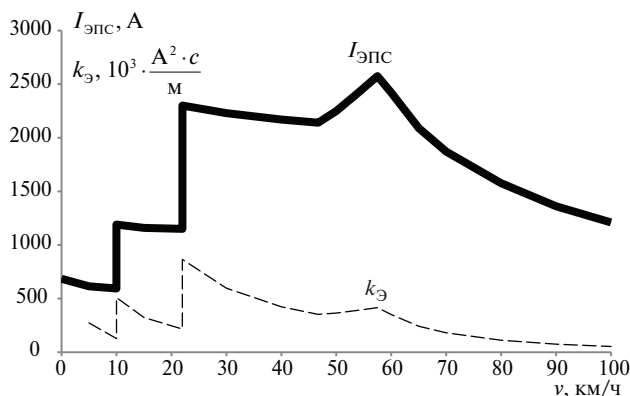


Рис. 2. Токовая характеристика и коэффициент выделения тепловой энергии на метр длины контактного провода для электровоза ВЛ10

Из рис. 2 видно, что максимальное значение $k_{\text{Э}}$ наблюдается при скорости 22 км/ч и потребляемом токе 2300 А. Эти значения скорости и тока являются расчётными, для теплового анализа контактного провода в процессе токосъёма. Расчётная длина анкерного участка — 2000 м. По формулам (3)–(6) рассчитаем значение тока в проводах контактной подвески в зависимости от расстояния до ЭПС и отразим это на рис. 3, показав значения тока на расстоянии 200 м в обе стороны от ЭПС.

Из рис. 3 чётко видна зона стекания тягового тока из НТ в КП. Расчет по формуле (7) дает расстояние $l_{\text{с}} = 32$ м. Время, за которое ЭПС проходит расстояние $l_{\text{с}}$ с расчётной скоростью 22 км/ч, равняется $t_{\text{ЭФФ}} = 5,3$ с.

Для решения уравнения теплового баланса необходимо значение эффективного тока, которое получается на основании функции тока в точке контактного провода. Решив уравнения (8) и (10), отразим зависимость тока в точке контактного провода $L_{\text{x}} = 1000$ м (рис. 4).

В результате вычислений по (5)–(7) при температуре окружающего воздуха $\theta_{\infty} = 40$ °С и скорости ветра 1 м/с коэффициент тепло-

отдачи со всей поверхности провода $k = 1,46 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м})$. Максимальный допустимый ток, который нагревает один контактный провод до максимальной допустимой температуры 80°С , равен 480 А (с учётом солнечной радиации $N_{Sh} = 900 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

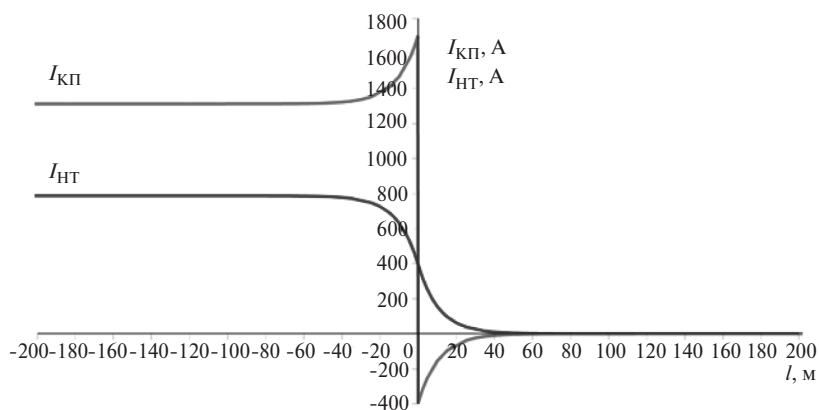


Рис. 3. Токораспределение в контактной подвеске 2МФ-100+М-120 при токе электровоза $I_{\text{эПС}} = 2300 \text{ А}$ и одностороннем питании (ТП слева)

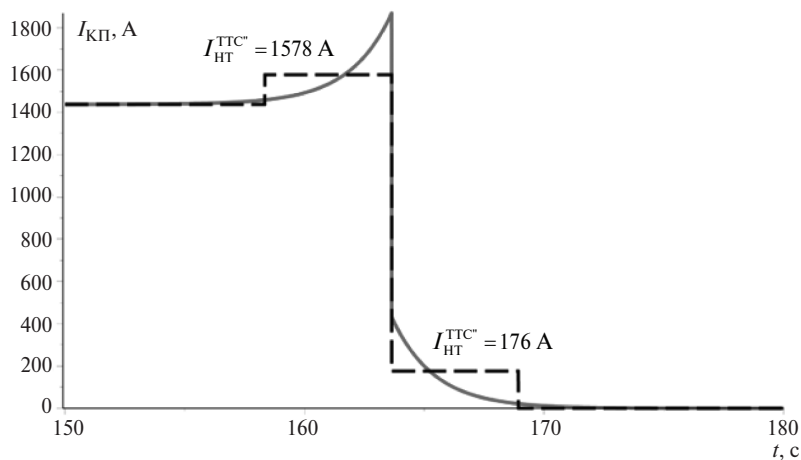


Рис. 4. Зависимость тока в точке контактного провода от времени и эффективные токи до и после точки токосъема

Транзитный ток по одному контактному проводу равен 719 А, что больше допустимого тока. Значит, необходимо увеличить сечение несущего троса или дополнить контактную подвеску усиливающими проводами для удовлетворения условия транзита тягового тока.

Результат расчета по формуле (11) температуры перегрева контактного провода в процессе токосъема представлен на рис. 5. До начала токосъема провод нагрет до максимальной допустимой температуры 80 °С.

$$I_{\text{эпс}} = 2300 \text{ А} = 22 \text{ км/ч.}$$

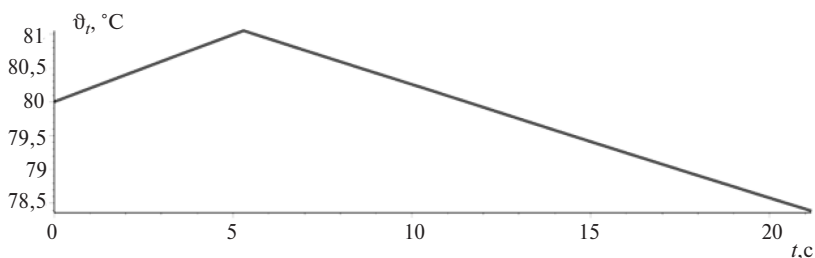


Рис. 5. Температура перегрева контактного провода в процессе токосъема

Из рис. 5 видно, что перегрев составил примерно 1 °С, однако следует понимать, что температура в точке токосъема может достигать температуры плавления, а полученное значения является усреднённым на зоне стягивания тягового тока в контактный провод. Для более подробного вычисления температуры в месте контакта токосъёмной пластины и контактного провода следует воспользоваться другими методами расчетов, например, методом конечных элементов [8]. Согласно условию (12), где пренебрегается охлаждением провода, а вся энергия, выделяющаяся в процессе токосъема, направлена на повышение температуры провода, токонесущая способность материала провода должна быть выше или равна передаваемому в процессе токосъема току. Обозначим левую часть уравнения $\Omega_{\text{мат}}$, а правую — $\Omega_{\text{ждл}}$. Проанализируем возможность применения стали или алюминия в качестве материала для контактного провода иведем результаты вычислений в таблицу.

Сводная таблица результатов подбора материала провода

Параметр материала			
Материал	Медь	Сталь	Алюминий
Удельное сопротивление ρ_r , Ом · м ² /м	$1,77 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^{-7}$	$2,95 \cdot 10^{-8}$
Теплоемкость c , Вт·с/(°С·кг)	385	462	903
Плотность ρ , кг/м ³	8900	7800	2800
Перегрев $\Delta\theta$, [°C]	20	20	20
$\Omega_{\text{мат}}$	$38,71 \cdot 10^{14}$	$5,26 \cdot 10^{14}$	$17,14 \cdot 10^{14}$
Параметры железнодорожной линии			
$\Omega_{\text{ждл}}$	$2,26 \cdot 10^{14}$	$4,75 \cdot 10^{14}$	$0,7 \cdot 10^{14}$
Площадь $S_{\text{кп}}$, мм ²	100	100	100
Время, $t_{\text{эфф}}$, [с]	5,3	3	3,5
Ток, $I_{\text{эфф}}$, [А]	648	1219	470

Как видно из таблицы, все материалы могут быть использованы в качестве контактного провода. Медный провод обладает лучшими характеристиками вследствие высокой электропроводности и теплоемкости. Для применения стали или алюминия необходимы токопроводящие струны, так как зона стягивания тягового тока меньше, чем периодичность установки поперечных электросоединителей. Сечения несущего троса и усиливающего провода должны быть увеличены при применении контактного провода из стали или алюминия для сохранения значения транзитного тока.

Требования к контактному проводу
по распространению волны

К физическим параметрам контактной сети относят скорость распространения поперечной волны как требование по качеству токосъема. Экспериментальным путём выяснено, что отношение скорости движения ЭПС $n_{\text{эпс}}$ к скорости распространения волны в проводе $v_{\text{п}}$ не должно превышать 0,7. Соотношение между плотностью материала провода и скоростью распространения волны в проводе представлено в формуле (13):

$$v_{\text{эпс}} \leq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (13)$$

где T – удельное натяжение провода, Па; ρ – плотность материала провода, кг/м³.

Медные сплавы с добавлением магния или хром-циркония обладают высокими механическими свойствами. Временное сопротивление на разрыв у таких проводов достигает 560–575 МПа, что с учетом плотности материала позволяет использовать их для скоростей до 400 км/ч. Стальные провода, упрочненные деформированием, имеют временное сопротивление 1500 МПа и выше в зависимости от марки стали и способа изготовления, что, с механической точки зрения, позволяет применять их для скоростей до 700 км/ч. Алюминиевые сплавы способны достигать временного сопротивления на разрыв до 600 МПа, что с учётом малой плотности материала сопоставимо со скоростями до 700 км/ч.

Для выбора материала контактного провода скорость движения ЭПС и максимальный потребляемый ток являются исходными данными. Эти значения связаны в токовой характеристике электровоза. Следовательно, при проектировании либо модернизации участка контактной сети необходимо заранее предполагать электровозы, которые будут эксплуатироваться на данном участке. Возможность применения того или иного материала в качестве материала для изготовления контактного провода определяется расчётом, в результате которого свойства проверяемого материала должны удовлетворять требования к физическим параметрам, токонесущей способности и тепло- и износостойкости контактной подвески.

Литература

1. ГОСТ Р 55647–2013. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия.
2. EN 50149:2001. Railway applications – Fixed installations – Electric traction. Copper and copper alloy grooved contact wires (Применение на железных дорогах. Стационарные устройства. Электрическая тяга. Фасонные контактные провода из меди и медных сплавов).
3. ТВ/Т 2809–2014. Copper and copper alloy contact wires for electric railway (Контактные провода из меди и медных сплавов для электрических железных дорог).
4. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЭ-868. М. : Трансиздат, 2002. 184 с. ISBN 5-900345-29-7.

5. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи. М.: Маршрут, 2003. 416 с. ISBN 5-89035-086-2.
6. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с. ISBN 5-277-01713-5.
7. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Publicis Corporate Publishing; 2nd edition (August 24, 2009). ISBN 978-3-89578-322-7.
8. Паранин А.В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприёмника и контактного провода // Транспорт Урала. 2009. №4 С. 85–88. ISSN 1815-9400.

Течение вязкого газа между двумя непроницаемыми плоскостями

В.Ф. Габдулхаев (научный руководитель – С. П. Баутин, д-р физ.-мат. наук), кафедра «Высшая и прикладная математика», Уральский государственный университет путей сообщения

Точное решение полной системы уравнений Навье – Стокса



Рассматривается случай двумерных течений политропного газа с уравнениями состояния (1) и (2) при постоянных значениях μ , $\mu' = 0$, κ и в качестве контактной поверхности берется плоскость $x = 0$, т. е. $v_1|_{x=0} = 0$

$$p = R\rho T, \quad (1)$$

где p – давление газа; ρ – плотность; $R = \text{const} > 0$ – газовая постоянная, T – температура газа;

$$e = c_{vo} T, \quad (2)$$

где e – внутренняя энергия; $c_{vo} = \text{const} > 0$ – постоянная удельная теплоемкость при постоянном объеме; T – температура газа; $\frac{R}{c_{vo}} = \gamma - 1$, где $\gamma = \text{const} > 1$ – показатель политропы газа.

Берется полная система уравнений Навье – Стокса, представленная в следующем виде ($x = x, y = x_2, u = v_1, u = v_2$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + u\rho_x + v\rho_y + \rho(u_x + v_y) = 0, \\ \rho u_t + \rho(uu_x + uv_y) + \frac{1}{\gamma}(T\rho_x + \rho T_x) = \mu_0 \left(u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} + \frac{1}{4}v_{xy} \right), \\ \rho v_t + \rho(vu_x + vv_y) + \frac{1}{\gamma}(T\rho_y + \rho T_y) = \mu_0 \left(v_{yy} + \frac{3}{4}v_{xx} + \frac{1}{4}u_{xy} \right), \\ \rho T_t + \rho(UT_x + VT_y) + (\gamma - 1)\rho T(u_x + v_y) = \kappa_0(T_{xx} + T_{yy}) + \\ + \gamma(\gamma - 1)\mu_0 \left\{ \frac{1}{2}[(u_x - v_y)^2 + u_x^2 + v_y^2] + \frac{3}{4}(u_y + v_x)^2 \right\}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для данной системы имеются следующие формулы, задающие точное двумерное стационарное решение, когда $\frac{\partial}{\partial z} = w = 0$:

$$\begin{aligned} \rho &= a_1; \\ u = v_1 &= \frac{a_2 \cdot Re \cdot y^2}{3} \Bigg|_{Re = \frac{4}{3\mu_0}} \Rightarrow u = \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2; \\ v &= v_2 = 0; \\ T &= a_2 x + a_3; \\ a_2 &> 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где ρ — плотность газа; u — скорость вдоль оси Ox ; v — скорость вдоль оси Oy ; T — температура газа.

Проверим подстановкой, что формулы (4) являются точным решением полной системы уравнений Навье — Стокса (3).

При подстановке точного решения (4) в систему (3) получатся тождественные равенства (при $\gamma = \frac{3}{2}$ и $a_1 = 1$). Таким образом, формулы (4) являются точным решением полной системы уравнений Навье — Стокса (3), а значит, они задают конкретное течение сжимаемого вязкого теплопроводного газа.

Физический смысл точного решения

Плотность $r = \text{const}$; $u = \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2$ – скорость вдоль оси Ox – квадратичная функция от переменной y . Она равна нулю только при $y = 0$, в остальных случаях она положительна; $v = v_2 = 0$ – скорость вдоль оси Oy , равная нулю; $T = a_2 x + a_3$ – температура газа, линейная функция от x ; $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$.

Будем рассматривать только верхнюю полуплоскость и только до некоторой высоты h , где скорость v будет являться некоей положительной константой. Значит, на всей прямой $y = h$, скорость u вдоль оси Ox постоянна. Так как скорость v вдоль оси Oy равна нулю, то движения вдоль оси Oy нет. Поэтому исходя из нашей задачи мы можем взять полосу между прямыми $y = 0$ и $y = h$ и изучать течения, не выходя из границ нашей полосы. В этой полосе нижняя плоскость $y = 0$ стоит на месте, а верхняя $y = h$ движется вдоль оси Ox с постоянной скоростью.

Рассматриваются течения между неподвижной плоскостью $y = 0$, с условиями прилипания (5) на ней и подвижной плоскостью $y = h$, движущейся со скоростью $u = \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2$, с условиями прилипания (6) на ней.

$$u|_{y=0} = 0, v|_{y=0} = 0, \quad (5)$$

$$u|_{y=h} = \frac{4a_2}{9\mu_0} h^2, v|_{y=h} = 0. \quad (6)$$

Вид искомого решения полной системы уравнений Навье – Стокса

Эквивалентный переход от системы (3) к системе представлен в [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_t + u\delta_x + v\delta_y - \delta(u_x + v_y) = 0, \\ u_t + uu_x + vv_y + \frac{1}{\gamma}\delta p_x = \mu_0\delta\left(\frac{1}{4}v_{xy} + u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy}\right), \\ v_t + uv_x + vv_y + \frac{1}{\gamma}\delta p_y = \mu_0\delta\left(\frac{1}{4}u_{xy} + v_{yy} + \frac{3}{4}v_{xx}\right), \\ p_t + up_x + vp_y + \gamma p(u_x + v_y) = \kappa_0 p(\delta_{xx} + \delta_{yy}) + 2\kappa_0(p_x\delta_x + p_y\delta_y) + \\ + \kappa_0\delta(p_{xx} + p_{yy}) + \mu_0\gamma(\gamma - 1)\left[(u_x^2 - u_x v_y + v_y^2) + \frac{3}{4}(u_y + v_x)^2\right]. \end{array} \right. \quad (7)$$

Будем строить решение полной системы уравнений Навье – Стокса (3):

$$\vec{u}(t, x, y) = \vec{u}_0(x, y) + \vec{u}_*(t, x, y), \quad (8)$$

где $\vec{u}_0(x, y)$ – точное решение полной системы уравнений Навье – Стокса (3); $\vec{u}_*(t, x, y)$ – возмущения.

Искомое решение полной системы уравнений Навье – Стокса (3) будет представлено в виде

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{a_1} + \delta_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} [\delta_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \delta_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x)] + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} \delta_{3m}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right), \\ u &= \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2 + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} [u_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + u_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x)] + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} u_{3m}(t) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right), \\ v &= \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} [v_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + v_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x)] + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} v_{3m}(t) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right), \\ p &= a_1(a_2 x + a_3) + p_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} [p_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + p_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x)] + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} p_{3m}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Для представления (8) на плоскостях $y = 0$ и $y = h$ выполняются условия теплоизоляции, то есть

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=h} = 0. \quad (10)$$

Далее необходимо получить бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов $\delta_0(t)$, $\delta_{1k}(t)$, $\delta_{2k}(t)$, $\delta_{3m}(t)$, $u_{1k}(t)$, $u_{2k}(t)$, $u_{3m}(t)$, $v_{1k}(t)$, $v_{2k}(t)$, $v_{3m}(t)$, $p_0(t)$, $p_{1k}(t)$, $p_{2k}(t)$, $p_{3m}(t)$, рядов (9).

Получение бесконечной системы обыкновенных уравнений для коэффициентов представлений (9)

Подставим представления (9) в систему (7). На примере нахождения обыкновенного дифференциального уравнения для $\delta'_0(t)$ из первого уравнения системы покажем алгоритм получения бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов $\delta_0(t), \delta_{1k}(t), \delta_{2k}(t), \delta_{3m}(t), u_{1k}(t), u_{2k}(t), u_{3m}(t), v_{1k}(t), v_{2k}(t), v_{3m}(t), p_0(t), p_{1k}(t), p_{2k}(t), p_{3m}(t)$, рядов (9).

Рассмотрим первое уравнение системы (7):

$$\delta_t + u\delta_x + v\delta_y - \delta(u_x + v_y) = 0;$$

$$\delta_t = \delta u_x + \delta v_y - u\delta_x - v\delta_y.$$

Распишем суммы рядов, вычислим производные, раскроем скобки:

$$\begin{aligned} \delta'_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \delta'_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \sum_{k=1}^{\infty} \delta'_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) + \sum_{m=1}^{\infty} \delta'_{3m}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} y\right) = \\ = (-1) \frac{1}{a_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{1k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) - \\ - \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{1n}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) - \\ - \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{1n}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) - \\ - \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{3m}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin(k \cdot x) + \\ + \frac{1}{a_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{2k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \\ + \delta_0(t) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{2k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \\ + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{2n}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) + \\ + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{2n}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{3m}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos(k \cdot x) + \\
& \quad + \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \\
& \quad + \delta_0(t) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{1k}(t) \cdot v_{1n}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{2k}(t) \cdot v_{1n}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \delta_{3m}(t) \cdot v_{1k}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos(k \cdot x) + \\
& \quad + \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) + \\
& \quad + \delta_0(t) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) + \\
& \quad + \delta_0(t) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{1k}(t) \cdot v_{2n}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{2k}(t) \cdot v_{2n}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \delta_{3m}(t) \cdot v_{2k}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin(k \cdot x) + \\
& \quad + \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{3m}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& \quad + \delta_0(t) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{3m}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& \quad + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \delta_{1k}(t) \cdot v_{3m}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \delta_{2k}(t) \cdot v_{3m}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{3m}(t) \cdot v_{3n}(t) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& + \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \delta_{1k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) + \\
& + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) + \\
& + \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) + \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{3m}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) - \\
& - \frac{4a_2}{9\mu_0} y^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \delta_{2k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) - \\
& - \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) - \\
& - \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) - \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{3m}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{1k}(t) \cdot \delta_{3m}(t) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{2k}(t) \cdot \delta_{3m}(t) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) + \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3m}(t) \cdot \delta_{3n}(t) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right).
\end{aligned}$$

Проинтегрируем данное уравнение по dx от 0 до 2π и по dy от 0 до h и воспользуемся свойствами двойных интегралов:

$$\begin{aligned}
& \delta'_0(t) \cdot \int_0^{2\pi} dx \cdot \int_0^h dy + \sum_{k=1}^{\infty} \delta'_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h dy + \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \delta'_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h dy + \sum_{m=1}^{\infty} \delta'_{3m}(t) \cdot \int_0^{2\pi} dx \cdot \int_0^h \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy = \\
& = (-1) \cdot \frac{1}{a_1} \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx - \\
& - \delta_0(t) \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx - \\
& - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{1n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx - \\
& - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{1n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx - \\
& - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{3m}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy + \\
& + \frac{1}{a_1} \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx + \\
& + \delta_0(t) \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx + \\
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{2n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \\
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{2n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{3m}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx + \\
& + \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \int_0^h \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx + \\
& + \delta_0(t) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \int_0^h \cos\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} v_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx +
\end{aligned}$$

26

$$\begin{aligned}
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx + \\
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx + \\
& \hline \hline
& + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{3m}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy - \\
& - \frac{4a_2}{9\mu_0} \int_0^h y^2 dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \delta_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx - \\
& - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx - \\
& \hline \hline
& - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx - \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{3m}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{1k}(t) \cdot \delta_{3m}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot v_{2k}(t) \cdot \delta_{3m}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) dx \cdot \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy + \\
& + \int_0^{2\pi} dx \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3m}(t) \cdot \delta_{3n}(t) \cdot \int_0^h \sin\left(m \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy. \\
& \hline \hline
\end{aligned}$$

Одной чертой выделены слагаемые, интегралы в которых равны нулю при любых $k, n, m = 0, 1, 2 \dots$, а так как слагаемые состоят из произведения множителей, то все слагаемое равно нулю при любых $k, n, m = 0, 1, 2 \dots$.

