Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXXII, вып. I, 1954 г.

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПОСОБА УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС ЭЛЕКТРОВОЗА С РЕЛЬСАМИ

Ассистент О. М. Янсон

В рудничных условиях профиль пути электровозной откатки, как правило, является весьма сложным. Имеют место значительные изменения уклонов пути, малые радиусы закруглений, резкие переходы с одного радиуса закруглений на другой и др. Это вызывает резкое изменение величины сил сопротивления движению поезда, а следовательно, и силы тяги электровоза. Изменение силы тяги вызывается также частыми пусками электровоза в ход при весьма коротких дистанциях пути.

Резкое изменение силы тяги электровоза в сторону увеличения часто вызывает проскальзывание ведущих колес электровоза относительно рельсов. Это ограничивает силу тяги электровоза, лимитирует величину состава поезда. Для увеличения коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами в настоящее время применяется песок, который подсыпается под ведущие полускаты на рельсы. При этом считается, что коэффициент сцепления ψ для сухих рельсов при трогании с места увеличивается от 0,20 до 0,25. Увеличение ψ обусловит прирост силы тяги примерно на 25%. В некоторых случаях, при весьма неспокойном профиле пути, проскальзывание колес электровоза наблюдается не только в периоды разгона, но и в периоды движения по трудным элементам пути. Машинисту электровоза приходится почти непрерывно пользоваться песочницами. Например, на шахтах Черемховского угольного месторождения, где откаточные выработки проходятся по почве горизонтально залегающих пластов полезного ископаемого, профиль откаточных путей так тяжел, что машинист за каждый рейс использует полную песочницу песка, и все же при движении электровоза наблюдается непрерывное проскальзывание ведущих колес. В ряде случаев скольжение колес в среднем составляет около 50% угловой скорости вращения колес, т. е. потребляемая энергия из сети тратится не только на движение состава, но и на трение колес электровоза о рельсы. Имея в виду равенство вращающих моментов колес при работе трения колес о рельсы и качения, расход энергии можно считать прямо пропорциональным угловым скоростям. Расход энергии на трение колес будет пропорционален угловой скорости проскальзывания колес, расход энергии на движение состава пропорционален угловой скорости качения колес по рельсам. Таким образом, при указанном режиме работы половина энергии тратится на вредное истирание ходовых частей электровоза. Это вызывает весьма быстрый износ бандажей колес, ведущих полускатов. На колесе образуется двойная реборда, увеличивается сопротивление

движению электровоза и ухудшается его работа, особенно на закруглениях. При этом истираются не только бандажи колес, но и головки рельсов. Наблюдались случаи, когда головка рельсов оказывалась изношенной до полки. Обильно применяемый песок приводит к быстрому засорению откаточных путей и стрелочных переводов. При каждом рейсе дополнительно затрачивается значительное время на набор песка, усложняется управление электровозом.

Улучшение условий сцепления может быть достигнуто исправлением откаточных путей, устранением резких переломов в профиле путей и малых радиусов закруглений, применением тяжелого профиля рельсов. В этом свете должна быть рассмотрена и возможность увеличения

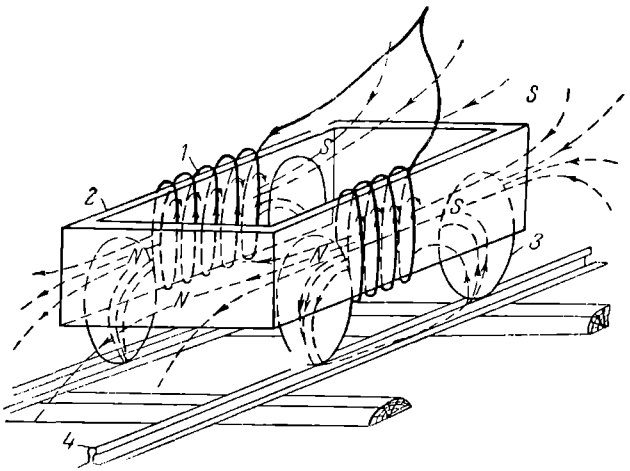


Рис. 1. Схема включения электромагнитов:
1 — катушки электромагнитов; *2* — рама электровоза; *3* — колеса электров
4 — рельсы

коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами электромагнитным путем. Силы магнитного притяжения, возникающие между звеньями контура магнитных силовых линий, могут создать дополнительное электромагнитное сцепление между колесом и рельсом. С этой целью должно быть создано силовое магнитное поле, замкнутое по точкам соприкосновения электровоза с рельсами.

