Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXVII, вып. 1, 1952 г.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ДВИЖЕНИЙ СОСТАВА НА РАБОТУ РУДНИЧНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Доц. А. В. Рысьев

Движение состава поезда с локомотивом в условиях рудничной откатки представляет собой весьма сложный процесс, складывающийся из целого ряда движений всей системы в целом и отдельных ее частей. Кроме главного — полезного поступательного — движения поезда здесь имеет место ряд побочных движений паразитного характера.

К их числу могут быть отнесены, например, удары вагонов друг о друга и о локомотив, подергивание локомотива, тряска, покачивание виляние, валка и др. С производственной точки зрения все перечисленные паразитные движения имеют весьма существенное значение. Они прямым образом влияют на главное — поступательное — движение и, кроме того, определяют устойчивость подвижного состава, вызывают сход его с рельсов, износ ходовых частей и рельсового пути, влияют также на конструктивные элементы пути и подвижного состава в целом.

Однако изученность этих вопросов остается до сих пор в зачаточном состоянии даже применительно к теории тяги на рельсовых путях магистральных железных дорог, имеющей более многолетнюю практику, чем теория рудничной электровозной откатки. Вопросы теории паразитных движений подвижного состава магистральных железных дорог рассматриваются, главным образом, лишь с точки зрения влияния их на конструкцию пути и подвижного состава.

При тяговых расчетах, при определении элементов основного движения, паразитными движениями, как правило, пренебрегают. Для магистральных железных дорог, отличающихся спокойным профилем, это является до некоторой степени правильным, так как побочные — паразитные — движения относительно малы. По сравнению с основными поступательными движениями они составляют ничтожную долю.

Для рудничных откаточных путей совсем пренебрегать паразитными движениями было бы неправильно. Как показывает практика, состояние рудничных откаточных путей даже в их стационарной, непереносной части, таково, что паразитные движения оказывают значительное влияние на полезное поступательное движение поезда. В зависимости от состояния рельсовых путей паразитные движения прямым образом снижают производительность электровозов, особенно электровозов малого сцепного веса, применяемых в подземной электровозной откатке. Они снижают также к. п. д. электровоза. Наряду с этим

паразитные движения, естественно, в сильной степени влияют на износ элементов подвижного состава и рельсовых путей при рудничной электровозной откатке.

Мы рассмотрим влияние паразитных движений при рудничной электровозной откатке лишь на основное поступательное движение состава поезда.

Это влияние может быть прямым, когда удар или подергивание снижают полезную силу тяги на крюке электровоза, или косвенным, когда в результате виляния элементов состава поезда увеличивается основное удельное сопротивление движению или когда в результате тряски и ударов увеличивается скольжение колес электровоза, снижая коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами. Величина прямого и косвенного влияния паразитных движений состава поезда зависит, в первую очередь, от состояния откаточных путей и изношенности элементов подвижного состава. Как первое, так и второе снижает к. п. д. электровоза тем больше, чем хуже состояние откаточных путей и больше изношенность подвижного состава поезда. В настоящее время мы еще не имеем точных экспериментальных данных о влиянии паразитных движений на основное поступательное движение состава. Их учет в известной степени производится лишь некоторым увеличением коэффициента сопротивления движению поезда.

На основании наблюдений за работой рудничных электровозов — преимущественно в тяжелых условиях на угольных шахтах — нам представляется, что главным по величине влиянием на режим работы электровоза является удар. Особенно, когда сила удара направлена в сторону, противоположную движению электровоза, ударная нагрузка значительно увеличивает силы сопротивления движению. Силы сопротивления в момент удара часто превышают силу тяги электровоза, обусловленную его сцепным весом. Мгновенная перегрузка электровоза, естественно, вызывает скольжение колес электровоза. В некоторых случаях скольжение колес принимает затяжной характер. Это объясняется тем, что при скольжении коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами резко уменьшается, в результате чего в дальнейшем, несмотря на отсутствие ударной нагрузки, электровоз не обеспечивает нормального движения. Такой режим работы электровоза нежелателен, так как он приводит к быстрому износу бандажей колес электровоза, сниванию головок рельсов, резкому снижению производительности электровоза, в связи с уменьшением скорости движения, и к значительному увеличению расхода энергии.

В режиме работы электровоза со скольжением колес, тяговые двигатели совершают двойную работу: 1) поступательного движения состава поезда и 2) работу трения колес электровоза о рельсы. Учитывая, что моменты вращения ведущих колес, совершающих ту или другую работу, одинаковы, расход энергии из сети на тоннокилометр груза при таком режиме можно принять двойным [4].

Движение электровоза со скольжением колес часто продолжается до более легкого элемента пути, когда сила тяги электровоза, обусловленная пониженным коэффициентом сцепления колес с рельсами, наконец, превысит силы сопротивления. Однако режим скольжения чаще ликвидируется машинистом электровоза путем искусственного увеличения коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами подсыпанием песка под колеса.

При прочих равных условиях затяжной характер явления скольжения наблюдается при больших составах поезда, когда сила тяги

при пониженной величине коэффициента сцепления является недостаточной даже для равномерного движения поезда.

Причинами возникновения ударной нагрузки на крюке электровоза могут служить: а)резкое увеличение скорости электровоза при нерастянутых сцепках между вагонами; б) наличие на путях кривых малого радиуса закругления; в) просадка рельсов в стыковых соединениях; г) виляние вагонов с набегом реборд колес на головку рельсов и др.

Три последние причины, вызывающие удары, носят случайный характер и являются местными причинами. Чаще всего возникает ударная нагрузка. Обычно удары, сопровождаемые скольжением колес, наблюдаются в моменты разгонов поезда, в моменты переходов с последовательного на параллельное соединение тяговых двигателей и особенно в моменты включения тяговых двигателей после движения на свободном выбеге. Движение на свободном выбеге создает предпосылки сближения вагонов состава, ослабления сцепок между вагонами. Сближение вагонов зависит от коэффициентов трения отдельных вагонов. Вагон с повышенным коэффициентом сопротивления задерживает движение и тем самым ослабляет сцепки между всеми последующими вагонами. Практически при свободном выбеге часто наблюдается ослабление сцепок сразу же за электровозом между всеми вагонами. Очевидно удельное сопротивление движению собственно электровоза оказывается выше сопротивления вагонов. Это объясняется увеличенными сопротивлениями от побочных движений электровоза при свободном выбеге, особенно в результате виляния электровоза в связи с набегом реборд колес на головки рельсов откаточных путей.

При включении двигателей и растяжке сцепок возникают дополнительные ударные нагрузки на крюке электровоза, вызывающие скольжение колес. Эти явления наблюдаются тем чаще, чем тяжелее профиль пути и чем больше происходит работы на переходных режимах тяговых двигателей — разгон и замедление. В некоторых случаях неспокойный профиль путей, а также необходимость ограничения максимальной скорости движения по условиям техники безопасности или по состоянию откаточных путей диктуют работу электровоза на переходных режимах разгон и замедление. В этом случае ударная нагрузка возникает при каждом повторном включении тяговых двигателей и принимает систематический характер. Практически режим работы рудничных электровозов происходит, главным образом, на переходных режимах. Движение поезда с установившейся скоростью можно наблюдать лишь на затяжных уклонах большой длины или при спокойном профиле пути некоторых угольных шахт, имеющих выработки большой протяженности [5]. Таким образом, в условиях рудничной электровозной откатки пренебрегать влиянием ударной нагрузки этого вида, очевидно, было бы неправильным.