Двумя чертами выделены слагаемые, интегралы в которых не равны нулю при любых $k, n, m = 0, 1, 2 \dots$, следовательно, и сами слагаемые могут быть не нулями.

Выпишем слагаемые, в которых интегралы не будут равны нулю при любых $k, n, m = 0, 1, 2 \dots$:

$$\begin{aligned}
& \delta'_0(t) \cdot \int_0^{2\pi} dx \cdot \int_0^h dy = \\
& = - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2k}(t) \cdot u_{1n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx + \\
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1k}(t) \cdot u_{2n}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot \int_0^{2\pi} dx \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{3k}(t) \cdot v_{3n}(t) \cdot \int_0^h \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy + \\
& + \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \sin(k \cdot x) \cdot \sin(n \cdot x) dx - \\
& - \int_0^h \sin\left(\frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1k}(t) \cdot \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \\
& + \int_0^{2\pi} dx \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3k}(t) \cdot \delta_{3n}(t) \cdot \int_0^h \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{h} \cdot y\right) dy.
\end{aligned}$$

Вычислим интегралы:

$$\begin{aligned}
& 2\pi \cdot h \cdot \delta'_0(t) = \\
& = - \left(-\frac{2h}{\pi}\right) \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) + \left(-\frac{2h}{\pi}\right) \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) + \\
& + \frac{\pi}{h} \cdot 2\pi \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{3n}(t) \cdot v_{3n}(t) + \left(-\frac{2h}{\pi}\right) \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) - \\
& - \left(-\frac{2h}{\pi}\right) \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) + 2\pi \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3n}(t) \cdot \delta_{3n}(t).
\end{aligned}$$

Выполним элементарные преобразования:

$$\begin{aligned}
& 2\pi \cdot h \cdot \delta'_0(t) = \\
& = 2h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) - 2h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) + \frac{2\pi^3}{h} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{3n}(t) \cdot v_{3n}(t) -
\end{aligned}$$

$$-2h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) + 2h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) + 2\pi^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3n}(t) \cdot \delta_{3n}(t).$$

Разделив обе части уравнения на $2\pi \cdot h$, получим одно обыкновенное дифференциальное уравнение для $\delta'_0(t)$:

$$\begin{aligned} \delta'_0(t) = & \\ = & \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) - \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) + \frac{\pi^2}{h^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{3n}(t) \cdot v_{3n}(t) - \\ & - \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{1n}(t) \cdot u_{2n}(t) + \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \delta_{2n}(t) \cdot u_{1n}(t) + \frac{\pi}{h} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot v_{3n}(t) \cdot \delta_{3n}(t). \end{aligned}$$

По данному алгоритму находятся бесконечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов $\delta_0(t)$, $\delta_{1k}(t)$, $\delta_{2k}(t)$, $\delta_{3m}(t)$, $u_{1k}(t)$, $u_{2k}(t)$, $u_{3m}(t)$, $v_{1k}(t)$, $v_{2k}(t)$, $v_{3m}(t)$, $p_0(t)$, $p_{1k}(t)$, $p_{2k}(t)$, $p_{3m}(t)$, рядов (9).

Благодарю моего научного руководителя, С.П. Баутина, д-ра физ.-мат. наук за всестороннюю поддержку.

Литература

1. Баутин С. П., Замыслов В. Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск : Наука, 2014. 91 с. ISBN 978-5-94614-328-8.
2. Баутин С. П. Замыслов В. Е. Представление приближенных решений полной системы уравнений Навье – Стокса в одномерном случае // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 3. С. 3–12. ISSN 1560-7534.
3. Баутин С. П. Замыслов В. Е. Одномерные периодические течения вязкого теплопроводного газа // Вестник УрГУПС. 2013. Т. 17, № 1(17). С. 4–13. ISSN 2079-0392.

Исследование амплитуд продольных горизонтальных колебаний грузов на колесном ходу при перевозке на открытом подвижном составе

А. А. Гордиенко (научный руководитель – Е. Н. Тимухина, д-р техн. наук), кафедра «Управление эксплуатационной работой», Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург



Перевозимые на открытом подвижном составе грузы на колесном ходу (или колесная техника) представляют серьёзную угрозу безопасности перевозок в случае нарушения их креплений. В 2011–2015 гг. доля отцепленных вагонов с колесной техникой составила около 35 % от общего количества отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями [1].

Грузы на колесном ходу при перевозке обладают повышенной подвижностью, что вызвано наличием в их конструкции упругих элементов, к которым относятся шины и упругие элементы подвесок (рессоры, пружины, торсионы, амортизаторы).

Несмотря на актуальность исследований сдвигов колесной техники при перевозке, пока не оценены амплитуды колебаний, необходимые для уточнения существующих методик проверочных расчетов прочности креплений.

Особое место при перевозке грузов на колесном ходу занимают продольные горизонтальные колебания, амплитуды которых принимают значительно большие величины по сравнению с поперечными и вертикальными, главным образом, вследствие несоблюдения скоростей роспуска вагонов с сортировочной горки.

Составим расчетную схему продольных горизонтальных колебаний (подергивание) колесной техники. Примем, что растяжки,

предназначенные для удержания груза от сдвига, представляют собой прямолинейные стержни, испытывающие одноосное растяжение. Растяжки подвергаются предварительному натяжению, величина которого находится в пределах от 15 до 25 кН [2]. Также будем учитывать, что на груз и вагон в разрабатываемых схемах воздействуют только продольные силы без учета вертикальных сил.

В разрабатываемой схеме горизонтальных продольных колебаний будем учитывать только продольное $\bar{a}_x = \bar{a}_{ex}$ переносное ускорение, возникающее вследствие неровностей пути, наличия зазоров в конструкции автосцепки и тележек вагонов, но главным образом вследствие соударения вагона о стоящие вагоны и торможения на тормозных позициях сортировочных горок.

Гибкие элементы креплений и рама вагона как внешние связи испытывают в расчетных схемах только продольную $\bar{I}_{ex} = \bar{I}_x$ переносную силу инерции [2, 3].

Для составления дифференциальных уравнений горизонтальных продольных колебаний колесной техники составим двухмассовую расчетную схему системы «вагон – упругие элементы – кузов колесной техники» (рис. 1).

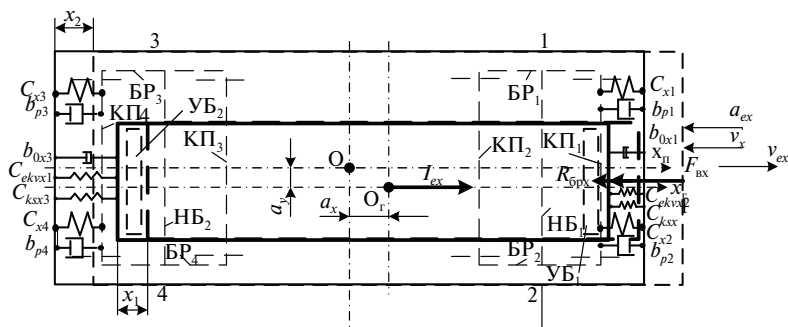


Рис. 1. Двухмассовая расчетная схема продольных горизонтальных колебаний (подергивание) колесной техники, размещенной на платформе*

КП – колесная пара; НБ – наддрессорная балка; БР – боковая рама тележки; УБ – упорный брус; c_{xi} , c_{kxi} , c_{ekxi} – продольные жесткости соответственно рессорных комплектов тележек, упругих элементов колесной техники и упругих элементов креплений; b_{pix} , b_{oxi} – продольные коэффициенты вязкого трения соответственно в рессорных комплектах вагона и упругих элементах груза

*Качество иллюстраций соответствует качеству предоставленных оригиналов.

Приведем значения продольных горизонтальных жесткостей и коэффициенты вязкого трения к эквивалентным. Обозначим C_{kvx} – эквивалентная продольная жесткость упругих элементов и креплений грузов на колесном ходу, кН/м; b_{0xj} – эквивалентный продольный коэффициент вязкого трения в j -упругих и диссипативных элементах связи колесной техники, кН·с/м; c_{ekvwx} – эквивалентная жесткость рессорных комплектов вагона в продольном направлении, кН/м; b_{px} – эквивалентный коэффициент вязкого трения в рессорных комплектах вагона в продольном направлении, кН·с/м. Предполагается, что шины колесной техники могут упруго деформироваться как вдоль, так и поперек вагона.

Выберем положение равновесия системы за начало отсчёта (рис. 2). За обобщённые координаты принимаем отклонение рамы вагоны от положения равновесия x_2 и смещение колёсной техники от своего положения равновесия x_1 [4].

Составим дифференциальные уравнения колебаний механической системы, показанной на рис. 1. Уравнения приведены для определения величины амплитуды подергивания колесной техники. Воспользовавшись методом Даламбера или уравнением Лагранжа второго рода [5], получим следующие системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M\ddot{x}_1 = -c_{ekvx}(x_1 - x_2) - b_{0xj}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + I_{ex} - \sum_{i=1}^n R_{0i} \cdot \frac{a_i}{l_i} - F_{vx} - \\ - [R_{6p}] \cdot n_{6px} \cdot n_{6v}, \\ M_p \ddot{x}_2 = c_{ekvx}(x_1 - x_2) + b_{0xj}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_{ekvwx}x_2 - b_{px}\dot{x}_2 + \\ + \sum_{i=1}^n R_{0i} \cdot \frac{a_i}{l_i} + I_{ex}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Следует отметить, что эквивалентная жёсткость упругих элементов креплений по продольной c_{ekvwx1} оси вычисляется по формуле [2, 6]:

$$c_{ekvwx1} = \frac{\pi 10^{-6} E}{4} d_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{l_i} \frac{a_i}{l_i} \frac{a_i}{l_i}. \quad (2)$$

Эквивалентные жесткости упругих элементов и креплений колесной техники в продольном и поперечном направлениях

определим как жесткости параллельно соединенных пружин [7], представляющих собой сумму эквивалентной жёсткости упругих элементов колесной техники (шин, упругих элементов подвески) в продольном C_{kxx} направлении и эквивалентной жесткости ее креплений C_{ekvx1} :

$$c_{ekvx} = c_{ekvx1} + c_{kxx}. \quad (3)$$

Значения эквивалентной жесткости упругих элементов колесной техники в продольном C_{kxx} направлении и эквивалентного коэффициента вязкого трения b_{0xj} в j упруго-диссипативных элементах связи колесной техники в продольном направлении принимается из соотношений [8]:

$$c_{kxx} = 0,5 \cdot c_{ks}, b_{0xj} = 0,5 \cdot b_{0j}. \quad (4)$$

Проекцию силы аэродинамического сопротивления на продольную F_{bx} ось будем вычислять по формуле, приведенной в [2].

Система дифференциальных уравнений горизонтальных продольных и колебаний (1) является неоднородной. Решение таких систем уравнений представляет в векторном понимании сумму общего решения однородных уравнений и частного решения системы неоднородных уравнений [9].

Полученная система уравнений (1) при необходимости может быть решена численным методом в пакете MatLAB [10].

Для аналитического определения значения амплитуд продольного сдвига колесной техники составим упрощенную схему продольных колебаний (одномассовые расчетные схемы) (рис. 2).

Составим дифференциальное уравнение сдвигов колесной техники массы M по продольной оси [11]. Колесная техника закреплена от перемещений вдоль вагона двумя растяжками 1 и 2 с жесткостями c_r . Длина в равновесном состоянии каждой растяжки и ее предварительный натяг — l и Δ , их нерастянутая длина — l_0 . Растяжки 1, 2 представляют собой парные крепления, увязанные к стоечным скобам платформы (А, В). Начальный угол между растяжками и их проекциями на продольную ось вагона равен α_0 , после сдвига — α .

Пусть колесная техника, а значит, и точки крепления растяжек к ней под действием продольной переносной силы инерции \bar{T}_{ex} получит конечное перемещение x [11].

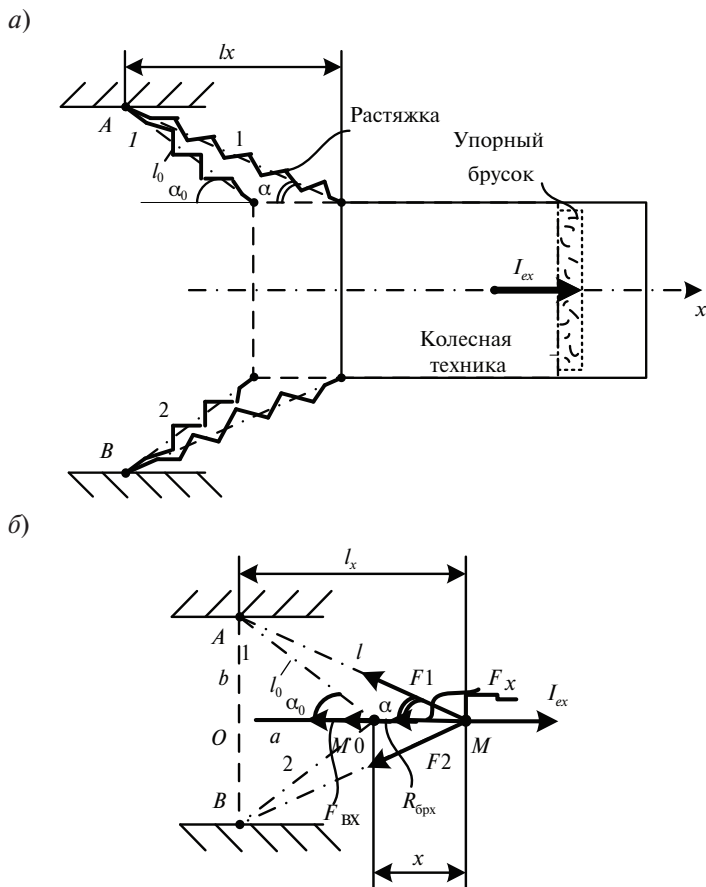


Рис. 2. Одномассовая расчетная схема продольных колебаний колесной техники при перевозке

Примем гладкую связь (без трения) между полом вагона и грузом. При продольном сдвиге на точку будут действовать две упругие силы: \bar{F}_1 и \bar{F}_2 [11]. Сила \bar{F}_1 (рис. 2) по модулю:

$$|\bar{F}_1| = c_{ekvx} (\Delta l_x + \Delta), \quad (5)$$

где Δl – удлинение крепления вследствие перемещения точки, м; Δ – предварительный натяг каждой растяжки, м, определяемый по закону Гука [11]:

$$\Delta = \frac{F_0 l}{EA}, \quad (6)$$

где F_0 — предварительное натяжение пружин, кН.

Удлинение гибкого элемента крепления вследствие продольного перемещения точки (рис. 2, б) определяется по формуле:

$$\Delta l_x = \sqrt{(l_0 \sin \alpha_0)^2 + (l_0 \cos \alpha_0 + x)^2} - l_0, \quad (7)$$

где $\sqrt{(l_0 \sin \alpha_0)^2 + (l_0 \cos \alpha_0 + x)^2} = l$ — конечная длина гибкого элемента крепления, м; α_0 — начальный угол между растяжкой и ее проекцией на продольную ось:

$$\sin \alpha_0 = \frac{AO}{AM_0} = \frac{b_i}{l_0} = \frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}; \quad (8)$$

$$\cos \alpha_0 = \frac{OM_0}{AM_0} = \frac{a_i}{l_0} = \frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}, \quad (9)$$

где a_i, b_i — проекции растяжек соответственно на продольную и поперечные оси, взятые из схем погрузки.

Выполнив преобразования, получим:

$$\Delta l_x = \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} - l_0. \quad (10)$$

Проекция силы \bar{F}_1 на ось x определяется из формулы:

$$F_{1x} = -c_{ekvx} \left(\sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} - l_0 + \Delta \right) \cos \alpha, \quad (11)$$

где α — угол, образованный между направлением перемещения точки x и направлением гибкого упругого элемента:

$$\cos \alpha = \frac{OM}{AM} = \frac{x + l_0 \cos \alpha_0}{l} = \frac{x + l_0 \cos \alpha_0}{\sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2}}. \quad (12)$$

Вследствие симметрии выражение (5) примет вид

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_{2x} = \\ &= -c_{ekvx} x \left(1 + \frac{l_0 \cos \alpha_0 \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} + (\Delta - l_0)(x + l_0 \cos \alpha_0)}{x \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Следовательно, учитывая парность креплений, на точку M вдоль оси x действует сила:

$$R_x = \sum_{k=1}^n F_{kx} =$$

$$= -2c_{ekvx} x \left(1 + \frac{l_0 \cos \alpha_0 \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} + (\Delta - l_0)(x + l_0 \cos \alpha_0)}{x \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2}} \right). \quad (14)$$

Для определения продольных сдвигов колесной техники, используя принцип Даламбера, составим дифференциальные уравнения ее продольных горизонтальных колебаний:

$$M\ddot{x} =$$

$$= -2c_{ekvx} x \left(1 + \frac{l_0 \cos \alpha_0 \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} + (\Delta - l_0)(x + l_0 \cos \alpha_0)}{x \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2}} \right) +$$

$$+ I_{ex} - F_{R0x} - R_{cx} - R_{бpx} - F_{bx}, \quad (15)$$

где R_{cx} — сила вязкого сопротивления упругих элементов колесной техники в продольном направлении; F_{bx} — проекция силы аэродинамического сопротивления на продольную ось [2].

После преобразований уравнение (15) примет вид

$$\ddot{x} + 2b_0 \dot{x} + k_x^2 x \times$$

$$\times \left(1 + \frac{l_0 \cos \alpha_0 \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2} + (\Delta - l_0)(x + l_0 \cos \alpha_0)}{x \sqrt{l_0^2 + 2l_0 \cos \alpha_0 x + x^2}} \right) = a, \quad (16)$$

где k_x — круговая частота свободных колебаний в продольной плоскости, рад/с:

$$k_x = \sqrt{\frac{2c_{ekvx}}{M}}, \quad (17)$$

a — продольное ускорение, м/с²:

$$a = a_{ex} - \frac{R_{\text{грх}} - F_{R0x} - F_{\text{вх}}}{M}. \quad (18)$$

Для получения аналитических решений упростим уравнение (16), приняв, что множитель при $k_x^2 x$ стремится к единице:

$$\ddot{x} + 2b_0 \dot{x} + k_x^2 x = a. \quad (19)$$

Уравнение (19) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Аналитическое решение данного уравнения найдено с использованием команды *dsolve* в пакете Maple [12] и имеет следующий вид:

$$x = e^{(-b_0 + \sqrt{-k_x^2 + b_0^2})t} C_2 + e^{(-b_0 - \sqrt{-k_x^2 + b_0^2})t} C_1 + \frac{a}{k_x^2}. \quad (20)$$

Выражение (20) показывает, что продольные колебания колёсной техники при перевозке складываются из двух видов колебаний [13]:

— первое и второе слагаемое представляют собой свободные и затухающие колебания колесной техники, которыми можно пренебречь при движении подвижного состава на перегоне;

— третье слагаемое представляет собой вынужденные и незатухающие колебания колёсной техники.