Для создания необходимых контуров магнитных силовых линий через ведущие колеса электровоза и рельсы катушки электромагнитов могут быть включены так, как указано на схеме рис. 1. Два встречных магнитных потока правой и левой сторон электровоза взаимно изолируют возможность замыкания магнитных силовых линий по телу собственно электровоза. Силовые линии вынуждены будут замыкаться через воздух и рельсы с высокой индукцией в точках касания колес и рельсов.

Своеобразные условия создания магнитных контуров, а также неизученность физики влияния магнитной индукции на условия сцепления колес электровоза с рельсами вызвали необходимость в тщательном экспериментальном исследовании.

Магнитный способ улучшения условий сцепления колес локомотива с рельсами является новым и малоисследованным. В технической литературе он до настоящего времени почти не затрагивался. В условиях железнодорожного транспорта Б. П. Микулиным (в 7-м депо Октябрьской железной дороги) были проведены производственные испытания локомотива СО № 17-2877, оборудованного электромагнитными возбудителями. Затем экспериментальные испытания этого же локомотива

были проведены ВНИИЖТом. Заключение по испытаниям локомотива СО № 17-2877 сводится к установлению факта слабой намагниченности колес и, как следствие этого, — к отрицанию возможности увеличения сцепного веса на сколько-нибудь значительную величину.

В исследовательской работе и в предложенном конструктивном решении электромагнитных возбудителей основной задачей выдвигалось увеличение сцепного веса P_0 локомотива за счет сил магнитного притяжения. Но самый упрощенный подсчет подъемной силы электромагнита, из условий максимальной индукции и максимальной площади контакта колеса с рельсом, показывает, что применение электромагнитов на всех пяти ведущих осях локомотива при B_{max} может увеличить его сцепной вес всего лишь на 2—3%.

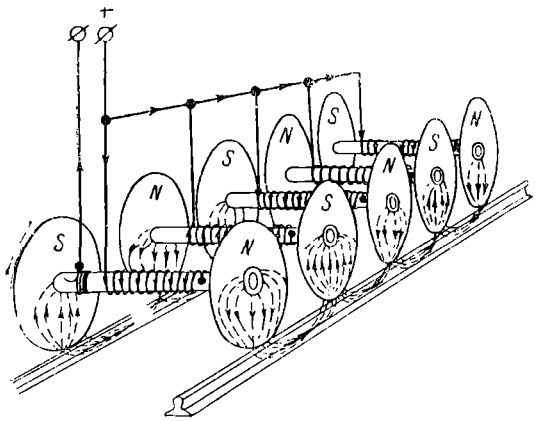


Рис. 2. Принципиальная схема расположения электромагнитов, примененная на локомотиве СО № 17-2877

Однако, несмотря на значительное магнитное рассеяние и незначительную индукцию $B_к$ на контактной площадке колеса с рельсом (при расположении электромагнитов, указанном на рис. 2) подмагничивание колес периодами значительно увеличивает силу тяги, обусловленную сцепным весом локомотива.

Сопоставление экспериментальных замеров индукций отдельных звеньев магнитной цепи с наблюдениями за влиянием подмагничивания в производственных условиях, а также не решенный ВНИИЖТом вопрос о полученном при экспериментальных поездках значении коэффициента сцепления у локомотива СО № 17-2877 ($\psi = 0{,}42—0{,}44$), заставляют искать причину улучшения условий сцепления не в увеличении сцепного веса P_0, а в изменении условий сцепления колеса с рельсом под влиянием намагничивания. Электромагнитный способ регулирования сцепной силы особую важность приобретает при разрешении проблемы полной автоматизации рудничной электровозной откатки.

Публикуемые в настоящей статье результаты первых лабораторных исследований вполне подтверждают наблюдения, полученные при производственных испытаниях локомотива СО № 17-2877, и дают возможность заключить, что магнитный эффект может оказаться достаточным для заметного улучшения условий сцепления колеса электровоза с рельсом.

Методика проведения экспериментов

Первая экспериментальная задача заключалась в проверке факта изменения условий сцепления под влиянием намагничивания. Чтобы можно было судить о качественной и количественной сторонах этих изменений, необходимо было прежде всего выяснить, какой характер носит пробуксовка колеса в зависимости от сцепной силы P_0, т. е. установить зависимость

$$\Delta S = f(P_0), \qquad (1)$$

где ΔS пробуксовка, %.

Затем нужно было определить силу притяжения колеса к рельсу в зависимости от тока возбуждения электромагнита

$$P_м = f(i_в),$$

где $P_м$ — сила магнитного притяжения;
$i_в$ — ток возбуждения.