Ударная нагрузка при растяжении сцепок будет создавать усилия, совпадающие с направлением сил сопротивления движения поезда. Эти дополнительные усилия будут передаваться между вагонами на высоте сцепок. Спепки расположены несколько ниже линии, проходящей по центрам тяжести элементов состава поезда, поэтому удар не будет чисто центральным. Здесь, кроме импульсов сил, совпадающих с направлением сил сопротивления, будут возникать моменты вращения в вертикальной плоскости, вызывающие продольные качания вагонов и электровоза. Однако эксцентриситет между центром тяжести и высотой сцепок очень мал, особенно у электровозов рудничного

типа, поэтому вращающий момент в сравнении с основным импульсом силы при ударе незначителен. Вполне достаточно рассматривать процесс удара как центральный удар поступательно движущихся тел. На величину импульса сил при ударе в данном случае будет влиять только первая часть удара, упругость ударяющихся тел, т. е. силы восстановления после удара влиять на силу тяги электровоза через систему сцепок, как гибкую связь, не могут. В связи с этим упругость ударяющихся тел в данном случае можно не принимать в расчет.

Как известно, при центральном ударе неупругих тел импульс сил определяется по формуле

$$S = \frac{M_1 M_2 (v_2 - v_1)}{M_1 + M_2} \kappa г, \qquad (1)$$

где M_1 и M_2 — соответственно масса первого и масса второго ударяющихся друг о друга тел;

v_1 и v_2 — скорости движения данных тел в момент удара.

Массу тела M_1 будут составлять электровоз и соответственное число вагонов, находящихся непосредственно за ним, с растянутыми сцепками. Массу M_2 представляют один или несколько вагонов с растянутыми сцепками, находящимися после рассматриваемой нерастянутой сцепки.

Разность скоростей между телами, т. е. между отдельными частями состава поезда, обусловлена длиной люфта в сцепках и расстоянием свободного хода между вагонами. Очевидно, чем больше это расстояние, тем больше может быть разность скоростей $v_2 - v_1$. При нерастянутых сцепках всего состава поезда в момент разгона, очевидно, может иметь место столько ударов, сколько вагонов в составе. При этом M_1, начиная от величины массы собственно электровоза, будет возрастать после каждого удара на величину одного вагона. Максимальную величину M_1 при последнем ударе будут составлять электровоз и вагоны состава без одного, последнего, представляющего массу M_2. Масса M_2 при этом, очевидно, будет при всех ударах постоянная и равная массе одного вагона. Однако из этого общего правила могут быть исключения, когда не все сцепки состава поезда нерастянуты. В этом случае приращение величины массы M_1, а также и величины M_2, могут быть не равны массе одного вагона. Вагоны с растянутыми сцепками при этом ударе будут оказывать сопротивление, как одно общее тело. Разность скоростей движения тел в момент ударов при растяжке сцепок будет постепенно нарастать.

Величина максимальной разности скоростей $v_2 - v_1$ при последнем ударе будет обусловлена суммой растояний свободного движения между вагонами и произведением величины люфта в сцепках на количество сцепок или вагонов. Очевидно, чем больше величина люфта в сцепках и чем больше количество вагонов в составе, тем значительнее будет величина разности скоростей $v_2 - v_1$ и сильнее будет удар.

Процесс суммарного удара состава поезда на ходу в момент включения тяговых двигателей после свободного выбега является, по существу, аналогичным рассмотренному. Отличие будет лишь в скоростях v_2, т. е, если при разгоне поезда мы имели v_2 постоянную и равную нулю, то здесь, при растяжке поезда на ходу, v_2 получит положительное значение и с течением времени будет уменьшаться, как при обычном свободном выбеге за счет сопротивлений движению

поезда. Таким образом, процесс удара в составе поезда на ходу при переходе от свободного выбега к работе электровоза под током нужно считать более сложным, зависящим от большего количества обусловливающих факторов.

Как уже упоминалось, величина разности скоростей при ударе, а следовательно, и сила удара зависят от величины люфта в сцепках. Люфт может изменяться в зависимости от конструкции сцепок и их изношенности. Большой люфт имеют сцепки с промежуточным кольцом, меньший люфт — обыкновенные штыревые. Стандартная сцепка для возможности расцепки и сцепки вагонов имеет наименьший люфт, равный 44 *мм*. Фактически поношенная сцепка имеет люфт, примерно в 1,5—2 раза превышающий указанную цифру. Особенно велик бывает люфт у сцепок, изготовленных в шахтных мастерских без учета надлежащих требований к ним.

Во избежание ошибок в анализе нами были приняты, с некоторым округлением для удобства расчетов, сцепки с наименьшим люфтом 0,05 *м*. При наличии в составе 20 вагонов суммарная растяжка поезда будет около 1 *м*.

В зависимости от величины ускорения при разгоне на этой длине будет обеспечена соответственная разность скоростей $v_2 - v_1$.

Величина ускорения может быть определена [1], [2] из основного уравнения движения

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{F}{P+Q} \quad w_0 \pm i\right)\frac{1}{110} \text{ м/сек}^2, \tag{2}$$

где F — сила тяги электровоза, *кг*;

$P+Q$ — вес состава поезда, *т*;

i — уклон пути, тысячные доли;

110 — переводный коэффициент, учитывающий размерность величин, входящих в формулу, и инерцию вращающихся частей поезда.

В период разгона поезда при нерастянутых сцепках, при прочих равных условиях, величина состава поезда $P+Q$ (по существу M_1) будет возрастать с каждым ударом на величину вагона. Следовательно, ускорение от некоторой максимальной величины будет падать. Изменение величины ускорения в процессе ударов будет протекать по некоторой кривой гиперболического вида.

Элемент приращения пути между ударами может быть выражен следующим образом:

$$\Delta l = v_{ср}\Delta t = \frac{v_1' + v_2''}{2}\Delta t \text{ м}, \tag{3}$$

где $v_{ср}$ — средняя скорость движения между ударами;

Δt — время движения между ударами;

v_1' — скорость после предшествующего удара;

v_2'' — скорость перед последующим ударом.

Приращение времени, в свою очередь, можно представить равенством

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{\frac{dv}{dt}} = \frac{v_1' - v_2''}{\frac{dv}{dt}} \text{ сек}. \tag{4}$$

После подстановки значения Δt из равенства (4) в формулу (3) и соответствующих алгебраических преобразований скорость движения электровоза перед последующим ударом определяется формулой

$$v_1'' = \sqrt{(v_1')^2 + 2\Delta l\frac{dv}{dt}} \text{ м/сек}. \tag{5}$$

Затем следует рывок — удар растягиваемой сцепкой движущейся части поезда одного или нескольких последующих вагонов. В результате удара двух тел, имеющих различные скорости движения, общая их скорость примет новое значение, определяемое формулой

$$u_i = \frac{M_1 v_1'' + M_2 v_2}{M_1 + M_2} \text{ м/сек}, \qquad (6)$$

где значение величин, входящих в формулу, указано выше.

При дальнейшем анализе процесса ударов полученная скорость u_i будет являться начальной скоростью v_1' в промежутке до следующего удара.

Таким образом, последовательным определением скорости движения тел после каждого удара можно установить характер изменения величины импульса сил при ударах, т. е. характер изменения величины ударной нагрузки на электровоз в период разгона поезда.

При использовании приведенных выше формул (1), (2), (5), (6) нами в качестве примера произведено определение элементов движения при разгоне поезда в предположении, что все сцепки являются нерастянутыми. Принят семитонный электровоз с двигателем ДК-801А, имеющим часовую силу тяги 700 *кг* и двухтонная вагонетка, собственный вес которой 1140 *кг*.