Таким образом, аналитически амплитуду продольных горизонтальных колебаний грузов на колесном ходу можно определить по формуле:

$$x_{\text{max}} = \frac{a}{k_x^2}. \quad (21)$$

Полученная формула определения амплитуд горизонтальных продольных колебаний колесной техники при перевозке позволит уточнить существующую методику обоснования креплений данных грузов на открытом подвижном составе и тем самым обеспечит применение при перевозке более рациональный выбор вида и количества реквизита крепления.

Литература

1. Тимухина Е. Н. Основные причины и технологические последствия коммерческих неисправностей вагонов с грузами на колес-

- ном ходу / Е. Н. Тимухина, А.А. Гордиенко // Транспорт Урала. 2015. № 2. С. 32–37. ISSN 1815-9400.
2. Туранов Х. Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок : монография. — Новосибирск : Наука, 2009. — 375 с. ISBN 978-5-02-02-023281-5.
 3. Тимухина Е. Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : дис. ... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.22.08. — Екатеринбург, 2012. — 384 с.
 4. Бать М. И., Джанелидзе Г. Ю., Кельзон А. С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. III (специальные главы механики). — М. : Наука, 1973. — 488 с.
 5. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики / Н. В. Бутенин [и др.] // — СПб : Изд-во «Лань». — В 2 т. — 1998. — 736 с.
 6. Туранов Х.Т. Размещение и крепления грузов в вагонах. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2007. — 365 с. ISBN 978-5-94614-076-8.
 7. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л. : Политехника, 1990. — 272 с.
 8. Бидерман В. Л., Гуслицер Р. Л., Захаров С. П. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытание, эксплуатация). М. : Госхимиздат, 1963. — 383 с.
 9. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. М.: Наука, 1967. — 571 с.
 10. Эдвардс Ч. Г., Пенни Д. Э. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple, MATLAB / пер. с англ. / М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. 3-е изд. — 1104 с.
 11. Рыкова Л. А. Повышение безопасности перевозок на открытом подвижном составе на основе совершенствования методики расчета креплений грузов цилиндрической формы: дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.22.08. — Екатеринбург, 2008. — 130 с.
 12. Дьяконов О. В. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. — М. : ДМК Пресс, 2011. 800 с. ISBN 978-5-94074-751-2.
 13. Портнова О. Ю. Моделирование колебаний закрепленной колесной техники при перевозке железнодорожным транспортом // Транспорт Урала. 2011. №1. С. 25–28. ISSN 1815-9400.

Расчетная оценка усталостной прочности сварных соединений с использованием метода конечных элементов

Д. А. Кокшаров (научный руководитель – А. Э. Павлюков, д-р техн. наук), кафедра «Вагоны», Уральский государственный университет путей сообщения



Рама тележки обеспечивает распределение статических и инерционных нагрузок от кузова, тяговых электродвигателей, тормозного оборудования и рессорного подвешивания, передает тяговые и тормозные силы от колесных пар к кузову электровоза. Современные рамы тележек грузовых электровозов представляют собой тонкостенную сварную конструкцию. От прочности сварных швов зависит надежность самой рамы; практика изготовления сварных конструкций из различных марок сталей и сплавов показывает, что получаемые сварные соединения часто имеют иные прочностные характеристики, чем основной металл. Вызвано это остаточными сварочными, механическими напряжениями, которые приводят к появлению различного рода дефектов (образование трещин, стресс-коррозионных растрескиваний, появление питтингов, ускоренное протекание коррозионных процессов и других).

Предприятия, специализирующиеся на локомотивостроении, для упрочнения чаще всего используют метод комплексной термообработки. Этот способ позволяет получить необходимые механические характеристики сварного соединения и обеспечивает необходимые прочность и надежность сварных соединений. Однако метод комплексной термообработки требует наличия печи, которая требует больших затрат энергетических и финансовых ресурсов, предполагаются также затраты на транспорт и погрузочно-разгрузочные работы, аренду или выделение территории для окончательного остывания обработанных изделий.

Поэтому задача выбора и обоснования альтернативного способа послесварочной обработки сварных соединений рам тележек тягового подвижного состава актуальна.

Основной критерий при выборе метода послесварочной обработки швов — усталостная прочность. Доля усталостных разрушений сварных конструкций составляет примерно 30 % общего числа их преждевременных повреждений и отказов.

Исследования поведения сварных несущих конструкций в условиях динамического нагружения проводятся по соответствующим ГОСТам, в основу которых положена модель многоциклового усталости, использующая линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений.

При расчете сварных соединений принимается ряд допущений [1]: не учитываются концентраторы напряжений, связанные с геометрией сварного шва, деформации сварного шва считаются малыми и пропорциональными напряжениями, материал шва считается однородным и изотропным, не рассматриваются сварочные деформации, механические свойства материала сварного шва и околошовной зоны принимаются такими же, как у основного металла, сварочный шов принято считать равнопрочным с основным металлом.

Все эти допущения приводят к ряду погрешностей и достаточно приближенной оценке напряжений в зоне сварного шва. От отдельных допущений можно отказаться, если для расчетов использовать метод конечных элементов (МКЭ), когда вся рассматриваемая конструкция разбивается на большое число конечных элементов с необходимым их измельчением в зонах высокой концентрации напряжений.

Один из способов реализации такой задачи, предложенный в [2] и реализованный в работе [3], заключается в трехэтапном подходе к ее решению, когда рассматриваемая конструкция разбивается на некоторое количество подконструкций, позволяющих получить более точные результаты в некоторой части модели. Из-за ограничений на общее количество степеней свободы в конечно-элементной модели, связанных с производительностью вычислительных машин, получить корректные результаты в области концентрации напряжений со сложной геометрией не представляется возможным. Результаты расчета в других областях модели в могут быть вполне корректными; такую модель называют макромоделью.

Суть этого метода заключается в построении интересующей части модели (фрагмента конструкции) с конечно-элементной сеткой, необходимой для получения корректных результатов [4]. Узловые перемещения, полученные в результате решения макрозадачи, интерполируются на поверхностях отреза — поверхностях, ограничивающих фрагмент конструкции, — на более мелкую сетку. Эти перемещения выступают в качестве кинематических граничных условий для под-

конструкций. Метод построения фрагментов конструкции основан на принципе Сен-Венана [5], согласно которому действие отброшенной части модели может быть заменено статически эквивалентной системой сил, приложенных на границах отрезка.

Основной критерий для оценки усталостной прочности конструкций тягового подвижного состава на стадии проектирования – расчетный коэффициент запаса сопротивления усталостной прочности [1], который позволяет оценить прочность конструкции под действием циклически повторяющейся нагрузки. Нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине или по величине и знаку, могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести (или предел прочности). Такое разрушение принято называть усталостным. Материал как бы устает под действием многократных периодических нагрузок. Разрушение такого рода особенно характерно для большинства машиностроительных конструкций, поэтому крайне важно предупредить разрушение на этапе проектирования.

На основании вышесказанного составлен алгоритм определения расчетного коэффициента запаса сопротивления усталости (рис. 1).

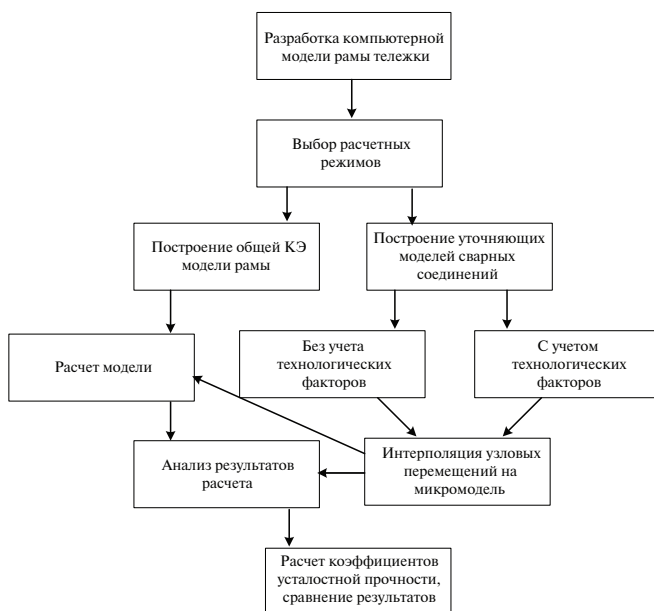


Рис. 1. Алгоритм определения расчетного коэффициента запаса сопротивления усталости

Компьютерная модель построена в ПО Siemens NX с учетом толщин всех листов, материалов и основных конструктивных элементов (рис. 2).

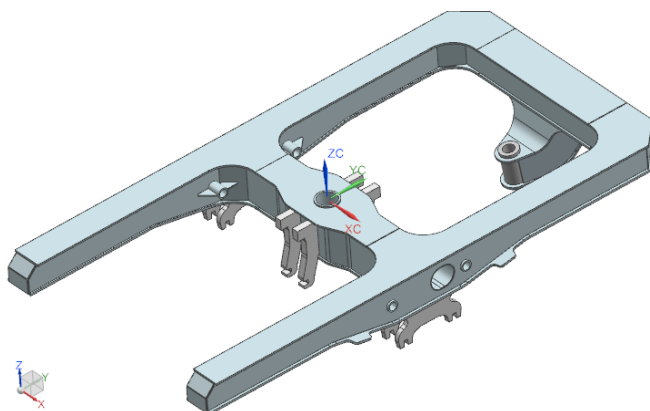


Рис. 2. Компьютерная модель рамы тележки

Основные механические характеристики материала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэф. Пуассона	Предел текучести s_T , МПа	Предел прочности s_B , МПа	Предел выносливости s_{-1} , МПа
325-09Г2С	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	325	450	220
325-10Г2С1	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	325	450	220
295-09Г2С	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	295	430	210
265-09Г2С	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	265	430	205
40Х	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	785	930	380

В качестве расчетных приняты: расчетный режим 1 (статический, электровоз находится в состоянии покоя) и расчетный режим 2 (соответствующий режиму движения по прямому участку пути с конструкционной скоростью). Для динамического режима необходимо учесть, что при эксплуатации на раму тележки, кроме статических

нагрузок от веса кузова с оборудованием, силы тяги (торможения) и реакций от момента и веса тяговых двигателей, действуют большие динамические вертикальные и горизонтальные нагрузки.

Тонкостенные части конструкции рамы тележки описаны оболочечными 2D-элементами, а массивные части (кронштейны крепления) – твердотельными 3D-элементами. Элементы, необходимые для передачи усилий между кузовом, рамой тележки и колесной парой моделируются балочными 1D-элементами, работающими на растяжение, сжатие и кручение. Амортизаторы описаны 1D-упруго-демпферными элементами, обеспечивающими связь двух степеней свободы с заданной жесткостью.

Расчетная схема с указанием действующих нагрузок и ограничений для статического расчетного режима показана на рис. 3, для эксплуатационного режима – на рис. 4.

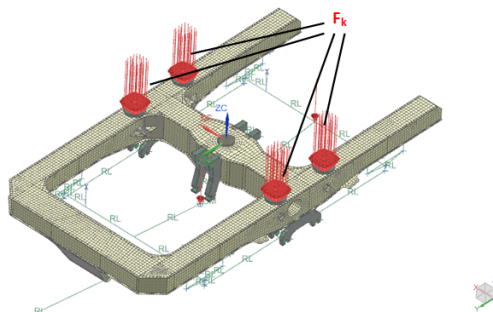


Рис. 3. Расчетная схема для статического режима

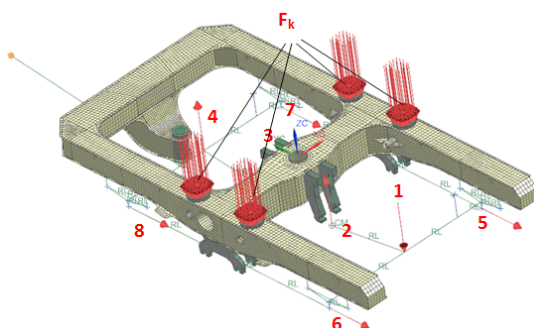


Рис. 4. Расчетная схема для эксплуатационного режима

На рис. 3 и 4: силы F_k – это силы, действующие от массы кузова на тележку, цифрами 1–4 показаны реакции от вращающихся частей двигателя, 5–8 – тяговые усилия

Результаты расчета показаны на рис. 5.

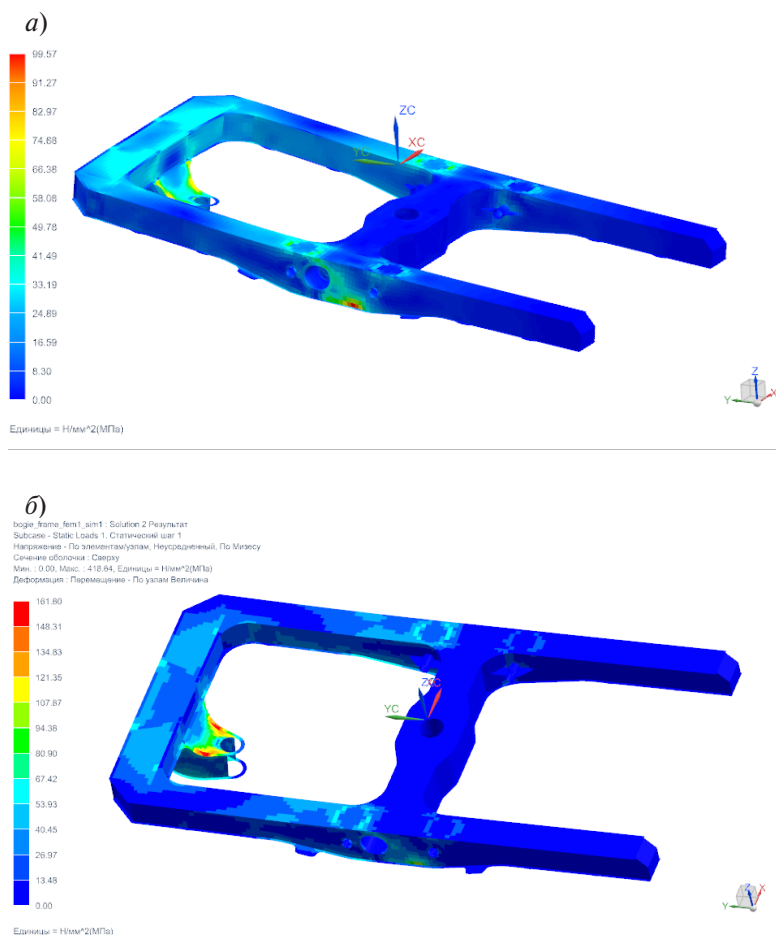


Рис. 5. Эпюры напряжений для статического (a) и эксплуатационного (б) режимов

Данный расчет позволяет оценить общие напряжения в конструкции, однако сварные соединения в конструкции являются концен-

траторами напряжений, из-за чего достоверно оценить прочность и долговечность сварных швов нельзя. Поэтому на основании полученных результатов производится уточняющий расчет наиболее нагруженных сварных швов с необходимым размером конечного элемента в зоне концентрации напряжений.

Инженерная практика показывает, что сгущение сетки необходимо проводить до тех пор, пока не будет достигнута сходимость результатов расчета. Обычно после проведения расчета в интересующем месте производится сгущение сетки и запускается повторный расчет. В этом случае использование метода подконструкций также позволяет существенно сократить время, необходимое на расчет, т.к. подбор размера конечных элементов можно производить только для одной из подконструкций, а на остальных сразу выстраивать сетку элементами нужного размера.

В доказательство этого был произведен расчет таврового сварного соединения со скосом одной кромки без учета геометрии шва с использованием ПО Siemens NX 10.0 (рис. 6–8).

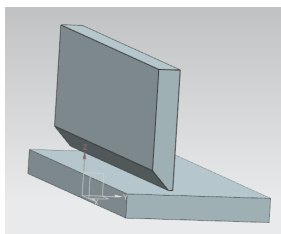


Рис. 6. Исследуемая трехмерная модель таврового соединения сварным швом

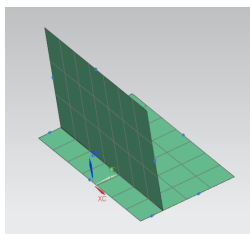


Рис. 7. Конечно-элементная модель с размерностью 20 мм

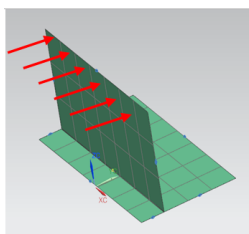


Рис. 8. Расчетная схема с указанием нагрузок и ограничений

По геометрии исходной модели построена расчетная оболочечная модель [6] из четырех узловых 2D-элементов. Принято, что размерность сетки на макромодели составляет 20 мм. Из этого условия размер элементов для первого расчета принят 20 мм (см. рис. 2). В расчетной модели учтены толщины свариваемых листов (заданием ассоциативных данных сетки). В качестве материала выбран стандартный материал из библиотеки Steel. Основные механические характеристики сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Основные механические характеристики материала

Параметр	Значение
Плотность, кг/мм ³	7,829·10 ⁻⁶
Предел текучести при 20 °С, кПа	137895
Сила при предельном растяжении при 20 °С, кПа	276000
Коэффициент Пуассона при 20 °С	0,288
Модуль Юнга, кПа	206,94·10 ⁶

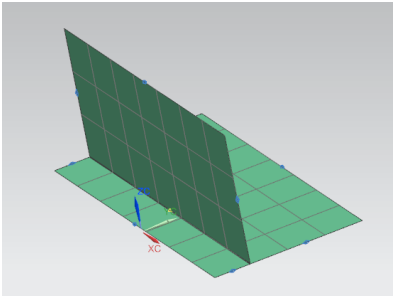


Рис. 9. Конечно-элементная модель с размерностью 20 мм

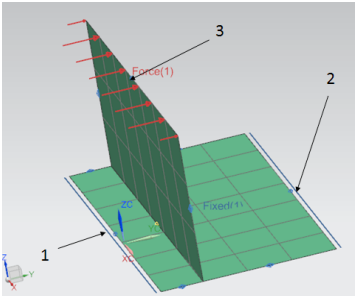


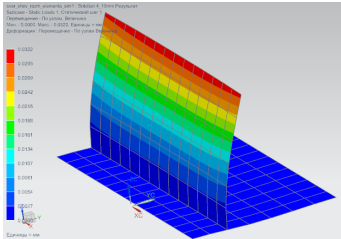
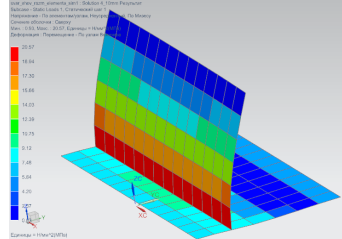
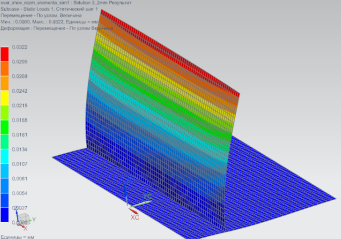
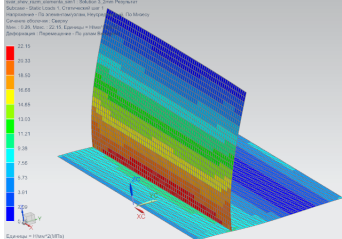
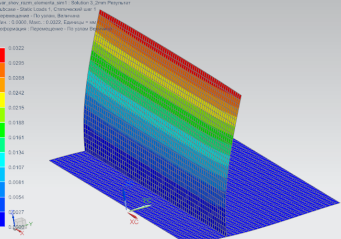
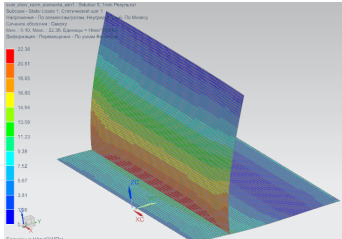
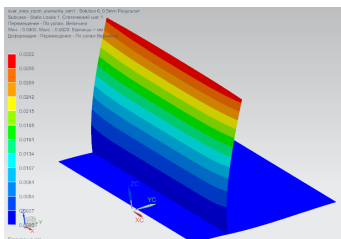
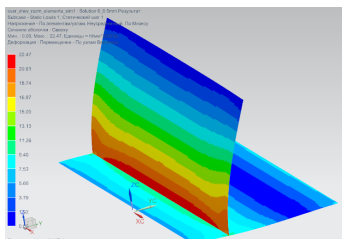
Рис. 10. Расчетная схема с указанием нагрузок и ограничений

К ребрам 1 и 2 расчетной модели приложено ограничение в виде заделки, лимитирующее все перемещения и вращения в этих узлах (рис. 10). К ребру 3 приложена нагрузка 1000 Н по направлению оси Oy. Далее модель посчитана в программном комплексе NX Nastran. Результаты расчета перемещений в узлах представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты тестовых расчетов

КЭ	Перемещение в узлах	Напряжение в узлах
Размерность сетки 20 мм		

КЭ	Перемещение в узлах	Напряжение в узлах
Размерность сетки 10 мм		
Размерность сетки 2 мм		
Размерность сетки 1 мм		
Размерность сетки 0,5 мм		

В результате расчета получено, что максимальные перемещения составили 0,0323 мм, напряжения – 18,66 МПа. Практика расчетов МКЭ показывает, что для получения достоверных результатов размерность элементов должна составлять не менее 1/20 по отношению

к длине пролета и минимум два элемента к его ширине. Так, например, для пластины с размерностью 200×20 мм минимальный размер элемента должен быть 10 мм [4]. Для расчета макромодели такая размерность вполне достаточна, однако для микромодели требуется снизить размерность сетки.