В случае, если магнитная индукция не оказывает влияния на условия сцепления,

$$P_м = \Delta P_0, \qquad (2)$$

где ΔP_0 — фиктивный прирост сцепного веса, вызванный силами магнитного притяжения.

Характер зависимости $\Delta S = f(P_0)$ при этом должен остаться неизменным.

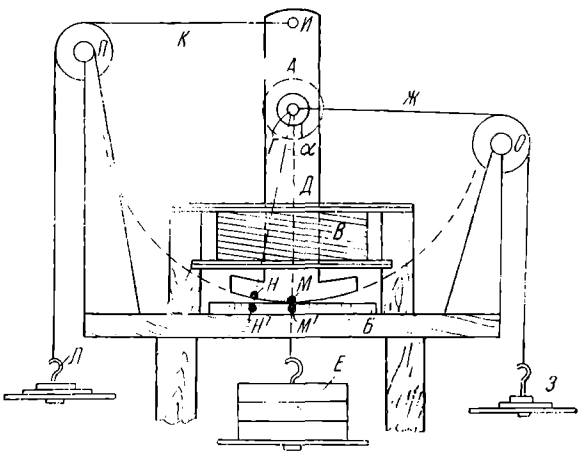


Рис. 3. Схема испытательного стенда

Если же магнитная индукция улучшает условия сцепления, то

$$\Delta P_0' > P_м, \qquad (3)$$

где $\Delta P_0'$ — фиктивный прирост сцепного веса, вызванный изменением самой физики сцепления.

Для выявления перечисленных зависимостей был предложен испытательный стенд (рис. 3). Сектор ведущего колеса *А* расположен на отрезке рельса *Б*. Сектор находится в поле электромагнита *В*. Сектор колеса и рельс имеют посредине продольную прорезь, где от упорного подшипника *Г* проходит трос *Д* к грузу *Е*. Грузом *Е* создается требуемый по условиям эксперимента сцепной вес P_0. От подшипника *Г* идет также второй трос *Ж* к грузу *З*, представляющему силу сопротивления движению $\sum W$ На секторе колеса *А* имеется второй подшипник *И*, к которому подходит трос *К*, идущий от груза *Л*, создающего вращающий момент относительно оси *Г* и мгновенного центра вращения колеса *М*.

Эксперимент 1. В задачу первого эксперимента входило определение характера пробуксовки (%) в зависимости от изменений P_0 без подмагничивания. Методика определения была следующей. На секторе колеса и отрезке рельса были нанесены миллиметровые деления. При 100-процентном качении под влиянием момента, создаваемого

натяжением троса K, при повороте сектора на угол α точки H и H' должны совпасть (рис. 3).

При 100-процентной пробуксовке с поворотом сектора на угол α совпадут точки H и M' Промежуточные положения точки H между точками H' и M' определят величину пробуксовки от 0 до 100% (рис. 4).

Эксперимент 2. В задачу второго эксперимента входило определение влияния намагниченности на условия сцепления. Для этого прежде всего была снята кривая $P = f(i_в)$ (рис. 5).