Результаты произведенных расчетов внесены в табл. 1.

Как видно из таблицы, в период разгона поезда с нерастянутыми сцепками во всем составе величина импульса сил при ударах S составляет примерно 10% от силы тяги электровоза при часовом режиме $F_ч$, равной 1400 *кг*. Количество ударов равно количеству вагонов в составе. Изменения величины S незначительны. Имеет место некоторое увеличение силы ударов в моменты растяжения сцепок в средней части поезда. Таким образом, в результате наложения ударной нагрузки на основную силу тяги общая сила тяги при разгоне поезда будет равна пусковой силе тяги, умноженной на коэффициент 1,1.

Величина ударной нагрузки может мгновенно увеличиться, если в процессе растяжки поезда окажутся растянутыми сцепки между несколькими вагонами. В этом случае электровоз получит массовый удар нескольких вагонов одновременно. Масса M_2 возрастет от одного вагона до нескольких. В табл. 2 приведены результаты вычислений импульса сил при одновременных ударах нескольких вагонов. С целью определения характера изменения величины S масса M_2 в расчете принималась переменной.

Как видно из табл. 2, величина ударной нагрузки при одновременных ударах составляет значительную долю от общей силы сопротивления движению. Максимальная величина S достигает 75% от общей пусковой силы тяги, равной 1400 *кг*. Если в первом случае при всех растянутых сцепках и можно было бы пренебречь ударной нагрузкой при разгоне поезда, то при массовых ударах этот фактор, очевидно, будет влиять на разгон поезда. Такой величины добавка к пусковым сопротивлениям определенно вызовет скольжение колес электровоза, а следовательно, снизит величину ускорения при разгоне. Поэтому электровоз иногда не может взять с места состав поезда с растянутыми сцепками.

Из расчетов видно, что максимальная величина ударной нагрузки совпадает с растяжкой сцепок в средней части состава. Причем в данном случае при массовых ударах изменение величины S происходит в широких пределах, поэтому, очевидно, всегда интересно знать мак-

Таблица 1

Импульсы сил при ударах вагонов в период разгона поезда с нерастянутыми сцепками

Исходные формулы и значения расчетных величин

$P+Q$, т	$f_{уд}+\frac{F_2}{P+Q}$ кг	$\frac{dN}{dt}=\frac{f-N_0}{110}$ т/сек²	$v_1'^2$	$v_1''=\sqrt{2\Delta\frac{dN}{dt}}$ м/сек²	$\frac{M_1v_1'}{g}$	$\frac{M_1M_2}{g}$	$v_1'=\frac{M_1v_1''+M_2v_2}{M_1+M_2}$ м/сек	$\frac{M_1M_2}{g^2}$	$S=\frac{M_1M_2(v_1-v_2)}{M_1M_2}$ кг
7,0	200	1,75	0	0,419	2,94	10,14	0,29	22	93,5
10,14	137	1,18	0,084	0,45	4,55	13,28	0,342	31,8	111
13,28	105	0,88	0,117	0,453	6,0	16,42	0,366	41,6	118
16,42	85	0,7	0,134	0,453	7,42	19,56	0,38	51,4	122
19,56	71,3	0,575	0,145	0,45	8,78	22,70	0,387	61,4	125
22,70	61,5	0,486	0,146	0,442	10,05	25,84	0,388	71,2	125
25,84	54	0,418	0,151	0.44	11,4	28,98	0,393	81	127
28,98	48,3	0,367	0,154	0,435	12,65	32,12	0,393	90	127
32,12	43,5	0,323	0,154	0,433	13,93	35,26	0,394	101	128
35,26	39,6	0,284	0,155	0,429	15,15	38,40	0,394	111	128
38,40	36,4	0,258	0,155	0,426	16,4	41,54	0.394	121	128
41,54	38,6	0,233	0,155	0,423	17,6	44,68	0,394	131	128
44,68	31,3	0,212	0,155	0,421	18,85	47,82	0,394	141	128
47,82	29,2	0,190	0,155	0,418	20,0	50,96	0,394	151	128
50,98	28	0,182	0,155	0,417	21,25	54,10	0,393	160	127
54,10	25,9	0,163	0,154	0,413	22,35	57,24	0,39	170	127
57,24	24,5	0,150	0,152	0,409	23,4	60,38	0,388	180	126
60,38	23,2	0,138	0,151	0,406	24,55	63,52	0,386	190	125
63,52	22	0,127	0,149	0,402	25,55	66,66	0,383	200	124
66,66	21	0,118	0,147	0,399	26,55	69,80	0,38	209	123
99,80	20	0,108	0,145	0,395	27,5	72,94	0,377	220	123
72,94	19,2	0,102	0,142	0,391	28,5	76,08	0,374	229	121
76,08	18,4	0,094	0,140	0,387	29,5	79,25	0,372	240	121
79,22	17,7	0,088	0,138	0,384	30,4	82,36	0,37	249	120
82,36	17	0,082	0,137	0,381	31,4	85,50	0,367	259	119
85,50	16,4	0,0765	0,135	0,378	32,3	88,64	0,365	268	118
88,64	15,9	0,072	0,133	0,375	33,2	91,78	0,362	278	116
91,78	15,3	0,0665	0,131	0,371	34	94,92	0,358	289	116

симальную величину ударной нагрузки. $S_{макс}$ при постоянной величине состава поезда зависит от произведения масс M_1M_2 и разности скоростей

Таблица 2

Импульсы сил при ударах нескольких вагонов одновременно

Исходные формулы и значение расчетных величин				
$\frac{M_1}{g}$ т	$\frac{M_2}{g}$ т	$\frac{M_1M_2}{g^2}$ т	$-v_2''$ м/с	$S = 103\frac{M_1M_2(v_1''-v_2'')}{M_1+M_2}$ кг
7,0	84,7	593	0,419	280
10,14	81,6	825	0,45	417
13,28	78,5	1040	0,453	526
16,42	75,3	1250	0,453	633
19,56	72,2	1415	0,45	712
22,70	69,0	1570	0,442	775
25,84	66,0	1710	0,44	842
28,98	62,8	1825	0,435	888
32,12	59,7	1920	0,433	930
35,26	56,5	1995	0,429	958
38,40	53,4	2055	0,426	980
41,51	50,3	2095	0,423	992
44,68	47,1	2108	0,421	993
47,82	44,0	2110	0,418	990
50,96	40,8	2080	0,417	972
54,10	37,7	2040	0,413	944
57,24	34,6	1980	0,409	906
60,38	31,4	1895	0,406	860
63,52	28,3	1800	0,402	810
66,66	25,1	1670	0,399	745
69,80	22,0	1535	0,395	678
72,94	18,8	1370	0,391	598
76,08	15,7	1195	0,387	518
79,22	12,6	993	0,384	428
82,36	9,4	775	0,381	331
85,50	6,3	538	0,378	228
88,64	3,14	278	0,375	117
91,78	0,0	0	0,371	0

ударяющихся тел ($v_1'' - v_2''$). Однако характер изменения импульсов сил в основном определяется характером изменения величины произведения масс M_1M_2. Произведение масс имеет явно выраженный максимум при равенстве масс $M_1 = M_2$, совпадающий со средней частью состава поезда.

Пределы изменения разности скоростей $v_1'' - v_2''$ составляют ничтожную долю, поэтому этот член незначительно отклоняет максимальное значение импульса сил от максимума произведений масс. Для технических расчетов с вполне достаточной точностью можно принимать максимум импульсов сил массовых ударов совпадающим с максимумом произведений масс.