На следующем шаге рассчитывалась эта же модель, с такими же граничными условиями и нагрузками, но уже с размерностью сетки 10 мм. Результаты расчета представлены в таблице 3.

В результате расчета получено, что максимальные перемещения составили 0,0322 мм, напряжения – 20,57 МПа. По рисункам видно, что распределение напряжений более плавное, и значение максимальных напряжений на 1,91 МПа больше с размерностью 10 мм. Из этого следует, что для достоверной оценки напряжений в данной модели размерность элементов в 20 мм не подходит.

Далее произведено дальнейшее уменьшение размера элементов расчетной модели с сохранением нагрузки и ограничений. Результаты расчета также сведены в таблицу 3.

Полученные значения перемещений в узлах и напряжений сведены в таблицу 4.

Таблица 4

**Результаты расчета перемещений и напряжений в узлах
в зависимости от размерности элементов**

Размер, мм	Перемещение в узлах, мм	Напряжение в узлах, МПа
20	0,0323	18,66
10	0,0322	20,57
5	0,0322	21,47
2	0,0322	22,15
1	0,0322	22,36
0,5	0,0322	22,47

Анализ таблицы 4 показывает, что для оценки перемещений в узлах (для рассматриваемой модели) размер элемента должен составлять 10 мм, для оценки напряжений – 2 мм, так как погрешность результатов расчета по сравнению с размером элемента 1 мм составляет меньше 1 % (0,948 %), дальнейшее уменьшение размерности сетки увеличит время расчета, а погрешность результатов расчета будет настолько мала, что не повлияет на конечный результат. Так, например, погрешность результатов для сеток с размерами 2 мм и 1 мм со-

ставляет 0,948 %, а время расчета для сетки размером 1 мм больше в 8 раз, чем для сетки 2 мм.

На основании вышесказанного построены и посчитаны уточняющие модели сварных соединений (рис. 1); в моделях учтены технологические зазоры и непровары.

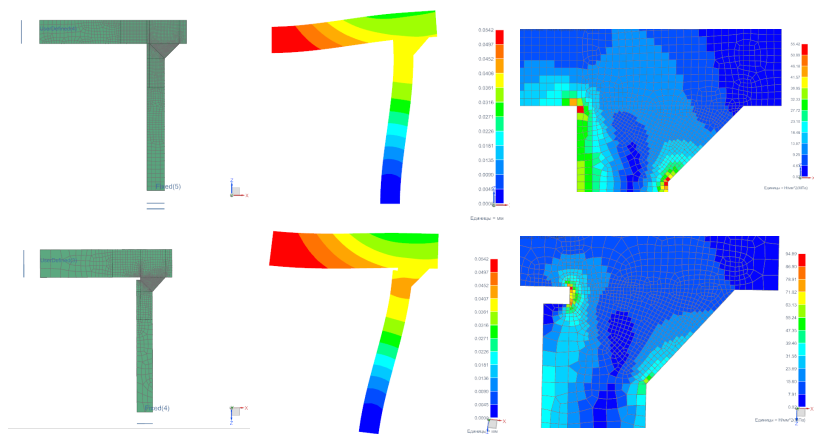


Рис. 11. КЭ модели и результаты расчета тавровых сварных соединений без учета (верхний ряд) и с учетом (нижний ряд) технологических факторов

Расчет коэффициента запаса усталостной прочности произведен на основании теории линейного суммирования повреждения. Согласно требованиям ГОСТ Р 55513–2013 [1], при отсутствии представительной гистограммы распределения амплитудных значений напряжений, характеризующих нагруженность объекта при эксплуатации, коэффициент запаса сопротивления усталости n вычисляются по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1p}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_a + \psi_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_m}{\alpha_{\sigma}}}.$$

Напряжения, полученные от действия статической нагрузки, принимаем за нулевую точку амплитуды цикла нагружений (рис. 12).

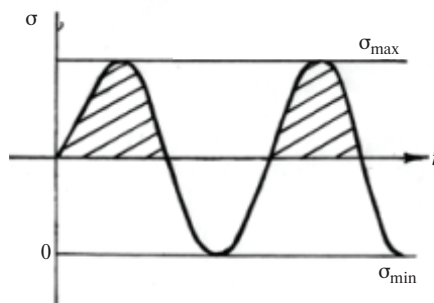


Рис. 12. Амплитуда напряжений цикла

s_{\max} — максимальное напряжение цикла (наибольшее в алгебраическом смысле напряжение цикла); s_{\min} — минимальное напряжение цикла (наименьшее в алгебраическом смысле напряжение цикла)

Тогда амплитуду цикла s_a можно определить по формуле:

$$s_a = s_{\text{эксп}} - s_{\text{стат}},$$

где $s_{\text{эксп}}$ — максимальные напряжения, полученные для эксплуатационного режима, МПа; $s_{\text{стат}}$ — максимальные напряжения, полученные для статического режима, МПа.

Средняя амплитуда цикла s_m :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{эксп}} - \sigma_{\text{стат}}}{2}.$$

Подставляя значения в формулы получим:

$$s_a = 94,69 - 76,18 = 18,51 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = \frac{94,69 - 76,18}{2} = 9,26 \text{ МПа};$$

$$n = \frac{147}{2,06 \cdot 18,51 + 0,3 \cdot \frac{9,26}{1,4}} = 3,67.$$

Расчетный коэффициент запаса усталостной прочности для самого слабого сварного соединения составил 3,67, что превышает значение требуемого коэффициента 2.

Данный метод расчета позволяет более точно оценивать напряжения в зоне сварного шва, учитывать технологические зазоры и допуски при изготовлении, учитывать неоднородность материалов свариваемых деталей и сварного соединения, выполнять оценку остальных сварных соединений на макромодели на основании скорректированных коэффициентов концентрации напряжений под рассматриваемую конструкцию.

Литература

1. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М. : Стандартинформ, 2013.
2. Винокуров В. А. Сварные конструкции: механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев / под ред. Б. Е. Патона. М. : Машиностроение, 1996. 576 с.
3. Василенко Д. А. Совершенствование методов расчета сопротивления усталости сварных соединений рам длиннобазных вагонов-платформ : дисс. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. СПб, 2010.
4. Шимановский А.О., Путятю А.В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики : учебно-методическое пособие. Гомель : БелГУТ, 2008. 61 с.
5. Фикс Д. Теория метода конечных элементов. М. : Мир, 1977. 351с.
6. Теплых А.В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных сварных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Magazine of civil engineering. 2011. №3.

Организация тяжеловесного и длинносоставного движения в России

А.С. Колышев (научный руководитель – С. В. Рачек,
д-р экон. наук), кафедра «Экономика транспорта», Ураль-
ский государственный университет путей сообщения



Железнодорожный транспорт, как правило, единственно вероятное решение в части организации перевозок руды и угля от мест добычи к экспортным портам, предприятиям черной металлургии и электростанциям [1]. Тяжеловесные железнодорожные перевозки могут осуществляться по системе «от двери до двери», как это часто практикуется при транспортировке угля в Китае и США, либо мо-

гут являться исходным (конечным) звеном в системах мультимодальных перевозок.

В нашей стране вождение тяжеловесных поездов началось в 1935 г., когда развернулось движение за освоение новейшей техники и высочайшей производительности труда.

Значительная часть железнодорожного транспорта из-за первой мировой войны, гражданской войны и военной интервенции была уничтожена. Из строя выведено 15 тыс. вагонов и 70 % паровозов, около 80 % пути, около четверти парка вагонов и большая часть паровозного парка нуждались в капитальном ремонте, разрушено и повреждено свыше 4 000 мостов, 400 паровозных депо и вагонных мастерских, около 3 000 стрелочных переводов, более 5 000 гражданских сооружений, разрушена практически вся связь и т.д. Материальный ущерб железнодорожному транспорту в ценах 1920 г. составил более 1 млрд руб. золотом [2]. В стране свирепствовали голод, тиф, везде царила разруха, не хватало локомотивов, вагонов, пропускная и провозная способность железных дорог была резко ограничена.

Восстановление народного хозяйства, индустриализация страны требовали от железнодорожного транспорта увеличения грузовых перевозок, особенно массовых грузов металлургической, угольной и лесной промышленности.

В этих условиях железнодорожники в 1920–1930-х гг. инициировали движение по увеличению пропускной и провозной способности железных дорог в первую очередь за счет использования внутренних ресурсов. Широкое развитие получило вождение тяжеловесных поездов, масса которых значительно превышала установленную норму. Это позволяло дорогам перевозить сверх плана дополнительное количество груза при том же числе локомотивов и снизить затраты на перевозки.

Так, например, машинист локомотивного депо Славянск Донецкой железной дороги Петр Кривонос 1 июля 1935 г. провел тяжеловесный угольный поезд из Славянска в Лозовую с технической скоростью, превысившей норму практически на 9 км/ч.

Кривоносовское и всем известное стахановское движения быстро распространились по всем железным дорогам страны. Кривоноса поддерживали не только машинисты, но и специалисты остальных профессий. Поездной диспетчер Днепропетровского отделения Приднепровской дороги Николай Закорко перестроил способы регулирования движения поездов, обеспечив пропуск их с наименьшим числом остановок. Лишь за первое полугодие 1940 г. передовые машинисты провели 131 тыс. тяжеловесных поездов и дополнительно перевезли 38 млн т грузов.

Однако мирный труд продолжался недолго. В 1941 г. началась война, которая нанесла железнодорожному транспорту огромный урон: на западе было разрушено 65 тыс. км пути, 13 тыс. мостов, свыше 4 100 станций, 1 600 водонапорных башен, свыше 300 паровозных депо, 129 ремонтных и машиностроительных заводов, 500 тыс. км проводов связи, взорвано и угнано около 16 тыс. паровозов и 428 тыс. вагонов и т.д. [2].

После войны усилия страны по восстановлению народного хозяйства были направлены на использование опыта вождения тяжеловесных поездов. Опыт, полученный в результате воплощения распоряжения МПС № 500/Ц, кроме установления локальных рекордных достижений, способствовал выяснению слабых и сильных сторон составляющих железной дороги, как взаимоувязанной системы.

Установлено, что при тяжеловесных перевозках значительно ухудшается характер протекания переходных процессов в поезде; продольные нагрузки превышают пределы прочности ударно-тяговых

устройств, что приводит к разрывам соединений; ухудшается управляемость работой тормозов; при продолжительных и экстренных торможениях развиваются запредельные продольные усилия, которые сопровождаются повышенным износом в соединениях, и это приводит к серьёзным нарушениям безопасности движения поездов.

С увеличением массы состава и загрузки вагонов уменьшается удельное сопротивление движению, а следовательно, и расход энергии на единицу перевезенного груза. Поэтому вождение тяжеловесных поездов обеспечивает снижение расхода энергии, повышает провозную способность дороги и ускоряет доставку грузов.

Тяжеловесное и длинносоставное движение приводило и приводит к комплексным результатам: разработка и использование нового подвижного состава; оптимизация парка локомотивов и вагонов; совершенствование пути; использование передовых приемов и способов управления движением и перевозок (контейнерных); использование механизации и автоматизации при производстве погрузочно-разгрузочных и транспортных работ; улучшение условий труда; повышение безопасности на железных дорогах и др.

Все это способствует повышению пропускной и провозной способности, пересмотру норм и правил строительства и эксплуатации железных дорог, созданию новых образцов техники и технологий и превращению железных дорог в единый народнохозяйственный комплекс.

Для использования тяжеловесного и длинносоставного движения главное — превращение железной дороги в единую взаимоувязанную систему. Экономический выигрыш от использования тяжеловесного и длинносоставного движения также важен, но имеет вспомогательное значение.

На железных дорогах России встречаются следующие разновидности грузовых поездов повышенной массы и длины:

- грузовые длинносоставные (их длина превышает максимальную норму, установленную графиком движения на участке следования хотя бы на один условный вагон [3]);
- грузовые тяжеловесные (вес для соответствующих серий локомотивов на 100 т и более превышает установленную графиком движения весовую норму на участке следования [3, 4]);
- грузовые повышенного веса (весом более 6 000 т);
- грузовые повышенной длины (350 осей и более);
- соединённые грузовые (из двух и более сцепленных между собой грузовых поездов, с действующими локомотивами в голове каждого поезда).

Таким образом, тяжеловесное грузовое движение — это технологический процесс организации движения грузовых поездов с массой состава 6 300 т и более, включающих в состав вагоны с нагрузкой на ось 23,5–25,0 тс и более.

На сети железных дорог России выделены 13 направлений, на которых целесообразно использовать для перевозок массовых сырьевых грузов поезда повышенной массы и длины (ППМД). Суммарно они составляют свыше 28 тыс. километров. Для использования таких поездов предполагается:

- на 21 % станций удлинить до 1 050 м приемоотправочные пути для поездов унифицированной нормы веса и длины;
- разработать отраслевой стандарт на ППМД для комплексного решения вопросов подвижного состава, пути и управления;
- разработать единую терминологическую базу тяжеловесного движения;
- сертифицировать системы обеспечения безопасности движения ППМД.

На сегодня в стране выполнены широкие исследования в области тяги, выбора веса поезда, определения потребных тяговых осей, рациональных режимов ведения поездов большой массы и длины в условиях смешанного движения грузовых и пассажирских поездов повышенной массы до 18 тыс. т на большие расстояния. На многих направлениях ОАО «РЖД» количество проведенных ППМД исчисляется уже тысячами. Так, только по Транссибу за последние четыре года прошли более 7 тыс. тяжеловесных и свыше 8 тыс. соединенных поездов массой каждый более 12 тыс. тонн.

Поэтому в ОАО «РЖД» одну из возможностей обеспечения всевозрастающей провозной способности видят в организации движения ППМД. Для этого предусматривается выполнение работ по подготовке путевого хозяйства, энергоснабжения, СЦБ и связи для обеспечения беспрепятственного пропуска грузовых поездов массой до 18 тыс. т. с повышенными осевыми нагрузками до 30 т/ось, вагонов перспективного габарита $T_{пр}$, локомотивов мощностью более 10 тыс. кВт, способных преодолевать многочисленные подъемы и спуски. Эффект от данных мероприятий:

- уменьшение парка подвижного состава на 20 %;
- увеличение производительности каждого вагона на 9,2 %;
- увеличение провозной способности железных дорог до 15 %;
- снижение эксплуатационных затрат до 5 % [5].

1. При развитии тяжеловесных и длинносоставных перевозок зафиксирован рост эффективности работы железной дороги и повышение ее конкурентоспособности.

2. Применение современных технологий может сделать подобные перевозки безопаснее, чем при использовании обычных грузовых поездов.

3. Развитие тяжеловесного движения способно снизить транспортные расходы грузоотправителей.

4. Для обеспечения качественного и безопасного сервиса предлагается продолжить обмениваться опытом со странами, входящими в Ассоциацию тяжеловесного движения, по таким направлениям, как совершенствование инфраструктуры, внедрение технических средств для организации движения тяжеловесных поездов (интеллектуальные системы вождения для локомотивов, распределенные по длине состава), создание инновационного тягового парка и вагонов, позволяющих существенно увеличить массу поезда.

5. Не менее актуальным является совершенствование нормативной правовой базы, нацеленной, в частности, на унификацию требований к обеспечению безопасного вождения тяжеловесных и длинносоставных поездов.

Литература

1. Курбасов А. С. Тяжеловесное движение грузовых поездов на российских железных дорогах: за и против. СПб : Наука и транспорт, 2012. №3. С. 15–17. ISSN 2306-9112.
2. История железнодорожного транспорта России и Советского Союза. Т. 2: 1917–1945 / Коллектив авторов / СПб : 1997. 416 с. ISBN 5-85952-005-0.
3. Приказ Минтранса РФ от 21 декабря 2010 г. № 286 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
4. Распоряжение ОАО «РЖД» от 28 августа 2012 №1704р «Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД».
5. ОАО «Российские железные дороги». Развитие тяжеловесного движения. URL: http://annrep.rzd.ru/reports/public/ru?STRUCTURE_ID=4538&.

Выбор системы управления принудительным наклоном кузова перспективного отечественного подвижного состава

А. С. Митраков (научный руководитель – В. Ф. Лапшин, д-р. техн. наук, кафедра «Вагоны», Уральский государственный университет путей сообщения, консультант – Д. Я. Антипин, канд. техн. наук, кафедра «Подвижной состав железных дорог», Брянский государственный технический университет), Уральский государственный университет путей сообщения



На современном этапе развития железнодорожных пассажирских перевозок основным направлением их совершенствования является повышение маршрутных скоростей движения и сокращение времени нахождения пассажира в пути. Это позволит увеличить конкурентоспособность железнодорожного транспорта. Основная проблема повышения маршрутных скоростей заключается в ограничениях, накладываемых на подвижной состав в кривых участках пути. Максимально допустимая скорость движения железнодорожного подвижного состава в кривых ограничивается требованиями обеспечения безопасности (в отношении схода с рельсов и стабильности верхнего строения пути) и необходимого уровня комфорта для пассажиров. И здесь можно применять поезда, оборудованные системой принудительного наклона кузова [1]. Использование системы принудительного наклона кузова позволяет уменьшить некомпенсированное поперечное ускорение, действующее на пассажира, тем самым повысить скорость движения на линиях с многочисленными кривыми без ущерба для безопасности и комфорта поездки.

Цель настоящей работы – выбор стратегии управления наклоном для перспективных разработок отечественного подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова в кривых, на примере модернизированной конструкции электропоезда ЭД4М [2].

Применение систем управления наклоном кузова предназначено для обеспечения безопасности и комфорта пассажиров путем создания адекватного управляющего воздействия на исполнительные механизмы единиц подвижного состава, принудительно наклоняющие кузов при прохождении кривых участков пути для компенсации возникающей центробежной силы.

Для оценки уровня комфорта, обеспечиваемого системой, при прохождении кривых участков пути может быть использована методика, предложенная в [3]. Методика основана на сравнении уровня комфорта пассажиров в кривых участках пути, обеспеченного рассматриваемой системой управления наклоном кузовов с теоретическим вариантом «идеальной системы», обеспечивающей максимальный уровень комфорта пассажиров. Уровень комфорта пассажиров целесообразно оценивать на основе индекса «комфортность пассажиров», рекомендуемого европейским стандартом EN 12299 [4] и определяемого по зависимости:

$$P_{CT} = 100 \cdot \left\{ \max \left[A \cdot |\ddot{y}_{ls}|_{\max} + B |\ddot{y}_{ls}|_{\max} \cdot C; 0 \right] + \left(D \cdot |\dot{\phi}_{ls}|_{\max} \right)^E \right\}, \quad (1)$$

где — боковое ускорение кузова, м/с²; — изменение бокового ускорения кузова в течение 1 с, м/с³; — скорость поворота кузова, рад/с; A , B , C , D , E — постоянные, принимаемые в соответствии с [4].

Индекс «комфортность пассажиров» отражает процент пассажиров находящихся в положениях «сидя» и «стоя» во время движения подвижного состава в кривых участках пути и испытывающих дискомфорт. Выражение (1) указывает на зависимость индекса от непогащенного бокового ускорения, скорости его изменения (рывки), а также от скорости наклона кузова.

Теоретически, система управления должна путем наклона кузова в кривых обеспечивать такой же уровень комфорта, как и в поездах, не оборудованных системой и проходящих кривые с пониженными скоростями. Для этого введем понятие «идеальный наклон», при котором угол наклона кузова при входе в кривую должен постепенно возрастать в согласовании с увеличением величин поперечных ускорений и угла возвышения наружного рельса. Это даст возможность получить «идеальные» значения индекса комфорта пассажиров.

Переходя от идеализированной системы управления к реальной, адаптированной к отечественным условиям эксплуатации, необходимо сформулировать основные критерии выбора на основе анализа достоинств и недостатков подходов к управлению принудительным наклоном кузовов железнодорожного подвижного состава в кривых [5].

Подходы к управлению наклоном кузовов в целом можно разделить на две группы, основанные на отслеживании изменений в геометрии пути, данных путевых меток и систем глобального позиционирования. Первая – «обнуление», полная компенсация ускорений кузова, «командное управление» и подход «опережающего срабатывания». Вторая – подходы, использующие комбинации методов определения местоположения подвижного состава: путевые метки, одометры, системы глобально позиционирования GPS/ГЛОНАСС.

Один из первых подходов к управлению, используемых на подвижном составе, основывается на принципах полной компенсации измеренного поперечного ускорения при установившемся движении в кривой. Обратная связь в такой системе обеспечивается установленным на кузове акселерометром. Преимущество заключается в расположении датчика, выступающего в роли механического фильтра случайных неровностей пути, после второй ступени подвешивания. При этом нахождение акселерометра в наклоняемом кузове может вызывать взаимовлияние подвешивания и системы динамического мониторинга, что приводит к возникновению проблем стабильности системы управления.