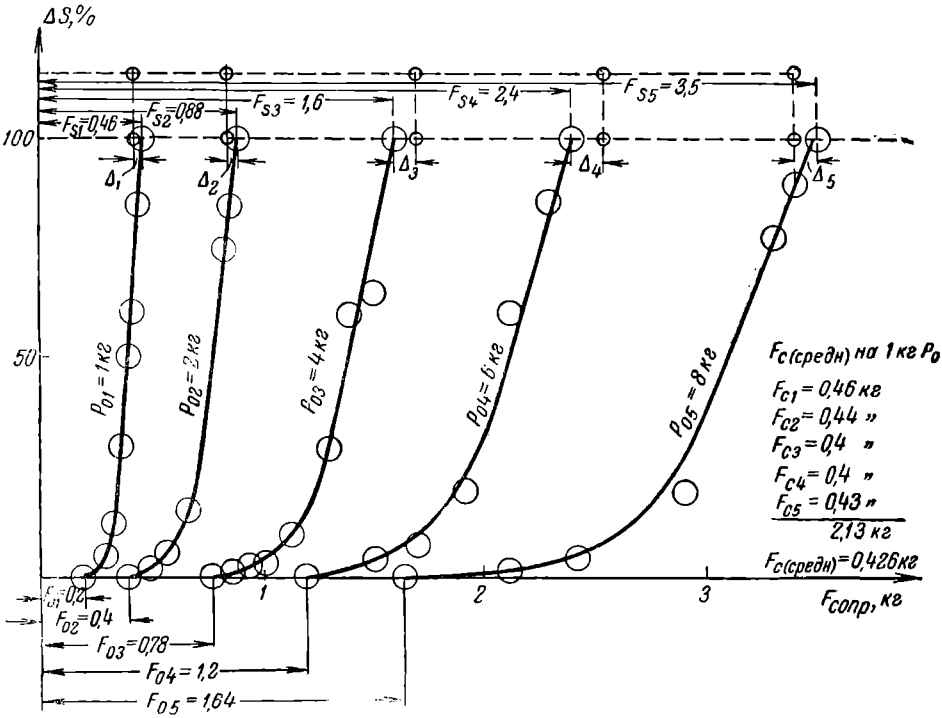


Рис. 4. Зависимость характера пробуксовки от изменения сцепной силы:
Δ — отклонение от среднего значения F_C; F_C и F_S — силы сопротивления, при которых наступает 100-процентная пробуксовка; F_0 — значение F_{max} при 100-процентном качении

Кривая силы магнитного притяжения снималась, как показано на рис. 6, путем фиксирования тока возбуждения $i_в$ при отрыве сектора колеса A от отрезка рельса $Б$ под влиянием заданной силы тяжести.

Таким образом, по показаниям амперметра, включенного в цепь электромагнита B, и по полученной кривой $P_м = f(i_в)$ можно было судить о величине дополнительной магнитной сцепной силы $P_м$.

Кривые пробуксовки с включенным электромагнитом приведены на рис. 7. Кривая 2 снята без подмагничивания при $P_0 = 2$ кг. Кривая 3 снята при

$$P_м = 0{,}78 \text{ кг},$$
$$P_в = 1{,}00 \text{ кг}$$
$$\overline{\sum P_0 = 1{,}78 \text{ кг}},$$

где $P_в$ — механическая составляющая сцепной силы (весовая);
$P_м$ магнитная составляющая сцепной силы;
$\sum P_0$ — сцепная сила.

Сцепной силе P_0, равной 1,78 *кг*, должна была бы соответствовать кривая *1*. Следовательно, фиктивный прирост сцепного веса $\Delta P_0'$ превосходит величину $P_м$.

$$\Delta P_0' = P_м + \Delta P_1, \qquad (4)$$

где ΔP_1 — экспериментально полученный фиктивный прирост сцепной силы.

Найденное путем интерполяции значение фиктивного прироста сцепной силы $\Delta P_1 = 0{,}73$ *кг*, т. е. полученная кривая *3* соответствует $P_0 = 2{,}51$ *кг*. Таким образом, фиктивный прирост сцепной силы $\Delta P_0' \approx 2P_м$.

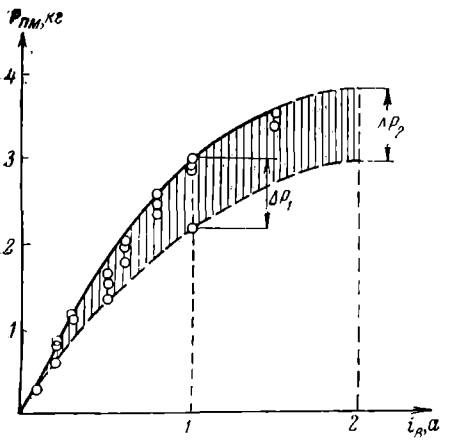


Рис. 5. Зависимость подъемной силы электромагнита $P_{пм}$ от тока возбуждения $i_в$.
$\Delta P = P_{пм_{max}} - P_{пм_{min}}$.
В экспериментах принято $P_{пм_{max}}$

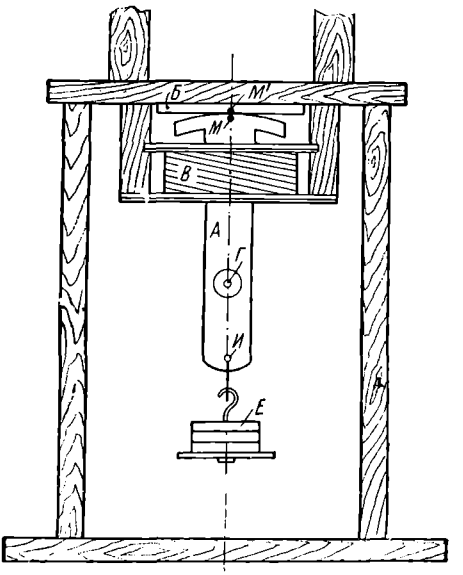


Рис. 6. Определение зависимости $P_м = f(i_в)$

Аналогичный результат был получен с кривыми *4*, *5*, *6*. В этом случае (рис. 7, кривая *6*)

$$P_м = 2{,}64 \text{ кг}$$
$$P_в = 1{,}00 \text{ кг}$$
$$\sum P_0 = 3{,}64 \text{ кг},$$
$$\Delta P_0' = P_м + \Delta P_2 = 2{,}64 + 0{,}91 = 3{,}55 \text{ кг}.$$