Как видно из анализа, для учета ударной нагрузки при разгоне поезда достаточно определить величину импульса сил при растяжке средней сцепки в его составе. Последнее можно найти и не прибегая к последовательному определению элементов движения всех промежуточных значений. Для этого сначала необходимо лишь определить разность скоростей движущихся масс без учета влияния промежуточных ударов; затем учесть влияния всех промежуточных ударов одним

средним суммарным ударом и по найденной таким образом разности скоростей сразу определить $S_{макс}$ при равенстве масс $M_1 = M_2$.

Формулы для определения разности скоростей перед ударом и влияния промежуточных ударов на них целесообразнее привести при рассмотрении более сложного случая ударной нагрузки на ходу.

Как упоминалось, ударная нагрузка имеет место также при растяжке состава поезда на ходу, при включении тяговых двигателей электровоза, после свободного выбега. В этом случае, в отличие от предыдущего примера, начальные скорости v_1' и v_2' не равны нулю и величина ускорений, обусловливающих разность скоростей при ударе, складывается из двух величин: а) из ускорений при разгоне электровоза; б) величины замедления задних вагонов при свободном выбеге. Разность скоростей движущихся тел будет определяться суммой предыдущей разности $v_1' - v_2'$ и новых приращений скорости

$$v''_{1,1} - v''_{2,1} = v'_1 - v'_2 + \Delta t(a + r) \text{ м/сек}, \tag{7}$$

где Δt — элемент времени движения на длине растяжки одной сцепки Δl;

a — ускорение, обусловленное силой тяги электровоза;

r — отрицательное ускорение задних вагонов при свободном выбеге.

Второе уравнение может быть составлено на основании равенства

$$\Delta l = \Delta t\,(v_{ср.\,a} - v_{ср.\,r}) \text{ м}, \tag{8}$$

где $v_{ср.\,a}$ и $v_{ср.\,r}$ — соответственно средние скорости движения тел M_1 и M_2; одно с ускорением, другое с замедлением.

При замене средних скоростей значениями их конечных величин и совместном решении уравнений (7) и (8) разность скоростей движения тел перед ударом определяется из выражения

$$v''_{1,1} - v''_{2,1} = +\sqrt{(v'_{1,1} - v'_{2,1})^2 + 2\Delta l\,(a + r)} \text{ м/сек}, \tag{9}$$

где значение входящих величин указано выше.

При известных величинах M_1 и M_2 по формуле (1), как в первом примере, может быть определен импульс сил при ударе. Однако для определения параметров перед следующим ударом необходимо учесть влияние удара на скорости движения тел, для чего надо знать истинные значения скоростей движущихся тел $v''_{1,1}$ и $v''_{2,1}$. Для определения скоростей движущихся тел может быть составлено третье уравнение в виде равенства отношений ускорений с соответствующими им приращениями скорости движения

$$\frac{a}{r} = \frac{v''_{1,1} - v'_{1,1}}{v''_{2,1} - v'_{2,1}}, \tag{10}$$

где a — величина ускорения массы M_1;

r — величина замедления массы M_2.

При совместном решении уравнений (9) и (10) истинные значения скоростей перед ударом определяются из выражений

$$v''_{1,1} = \frac{av'_{2,1} + a\,(v''_{1,1} - v''_{2,1}) + rv'_1}{a + r} \text{ м/сек}, \tag{11}$$

$$v''_{2,1} = v''_{1,1} - (v''_{1,1} - v''_{2,1}) \text{ м/сек}. \tag{12}$$

Таким образом, и в данном случае возможно последовательное определение элементов движения поезда при растяжке сцепок с присущими данному случаю ударными нагрузками на крюке электровоза.

Используя формулы (1), (2), (6), (9), (11) и (12) в качестве примера, мы произвели последовательное определение элементов движения при растяжке сцепок поезда на ходу.

Подвижной состав для сравнения в примере взят аналогичным предыдущему. Скорость при переходе на двигательный режим принята 2,77 *м/сек*, равная скорости выхода на автоматическую характеристику при пусковой силе тяги 1400 *кг*.

Значение величин, полученных при расчете, внесено в табл. 3. Как видно из таблицы, в данном случае величина импульсов сил при ударе не остается постоянной. Она постепенно возрастает по мере растяжки состава поезда, достигая двукратного значения при последних ударах.

Это объясняется тем, что разность скоростей движения тел $v_1'' - v_2''$ здесь последовательно возрастает от 0,428 до 0,565 *м/сек*. Однако абсолютное значение ударной нагрузки остается небольшим; оно немногим превышает 10% величины пусковой силы тяги.

В табл. 3 подсчитаны импульсы сил при растяжке состава поезда со всеми ослабленными сцепками, т. е. когда при каждом ударе масса M_2 равна одному вагону. При массовом ударе, когда не все сцепки в составе поезда оказываются растянутыми и когда M_2 представляет несколько вагонов, импульсы сил, естественно, принимают большие значения.

Элементы движения состава поезда при наличии одновременных ударов вагонов представлены в табл. 4; где M_2 принималась различной величины в пределах всего поезда. Как видно из таблицы, величина ударной нагрузки представляет собой внушительные значения при любых величинах масс. Максимум импульса сил достигает 80% от пусковой силы тяги. Очевидно, и в случае перехода на двигательный режим можно ожидать скольжения колес электровоза, если не все сцепки состава поезда окажутся ослабленными. Массовый удар вагонов может мгновенно увеличить сопротивление движению поезда на 50—75% от пускового сопротивления.

Максимальные значения ударной нагрузки и здесь совпадают с максимальными значениями произведений масс M_1, M_2, т. е. они также относятся к ударам при растяжке сцепок в середине состава поезда, когда $M_1 \approx M_2$.

Однако небольшое отклонение максимального значения импульса сил от максимума произведений масс будет происходить за счет изменения величины разности скоростей движущихся тел v_1'' и v_2'', входящих в формулу (1) при определении S. Несколько точнее место максимума импульса сил можно определить аналитически, приравнивая первую производную от выражения (1) нулю и решая ее относительно числа вагонов до удара с максимальной силой. Для этого в формуле

$$S = 103 \frac{M_1 M_2 (v_1'' - v_2'')}{M_1 + M_2} \quad кг,$$

выражаем переменные величины через число вагонов m до удара с максимальным импульсом и общее число вагонов в составе n. Тогда последняя формула примет вид

$$S = 103 \frac{(kq + mq)\, q\, (n - m)\, (v_1'' - v_2'')_m}{(kq + mq) + q\, (n - m)} \quad кг, \qquad (13)$$

где kq — вес электровоза, выраженный через вес одного вагона.