Опыт реальной эксплуатации подвижного состава, оборудованного системами управления, основанными на данной стратегии, показал, что полная компенсация боковых ускорений связана с большой скоростью наклона и не обеспечивает оптимального комфорта. Исследования показали, что при полной компенсации центробежной силы у пассажиров в дневное время суток наблюдается эффект укачивания из-за несогласованности информации от вестибулярного аппарата и наблюдаемой визуальной картиной [6]. При этом скорость поворота и рывки усиливают сенсорный конфликт. Для количественной оценки уровня дискомфорта пассажиров, испытываемого вследствие данного эффекта, предлагается «коэффициент укачивания», рассчитываемый по зависимости

$$MSDV_z(t) = k_{MSDV} \sqrt{\int_0^t a_{wf}^2(t) \cdot dt}, \quad (2)$$

где a_{wf}^2 — частотно-взвешенное вертикальное ускорение; м/с²; $k_{MSDV} = 1/3$ — коэффициент для смешанного населения взрослых женщин и мужчин, не способных к адаптации.

По результатам теоретических исследований и натурных экспериментов для снижения эффекта укачивания предложено ограничивать компенсацию боковых и угловых ускорений в кривых участках пути на уровне 60–75 % от величины полной компенсации [6].

Дальнейшим развитием подхода «обнуления» стала стратегия «управление командами», обеспечивающая возможность частичной компенсации ускорений. Это достигается введением коэффициента усиления, изменяющегося в пределах от 0 (система отключена) до 1 (полная компенсация непогашенного ускорения). Система управления, основанная на таком подходе, кроме акселерометра дополнена гироскопами для увеличения чувствительности и возможности отслеживать возвышение наружного рельса. Подобный эффект может быть также получен и с использованием «обнуляющей» системы управления путем введения в контроллер обратного угла, но это усложняет процесс управления.

В системах, основанных на «командном» подходе, датчики традиционно располагаются на тележке и не испытывают влияния параметров подвески. Это позволяет вынести его за контур управления и повысить стабильность системы. Однако из-за жесткости связей с тележкой акселерометр воспринимает ускорения не только в кривых, но и на случайных неровностях, что может привести к ошибочному срабатыванию системы на прямых участках пути. Исключение самопроизвольного срабатывания системы осуществляется за счет использования фильтра Кальмана [7] при расчете управляющего воздействия на исполнительные механизмы. Фильтр предназначен для рекурсивного дооценивания вектора состояния априорно известной динамической системы, то есть для расчёта текущего состояния системы используется текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Введение фильтра снижает влияние неровностей пути на систему и обеспечивает удовлетворительное прохождение прямых участков пути, но приводит к задержке срабатывания системы в кривых участках.

Указанный недостаток устранен в стратегии управления, построенной на принципе «опережающее срабатывание», применяемой, в частности, на высокоскоростных поездах шведских железных дорог серии X2000 [8].

В системах управления, основанных на стратегии «опережающее срабатывание», сигнал, получаемый от датчиков, установленных на

тележках головных вагонов поезда, передается в цифровом виде на последующие вагоны с соответствующей временной задержкой. При этом необходим учет скорости и направления движения. Недостаток — сложная схема исполнения и необходимость передачи информации между вагонами. Кроме этого, в подобных системах головной вагон либо выключается из работы системы, либо функционирует с задержкой.

Решение указанной проблемы возможно за счет использования стратегии управления, основанной на данных систем глобального позиционирования, подобно используемой на поездах высокоскоростных линий Shinkansen (Япония, JR Central) [8].

В таком подходе к управлению используется бортовой компьютер с заранее записанной информацией о кривых участках пути, включая кривизну, возвышение наружного рельса и т.д. Система построена на передаче необходимой информации из базы данных к устройству наклона кузова при достижении подвижным составом точки входа в кривой участок пути. Основным вопросом для такой стратегии управления является определение точного местоположения. В рамках данного подхода в местах входа в кривой участок пути устанавливаются путевые метки, при приближении к которым бортовой компьютер дистанционно считывает необходимую информацию и передает к устройствам наклона кузова. При выходе из кривой бортовой компьютер получает сигнал от следующей метки о необходимости завершения наклона кузова. Такая система управления наклоном обеспечивает большую плавность работы в кривых участках пути и стабильность в прямых вне зависимости от уровня неровностей пути. Недостатком такого подхода является высокая стоимость системы, сложность организации протяженной инфраструктуры и невозможность использования подвижного состава на других маршрутах без предварительной подготовки. Дополнительно при использовании дистанционно считываемых путевых меток существует вероятность несчитывания/ошибочного считывания информации со стационарного передатчика. Для повышения надежности система управления наклоном может быть дополнена одометром, учитывающим пробег вагона, что позволяет контролировать путь, пройденный между путевыми метками. Недостатком использования одометра является наличие эффекта накопления погрешности.

Исключение недостатков одометра возможно за счет дополнения стратегии управления данными глобального позиционирования систем GPS/ГЛОНАСС. Применение спутниковой навигации позволя-

ет определять глобальные координаты подвижного состава, что делает возможным частичный отказ от путевых меток. При этом стратегия управления, основанная на данных глобального позиционирования, не может быть использована в качестве основной вследствие ограниченной надежности и возможной потери сигнала от спутников. Для оценки возможности использования таких систем с точки зрения их надежности может быть использован показатель надежности приема R , определяемый по зависимости [6]

$$R = \left(1 + \frac{240}{(t+8)^2} \right) + \left(\frac{2,4}{0,5 + HDOP} + h \right), \quad (3)$$

где R — показатель надежности приема; t — время обновления данных; $HDOP$ — горизонтальная точность; h — коэффициент, зависящий от количества спутников в зоне приема.

В зависимости (3) горизонтальная точность $HDOP$ является оценкой степени дисперсности спутников в небе и получается приемником вместе с данными о местоположении. $HDOP$ определяется по шкале от 3 до 8, где 3 — высокая точность, 8 — низкая. Коэффициент h зависит от количества доступных спутников.

$$h = \begin{cases} 0, & \text{при } n < 3 \\ n, & \text{при } n \geq 3 \end{cases}, \quad (4)$$

где n — количество спутников.

В работе [9] рекомендуется использовать систему GPS/ГЛОНАСС в качестве основной при показателе надежности $R > 21$. Использование при позиционировании путевых меток, одометра и данных систем глобального позиционирования одновременно позволяет уменьшить ее погрешность до 4 м.

Подводя итог анализу достоинств и недостатков существующих подходов к реализации системы управления принудительным наклоном кузовов, сформулируем критерии выбора этих систем:

- безопасность подвижного состава на всех этапах функционирования;
- своевременное получение информации о подходе подвижного состава к криволинейному участку пути и его параметрах, позволяющего выполнить полный регламент активации и соответствующей настройки исполняющих механизмов системы;
- достаточная точность (с погрешностью до 4 м) и надежность получения геопозиционной информации;

- учет скорости движения и составности поезда при регулировании;
- динамические параметры подвижного состава, определяющие уровень комфорта пассажиров на уровне 60–75 % от величины полной компенсации на всех этапах прохождения криволинейного участка пути (вход в кривую, движение по кривой и выход из кривой);
- своевременное получение информации о подходе подвижного состава к выходу из криволинейного участка пути;
- исключение ошибочного срабатывания системы на прямолинейных участках пути с любым допустимым уровнем неровностей;
- контроль в режиме реального времени работоспособности системы и наличия механизма снижения скорости прохождения криволинейных участков пути в случае отказа элементов системы до безопасной.

Литература

1. Р. Фрацек, А. Масел. Возможности внедрения подвижного состава с наклоном кузовов на железных дорогах Польши // Железнодорожный транспорт. 2000. № 7–8. С. 30–32.
2. Антипин Д.Я., Кобищанов В.В., Лапшин В.Ф., Митраков А.С. Исследование динамических характеристик отечественного пассажирского подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова в кривых // Транспорт Урала. 2015. №3. С 54–59. ISSN 0347-6030.
3. Goodall R.M., Zolotas A., Evans E. Assessment of the performance of tilt system controllers//The Railway Conference at Railtex '00, NEC Birmingham(UK). 2000. Pp. 21–23.
4. BS EN 12299:2009 – Railway applications. Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation. – Brussel: BSI, 2009 – P. 66.
5. Zolotas Advanced control strategies for tilting trains: PhD dissertation. Loughborough university. UK. 2002. P. 221.
6. Förstberg, J., Andersson, E., & Ledin, T. Influence of different compensation strategies on comfort in tilting high speed train // Acta Awho.1999. № 18(1). P. 18–21.
7. Ribeiro Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties// Institute for Systems and Robotic. 2004.
8. Persson R. Tilting trains – Description and analysis of the present situation. A literature study/ VTI rapport 595A.2007.81 p. Sasaki Position Detection System Using GPS for Carbody Tilt Control // QR of RTRI. 2005. №2. Pp. 73–77.

Об одном методе решения задачи безударного сильного сжатия одномерных слоёв газа в конфигурации Р. Мизеса

Н.С. Новаковский, Уральский государственный университет
путей сообщения, Екатеринбург



Математическое описание процесса безударного изоэнтропического сжатия идеального газа до любого наперед заданного значения плотности, в том числе до бесконечной плотности (подробную библиографию см. в [1]) представляет интерес в связи с проблемой лазерного термоядерного синтеза [2, 3]. В случае плоскосимметричных течений ($\nu = 0$)

простая центрированная волна Римана описывает сжатие плоского слоя газа в конечный момент времени $t = t_*$ до бесконечной плотности [4]. Состыковка центрированной волны Римана с однородным потоком газа дает решение задачи о получении в сжатом плоском слое любого конечного значения плотности [5]. Результаты расчетов центрированной волны Римана с использованием одной разностной методики, хорошо себя зарекомендовавшей на протяжении тридцати лет при решении широкого класса прикладных задач, приведены в [6]. Здесь максимально достигнутое значение плотности в $3 \cdot 10^4$ раз превышает исходную плотность. При этом среднее значение плотности в центрированной волне равно $8 \cdot 10^3$.

Математическая теория безударного сильного сжатия идеального газа разработана в [1]. В частности, для случая сжатия цилиндрически $\nu = 1$ и сферически $\nu = 2$ симметричных слоев политропного газа с показателем $\gamma > 1$ доказано, что непрерывная состыковка двух течений дает решение задачи о безударном сильном сжатии до любой наперед заданной плотности.

Первое из этих двух течений является обобщением центрированной волны Римана. Не только доказано существование этого течения, но и приведен бесконечный сходящийся ряд, описывающий его. Проанализирована структура коэффициентов ряда, что позволило получить, обосновать и уточнить асимптотические законы движения сжимающего поршня, а также строго описать особенность течения в момент сильного сжатия [1, 7].

Второе из течений является решением задачи о получении наперед заданных распределений газодинамических параметров [1, 8]. Это течение через звуковую характеристику примыкает к обобщению центрированной волны Римана и особенностей не имеет. При этом в качестве наперед заданного распределения можно произвольно задавать либо плотность, либо скорость газа. Второй из этих газодинамических параметров в момент сильного сжатия и все течение до момента сжатия определяются однозначно как решение характеристической задачи Коши стандартного вида [1, 8]. Теоремы утверждают, что существуют цилиндрические и сферические слои с ненулевой массой газа, которые можно безударно сжать до любой плотности [1]. Однако эти теоремы не позволяют определить ширину исходных слоев, то есть массу сжимаемого газа, которую при фиксированных v , γ можно безударно сжать до заданной плотности ρ_* .

Алгоритм расчета безударного сильного сжатия одномерных слоев первоначально однородного и покоящегося газа с $\rho_0 = 1$ до любой наперед заданной конечной постоянной плотности $\rho_* > 1$ предложен в работе [9]. Цель настоящей работы — проверка работоспособности предложенного в [9] алгоритма и его применение для задачи сжатия слоя изнутри.

В работе кратко описан алгоритм расчета безударного сильного сжатия изнутри одномерных слоев первоначально однородного и покоящегося газа в диапазоне от $\rho_0 = 1$ до любой наперед заданной конечной плотности $\rho_* > 1$. Приводятся алгоритм расчёта траектории сжимающего поршня, тестовые расчёты для плоского случая ($v = 0$), а также некоторые результаты расчётов сжатия цилиндрических ($v = 1$) и сферических ($v = 2$) слоёв фиксированной массы до наперёд заданного конечного значения плотности.

Математическая постановка одномерной задачи безударного сильного сжатия газовых слоёв

Далее рассматриваются только одномерные симметричные изэнтропические ($s = 1$) течения политропного газа. Такие течения являются решениями системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} \sigma_t + u\sigma_r + \frac{(\gamma-1)}{2}\sigma\left(u_r + v\frac{u}{r}\right) = 0, \\ u_t + \frac{2}{(\gamma-1)}\sigma\sigma_r + uu_r = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\sigma = \rho^{(\gamma-1)/2}$ – скорость звука в газе; ρ – плотность; γ – константа в уравнении состояния $p = \rho^\gamma/\gamma$, $\gamma > 1$, p – давление; $\vec{U} = (\sigma, u)$ – искомые функции. Значения $v = 0, 1, 2$ соответствуют случаям плоской, цилиндрической и сферической видам симметрии.

В случае $v = 0$ в системе (1) $r = x_1$, $u = v_1$, – проекция вектора \vec{V} на ось Ox_1 .

В случае $v = 1, 2$

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^{v+1} x_i^2} \geq 0,$$

а скорость газа u есть проекция вектора \vec{V} на радиус-вектор в плоскости $x_1 Ox_2$ при $v = 1$ или на радиус-вектор в пространстве переменных x_1, x_2, x_3 при $v = 2$ соответственно.

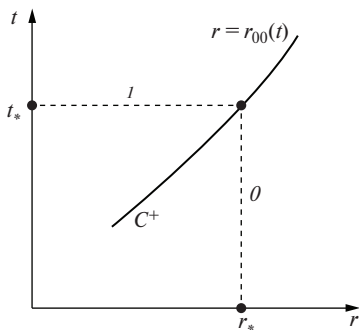


Рис. 1

Далее рассматривается сжатие газового слоя изнутри. Пусть в некоторой окрестности точки $(t = t_*, r = r_*)$ при $r_* > 0$ задано какое-либо фоновое течение $\vec{U} = \vec{U}^0(t, r)$, где компоненты вектора $\vec{U}^0(t, r)$ – аналитические функции $\sigma^0(t, r)$, $u^0(t, r)$ являются решением системы (1). На рис. 1 в области 0 находится фоновое течение, а в области I требуется построить искомое течение с наперед заданным распределением

одного из газодинамических параметров, которое будет сопряжено с фоновым течением через слабый разрыв.

Слабым разрывом будет являться звуковая C^+ -характеристика, однозначно определяющаяся при решении задачи Коши:

$$\frac{dr}{dt} = u^0(t, r) + \sigma^0(t, r), r(t)|_{t=t_*} = r_*.$$

Из аналитичности фонового течения следует существование и единственность решения данной задачи — аналитической функции $r = r_{oo}(t)$, описывающей закон движения характеристики C^+ . Далее везде считается, что функция $r = r_{oo}(t)$ известна и, следовательно, известны значения газодинамических параметров фонового течения на этой C_0^+ -характеристике:

$$U^0(t, r)|_{r=r_{oo}(t)} = U_{oo}(t),$$

т. е.

$$\sigma|_{C_0^+} = \sigma_{oo}(t), u|_{C_0^+} = u_{oo}(t). \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда звуковая характеристика разделяет однородный покой и искомое течение.

C^+ : $r = (t - t_*) + r_*$ на которой $u|_{C^+} = 0$ и $\sigma|_{C^+} = 1$. Область определения искомого течения ограничена прямой $t = t_*$ и звуковой характеристикой C_0^+ фонового течения. Эта область состоит из двух частей: нижнего треугольника (цифра 1 на рис. 2) — области определения обобщения центрированной волны Римана и верхнего треугольника (2 на рис. 2) — области определения течения, имеющего в момент $t = t_*$ наперед заданное распределение $\sigma = \sigma^*(r)$, например, постоянное: $\sigma^*(r) = \sigma^* \text{const}$. Требуется найти закон движения поршня, безударно сжимающего однородный покоящийся газ с плотностью $\rho = 1$ до плотности $\rho = \rho(t_*, r) = \rho_* = \text{const}$, постоянной в сжатом слое шириной d_* (рис. 2). Эта траектория определяется как решение следующей задачи Коши:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = u(t, r), \\ r|_{t=t_*} = r_* - d_*. \end{cases} \quad (3)$$

В формуле (3) в правой части дифференциального уравнения стоит функция $u(t, r)$, определяющаяся при решении системы (1).

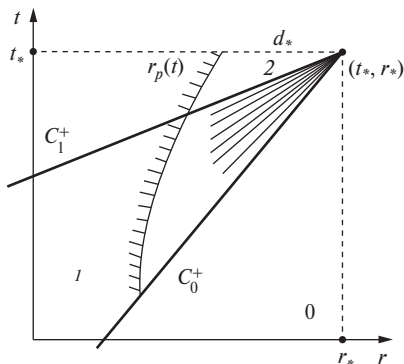


Рис. 2

Теоремы, доказанные в [1], утверждают, что существует ненулевая масса газа m_0 , расположенная в области между траекторией движения поршня $r = r_p(t)$ и прямой $r = r_*$, которую можно безударно сжать до любой наперед заданной плотности $\rho_*(r)$. Но эти теоремы не определяют максимальное возможное значение m_0 , а следовательно, и максимальную ширину слоя d_* (рис. 2).

Алгоритм численного решения задачи сильного сжатия газа в одномерном изэнтропическом случае методом характеристик

Приведём далее алгоритм, основанный на стандартном методе характеристик с пересчётом [10] и ранее изложенный в [1, 10]. Остановимся на отдельных моментах этого алгоритма, необходимых для программной реализации.

1. Система (1) сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с помощью введения инвариантов Римана $R = u + \frac{2}{(\gamma-1)}\sigma$; $L = u - \frac{2}{(\gamma-1)}\sigma$ и производных вдоль характе-

ристик $\left. \frac{d}{dt} \right|_{C^\pm} = \frac{\partial}{\partial t} + (u \pm c) \frac{\partial}{\partial r}$.

$$\begin{cases} \left(\frac{dR}{dt} \right)_{C^+} = -v \frac{\gamma-1}{8} \frac{R^2 - L^2}{r}, \\ \left(\frac{dL}{dt} \right)_{C^-} = v \frac{\gamma-1}{8} \frac{R^2 - L^2}{r}. \end{cases} \quad (4)$$

К системе присоединяются дифференциальные уравнения для характеристики C^\pm :

$$\frac{dr}{dt} = u(t, r) \pm \sigma(t, r), \quad (5)$$

учитываются также начальные условия (2) и краевое условие.

Система (4) решается отдельно в областях 1 и 2.

Алгоритм построения численного решения в области 1

Расчет сетки в нижнем треугольнике и вычисление значений параметров газа в ее узлах также происходят в обратном направлении изменения времени.

1) В точке (r_*, t_*) интервал $[1, \sigma_*]$ изменения σ разбивается на N промежутков; здесь $\sigma_* = \rho_*^{(\gamma-1)/2}$. Для каждого значения $\sigma_i = 1 + i\Delta\sigma$, $\Delta\sigma = \frac{\sigma_* - 1}{N}$, $i = 0, 1, \dots, N$ используем формулу обобщённой ЦВ Римана [1]:

$$\sigma(t, r) = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{r - r_*}{t - t_*} + \frac{2}{\gamma + 1}, u(t, r) = 2 \frac{r - r_*}{t - t_*} - \frac{2}{\gamma + 1}; \quad (6)$$

при $t = t_*$ получаем значения скорости u_t .

2) Из точки (r_*, t_*) выпускаются N штук C^+ -характеристик.

3) Задаем число шагов по времени M , таким образом определяется шаг по времени $\Delta t = t_*/M$.

4) Делается шаг Δt в обратном направлении изменения времени вдоль характеристики C_0^+ .

Из точки на этой характеристике, соответствующей моменту времени $t_* - j\Delta t$, выпускается C_j^- -характеристика до пересечения с линией C_1^+ . Здесь и далее $j = 0, 1, \dots, N$ – номер шага по времени.

5) Используя разностные аналоги уравнений (4) и значения газодинамических параметров в начальных точках соответствующих характеристик, получаем газодинамические параметры в точке пересечения.

6) Повторяем процедуру, выпуская C_j^- -характеристику из полученной точки пересечения (рис. 3). После того как найдена точ-

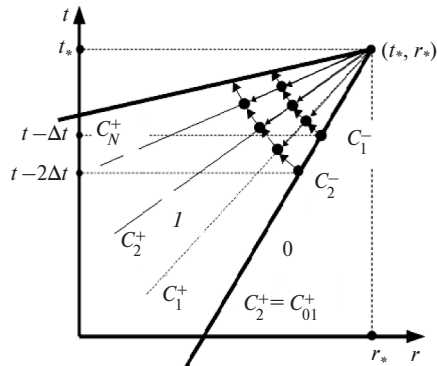


Рис. 3

ка пересечения с характеристикой C_N^+ , переходим к пункту D , делая новый шаг по времени. Если достигнуто значение $t = 0$, значит, решение в области I построено.