Следовательно, $\Delta P_0'$ составляло от $P_м$ в первом случае 193% (кривая *3*), во втором случае — 134% (кривая *6*)

Можно было бы считать, что эти данные уже вполне доказывают наличие изменений в условиях сцепления колеса с рельсом при намагничивании. Но так как характер кривых пробуксовки не меняется, можно сделать предположение, что магнитная составляющая сцепной силы $P_м$ увеличивается только под влиянием давления колеса на рельс.

Подъемная сила магнита определяется зависимостью

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0}, \qquad (5)$$

где F — подъемная сила магнита;

B — индукция;

S — площадь соприкосновения звеньев магнитной цепи;

μ_0 — магнитная проницаемость пустоты,

и характеризуется способностью притягивать ферромагнитные тела до тех пор, пока

$$P \leqslant F, \qquad (6)$$

где P — вес тела.

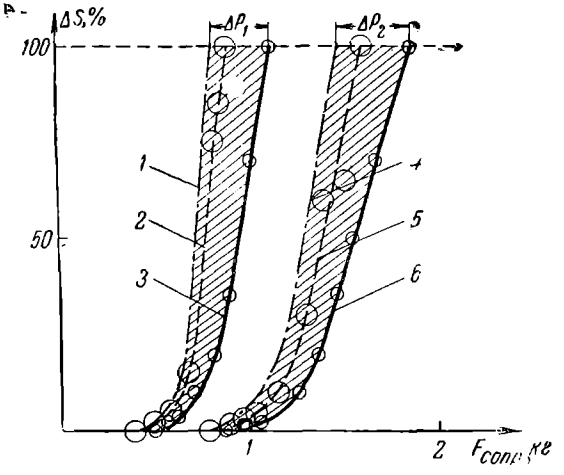


Рис. 7 Зависимость характера пробуксовки от магнитной индукции

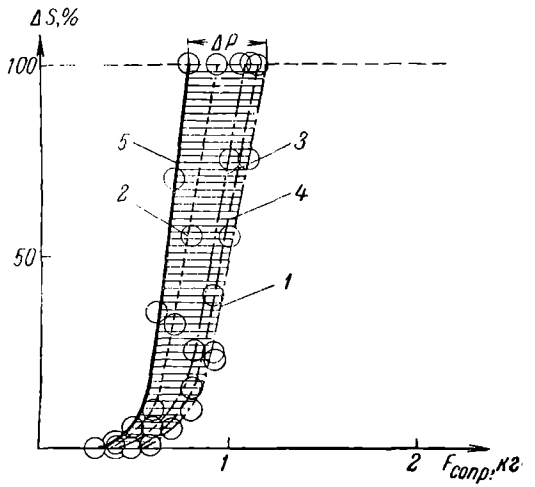


Рис. 8. Зависимость характера пробуксовки от времени, при наличии остаточной индукции $P_0 =$ $=$ const $= 2$ *кг*. Кривая *1* снята 1 июня; кривая *2* — 1 июня, после протирания поверхности; кривая *3* — 2 июня; кривая *4* — 11 июня; кривая *5* — 11 июня, после протирания поверхности

При $P = F$ давление тела на магнит $\frac{F-P}{S} = 0$. Следовательно, рабочие условия контакта колеса с рельсом не являются идентичными с процессом подъема тела магнитом. Поэтому в дальнейшем сила магнитного притяжения между колесом и рельсом будет именоваться контактной силой $P_{км}$ (контактная, магнитная).

По полученным экспериментальным данным можно сделать заключение, что

$$P_{км} > P_{пм}, \qquad (7)$$

где $P_{пм}$ — подъемная сила магнита.

Дальнейшая экспериментальная работа, таким образом, строится уже на предположении, что при наличии давления одного звена магнитной цепи на другое силы магнитного притяжения между звеньями увеличиваются.

Многократная проверка опыта внесла существенные дополнения к полученным результатам. Каждый раз при проведении эксперимента результаты получались количественно различными. Если повторение происходило через сутки, то $\Delta P_0'$ имело обязательно бо́льшее значение, хотя за счет подшлифовки контактных площадок можно было бы ожидать как раз обратного результата.