аблица

Импульсы сил при ударе вагонов в период включения двигателей на ходу с нерастянутыми сцепками поезда

Исходные формулы и значение расч чин

$\frac{M_1}{g}$	$a = \frac{dv}{dta}$	$v_1 - v_2'$	v_1'' м/сек	v_2'' м/сек	$v_1'' -$ /сек	$\frac{M_1 v_1''}{g}$	$\frac{M_2 v_2''}{g}$	$\frac{M_1 + M_2}{g}$	v_1' $\frac{M_1 v_1'' + M_2 v_2''}{M_1 + M_2}$	$\frac{M_1 M_2}{g^2}$	$S = 103 \frac{M_1 M_2 (v_1'' - v_2'')}{M_1 + M_2}$
7,0	1,75	0	3,17	2,742	0,428	22,2	8,61	10,14	3,04	22	97,0
10,14	1,18	0,308	3,12	2,698	0,470	30,7	8,30	13,28	3,02	31,8	116
13,28	0,88	0,37	3,13	2,698	0,482	42,2	8,45	16,42	3,08	41,6	126
16,42	0,7	0,38	3,17	2,697	0,473	51,9	8,45	19,56	3,09	51,4	128
19,56	0,575	0,39	3,20	2,733	0,467	62,5	8,56	22,70	3,13	61,4	130
22,7	0,486	0,397	3,20	2,737	0,463	72,6	8,58	25,84	3,14	71,2	132
25,84	0,418	0,403	3,19	2,729	0,461	82,3	8,55	28,98	6,14	81	133
28,98	0,367	0,411	3,19	2,735	0,465	93,0	8,56	32,12	3,15	90,6	135
32,12	0,323	0,415	3,18	2,719	0,461	102,8	8,54	35,26	3,15	101	136
35,26	0,287	0,431	3,17	2,698	0,472	112,0	8,45	38,40	3,14	111	140
38,4	0,258	0,442	3,19	2,711	0,479	123,0	8,50	41,54	3,16	121	144
41,54	0,233	0,449	3,20	2,717	0,483	133,0	8,53	44,68	3,16	131	146
44,68	0,212	0,443	3,19	2,714	0,476	143,0	8,52	47,82	3,17	141	145
47,82	0,193	0,436	3,20	2,715	0,485	153,5	8,52	50,96	3,18	151	148
50,96	0,182	0,465	3,20	2,708	0,492	163,5	8,50	54,10	3,16	160	150
54,10	0,163	0,452	3,18	2,701	0,479	173,5	8,45	57,24	3,18	170	147
57,24	0,150	0,479	3,19	2,692	0,503	183,5	8,45	60,38	3,18	180	155
60,38	0,138	0,488	3,20	2,689	0,511	193,5	8,45	63,52	3,18	190	157
63,52	0,127	0,491	3,20	2,688	0,512	204,0	8,45	66,66	3,185	200	159
66,66	0,118	0,497	3,20	2,683	0,517	214,0	8,41	69,80	3,185	209	160
69,8	0,108	0,502	3,17	2,650	0,520	222,0	8,30	72,34	3,185	220	163
72,84	0,102	0,535	3,19	2,640	0,550	233,0	8,28	76,08	3,17	229	171
76,08	0,094	0,530	3,19	2,642	0,548	243,0	8,28	79,22	3,17	240	172
79,22	0,088	0,528	3,18	2,636	0,544	252,0	8,25	82,36	3,17	249	171
82,36	0,082	0,534	3,18	2,632	0,548	262,0	8,25	85,50	3,16	259	172
85,5	0,0765	0,528	3,18	2,636	0,544	272,0	8,25	88,64	3,165	268	170
88,64	0,072	0,524	3,19	2,632	0,546	282,0	8,25	91,78	3,18	275	172
91,78	0,0665	0,548	3,19	2,625	0,565	293,5	8,23	94,92	3,18	189	278

Таблица 4

Импульсы сил при ударах нескольких вагонов одновременно

Исходные формулы и значение расчетных величин				
$\frac{M_1}{g}$ T	$\frac{M_2}{g}$ T	$\frac{M_1 M_2}{g^2}$ T	*м/сек*	$S = 103\,\frac{M_1 M_2 (v_1'' - v_2'')}{M_1 + M_2}$
7,0	84,7	593	0,428	284
10,14	81,6	825	0,470	435
13,28	78,6	1040	0,482	561
16,42	75,3	1250	0,473	661
19,56	72,2	1415	0,467	640
22,70	69,0	1570	0,463	814
25,84	66,0	1710	0,461	883
28,98	62,8	1825	0,465	950
32,12	59,7	1920	0,461	990
35,26	56,5	1995	0,472	1052
38,40	53,4	2055	0,479	1105
41,54	50,3	2095	0,483	1135
44,68	47,1	2108	0,476	1130
47,82	44,0	2110	0,485	1150
50,96	40,8	2080	0,492	1150
54,10	37,7	2040	0,479	1100
57,24	34,6	1980	0,503	1120
60,38	31,4	1895	0,511	1085
63,52	28,3	1800	0,512	1030
66,66	25,1	1670	0,517	967
69,80	22,0	1535	0,520	893
72,94	18,8	1370	0,550	844
76,08	15,7	1195	0,548	734
79,22	12,6	993	0,544	607
82,36	9,4	775	0,548	477
85,50	6,3	558	0,544	329
88,64	3,14	278	0,548	171
91,78	0,0	0	0,565	0

Переменную величину разности скоростей $v_1'' - v_2''$ можно также выразить через число вагонов в составе, если приближенно считать, что эта разность возрастает пропорционально числу вагонов, т. е. числу растянутых сцепок при разгоне

$$\frac{(v_1'' - v_2'')_n}{(v_1'' - v_2'')_m} = \frac{n}{m}, \qquad (14)$$

где в числителе фигурирует разность скоростей перед последним ударом в конце состава с числом вагонов n, т. е. максимальная разность, а в знаменателе — разность скоростей, отвечающая удару искомого вагона m при максимальном импульсе сил.

При совместном решении формул (13) и (14) переменное значение импульса сил при ударах будет выражено формулой

$$S_{\text{макс}} = 103\,\frac{q\,(v_1'' - v_2'')_m}{n\,(k+n)}\,[knm + (n-k)\,m^2 - m^3]\ \ кг, \qquad (15)$$

где переменной величиной является m — искомое число предшествующих вагонов, а следовательно, число растянутых сцепок до удара, отвечающего максимальной величине импульса сил. Для определения места максимального значения ударной нагрузки приравниваем нулю первую производную от выражения (15) и решаем относительно m.

Тогда

$$m = \frac{1}{3}\left[n - k \pm \sqrt{(n-k)^2 + 3kn}\right] \tag{16}$$

Если принять в нашем примере: $P = 7$ m и $q = 3{,}14$ m, тогда $k = 2{,}24$ и $n = 27$, что совпадает с $m = 17$ вагонам. Несколько завышенная сдвижка $S_{макс}$ к концу состава (табл. 4) объясняется тем, что нарастание разности v_1'' и v_2'' происходит не по всей длине состава равномерно, а имеет значительный скачок до первого удара. При учете этого фактора можно получить более точные результаты в определении m, т. е. при определении количества предшествующих ударов до удара с максимальной величиной ударной нагрузки. Однако, учитывая, что пределы изменения величины разности скоростей (табл. 4) от первого удара до удара с максимальным S составляют всего лишь

$$\frac{0{,}485 - 0{,}428}{0{,}485} = 0{,}12,$$

тогда как пределы изменения произведения масс

$$\frac{2110 - 593}{2110} = 0{,}72,$$

место максимальной величины импульса сил определится, очевидно, максимумом произведения масс M_1, M_2.

С достаточной для технических целей точностью и здесь $S_{макс}$ можно считать при ударе в средней части состава поезда, когда $m \approx \frac{n}{2}$. Это тем более справедливо, если учесть весьма пологий характер кривой изменения величины S в пределах ее максимальных значений.

Таким образом, и здесь, очевидно, было бы интересно определить сразу $S_{макс}$, не производя вычислений всех промежуточных значений элементов движения.

Как упоминалось ранее, для этого сначала находится суммарная разность скоростей без учета влияния на них всех промежуточных ударов, затем учитываются удары одним общим ударом, приведенным к средним величинам.