Алгоритм построения решения в области 2

Расчет сетки в верхнем треугольнике тоже ведется в обратном направлении изменения времени.

C_0^+ -характеристика области 2 совпадает с C_N^+ -характеристикой области 1. Берём первую (вторую и последующие будем обозначать буквой j) точку и выпускаем характеристику C_1^- до пересечения с линией $t = t_*$. На этой прямой известно только значение $\sigma = \sigma_*$, поэтому значение инварианта R вычисляется через значения L и σ_*

$$R = L - \frac{4\sigma_*}{\gamma - 1}.$$

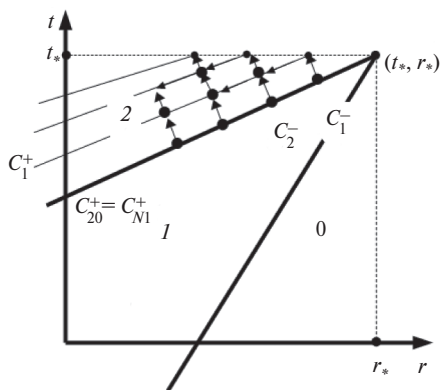


Рис. 4

2) Из полученной на прямой $t = t_*$ точки пересечения выпускаем C_1^+ -характеристику. Этот шаг выполняется всякий раз как только найдено пересечение очередной характеристики C_j^- с прямой $t = t_*$. Номер текущей C^+ -характеристики будет обозначен далее буквой i .

3) Из следующей $(j+1)$ -й по порядку точки C_0^+ -характеристики выпускаем характеристику C_{j+1}^- до пересечения с C_1^+ -характеристикой.

4) Используя разностные аналоги уравнений (4) и значения газодинамических параметров в начальных точках соответствующих характеристик, получаем газодинамические параметры в точке пересечения.

5) Повторяем процедуру, выпуская C_{j+1}^- -характеристику из полученной точки пересечения (рис. 4). После того как найдена точка пересечения с прямой $t = t_*$, переходим к пункту 2.

6) Повторяем пункты 2–6 до тех пор, пока не дошли до последней точки характеристики C_0^+ .

Алгоритм построения траектории сжимающего поршня

Построение траектории движения поршня, как и построение характеристической сетки, происходит в обратном направлении изменения времени, т. е. при $t \leq t_*$.

1) Траектория движения строится исходящей из точки ($t = t_*$, $r = r_* - d_*$), где d_* определяет ширину уже сжатого слоя газа. Из этой точки выпускаем прямую, определяемую разностным аналогом задачи Коши (3).

2) Находим точку пересечения этой прямой с одной из линий характеристической сетки, построенной в соответствии с вышеописанными алгоритмами. В найденной точке пересечения скорость газа u находится линейной интерполяцией по значениям в ближайших узлах. Пусть найденная точка пересечения имеет координаты ($t = \tilde{t}$, $r = \tilde{r}$). Выпускаем из нее прямую, определяемую разностным аналогом задачи Коши

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = u|_{t=\tilde{t}, r=\tilde{r}}, \\ r|_{t=\tilde{t}} = \tilde{r}, \end{cases} \quad (7)$$

до пересечения этой прямой со следующей линией построенной характеристической сетки.

4) Продолжаем вычисления по этому алгоритму до тех пор, пока либо траектория поршня не пересечёт характеристику C_0^+ нижнего треугольника, либо не выйдет за пределы области, в которой существует решение.

5) В последнем случае следует уменьшить ширину сжатого слоя d_* и вернуться к началу алгоритма.

Примеры расчётов

Одним из поводов для этой работы стала все возрастающая вычислительная мощность компьютеров. Изложенные выше алгоритмы реализованы в виде программы для РС на языке C⁺⁺. Далее приводятся результаты на более подробных сетках, чем использованы в работе [11].

Для проверки работоспособности программ посчитаны задачи сильного сжатия для случая плоской симметрии, когда известно точное решение [4, 5]. Рассчитанные поля совпали с ним с точностью, близкой к машинному нулю. На рис. 5 приведен пример рассчитанной характеристической сетки и траектории поршня. По оси абсцисс отложена координата r траектории частицы газа, полученная в процессе решения, по оси ординат — время t . Выделенная прямая в верхней части рисунка — характеристика C_0^+ верхнего треугольника, которая пересекает траекторию поршня в момент времени $(t_*, 0,0001)$.

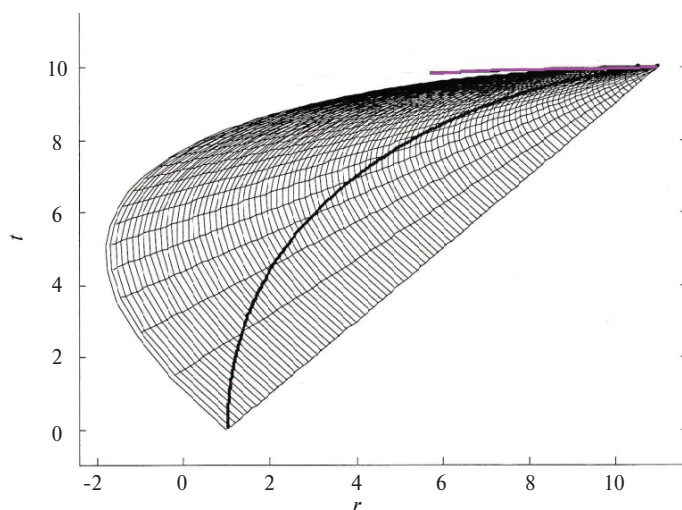


Рис. 5. Пример рассчитанной характеристической сетки

Результаты сравнения численно построенных решений с точным решением для случая плоской симметрии ($v = 0$) — результаты сравнения четырёх численных решений с точным — представлены в таблице 1. Варьировались следующие параметры: γ — показатель политропы идеального газа, d_* , ρ_{\max} — ширина сжимаемого слоя и максимальная плотность слоя газа. Посчитаны и приведены в таблице нормы разности численно полученных и точных значений скорости звука и скорости газа. Используются обозначения: c_{ex} , c_{num} , u_{ex} , u_{num} — точное (exact) и численное (numerical) значения скорости звука и скорости газа, $\|\bar{F}\|_c = \max(|F_i|)$ — норма.

Таблица 1

Нормы разностей численного и точного решений

d_*	d_*	ρ_{\max}	$\ c_{\text{ex}} - c_{\text{num}}\ _C$	$\ \mu_{\text{ex}} - \mu_{\text{num}}\ _C$
1,4	10	10^4	$1,66355818 \cdot 10^{-12}$	$8,37019342 \cdot 10^{-12}$
1,4	100	10^5	$2,25801919 \cdot 10^{-11}$	$1,12819975 \cdot 10^{-10}$
5/3	10	10^4	$4,13891143 \cdot 10^{-13}$	$1,24167343 \cdot 10^{-12}$
5/3	100	10^5	$1,81159976 \cdot 10^{-10}$	$5,43906253 \cdot 10^{-10}$

Построенная численно траектория сжимающего поршня тоже удовлетворительно согласуется с точным решением [1]. Поточечная норма разности убывает обратно пропорционально возрастанию числа точек в расчете. В таблице 2 приведены нормы ошибки при сгущении сетки для случая $\gamma = 1.4$, $d_* = 10$; $\rho_{\max} = 10^4$.

Таблица 2

Норма погрешности при расчёте траектории поршня

$N \times M$	$\ r_{\text{ex}} - r_{\text{num}}\ _C$
250×250	$4,41841714 \cdot 10^{-3}$
500×500	$1,09307290 \cdot 10^{-3}$
1000×1000	$2,71721107 \cdot 10^{-4}$
2000×2000	$6,78031476 \cdot 10^{-5}$

Основываясь на данных из таблиц 1 и 2, можно сделать вывод об адекватном описании предложенным алгоритмом решения задачи о сильном сжатии одномерного газового слоя в случае плоской симметрии.

Далее приводятся результаты численных экспериментов в случаях $\nu = 1, 2$, для которых не существует точного решения в аналитическом виде.

В качестве критерия точности полученного решения задачи мы вслед за авторами [1,4] выбрали: масса несжатого слоя шириной d_0 равна массе сжатого слоя шириной d_* , т. е. проверялось равенство масс в начальный и конечный моменты сжатия газа.

Такая поверка выполнялась и в промежуточные моменты сжатия. В таблице 3 приведены варианты расчётов, в которых различие масс Δm сжатого и несжатого газа колеблется 0,02 до 0,85 %. Точность можно повышать, уменьшая Δt , увеличивая подробность сетки и уменьшая временной шаг.

Результаты численных экспериментов

ν	γ	t_*	m_*	ρ_{\max}	$N \times M$	$\Delta m, \%$
0	1,4	10,01166	10	10^4	500×500	0,117
1	1,4	1,04242	10	10^4	500×500	0,131
2	1,4	0,44934	10	10^4	500×500	0,132
0	5/3	10,04016	10	10^4	500×500	0,402
1	5/3	1,03799	10	10^4	500×500	0,502
2	5/3	0,45187	10	10^4	500×500	0,516
0	1,4	100,0202	100	10^5	2000×2000	0,02
1	1,4	4,4574	100	10^5	1000×1000	0,103
2	1,4	1,5411	100	10^5	1000×1000	0,092
0	5/3	100,1122	100	10^5	2000×2000	0,112
1	5/3	4,5588	100	10^5	1000×1000	0,844
2	5/3	1,5656	100	10^5	1000×1000	0,735

По представленным результатам можно сделать вывод, что алгоритм решения задачи сильного сжатия строит решение и адекватно описывает процесс сжатия. Время счёта не превышает нескольких минут.

Автор выражает признательность своему научному руководителю С. П. Баутину, д-ру физ.-мат. наук, профессору за внимание, помощь и поддержку.

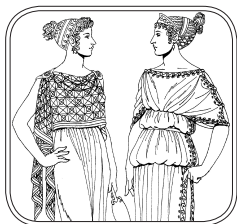
Литература

1. Баутин С. П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Новосибирск : Наука, 2007. 308 с.
2. Накколс Дж. Г. Осуществимость инерциально-термоядерного синтеза // Успехи физических наук. 1984. Т. 143. № 3. С. 467–482.
3. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М. : Наука, 1988. 173 с.
4. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М. : Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. 804 с.
5. Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости. М. : Изд-во иностранной литературы, 1961. 588 с.

6. Анучин М. Г. Влияние теплопроводности на неограниченное безударное сжатие плоского газового слоя // ПМТФ. 1998. Т. 39. №4. С. 25–32.
7. Баутин С. П. Асимптотические законы безударного сильного сжатия квазиодномерных слоев газа // Прикладная математика и механика. 1999. 63. Вып. 3. С. 415–423.
8. Баутин С.П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск : Наука, 2009. 367 с.
9. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М. : Наука, 1968. 529 с.
10. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Об одном методе расчёта безударного сильного сжатия одномерных слоёв газа // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. №4. С 3–12. ISSN 1560-7534.
11. Николаев Ю.В. О численном решении задачи безударного сильного сжатия одномерных слоёв газа // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. №2. С. 104–108. ISSN 1560-7534.

О возможности использования средств беспроводной передачи электрической энергии*

Д.С. Паныч (научный руководитель – К.Б. Кузнецов, д-р техн. наук), Уральский государственный университет путей сообщения



Из длинного перечня фантастических технических идей, реализованных сегодня, только мечта о беспроводной передаче электрической энергии продолжает оставаться неприступной. Подробные описания энергетических лучей в фантастических романах дразнят инженеров своей очевидной потребностью и... невозможностью реализации.

В конце XIX столетия открыты и исследованы свойства электромагнитных волн, способных распространяться на огромные расстояния, проникать сквозь преграды без существенного ослабления. Свойства электромагнитного поля стали широко использоваться в электрических приборах, для электросвязи, передачи электрической энергии на большие расстояния с помощью линий электропередачи (ЛЭП), перемещения электрических транспортных средств [1].

С развитием науки сведения, получаемые об электромагнитных процессах, непрерывно углублялись, находя применение во многих отраслях современной техники.

Практическое использование электрической энергии вызвало развитие новой дисциплины — электротехники, задача которой состоит в разработке методов наиболее экономичного и рационального производства, передачи и потребления электрической энергии.

С развитием электротехники были разработаны способы передачи электроэнергии, которая передавалась потребителю при помощи проводников (линий электропередачи). Беспроводная передача электроэнергии казалась ученым нереализуемой задачей.

* Публикуется в авторской редакции.

Существует несколько различных способов беспроводной передачи электроэнергии (таблица 1).

Таблица 1

Методы беспроводной передачи электроэнергии

Наименование	Сущность
Ультразвуковой метод	Передачик излучает ультразвуковые волны, приёмник преобразует их в электричество. Расстояние передачи составляет 7–10 м, требуется прямая видимость между приёмником и передатчиком. Напряжение передаваемого электрического сигнала достигает 8 В, но не указывается вид получаемой силы тока [2]
Метод электромагнитной индукции	Использует ближнее электромагнитное поле на расстояниях около одной шестой длины волны. Благодаря электродинамической индукции переменный электрический ток, протекающий через первичную обмотку, создает переменное магнитное поле, которое воздействует на вторичную обмотку, индуцируя в ней переменный электрический ток. Для достижения высокой эффективности взаимодействия должно быть достаточно тесным [3]
Электростатическая индукция	Электростатическая или емкостная связь представляет собой прохождение электроэнергии через диэлектрик. На практике это градиент электрического поля или дифференциальная емкость между двумя или более изолированными клеммами, пластинами, электродами, или узлами, возвышающимися над проводящей поверхностью. Электрическое поле создается за счет заряда пластин переменным током высокой частоты и высокого потенциала. Электрическая энергия, передаваемая с помощью электростатической индукции, может быть использована в приемном устройстве, например, таком, как беспроводные лампы [4]
Микроволновое излучение	Радиоволновую передачу энергии можно сделать более направленной, значительно увеличив расстояние эффективной передачи энергии, уменьшив длину волны электромагнитного излучения, например, до микроволнового диапазона. Для обратного преобразования микроволновой энергии в электричество может быть использована ректенна, эффективность преобразования энергии которой превышает 95 % [5]
Лазерный метод	В том случае, если длина волны электромагнитного излучения приближается к видимой области спектра (от 10 мкм до 10 нм), энергию можно передать путем её преобразования в луч лазера, который затем может быть направлен на соответствующий фотоприемник [6]

Использование каждого из этих методов находит практическое применение в различных областях. Метод электромагнитной индукции применяется при работе трансформаторов [7], электрических двигателей и генераторов [8], приборов для учета электрической энергии и для исполнения различных типов релейных защит [9]. Однако этот способ низкоэффективен для беспроводной передачи энергии в связи с невысокой дальностью его действия.

С точки зрения практического применения, очень интересен метод электростатической индукции [10–12]. Н. Тесла продемонстрировал беспроводное питание ламп освещения энергией, передаваемой переменным электрическим полем [13].

Большой интерес представляет собой передача энергии при помощи электромагнитного поля СВЧ. Идея передачи энергии СВЧ лучом основана на преобразовании электрической энергии СВЧ-излучения после передач его в заданную точку пространства или земной поверхности с последующим обратным преобразованием СВЧ-энергии в постоянный ток с помощью специальной антенны (ректенны). При передаче энергии с помощью СВЧ-излучения энергия теряется. Величина такой потери определяется в основном законом распределения плотности потока энергии в излучающей системе, размерами ректенны и излучающей антенны [14].

Преимущества метода, основанного на использовании лазера: монохроматическая световая волна, обладающая малым углом расходимости, позволяет узкому пучку эффективно передавать энергию на большие расстояния, компактный размер твердотельного лазера и фотоэлектрического полупроводникового диода позволяет выполнить устройства небольших размеров, лазер не создает радиочастотных помех для существующих средств связи, например, wi-fi или сотовых телефонов,

естественный контроль доступа, так как только приемники, освещенные лазерным лучом, получают электроэнергию [6].

Авторы поставили перед собой задачу исследовать токопроводящие свойства канала лазерного излучения в непроводящей среде. На начальном этапе в арсенале инструментов исследований кроме средств измерения и контроля были: лазер мощностью 1 Вт и высоковольтная установка напряжением до 100 кВ промышленной частоты.

Изучение электрического пробоя газов в постоянном электрическом поле в свое время — одна из центральных проблем физики газового разряда [15]. В [16] подробно изложена физика СВЧ-пробоя, но

нет даже допущения о возможности пробоя газов излучением оптического диапазона. Только после создания оптических генераторов с модулированной добротностью, работающих в режиме гигантского импульса, когда максимальные мощности достигают десятков мегаватт, в результате острой фокусировки таких мощных лучей, впервые удалось наблюдать оптический пробой.

Когда луч рубинового лазера, работающего в режиме гигантского импульса, пропускается через фокусирующую линзу, в воздухе, в точке фокуса, возникает искра, как при электрическом пробое разрядного промежутка. Это сенсационное сообщение прозвучало в феврале 1963 г. на III Международной конференции по квантовой электронике в Париже [17]. Явление лазерной искры сразу же приковало себе внимание физиков. Открытие лазерной искры стимулировало развитие ряда новых направлений в физике разрядов и плазмы.

И здесь очень интересно возникновение пробоя воздуха с помощью твердотельного лазера в различных диапазонах волн. В исследованиях по созданию протяженных проводящих каналов в атмосфере сделаны выводы, что для создания плазменного канала длиной около 1 км для реализации электрического пробоя оказывается достаточно напряжения 7 МВ при общей вложенной энергии около 300 кДж (при диаметре канала 8 мм) [18]. Минимальное удельное сопротивление канала существенно зависит от удельной приложенной энергии, от поперечного размера плазменных образований, концентрации и размера частиц аэрозолей, частоты следования лазерных импульсов и их энергии, влажности, температуры и многих других параметров среды, в которой создается токопроводящий канал.

Нами предполагается экспериментальное исследование особенностей взаимодействия электромагнитных полей промышленной частоты и частоты оптического диапазона.

Первое пробное экспериментальное исследование влияния лазерного луча на величину

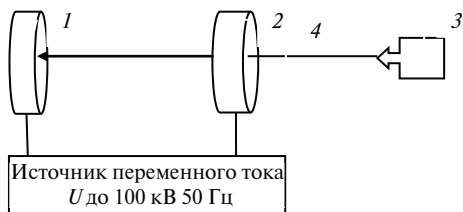


Схема пробного исследования влияния лазерного луча на величину проводимости высоковольтной плазмы

- 1 — сплошной металлический электрод;
2 — мелкосетчатый металлический электрод;
3 — лазер; 4 — лазерный луч

ну проводимости плазмы при пробое воздушного промежутка проведено по схеме (рис.).

Результаты испытаний, проведенные по исследованию проводимости лазерного луча, показаны в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений пробоя воздушного промежутка без лазерного излучения и при его воздействии

№ опыта	d , м	$U_{\text{эсп}}$, кВ	$U_{\text{лаз}}$, кВ
1	0,05	23	21
2	0,1	33	31
3	0,12	40	40

Первые исследования показали, что наблюдаемые отклонения проводимости плазмы при наличии лазерного луча и при его отсутствии незначительны. Отличия измерений составляют 3–5 %, что может находиться в пределах погрешности. Это связано с тем, что на результаты измерения влияют многочисленные факторы: атмосферное давление, температура, влажность воздуха, ионизация воздуха, точность измерительных приборов.

Для дальнейших исследований предложено усовершенствовать установку для на повышение точности измерений, исследовать новые явления при осуществлении разряда в воздушном пространстве с возможностью использования нового материала, например, графена в качестве проводника; исследование резонансных явлений при прерывистом излучении лазера с частотой, близкой к 50 Гц.

Литература

1. Кузнецов К. Б., Мишарин А. С. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта. М. : Маршрут, 2005. 456 с.
2. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer (дата обращения 14.02.2016).
3. Парселл Электричество и магнетизм. М. : Наука. 1983. 416 с.
4. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_induction (дата обращения: 14.02.16).
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_transmission (дата обращения: 14.02.16).

6. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser> (дата обращения: 14.02.16).
7. Почаевец В. С. Электрические подстанции. М. : Желдориздат, 2001. 512 с.
8. Кацман М. М. Электрические машины. М. : Академия. 2011. 463 с.
9. Фигурнов Е.П. Релейная защита. М. : Желдориздат, 2002. 720 с.
9. Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takchiro Imura and Yoichi Hori. Novel Band-Pass Filter Model for Multi-Receiver Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling and Power Division // Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2012.
10. Cheney M. Tesla. Man Out of Time. P. 174.
11. Landis , Stavnes M., Olcson S., Bozck J. Space Transfer With Ground-Based Laser // Electric Propulsion. 1992.
12. Тесла. Наследие гения. М. : Эксмо, 2010. 272 с.
13. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М. : Наука, 2003. 446 с.
14. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М. : Изд-во Наука, 1974. 308 с.
15. Браун Элементарные процессы в плазме газового разряда. М. : Госатомиздат, 1961. 321 с.
16. Maker, Terhune, Savage Optical third harmonic generation. In. Quantum Electronics, v. III. P. Grivet and N. Bloembergen (Eds.). N. Y., Columbia Univ. Press, 1964.
17. Способ создания токопроводящих каналов в непроводящей среде : пат. № 2400005 Рос. Федерации.

Эволюция природы смеха

Д. С. Сверлов, Уральский государственный университет
путей сообщения



Что такое смех и почему человеку приятно его переживать и о нем говорить? С физиологической точки зрения, смех представляет собой прерывистые горловые звуки, вызываемые при проявлении веселья или радости. Звучит подобное описание не очень привлекательно, однако смех не просто привлекателен, но и заразителен так же, как заразителен

научный интерес к этой теме.

Такое сложное и многомерное явление, как смех в разные исторические периоды неоднократно вызывало интерес со стороны ученых. Разнообразие концепций, сформированных в результате обращения к проблемам смешного и смеховой культуры, подтверждают многогранность явления. Круг вопросов, возможных для рассмотрения этого феномена в культуре, необычайно широк. Являясь своеобразным зеркалом эпохи, смех в различных градациях отражает спектр социальных отношений, а также стимулирует поиск возможных путей выхода из кризисных состояний, возникающих на различных этапах культурно-исторического развития.

Среди многообразия концепций, рассматривающих смех в его различных преломлениях, большая часть опирается на идеи, рожденные в античный период. Взгляды философов этого периода, их идеи и наблюдения сформировали фундамент для последующих исследователей проблемы. В Древней Греции и Риме впервые поднимаются вопросы, связанные с природой и ролью смеха, предпринимается попытка объяснения этого неотъемлемого компонента человеческой жизни. Все это происходит в контексте возникшей потребности осмысления явлений окружающего мира, а также объяснения социальных процессов. Часто вопросы, связанные с ролью смешного, поднимаются в дискуссиях, что обуславливает связь с ораторской практикой. Анализ смеха в истории философской мысли осуществляется через категорию комического.

Впервые смех начинает анализировать Платон в «Филебе», Аристотель в трактатах «Поэтика», «Риторика», «Политика» выявлял причины, вызывающие смех. Для Платона смех — это одновременно боль и удовольствие. Платон считает, что смех является важным предметом исследования, поскольку смех есть также инструмент в познании серьезного в жизни [1]. По мнению Платона, причина смеха — что-то мнимощенное. В этом его мысль вновь пересекается с основными трактовками комического и других античных мыслителей. Сущность смеха заключается в смеси печали и удовольствия [2]. Дифференцируя серьезное и смешное, мыслитель стремится разграничить в исследуемом явлении развлекательную роль и функцию насмешки. Констатация неразрывной связи и взаимодействия этих противоположных компонентов человеческого существования выводит его теорию на новый уровень осмысления проблемы. Для философа смех является своеобразным критерием, демонстрирующим несоответствие высокого самомнения индивида и объективной ситуации. Признавая способность смеха устранить эту дисгармонию, мыслитель, тем не менее, не одобряет его в качестве инструмента для исправления нравов.

Одним из наиболее известных теоретиков смешного считается ученик Платона — выдающийся философ Аристотель. По Аристотелю, смех вызывает несчастья и отрицательные явления, никому не причиняющие страдания и ни для кого не пагубные. Аристотель исследует смех в первую очередь с точки зрения вопросов этики. Он разграничивает смех и насмешку. Смех представляется ему как нечто доброе и приятное. Насмешка же содержит в себе всегда и некоторый злой компонент. Это представление позднее ляжет в основу выделения двух основных форм комического — юмора и сатиры [3].

Аристотель писал, что из всех живых существ только человеку свойствен смех [4]. У этой теории много последователей (Лукиан, Квинтилиан, Порфирий, Фома Аквинский, Капелла). В Средневековье было распространено следующее определение человека: «*Homo est animal rationale, mortale, risus capax*» («Человек — животное разумное, смертное и способное смеяться»). Предположительно, слова принадлежат бенедиктинскому ученому монаху Ноткеру Немецкому (Губастому).

Однако сегодня известно, что и некоторые животные, например, обезьяны, собаки или крысы также могут смеяться, правда, в их случае смех является, скорее, физиологическим или инстинктивным. Физиологический смех возможен и у человека, например, во время

щекотки. Однако неоспорим тот факт, что для человека смех значит нечто большее, чем просто реакция на раздражитель. Вероятно, способность смеяться осознанно и порождать то, что может вызвать смех, и есть главное отличие человека от животного.

Состояние радости или веселья довольно близки к смеху, но все же не есть одно и то же. Интересно, что смех как физиологическая реакция присущ любой человеческой особи и проявляется схоже в независимости от географических, культурных и возрастных отличий. Причины, вызывающие смех, могут быть разными. Смех представляет собой исключительно ответную реакцию на некоторое событие (возможно, и языковое). Смех без причины не является смехом в чистом виде, а скорее, симптомом некоторого психического расстройства.

Позднее и Цицерон писал о том, что смех представляется способом выявления безобразного и деформированного в действительности [5].

Цицерон создал первую классификацию приемов остроумия: во-первых, смешное проистекает из самого содержания предмета; во-вторых, некая словесная форма должна включать двусмысленность, каламбуры, пословицы, метафоры, иронию и т.д. При этом он выделяет остроумные (тонкие и изящные) шутки и неостроумные виды смеха (гримасничанье, шутовство, непристойности). Также он подчеркивает, что смех бывает аристократическим или простонародным. Он подчеркивает важность ораторских способностей, лоск речи, витиеватость и изящность речевых оборотов. То есть, в отличие от Аристотеля, который изучал этический вопрос, он обращается прежде всего к риторике. Это первый в истории изучения комического стилистический подход.

Практиком смеха можно назвать отца комедии Аристофана, отразившего в пьесах процессы современного ему жизненного уклада. Сатира автора не щадила объекты, заслуживающие, по его убеждению, осмеяния. Если в ранний период творчества остроумие комедиографа было спроецировано в сторону общественной жизни и ее представителей с акцентуацией политического аспекта, то в зрелый период эти проблемы уходят на второй план, открывая путь для создания бытовой комедии нравов. Неограниченная свобода слова, в целом характерная для рассматриваемого жанра в античный период, вскрывала злободневные проблемы современности, не исключая резкие и грубые выпады в адрес комедийных героев. Аристофан трактовал смех как средство восстановления истины, орудие, направленное против социального зла. Цель рассмешить, по Аристофану, совме-

щена с высшей целью своеобразного комического катарсиса — очищения и освобождения от иллюзий. Поэтому поощряется смех над проявлениями социального зла [6].

Особенности его комедий, репрезентирующих исторический фон, взгляды автора на политический уклад в определенной мере оказали воздействие на других представителей античной мысли.

Первая теория относительно смеха принадлежит Демокриту, который понимал его как способ противостоять пошлости и путь к спасению [7]. Это определенное оружие для борьбы с человеческими пороками. Лукиан пишет, что причина смеха заключается в «бесцельности поступков большинства людей». То, что кажется жизненно важным, то, ради чего предают друзей или нарушают закон, например, власть, слава и богатство, на самом деле, всего лишь пустота, претендующая на значимость [8]. Получается, что смех — это орудие в руках того, кто умеет им пользоваться. Он помогает ему бороться с общественными заблуждениями и пороками.

Древнегреческий писатель Лукиан, как и Аристофан, не оставил работ, посвященных теории смеха, однако сатирический вектор приобрел в его сочинениях доминирующий характер. Стремление к власти, богатству и славе становятся константными объектами насмешки писателя. Смех Лукиана бичует в его творениях различные человеческие пороки. Не ограничиваясь констатацией отрицательных качеств человеческой сущности, автор прибегает к воспитательной функции смешного, способного не только указать на причину болезни духа человеческого, но также исцелиться от нее.

Вокруг природы понимания комического в античности выстроились две основные концепции.

Сторонниками первой были, например, Демокрит, Аристофан, Лукиан. Они возлагали большие надежды на смех и видели его предназначение в очищении и исправлении общества от пороков. Платон, Аристотель, Цицерон и Квинтилиан придерживались того мнения, что комическое и смешное прежде всего служат сферам отдыха и развлечения.

Однако обе концепции примиряет тот факт, что они отводят важное место смеху в жизни человека. Однако уже тогда на их основе различим двойственный подход к функциям смеха (развлекательный, который не выходит за рамки дозволенного, и насмешливый, который нарушает законы дозволенного).

Итак, проблема природы и особенностей смеха была одной из центральных в философской мысли в античности. Внимание

на вопросах смешного фокусировали поэты, писатели, ораторы, комедиографы, выдающиеся мыслители древности. Уже в этот период смех обретает статус одного из действенных способов решения социальных проблем. Многообразие наблюдений, выдвинутых идей и сформированных положений в той или иной степени оказали влияние на дальнейшее развитие теории смеха.

Средневековое, сменившее античный период, представляет сложное и противоречивое время, отмеченное всевластием католической церкви, установлением жестких рамок и ограничений, проникающих во все сферы общественной жизни. Признание значимости смеха передовыми мыслителями древности сменяется резким неприятием смешного, что вызвало миграцию смеха из культуры официальной, из области теоретических обобщений на уровень народной культуры. Высказывания о смешном в большинстве случаев носят отрицательную оценку.

Эпохе Ренессанса, характеризующейся реминисценцией взглядов и концепций философов античности, не свойственно возникновение новых подходов к пониманию феномена. Отсутствие оригинальных теорий компенсировалось возникновением оригинальной литературы, отразившей различные грани смехового мира этой пестрой эпохи. Произведения Дж. Боккаччо, Ф. Рабле, У. Шекспира становятся своеобразной панорамой этого периода, трансформируя отношение Европы к вопросам комического.

С XVII в. научная мысль вновь ориентирована в сторону смеха. Упоминание о комическом встречаются в работах Р. Декарта и Ф. Бэкона, новые теории смешного предлагают представители немецкой философии И. Кант и Г. Гегель.

Одну из оригинальных теорий выдвигает английский мыслитель XVII в. Т. Гоббс. Развивая мысли древнегреческих философов, он утверждает, что смех имеет прямое отношение к достижению превосходства над окружающими, т. к. является воплощением спонтанного триумфа, рожденного внезапно возникшим чувством превосходства над окружающими или своим прошлым [9]. Поскольку общественные нормы поведения не позволяют уничтожать соперников физически, победа становится возможной благодаря превосходству иного рода, посредством юмора и остроумия.

И. Кант в «Критике способности суждения» отмечал, что смех (как и музыка) — это «тип игры эстетическими идеями, посредством которого ничего не мыслится, но доставляет живое удовольствие» [10]. Он относит шутку скорее к приятному, нежели к прекрасному искусству.

И. Кант констатирует субъективное начало в рассматриваемом процессе. Первоисточником в смехе, по убеждению философа, выступает человеческий рассудок, а реакцией становится телесное проявление. Функцию смешного мыслитель сводит к примирению противоречий. По мнению И. Канта, «во всем, что вызывает веселый неудержимый смех, должно быть нечто нелепое... Смех есть аффект от внезапного превращения напряженного ожидания в ничто» [11].

В измененном облике эта идея воплотилась в теориях Жан-Поля, Г. Гегеля, а также Г. Спенсера, анализирующего остроумие с позиции формы мышления. Различные виды смеха, в интерпретации философа, соответствуют определенному образовательному уровню смеющегося. Г. Гегель подчеркивал несовместимость смеха с образованным человеком. Аналогично Канту философ отмечает в смехе развенчание иллюзий. К одной из магистральных основных функций смешного мыслитель относит его способность избавлять общество от отживших идей. Способность провоцировать смех он приписывает низменным качествам, скрывающимся под маской моральности. Г. Гегель справедливо утверждает, что импульс, провоцирующий мировосприятие сквозь призму смешного, рождает прежде всего периоды эпохальных переломов в социуме. Гибель какой-либо эпохи непременно сопровождается всплеском разоблачающего смеха [12].

Один из ярких представителей философии, А. Шопенгауэр, в процессе познания смешного вывел так называемую теорию абсурда, в которой смех предстает фактом выявления несоответствия. «Смех всегда возникает не из чего иного, как из неожиданного осознания несовпадения между известным понятием и реальными объектами, которые в каком-либо отношении мыслились в этом понятии, — и сам он служит лишь выражением такого несовпадения» [13]. Смех становится точкой соприкосновения наших представлений об окружающем мире с несоответствующим этим представлениям реальным положением вещей. Обращение А. Шопенгауэра к проблеме смеха происходит в рамках его теории познания. Автор разделяет смешное на два полюса. Остроумие и глупость в ее различных проявлениях рассматриваются в контексте взаимоотношений личности и социума. К проявлениям глупости мыслитель относит прежде всего приверженность сухим принципам и правилам, считая это помехой реальной жизни и творчеству. Как общественное явление она препятствует пониманию реальных отношений между людьми. Немецкий философ формирует типологию смешного, выстраивая иерархию следующим образом: преднамеренно смешное он именует шуткой.

Когда в шутке скрыто нечто серьезное, проявляется юмор. В обратном случае, серьезность, скрывающую в себе шутку, автор называет иронией. Доминантой юмора является субъективность, в иронии преобладает объективное начало [14].

XIX в. приносит усложнение духовного мира личности и ставит ее в центр социальных отношений, что отразилось в направлении критического реализма с использованием эстетических идеалов народных представлений о бытии человека (Н.В. Гоголь, М. Е. Салтыков-Щедрин и др.).

М.Е. Салтыков-Щедрин писал, что смех есть оружие очень сильное: «Ничто так не обескураживает порок, как сознание, что он угадан и что по поводу его уже раздался смех» [15]. Смех, быть может, и стал для человечества, постепенно уничтожающего самого себя, тем спасительным средством, что держит на плаву это непотопляемое судно. Смех продлевает жизнь, скрашивает будни и просто доставляет удовольствие. Смех как таковой является предметом медицинских, психологических, социологических исследований, в рамках же исследований лингвистических смех рассматривается как некоторый индикатор комического, показатель удавшейся или неудавшейся языковой шутки, как наивысшая оценка для нее.

Русская литература является своеобразной сокровищницей комического материала, однако вплоть до XX в. теория комического была здесь мало изучена. В 1965 г. вышла книга М. Бахтина «Творчество Франсуа Рабле и народная культура средневековья и Ренессанса», которая по праву считается важным исследованием в области природы комического не только в рамках российской философской мысли, но и общеевропейской. В ней постулируются такие понятия, как народно-смеховая культура, универсальность и амбивалентность смеха. Сам смех Бахтин трактует как диалогичное и полифоничное явление [16].

В XX в. наряду с рождением новых теорий смеха многие исследователи развивают идеи своих предшественников и старших современников. В смеховой панораме среди разнообразных подходов к явлению выделяются труды М. Истмена, А. Зива, Н. Холланда. К современным концепциям примыкают оригинальные творческие замечания У. Эко («Заметки на полях «Имени розы»). В 1976 г. формируется международная организация по исследованию юмора The International Society for Humor Studies, в которой современные западные авторы развивают существующие направления в изучении смеха. Работы К. Девиса, Р. Фрэнсиса, М. Дугласа, М. Флаэрти, К. Па-

уэлла, Дж. Эмерсона и других представителей общества раскрывают аспекты этого многогранного явления в различных сферах человеческой жизнедеятельности.

В отечественном понимании природы комического можно выделить два основных подхода. В рамках первого (Белинский, Чернышевский, Герцен, Луначарский) постулируется отрицающий, сатирический смех, который исполняет важную общественную функцию деидеологизации, в рамках которой развеиваются общественные иллюзии и заблуждения. Согласно второму подходу (Бахтин), основной функцией смеха является, напротив, жизнеутверждающая. Смех противопоставляется идеологии и насилию.

В XX в. с изучением смеха связаны такие имена, как З. Фрейд, К. Лоренц, М. М. Бахтин, Д. С. Лихачев, В. Я. Пропп, Б. Дземидок, А. З. Вулис, Л. В. Карасев, А. Н. Лук, А. Панченко, Ю. Борев и др. Внесомый вклад в изучение проблемы смеха внес австрийский психолог З. Фрейд. Рассматривая явление сквозь в контексте психологии, автор труда «Остроумие и его отношение к бессознательному» предлагает его оригинальную трактовку. Согласно утверждению З. Фрейда, «...юмор является средством получения удовольствия, несмотря на препятствующие ему мучительные аффекты...» [17]. Стержневой функцией смеха философ считает функцию разрядки. Исследователь отмечает положительную роль смеха в социуме, называя его одним из факторов, разрушающих асоциальные желания. Он проецирует остроумие на общественный процесс, исследуя определенные коллективные взаимоотношения, социальные предпосылки, стимулирующие возникновение смеха. Философ рассуждает о необходимости для *homo ridens* наличия слушателя, поскольку шутка нуждается в оценке.

Диапазон смеха, по Фрейду, включает в себя как примитивные, непредумышленные формы, так и социально значимые, к которым психолог относит пародию, карикатуру и разоблачение. Призванные понизить градус общественно значимого до уровня обыденности они развенчивают пафос мнимого величия, иллюзорность власти и корректируют идеологию.

В эпоху постмодернизма на первый план в теории смеха обретает ирония. У. Эко в своих трудах заметил: «Поскольку прошлое нельзя разрушить, его можно иронично пересмотреть» [18]. Истинная сущность открывается на уровне самоиронии, самопародии. Пародия связана с комедийной игрой смыслами в отличие от предшествующей ей пародии эпохи модерна, когда драматизм подавлял комедийное начало.

На современном этапе развития науки многие стороны смеха являются предметом междисциплинарных исследований. Наиболее разработанными оказались темы, связанные с категорией комического. Представителем социологического подхода можно назвать А. В. Дмитриева, который убежден, что юмор и вызываемый им смех требуют прежде всего социологического объяснения, но не общепринятого философского и эстетического [19].

В научной литературе смех обычно анализируется в психологическом, физиологическом, философском, эстетическом и социологическом (в последние годы — социокультурном) аспектах. Концепции большинства авторов, разрабатывающих проблемы смеха, также сложно отнести к какому-то одному направлению. Например, исследования З. Фрейда можно рассматривать как в психологическом, так и в социальном и эстетическом планах; Л. В. Карасева — в философском и социологическом; М. М. Бахтина — в философском и культурологическом и т. д.

Объединяющими оба эти подхода можно считать три основных свойства смеха, в той или иной мере нашедшие отражение у всех отечественных авторов, которые изучают вопросы комического: 1) смех является определённым способом урегулирования реальности и представлений об идеале; 2) смех — это всегда социальный феномен; 3) важность учета исторического фактора в анализе комического.

Эти аспекты лежат в основе понимания природы комического у многих ученых, однако наиболее полную классификацию возможных моделей комического взаимодействия субъекта и объекта представил польский эстетик Б. Дземидок в своей книге «О комизме». Он выделяет теорию отрицательного свойства, теорию деградации, теорию контраста, теорию противоречия, теорию пересекающихся мотивов и теорию отклонения от нормы. При этом последняя теория рассматривается как основополагающая в понимании природы комического у таких исследователей, как К. Гросс, Э. Обуэ, С. Милитон Нахам, В.З. Санников.

Еще одно обстоятельство, примиряющее все эти теории, лежит в понимании мотивов комического. Как пишет В. Санников, невозможно приказать себе шутить, комическое как самоцель редко бывает истинно комическим [20]. Присутствие мотива у шутки, как правило, искажает комичность ситуации, придавая ей некоторую неестественность. Неестественность в данном случае не тождественна отклонениям от нормы, описанным выше, а превращает шутку в низкопробный юмор.

Исторический срез показал, что теория комического интересовала многих ученых от античного времени вплоть до наших дней.

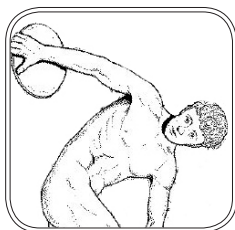
Диалог со смехом, продолжающийся на протяжении веков, подтверждает многогранность феномена, а также его тесную связь с социокультурной средой, что открывает новые перспективы в изучении явления механизма создания смеха.