Следовательно, в данном случае на условия сцепления могло иметь место влияние: а) коррозии, б) тончайшего слоя пыли, которая могла за сутки осесть на отрезке рельса; в) влажности воздуха.

На рис. 8 приведено семейство кривых, снятых в течение 10 дней при $P_0 = 2$ *кг* без подмагничивания, но при наличии остаточного магнетизма. Полученные результаты привели к несколько противоречивым выводам:

1) протирка рельса и сектора колес ухудшает условия сцепления;

2) улучшение условий сцепления за сутки мало отличается от результата улучшения за 10 суток, хотя, если причиной считать пыль или коррозию, то за 10 суток влияние их должно было бы сказаться в значительно бóльшей степени.

На первом этапе изучения этих явлений правильного ответа найдено не было, так как влиянию остаточного магнетизма не придавалось серьезного значения. Был сделан только вывод, что в строгом смысле слова о кривых пробуксовки можно говорить только в идеальном случае, а практически будут иметься всегда области или площади, ограниченные для данных условий минимальной и максимальной кривыми.

В данном случае ΔP между кривой *1* и кривой *5* (рис. 8) соответствует фиктивному значению сцепного веса $\Delta P_0 = 0{,}93$ *кг*. Полученное же максимальное значение $\Delta P_2 = 0{,}91$ *кг* (рис. 7). Следовательно, возможная область изменения условий сцепления перекрывает полученные результаты при намагничивании

$$\Delta P = 0{,}93 \text{ кг} > \Delta P_2 = 0{,}91 \text{ кг}.$$

Это обстоятельство заставило изменить методику эксперимента. Необходимо было достигнуть таких условий, при которых побочные и случайные факторы не оказывали бы влияния на основные исследуемые закономерности.

Однако обобщение последующих полученных данных показывает, что ухудшение условий сцепления (рис. 8) происходит не из-за обтирания поверхностей соприкосновения, а из-за разрыва электронных цепочек и дезориентации диполей при отрыве колеса от рельса. За сутки диполи снова занимали ориентированное положение и силы магнитного притяжения увеличивались. Совершенно закономерным становится и то положение, что за последующий отрезок времени, хотя и значительно бóльший, существенных изменений не наблюдалось.

Таким образом, семейство кривых на рис. 8 является лишь доказательством того, что контактная сила $P_{км}$ не равна $P_{пм}$.

Следующий этап экспериментов заключался в создании условий, при которых возможное влияние коррозии, пыли, влажности и подшлифовки поверхностей было бы сведено к минимуму. Для этого сектор колеса и рельс был покрыт слоем масла так, что контактные площадки во время работы и в промежутках между экспериментами были окружены масляной каплей.

Полученные кривые пробуксовки несколько изменили свою форму (рис. 9), коэффициент сцепления значительно уменьшился.

На рис. 9 приведено семейство кривых, снятых аналогично кривым рис. 8. Область кривых для $P_0 = \text{const}$ здесь значительно меньше. Результаты опытов с применением масла получились значительно более четкими.

На рис. 10 дано семейство кривых, снятых при условии:

$$\sum P_1 = \sum P_2 = \sum P_3 = \sum P_4 = 4 \text{ кг};$$

$$P_{\text{пм}_2} < P_{\text{пм}_3} < P_{\text{пм}_4};$$

где $P_{\text{пм}_1} = 1$ кг; $P_{\text{пм}_2} = 2$ кг; $P_{\text{пм}_4} = 3$ кг;

$$P_{\text{в}_1} > P_{\text{в}_2} > P_{\text{в}_3} > P_{\text{в}_4};$$

где $P_{\text{в}_1} = 4$ кг; $P_{\text{в}_2} = 3$ кг; $P_{\text{в}_3} = 2$ кг; $P_{\text{в}_4} = 1$ кг;

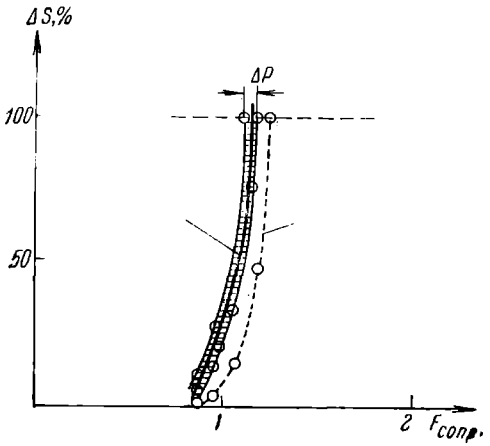


Рис. 9. Область возможных случайных отклонений кривых пробуксовки от средних значений при смазке $P_0 = \text{const} = 4$ кг. Кривая 1 — среднее значение $\Delta S = f(F_{\text{сопр}})$ при $P_0 = 4$ кг; кривая 2 снята при наличии остаточного магнетизма, $P_0 = 4$ кг