Для решения этой задачи по аналогии можно пользоваться формулами (6) и (9), преобразованными с этой целью в следующий вид:

$$v_1' = \frac{M_{ср.\,1}\, v_{ср.\,1} + \sum M_2 v_{ср.\,2}}{M_{ср} + \sum M_2} \ м/сек, \tag{17}$$

где v_1' — скорость массы M_1 после суммарного приведенного удара;

$M_{ср\,1}$ — среднее значение первой массы, в пределах изменения ее от P до $(P + qm)$;

$v''_{ср\,1}$ — средняя скорость движения M_1;

$\sum M_2$ — сумма значений второй массы;

$v_{ср\,2}$ — средняя скорость движения M_2.

$$v_1'' - v_2'' = \sqrt{(v_1' - v_2'')^2 + 2\Delta l m (a_{ср} + r)} \ м/сек, \tag{18}$$

где $v_1'' - v_2''$ — разность скоростей перед ударом, обусловленная ускорениями при движении тел M_1 и M_2;

$v_1' - v_2'$ — разность скоростей в начале растяжки поезда, равная нулю;

m — число растяжек, а следовательно, число вагонов до удара максимальной силы;

$a_{ср}$ — средняя величина ускорений, обусловленных электровозом;

r — постоянная величина отрицательного ускорения при свободном выбеге.

Определение средней величины ускорения при небольшом числе вагонов m можно производить делением суммы всех промежуточных значений ускорений на их число. При значительном числе вагонов, как показали решенные примеры, можно для определения $a_{ср}$ пользоваться формулой приближенного вычисления определенных интегралов

$$a_{ср} = \frac{1}{6}\left(a_1 + 4a_{\frac{m}{2}} + a_m\right), \tag{19}$$

где a_1 — ускорение, присущее массе M_1, равной массе собственно электровоза;

$a_{\frac{m}{2}}$ — ускорение, отвечающее массе M_1, равной массе электровоза плюс половина массы вагонов;

a_m — ускорения перед ударом максимальной силы.

Некоторое завышение средней величины ускорения по данной формуле компенсируется в дальнейших расчетах.

Как известно, при неупругом ударе тел наблюдается потеря энергии, величина которой может быть определена по формуле

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{2} S(v_1'' - v_2'') \ кгм/сек, \tag{20}$$

где S — импульс сил при ударе;

$v_1'' - v_2''$ — разность скоростей движения тел перед ударом.

На основании ранее подсчитанных значений S и $v_1'' - v_2''$ (табл. 1 и 3) произведено определение потери энергии в момент растяжки сцепок при ударах различной величины масс M_1 и M_2 по формуле (20). Результаты вычислений приведены в табл. 5, где первые три столбца отвечают разгону поезда с места, а вторые три представляют значения величины при растяжке состава поезда на ходу.

Как видно из табл. 5, в первом случае величина потери энергии остается практически постоянной для растяжки всех сцепок состава, а во втором случае постепенно возрастает к концу растяжки, примерно, в два раза. Однако как в первом, так и во втором случаях, потеря энергии при ударах по абсолютной величине остается весьма незначительной. Практически учет ее при определении энергетических элементов движения поезда не имеет смысла.

Таким образом, из приведенного анализа видно, что существенным фактором при растяжке поезда в период разгона или в период включения тяговых двигателей на ходу является массовый удар вагонов.

Очевидно, при определении величины состава поезда пренебрегать этим фактором было бы неправильно.

Импульс силы при массовом ударе зависит от некоторых случайных обстоятельств, к которым относится число одновременно участвующих в ударе вагонов.

Таблица 5

Потеря энергии при ударах в момент растяжки сцепок

Исходные формулы и значение расчетных величин					
S кг	v_1'' м/сек	$T_2 = \frac{1}{2} S (v_1'' - v_2'')$ кгм/сек	S кг	$v_1'' - v_2$ м сек	$_1 = \frac{1}{2} S (v_1'' -$
93,5	0,419	19,5	97	0,428	20,8
111	0,450	25,0	116	0,470	27,2
118	0,453	26,7	126	0,482	30,3
122	0,453	27,5	128	0,473	30,2
125	0,450	28,1	130	0,467	30,3
125	0,442	27,6	132	0,463	30,5
127	0,440	27,9	133	0,461	30,6
127	0,435	27,6	135	0,465	31,3
128	0,433	27,7	136	0,461	31,3
128	0,429	27,4	140	0,472	33,0
128	0,426	27,2	144	0,479	34,4
128	0,423	27,0	146	0,483	35,2
128	0,421	26,9	145	0,476	34,4
128	0,418	26,7	148	0,485	35,8
127	0,417	26,4	150	0,492	36,8
127	0,413	26,2	147	0,479	35,1
126	0,409	25,7	155	0,503	38,9
125	0,406	25,4	157	0,510	40,0
124	0,402	24,9	159	0,512	40,6
123	0,399	24,5	160	0,517	41,2
123	0,395	24,2	163	0,520	42,3
121	0,391	23,6	171	0,550	46,9
121	0,387	23,4	172	0,548	47,1
120	0,384	22,9	171	0,544	46,3
119	0,381	22,6	172	0,548	47,0
118	0,378	22,2	170	0,544	46,0
116	0,375	21,7	172	0,548	47,0
116	0,371	21,5	178	0,565	50,0

Кроме того, его величину определяет также ряд параметров не случайного характера, к которым могут быть отнесены:

величина силы тяги при разгоне $f_{уд}$;

угол наклона путей $i^0{}'_{00}$;;

основное удельное сопротивление движению w_0;

длина пути люфта в растяжке сцепок Δl;

величина состава поезда nq.

Первые три величины $f_{уд}$, $i^0/_{00}$ и w_0, взаимно связаны друг с другом, поэтому их можно рассматривать одновременно. Изменения величины уклона путей или основного удельного сопротивления могут одинаково уменьшать или увеличивать удельную силу тяги электровоза.

Более широкие пределы изменения удельной силы тяги можно предполагать от наличия различных уклонов путей, поэтому анализ влияния уклонов на силу удара является наиболее характерным.

С целью установления влияния уклона путей на величину импульса сил массовых ударов на откаточном пути с уклоном $5^0/_{00}$ (табл. 6) приведены результаты расчета элементов движения при растяжке состава поезда на ходу с массовыми ударами вагонов. При сравнении результатов расчетов по величине ударной нагрузки при одинаковых количествах вагонов с данными табл. 4 видно, что отрицательный