Литература

1. Платон. Законы. М., 1965. С. 77
2. Арутюнова Н. Д. Эстетический и антиэстетический аспекты комизма. Логический анализ языка: языковые механизмы комизма. М. : Индрик, 2007. С. 5.
3. Аристотель. Риторика. Поэтика. М., 2000. С. 220.
4. Аристотель. О частях животных. М., 1937. С. 118.
5. Цицерон, Марк Туллий. Три трактата об ораторском искусстве. М. : Наука, 1972. — 471 с.
6. Цицерон. Об ораторе. М. : Изд-во МГУ, 1959. С.105.
7. Аристофан. Комедии. М., 2000. С. 893.
8. Демокрит. Тексты. Переводы. Исследования. М., 1970.С. 198.
9. Гоббс Т. Соч. М., 1991. С. 645
10. Кант И. Критика способности суждения. М. : Искусство, 1994. С.365.
11. Ярхо В.Н. У истоков комедии. М. : Наука, 1979. С. 175
12. Вулис А.З. В лаборатории смеха. М. : Худ. лит-ра, 1966. С. 44.
13. Шопенгауэр А. Мир как воля и представление. М. : Наука, 1993. С. 90.
14. Акопян К.З. Культура смеха. М., 1959. С. 29.
15. Салтыков-Щедрин М. Е. Собрание сочинений. М. : Прогресс, 1988. С. 48.
16. Бахтин М. М. Творчество Франсуа Рабле и народная культура Средневековья и Ренессанса. М. : Худ. лит-ра, 1990. С. 541.
17. Фрейд З. Остроумие и его отношение к бессознательному. М., 1997. С. 480.
18. У. Эко. Мир личность — ирония. М., 1993. С. 19.
19. Дмитриев А.В. Социология юмора. М. : РОССПЭН. 1998, С. 332.
20. Санников В.З. Лингвистический эксперимент и языковая игра. М. : Рукописные памятники Древней Руси, 2012. С. 316.

Развитие тяжеловесного движения в контексте реализации клиентоориентированного подхода на железнодорожном транспорте

А.В. Суханова (научный руководитель – С.В. Рачек, д-р экон. наук), Уральский государственный университет путей сообщения



Активное развитие транспортного рынка в условиях современной экономики требует повышенного внимания к вопросу конкуренции между автомобильными и железнодорожными грузовыми перевозками.

Одна из главных задач ОАО «РЖД» — удержание своих конкурентных позиций на транспортном рынке, а также привлечение новых клиентов путём внедрения стратегии клиентоориентированности [11]. Для повышения конкурентоспособности на рынке транспортных услуг компания разработала формулу, или модель компетенций «5 К + Л»: компетентность, клиентоориентированность, корпоративность и ответственность, качество и безопасность, креативность и инновационность, лидерство [4, 9].

Если взаимодействие компании с клиентами выстроено эффективно — соблюдается компетенция «клиентоориентированность», то и репутация компании будет на высоком уровне, а это привлекает инвестиции [18].

Клиентоориентированность — это способность компании наращивать количество клиентов, а следовательно, и дополнительную прибыль путём понимания и удовлетворения потребностей клиентов [6].

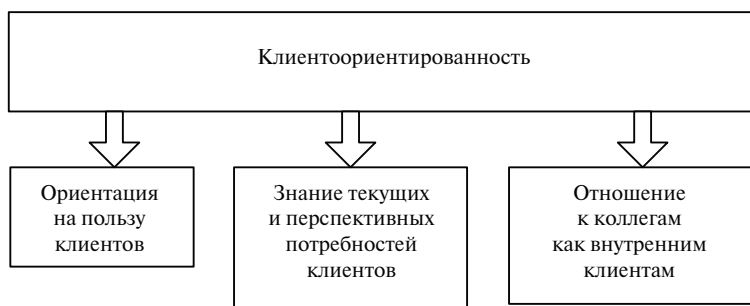
Клиентоориентированность следует также понимать как процесс, который приводит к увеличению жизненного цикла взаимодействия компании с клиентом [13].

Клиентоориентированное поведение компании подразумевает адаптацию продукта (на транспортном рынке — услуги) под особен-

ные запросы клиента, или грузоотправителя, соответствуя всем стандартам [14].

Понятие «клиентоориентированность» отличается от понятия «конкурентоспособность» тем, что в первом отражается степень соответствия компании ожиданиям их клиентов, а во втором — соответствие предприятия конъюнктуре рынка. Однако термин «клиентоориентированность» применяется в первую очередь для коммерческих организаций, у которых в приоритете стабильный доход и поток клиентов [1, 6]. Железнодорожный транспорт ведёт активную конкурентную борьбу с автомобильным транспортом, оценивая важность каждого клиента или грузоотправителя, подбирая индивидуально те или иные виды скидок, что является неотъемлемой частью клиентоориентированного подхода.

Модель компетенции «5К + Л» под клиентоориентированностью подразумевают три составляющие (рис.).



Составляющие клиентоориентированности

Каждый компонент модели направлен на формирование целостной системы клиентоориентированного подхода [18].

Для внедрения стратегии клиентоориентированности в практике выделяют четыре этапа.

Первый этап. Понимание клиентоориентированности (вся компания «РЖД» должна прийти к общему пониманию сущности клиентоориентированного подхода), т. е. в компании необходимо сформировать общий взгляд на проблему «оттока» грузов и прийти к общей идеи того, что каждому клиенту необходим особый подход. Определение клиентоориентированного подхода как деятельности компании и персонала, которая направлена на понимание и удовлетворение потребностей клиента с использованием всех ресурсов компании

и инструментов маркетинга, приведёт к получению новых клиентов, соответственно, к расширению доли компании на рынке и получению дополнительной прибыли.

Второй этап. Воспитание клиентоориентированности для понимания каждым работником важности клиентоориентированного подхода, например, проводить тренинги с просмотром различных сюжетов о важности клиентоориентированности. Воспитывать клиентоориентированность у сотрудников руководитель может собственным примером, показывая, как необходимо работать с клиентами.

Третий этап. Обучение клиентоориентированности (ежедневно, на рабочем месте; проводит начальник). Каждая планёрка или собрание должны включать вопросы повышения уровня клиентоориентированности.

Четвертый этап. Вознаграждение клиентоориентированности (материальная мотивация сотрудников) сотрудников (например, материальное поощрение лучших операторов по результатам опросов грузоотправителей) [16].

Пройдя все этапы, компания сможет повысить уровень клиентоориентированности и не только удержать старых клиентов, но и заполучить новых.

Моделей клиентоориентированного подхода может быть много, но общее требование у всех одно: рассматривать каждого клиента индивидуальным образом, согласно его уникальным запросам [5].

Клиентоориентированный подход — это повышение доходности компании путём увеличения объёмов продаж или сокращения издержек, развитие компании путём обучения через клиентов (клиент становится поставщиком информации, которая помогает развивать бизнес), продвижение и развитие бизнеса, так как довольный покупатель посоветует данную компанию и другим потребителям, другим грузоотправителям, повышение конкурентоспособности за счёт современных тенденций в сфере обслуживания клиентов, получение постоянных клиентов путём направленности компании на повышение лояльности, снижение затрат за счёт выбора наиболее прибыльных клиентов, совершенствование процесса продаж благодаря допослепродажному обслуживанию, [8,10], расширение и оптимизация «портфеля» услуг «РЖД» для максимального соответствия запросам рынка и индивидуальным потребностям клиентов, повышение качества путём унификации требований и использования инструментов контроля качества и уровня удовлетворенности и лояльности потребителей [15].

Повысить уровень клиентоориентированности помогут различные мероприятия, которые оптимизируют работу компании и привлекают внимание клиента. Например, увеличение массы поезда приведет к таким положительным изменениям, как сокращение расхода энергии на единицу перевезённого груза или, как говорилось ранее, повышение пропускной способности дороги, что ускорит доставку грузов.

Модель клиентоориентированности в ОАО «РЖД» очень актуальна в условиях конкуренции с автомобильным транспортом, что подтверждается внедрением системы «5 К + Л». Однако, говоря о клиентоориентированности железнодорожного транспорта, возникает вопрос скорости доставки груза из пункта отправки до пункта назначения с учетом времени на погрузку и разгрузку. Необходимо отметить, что этот показатель работы является одним из наиболее важных для грузоотправителей.

Средняя скорость доставки грузов на железнодорожном транспорте в 2015 г. составляет всего лишь 46 км/ч, или 340 км/сут. Такие низкие показатели скорости объясняются длительными простоями составов в начальных и конечных пунктах, а также на технических и промежуточных станциях.

В повышении скорости движения заинтересованы все стороны перевозочного процесса, в том числе и грузоотправители. Существует правило: чем меньше отправленный груз и вагоны операторов находятся в пути следования и простаивают на участках, т.е. чем выше скорость доставки грузов и скорость движения вагоном операторов, тем более конкурентоспособен железнодорожный транспорт для грузоотправителей [17].

Потребность в тяжеловесном движении возникла из-за необходимости обеспечивать наиболее экономичный вариант перевозки руды, угля и других однородных насыпных типов грузов от месторождения до потребителя. Организация движения поездов повышенного веса и длины рассматривается как один из возможных способов увеличения пропускной и провозной способностей железнодорожных направлений [3].

Благодаря внедрению тяжеловесного движения на направлении Кузбасс — северо-запад в 2015 г. было освоено дополнительно 4,6 млн т груза (экономический эффект — 3,16 млрд руб.).

На сегодняшний день тяжеловесное движение должно быть под пристальным вниманием особенно при решении вопросов повышения эффективности организации перевозочного процесса.

Программа тяжеловесного движения даже в условиях ограниченности пропускных и провозных способностей находит более экономически выгодные схемы перевозок [12].

Литература

1. Бусаркина В.В. Понятие клиентоориентированности предприятия и проблемы ее оценки // Проблемы современной экономики. 2007. № 4 (24). Технологии роста // Гудок : сетевой ресурс. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1288695> (дата обращения: 6.02.2016).
2. Захаров С.М., Шенфельд К. П. Развитие тяжеловесного движения в мире // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 9–18. ISSN 2223-9731.
3. Корпоративные компетенции ОАО «РЖД».
4. Лидин К.Л., Потехина А.М., Якобсон А.Я. Стратегия клиентоориентированного подхода в средах с различной турбулентностью. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-klientoorientirovannogo-podhoda-v-sredah-s-razlichnoy-turbulentnostyu> (дата обращения: 4.02.2016).
5. Лучков В. Что такое клиентоориентированность: школа процессного управления // Бизнес-журнал. URL: <http://victorluchkov.ru/articles/chto-takoe-klientoorientirovannost.html> (дата обращения: 04.02.2016).
6. Мехоношина И. Новые задачи СвЖД: тяжеловесным поездам — большое будущее. URL: <http://www.justmedia.ru/analitika/economy/Tyazhelovesnym-royezdam-bolshoe-budushee> (дата обращения: 7.02.2016).
7. Патлах И.Н. Клиентоориентированность как философия бизнеса // Ваш бизнес. 2011. №10 (декабрь). С. 24–26.
8. Пестерева Т. Обращение бренд-лидера. URL: <http://nextzrd.ru/> (дата обращения: 4.02.2016).
9. Профессиональные продажи / пер. с англ. под ред. Т.А. Лукичевой. — СПб : Изд. дом «Нева», 2003. 384 с. ISBN 5-7654-2736-7, ISBN 0-03-26701-3 (англ.)
10. Рачек С.В. Теоретические основы управления качеством. Отечественный и зарубежный подход // Социально-экономические проблемы железнодорожного транспорта : сб. м-лов Всеросс. науч.-техн. конф., посв. 125-летию Свердловской ж.д. — Екатеринбург, 2003. С. 443–447.

11. Росляков Ю.А. Развитию тяжеловесов – зелёную улицу // Локомотив. 2014. № 7, ISSN 0869-8147.
12. Русанова А.А. Системный взгляд на клиентоориентированность // М-лы II Всеросс. научн.-практ. конф. «Современные тенденции развития теории и практики управления отечественными предприятиями» / Ставрополь, 2008. ISSN 2304-120X.
13. Толстобров Д.А., Толстоброва Н.А. Влияние клиентоориентированной политики предприятия на организацию производственного процесса // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-3. С. 606–611. ISSN 1812-7339.
14. Формирование корпоративной системы развития клиентоориентированности холдинга «РЖД».
15. Харский К. Хорошо. Клиентоориентированность. Что дальше и конкретно надо делать? URL: <http://blog.harsky.ru/?p=1066> (дата обращения: 7.02.2016). Шенфельд К.П. Развитие методов управления перевозочным процессом в условиях рыночной экономики и реформирования железнодорожного транспорта : автореф. дис. ... на соиск. учен. ст. д-ра техн. наук. М. : ВНИИЖТ. 281 с.
16. Якунин В.И. Культурная революция // Пульс управления. 2012. №5.

Моделирование сил в контакте «колесо-рельс» при движении поезда в криволинейном участке пути*

К. М. Щепин (научный руководитель – Г. Л. Аккерман, д-р техн. наук), Уральский государственный университет путей сообщения

Безопасная бесперебойная работа железнодорожного транспорта во многом зависит от железнодорожной инфраструктуры, а именно, железнодорожного пути [1]. Железнодорожный путь с различными отступлениями может привести к перебоям в работе всей отрасли. Даже в идеальном железнодорожном пути, то есть без каких-либо отступлений, могут возникать значительные силы в системе «колесо-рельс», которые негативно влияют на движение поездов.

Один из таких участков пути — выходные переходные кривые, при прохождении которых возникают значительные силы в продольном и поперечном направлениях. В качестве переходных кривых чаще всего используют радиоидальные спирали [2] или клотоиды.

Графики продольных и поперечных сил в контакте «колесо-рельс», возникающих при движении поезда по криволинейному участку пути, представлены на рис. 1, 2.

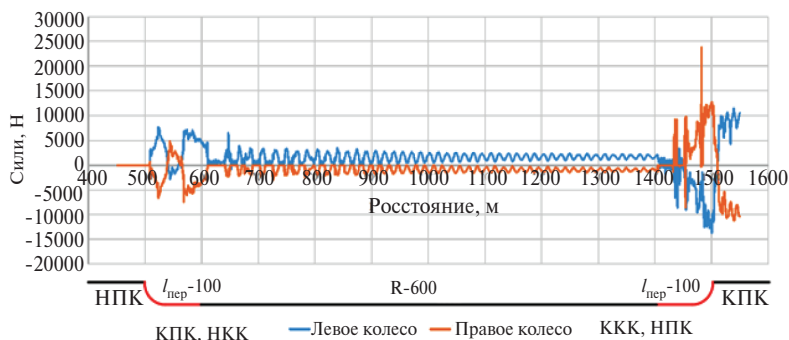


Рис. 1. Силы, возникающие в продольном направлении в контакте «колесо-рельс»

* Публикуется в авторской редакции.

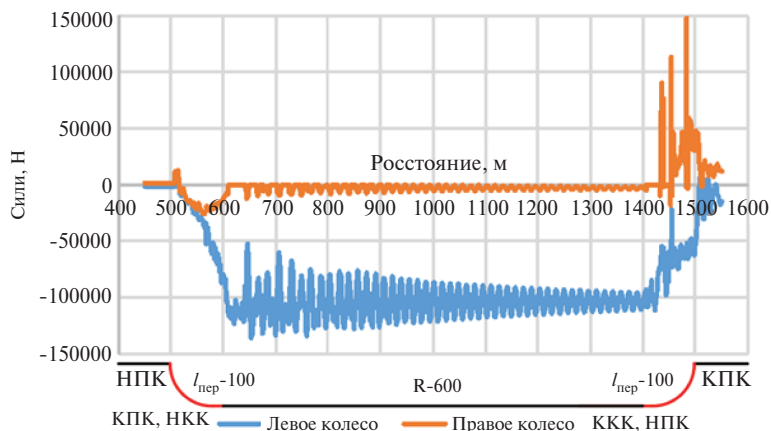


Рис. 2. Силы, возникающие в поперечном направлении в контакте «колесо-рельс»

Значения сил (рис. 1, 2) получены с помощью моделирования движения подвижного состава в программном комплексе «Универсальный механизм». Скачки сил возникают в местах движения поезда по выходной переходной кривой. Эти силы значительно ухудшают плавность хода, повышают износ гребней колес и головок рельсов [3], увеличивают периодичность выполнения работ по рихтовке железнодорожного пути.

Моделирование показало, что для уменьшения сил в системе «колесо-рельс» выходная переходная кривая должна быть больше входной. Однако на практике это не всегда удастся выполнить.

При увеличении выходной переходной кривой в 1,5 раза силы в поперечном направлении снижаются более чем на 70 %, а в продольном — на 20 %. Результаты проведенного моделирования представлены на рис. 3, 4.

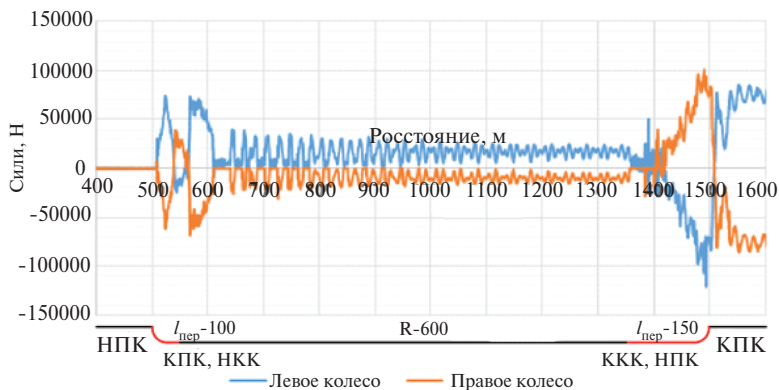


Рис. 3. Силы, возникающие в продольном направлении при увеличенной выходной переходной кривой в 1,5 раза

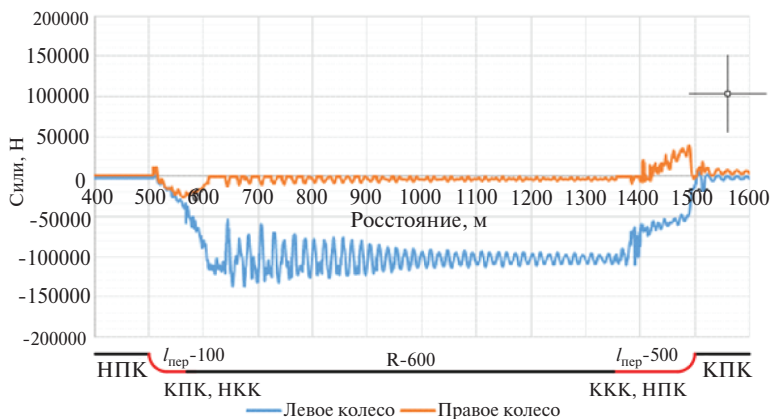


Рис. 4. Силы, возникающие в поперечном направлении при увеличенной выходной переходной кривой в 1,5 раза

Удлинение выходной переходной кривой значительно снижает силы в системе «колесо-рельс». Дальнейшее уменьшение сил может быть достигнуто с помощью замены половины круговой кривой и выходной кривой на клотоиду. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

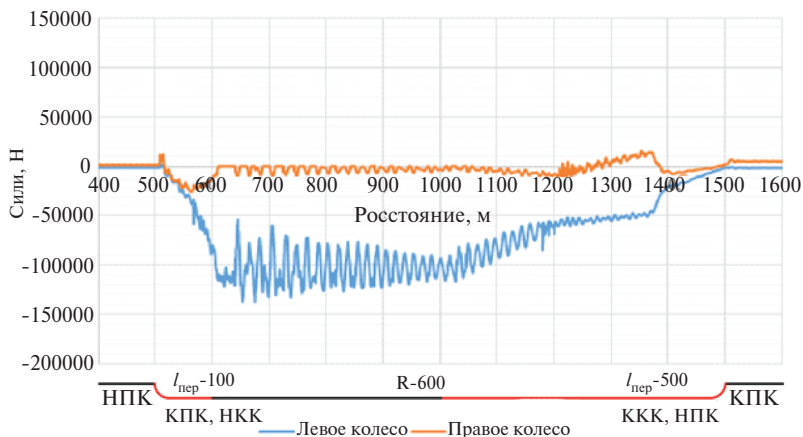


Рис. 5. Силы, возникающие в поперечном направлении при замене половины круговой кривой и выходной переходной кривой на клотоиду

Удлинение выходной переходной кривой позволяет значительно повлиять на повышение плавности хода подвижного состава, а значит, и скорость движения, уменьшает износ металла и снижает периодичность выполнения работ по рихтовке пути, тем самым сокращаются эксплуатационные затраты. Однако удлинение выходной переходной кривой применимо только для двухпутных участков пути; если же говорить об однопутных участках, то для максимального эффекта необходимо увеличивать ту переходную кривую, которая будет выходной в том направлении, где больший грузопоток.

Литература

1. Аккерман Г. Л., Щепин К. М. Основные причины возникновения отказов в работе железнодорожного пути // Инновационный транспорт. 2015. №3 (17).
2. Исламов А. Р. Исследование сопряжения элементов продольного профиля железнодорожного пути посредством имитационного моделирования : дисс. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Екатеринбург, 2014.
3. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Метод снижения затрат на содержание криволинейных участков пути // 2011. С. 28–30.

Научное издание

«Эврика!»

Научный редактор — Б.С. Сергеев
Редактор Л.С. Барышникова
Компьютерная верстка Н. А. Журавлевой

Подписано в печать 25.05.2016.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 5,9.
Тираж 40 экз. Заказ 144.

УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Тел.: (343) 221-24-90