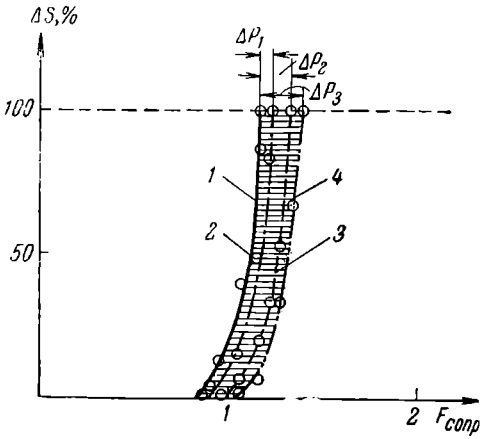


Рис. 10. Зависимость характера пробуксовки от величины магнитной индукции при смазке

Результаты полученных данных —

для кривой 1 $P_{\text{км}}$ 0,

2 $P_{\text{км}} = 1{,}18$ кг,

3 $P_{\text{км}} = 2{,}45$ „

4 $P_{\text{км}} = 3{,}6$ „ —

показывают, что с увеличением магнитной индукции B, контактная сила $P_{\text{км}}$ увеличивается более интенсивно, чем подъемная или отрывная сила магнита $P_{\text{пм}}$. Область случайных изменений ΔP не перекрывает полученных значений ΔP_2 и ΔP_3.

Следовательно, можно считать окончательно доказанным существование контактной магнитной силы $P_{\text{км}}$ и того, что $\Delta P_{\text{км}} > P_{\text{пм}}$ при наличии давления между звеньями магнитной цепи.

Эксперимент 3. В задачу третьего эксперимента входило определение зависимости

$$P_{\text{км}} = f(P_0) \qquad (8)$$

при условии

$$P_{\text{пм}} = f(i_{\text{в}}) \quad \text{const}.$$

Кривые снимались, как и в предыдущем случае, при наличии масла на контактных площадках. Изменением веса груза E (рис. 3) создавались условия:

$$P_{B_1} < P_{B_2} < P_{B_3},$$

где $P_{B_1} = 1$ *кг*;
$P_{B_2} = 5$
$P_{B_3} = 13$ „

$$\sum P_1 < \sum P_2 < \sum P_3,$$

где $\sum P_1 = 4$ *кг*;
$\sum P_2 = 8$ „;
$\sum P_3 = 16$ „;

$$P_{пм} \quad \text{const} = 3 \text{ кг}.$$

Результаты многократных опытов приведены на графике рис.

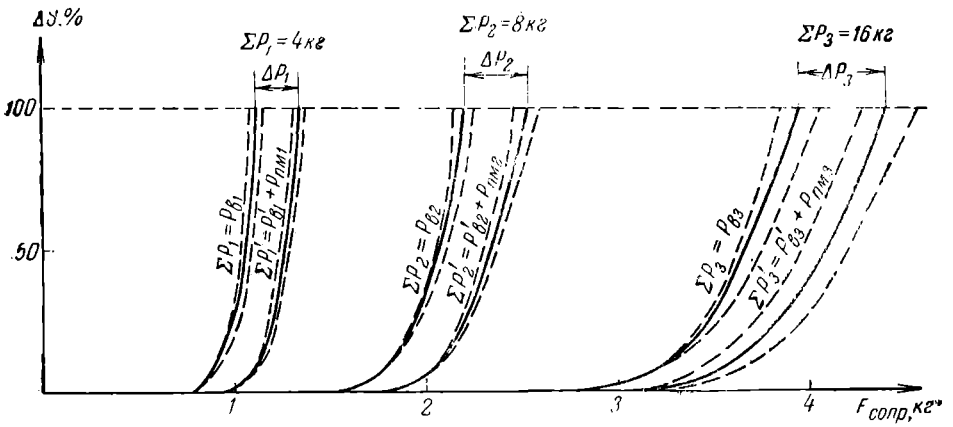


Рис. 11. Зависимость $P_{км}$ от увеличения сцепной силы P_0 при $P_{пм} = \text{const}$
$\Delta P_1 \quad P_{км_1}$, $\Delta P_2 = P_{км_2}$, $\Delta P_3 = P_{км_3}$, $P_{пм_1} = P_{пм_2} \quad P_{пм_3}$

Обобщение полученных результатов

1. В результате нескольких сот опытов, проведенных в различных условиях и различными методами, установлено, что сила магнитного притяжения $P_{км}$, при наличии давления между звеньями магнитной цепи, больше отрывной или подъемной силы магнита.