Таблица 6

Импульсы сил массовых ударов на откаточном пути с уклоном 5‰

Наименование величин	Расчетные формулы	Единица измерения	Значение величин			
Число вагонов до удара	n	шт.	5	10	15	20
Средняя величина ускорений	$a_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} a_i}{n}$	*м/сек²*	1,05	0,724	0,564	0,465
Разность скоростей движущихся до приведенного суммарного удара	$v''_{1,1} - v''_{2,1} \sqrt{2\Delta l n (a_{ср} + r)}$	*м/сек*	0,75	0,897	0,98	1,045
Скорость электровоза до приведенного удара	$v''_{1,1} = \frac{a_{ср} v'_{2,1} + a_{ср} (v''_{1,1} - v''_{2,1}) + r v'_{1,1}}{a_{ср} + r}$	*м/сек*	3,47	3,57	3,62	3,65
Скорость задних вагонов до приведенного удара	$v''_{2,1} = v''_{1,1} - (v''_{1,1} - v_{2,1})$	*м/сек*	2,72	2,673	2,64	2,605
Средняя скорость электровоза до приведенного удара	$v_{ср_1} = \frac{v'_{1,1} + v''_{1,1}}{2}$	*м/сек*	3,12	3,17	3,19	3,[illegible]
Средняя скорость задних вагонов до приведенного удара	$v_{ср_2} = 0{,}5 (v'_{2,1} + v''_{2,1})$	*м/сек*	2,74	2,72	2,7	2,69
Средняя величина первой массы	$M_{ср_1} = 0{,}5q (2k + n)$	*кг сек²/м*	14,9	22,7	30,6	38,4
	$M_{ср_1} + m_2$	*кг сек²/м*	18,04	25,84	33,74	41,54
	$M_{ср_1} v_{ср_1}$	*кг сек²/м*	46,4	71,9	97,4	123,5
	$m_2 v_{ср_2}$	*кг сек²/м*	8,6	8,52	8,45	8,43
Скорость электровоза после приведенного удара	$v'_{1,2} = \frac{M_{ср_1} v_{ср_1} + m_2 v_{ср_2}}{M_{ср_2} + m_2}$	*м/сек*	3,05	3,11	3,14	3,17
Разность скоростей после приведенного удара	$v'_{1,2} - v''_{2,1}$	*м/сек*	0,33	0,437	0,50	0,565
Ускорение электровоза перед следующим ударом	$a_i = \frac{f - w_0 + 5}{110}$	*м/сек*	0,514	0,286	0,190	0,136
Разность скоростей перед следующим ударом	$v'_{1,2} - v''_{2,2} = \sqrt{(v'_{1,2} - v''_{2,1})^2 + 2\Delta l (a_i + r)}$	*м/сек*	0,411	0,4765	0,526	0,56
Величина первой массы	$M_1 = q (k + n)$	*кг сек²/м*	22,70	38,40	54,10	69,80
Величина второй массы	$M_2 = q$	*м*	69,0	53,4	37,1	22,0
	$M_1 M_2$	*кг сек²/м*	1570	2055	2040	1535
	$M_1 + M_2$	*кг сек²/м*	91,74	91,78	91,78	91,78
Импульс сил при массовом ударе	$S = 103 \frac{M_1 M_2 (v''_{1,2} - v''_{1,2})}{M_1 M_2}$	*кг*	724	1100	1210	960

уклон несколько увеличивает величину импульса сил, что объясняется некоторым увеличением ускорений при разгоне электровоза.

Однако, как показывает сравнение результатов табл. 6 и 4, разница величины S при прочих равных условиях невелика. В зоне максимума ударной нагрузки она не превышает 10% от общей величины импульса сил. Таким образом, при технических расчетах, очевидно, влияние уклона путей на величину ударной нагрузки можно не учитывать, тем более, что включение тяговых двигателей на ходу на большом отрицательном уклоне не будет иметь места, а растяжка состава на подъеме будет сопровождаться ударной нагрузкой меньшей величины. Изменение величины удельного сопротивления w_0 наблюдается еще в меньших пределах, чем изменение уклона пути, поэтому вряд ли есть необходимость учитывать влияние его на ударную нагрузку при разгоне поезда. Более резкое увеличение импульса сил дает изменение длины растяжки в сцепках Δl.

В табл. 7 приведены результаты вычислений ударной нагрузки в зависимости от длины растяжки в сцепках между вагонами до 75 и 100 *мм*. Как видно из сравнения табл. 7 и 4, при прочих равных условиях двойное увеличение Δl дает приращение ударной нагрузки при массовом ударе до 50%.

Очевидно, при расчете элементов движения электровозной откатки пренебрегать этим фактором было бы неправильно. При одинаковых условиях большая величина люфта между вагонами может вызвать значительной силы ударную нагрузку при резких изменениях скорости, что, в свою очередь, может в сильной степени отражаться на работе электровоза. Величина растяжки в сцепках зависит от конструктивных особенностей сцепок и их изношенности. Очевидно, при конструктировании сцепок необходимо, наряду с требованиями удобства сцепки и расцепки составов, учитывать и эти факторы.

Величина ударной нагрузки в прямой степени зависит также от величины состава поезда. В табл. 8 приведены результаты вычислений ударной нагрузки для различной величины состава поезда. Как видно из таблицы, увеличение состава поезда дает прямо пропорциональное увеличение максимального импульса сил при массовом ударе. При изменении величины состава в пределах от 38,5 до 88,5 *т* импульсы сил увеличились от 400 до 975 *кг*. Таким образом, основным фактором, определяющим величину ударной нагрузки, является величина состава поезда, что, очевидно, необходимо учитывать при расчете электровозной откатки.

Однако одну и ту же величину состава поезда по весу в зависимости от емкости откаточных сосудов может составлять разное количество вагонов. При большем количестве вагонов в составе, при прочих равных условиях, увеличивается суммарная длина люфта растяжки между сцепками. В связи с этим увеличивается возможность расхождения скоростей движущихся тел, а следовательно, растет величина импульса силы при массовом ударе. В качестве доказательства последнего произведен расчет элементов движения при растяжке поезда, составленного из однотонных вагонов весом по 1,75 *т*. Длина люфта в сцепках принята прежняя, равная 0,05 *м*.

Данные расчетов импульсов сил приведены в табл. 9. При сравнении величин импульсов сил, приведенных в табл. 9 и 4, при прочих равных условиях, т. е. при одинаковых массах движущихся тел, видно, что при однотонных вагонах ударная нагрузка значительно больше, чем при двухтонных. Возрастание величины силы удара

Таблица 7

Импульсы сил массовых ударов в зависимости от длины растяжки в сцепках

Наименование величин	Расчетные формулы	Единица измерения	Значение величин							
Длина растяжки в сцепках	Δl	*м*	0,075	0,10	0,075	0,10	0,075	0,10	0,075	0,10
Число вагонов до удара . .	n	шт.	5	5	10	10	15	15	20	20
Средняя величина ускорений	$a_{ср}$	*м/сек²*	1,02	1,02	0,696	0,696	0,534	0,534	0,435	0,435
Разность скоростей движущихся тел до приведенного суммарного удара	$v''_{1,1} = v''_{2,1}$	*м/сек*	0,905	1,05	1,08	1,25	1,18	1,36	1,245	1,435
Скорость электровоза до приведенного удара	$v''_{1,1}$	*м/сек*	3,60	3,75	3,73	3,84	3,81	3,96	3,83	3,98
Скорость задних вагонов до приведенного удара . .	$v''_{2,1}$	*м/сек*	2,695	2,70	2,65	2,62	2,63	2,60	2,58	2,54
Средняя скорость электровоза до приведенного удара .	$v_{ср_1}$	*м/сек*	3,17	3,26	3,25	3,32	3,29	3,36	3,30	3,37
Средняя скорость задних вагонов до приведенного удара	$v_{ср_2}$	*м/сек*	2,73	2,73	2,71	2,69	2,7	2,68	2,68	2,66
Средняя величина массы	$M_{ср_1}$	*кг/сек²*	14,9	14,9	22,7	22,7	30,6	30,6	38,4	38,4
Скорость электровоза после приведенного удара	$v'_{1,2}$	*м/сек*	3,09	3,17	3,18	3,24	3,22	3,29	3,25	3,31
Разность скоростей после приведенного удара	$v'_{1,2} - v''_{2,1}$	*м/сек*	0,395	0,470	0,530	0,620	0,590	0,690	0,665	0,765
Ускорение электровоза перед следующим ударом	a_i	*м/сек²*	0,486	0,486	0,258	0,258	0,163	0,163	0,108	0,108
Разность скоростей перед следующим ударом	$v''_{1,2} - v''_{2,2}$	*м/сек*	0,49	0,578	0,576	0,672	0,62	0,724	0,686	0,788
Произведение масс	$\frac{M_1 M_2}{g^2}$		1570	1570	2055	2055	2040	2040	1535	1535
Импульс сил при массовом ударе	S	*кг*	860	1020	1330	1550	1420	1655	1180	1360