2. Контактная сила зависит от индукции B, давления между звеньями цепи P и времени t, протекшего с момента возникновения контакта.

3. Полученные данные обобщены в графики (рис. 12 и 13), на которых показана зависимость $P_{км} = f(P_0)$ и $P_{км} \quad f(i_н)$. Модель, на которой производились эксперименты, имела сектор колеса, изготовленный из бандажной стали, а рельс из рельсовой стали.

4. Приведенные на рис. 12 и 13 зависимости не являются, конечно, исчерпывающим ответом и всесторонним отражением закономерностей проявления магнитной контактной силы. Это только первые результаты, полученные, правда, разными методами, но пока еще на небольшом числе моделей. Однако эти данные позволяют уже сделать заключение, что магнитный эффект может оказаться достаточным для заметного улучшения условий сцепления колеса локомотива с рельсом.

5. В заключение приводится отрезок кривой, построенной на основании усредненных значений магнитного эффекта, полученных из проведенных опытов (рис. 14). Кривая показывает характер изменения при-

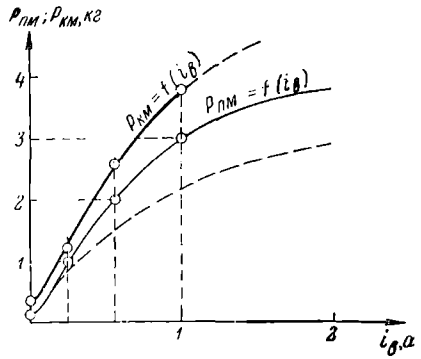


Рис. 12. Зависимость контактной силы от магнитной индукции
$P_{км} = f(i_в)$, $\Sigma P_0 = 4$ кг

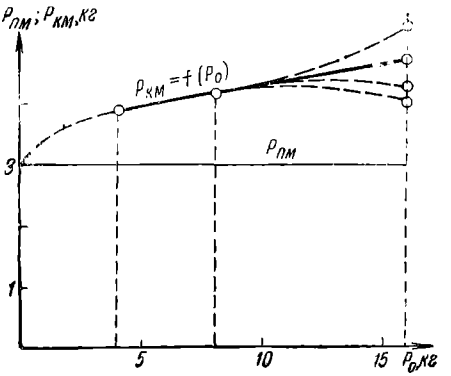


Рис. 13. Зависимость контактной силы от давления между звеньями магнитной цепи
$P_{км} = f(P_0)$, $i_в = \text{const}$

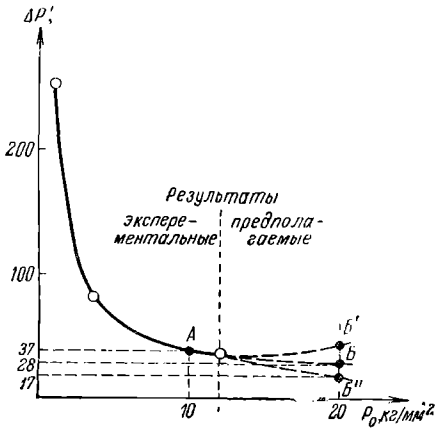


Рис. 14. Зависимость возможного прироста фиктивного сцепного веса $\Delta P_0'$ от удельного давления колеса на рельс.
$\Delta P_0' = f(P_0)$, $i_в = \text{const}$, $\Sigma P_0 = P_0 + \Delta P_0'$

роста фиктивного сцепного веса $\Delta P_0'$ в зависимости от удельного давления колеса на рельс.

Дальнейшие экспериментальные работы должны окончательно определить пределы процентного прироста фиктивного сцепного веса под влиянием намагничивания для рудничных электровозов различных типов.

Таким образом, следующими экспериментальными и исследовательскими задачами являются:

а) вывод расчетных формул и проверка их на моделях;

б) составление проекта, на основании полученных данных, оборудования электровоза электромагнитами;

в) промышленные испытания электровоза, оборудованного электромагнитами при различных состояниях пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рысьев А. В. К некоторым вопросам теории рудничной электровозной откатки. Записки Ленинградского горного института, 1948, т. XXII.

2. Поросятников А. В. и Быстрицкий К. П. Рельсовые электромагнитные тормозы. Труды ВНИТО городского электротранспорта, 1938, № 15.

Поступило 8. I. 1954 г.