Таблица 8

Максимальные импульсы сил ударов при разной величине составов поезда

Наименование вел	Расчетные формулы	Единица измерения	Значение величин			
Число вагонов в составе		шт	10	15	20	27
Средняя величина ускорений	$a_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} a_i}{n}$	*м/сек²*	0,6266	0534	0435	0336
Разность скоростей до приведенного удара	$v''_{1,1} - v''_{2,1} = \sqrt{2\Delta ln \frac{1}{2} a_{ср} + r}$	*м/сек*	0742	0656	0728	0735
Скорость электровоза до приведенного удара	$v''_{1,1} = \frac{a_{ср} v'_{2,1} + a_{ср} (v_{1,1} - v_{2,1}) + v'_{1,1}}{a_{ср} + r}$	*м/сек*	3,45	3,34	3,32	3,36
Скорость вагонов до приведенного удара	$v''_{2,1} = v''_{1,1} - (v''_{1,1} - v''_{2,1})$	*м/сек*	2,718	2,684	2,662	2,625
Средняя скорость электровоза	$v_{ср} = \frac{v'_{1,1} + v''_{1,1}}{2}$	*м/сек*	3,11	3,05	3,08	3,06
Средняя скорость вагонов	$v_{ср_2} = \frac{v'_{2,1} + v''_{2,1}}{2}$	*м/сек*	2,75	2,73	2,72	2,70

Продолжение

Наименование величин	Расчетные формулы	Единица измерения	Значение величин			
Средняя величина первой массы	$M_{ср_1} = q\left(2k + \frac{n}{2}\right)\frac{1}{2}$	*кг сек²/м*	14,9	18,0	22,7	27,4
	$M_{ср_1} + m_2$	*кг сек²/м*	18,34	21,14	25,84	30,51
	$M_{ср_1} v_{ср_1}$		46,30	54,80	69,80	83,60
	$M_2 v_{ср_2}$		8,62	8,56	8,53	8,48
Скорость электровоза после приведенного удара	$v'_{1,2} = \frac{M_{ср_1} v_{ср_1} + M_2 v_{ср_2}}{M_{ср_1} + M_2}$	*м/сек*	3,05	3,01	3,03	3,02
Разность скоростей после приведенного удара	$v'_{1,2} - v''_{2,1}$	*м сек*	0,332	0,316	0,368	0,395
Ускорение перед следующим ударом	$a_l = \frac{f - w_0}{110}$	*м/сек²*	0,575	0,418	0,287	0,212
Разность скоростей перед следующим ударом	$v_{1,2} - v''_{2,2} = \sqrt{(v'_{1,2} - v''_{2,1} + 2\Delta l\ (a_l + r)}$	*м/сек*	0,419	0,359	0,416	0,430
Величина первой ма	$M_1 = q\left(k + \frac{n}{2}\right)$	*кг сек²/м*	22,8	29,1	38,4	47,7
Величина второй массы	$M_2 = q\frac{n}{2}$	*кг сек²/м*	15,7	22,0	31,4	40,8
	$M_1 M_2$	*кг сек²/м*	357	640	1210	1950
	$M_1 + M_2$	*кг сек²/м*	38,5	51,1	69,8	88,5
Максимальный импульс силы при массовом ударе	$S = 103\frac{M_1 M_2 (v''_{1,2} - v''_{2,2})}{M_1 + M_2}$	*кг*	400	500	742	975

Таблица 9

Импульсы сил массовых ударов при однотонных вагонетках

Наименован	Расчетные формулы	Единица измерения	Значение величин	
Число вагонов до удара .	n	шт	10	20
Средняя величина ускорений	$a_{ср}$	$м\ сек^2$	0,906	0,617
Разность скоростей движущихся тел до приведенного суммарного удара	$v_{1,1} - v_{2,3}$	$м/сек$	0,992	1,183
Скорость электровоза до приведенного суммарного удара		$м$	3,68	3,81
Скорость задних вагонов до приведенного суммарного удара	$v''_{1,2}$	$м\ сек$	2,688	2,627
Средняя скорость электровоза до приведенного суммарного удара	$v_{ср_1}$		3,23	3,29
Средняя скорость задних вагонов до приведенного удара	$v_{ср_2}$	$м/сек$	2,73	2,70
Средняя величина массы электровоза и передних вагонов	$M_{ср_1}$	$кг.\ сек^2/м$	15,8	24,5
Скорость электровоза после приведенного удара	$v'_{1,2}$	$м/$	3,18	3,56
Разность скоростей движущихся тел после приведенного удара	$v'_{1,2} - a_{2,1}$	$м/сек$	0492	0933
Ускорение электровоза перед следующим ударом .	a_i	$м/сек^2$	0446	0231
Разность скоростей движущихся масс перед следующим ударом	$v''_{1,2} -$	$м/ ек$	0,5425	0,950
Масса первого тела	M_1	$кг.\ сек^2/м$	24,5	42
Масса второго тела	M_2	$кг.\ сек^2/м$	67,28	49,78
Произведение масс	$M_1\ M_2$	$\frac{кг.\ сек^2}{м}$	1650	2085
Импульс сил при массовом ударе	S	$кг$	1000	2200

происходит в той же закономерности, какая наблюдалась при увеличении люфта Δl в растяжках сцепок (табл. 7). Таким образом, влияние емкости сосуда на величину силы ударов при растяжке поезда, очевидно, можно учитывать аналогично влиянию длины растяжки в сцепках. Следовательно, прямая зависимость величины массового удара от величины состава поезда справедлива в пределах постоянной емкости вагонов и постоянной длины растяжки в сцепках.

Как известно, в настоящее время максимально допустимая величина состава поезда теоретически определяется из следующих трех условий: 1) пуска электровоза в ход на подъем с грузом на преобладающем (руководящем) уклоне; 2) торможении электровоза при ходе с грузом под уклон; 3) допустимом нагревании тяговых двигателей при работе.

Все три условия дают возможность довольно просто определить максимально допустимые значения составов для существующих типов электровозов. Однако, как показывают примеры [3], при этом для контактных электровозов получаются, например, весьма большие,

практически нереальные значения величины составов, превышающие, по крайней мере, в два раза фактические, имеющие место на рудниках и шахтах. В связи с этим некоторые изменения величин w_0 и $i^0/_{00}$ в формуле (21) применительно к условиям шахты как будто совершенно не играют никакой роли, так как они вызывают изменение составов в пределах максимальных величин, далеко отстоящих от реальных значений.

По существу, все перечисленные выше проверки величины состава не дают ответа на поставленный вопрос. Выбирать величину состава фактически приходится по практическим данным и экономическим сравнениям. Величина состава не принимается максимально допустимой согласно формулам не только по экономическим соображениям. Как показывает практика, электровоз фактически и не может в условиях рудничных откаточных путей вести составы такой величины [4].

При увеличении составов сверх установленной практикой нормы режим работы электровоза становится ненормальным: наблюдается сильное скольжение колес, что приводит к резкому снижению скорости движения, перерасходу энергии на трение и сильному износу ходовых частей электровоза.

Причиной этого служит плохое состояние откаточных путей и подвижного состава, что, в свою очередь, вызывает наличие ударной нагрузки на электровоз.

Последний фактор, очевидно, может быть учтен на основании первого условия, т. е. пуска электровоза с грузом на подъем при соответствующем изменении коэффициентов, входящих в формулу, особенно коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами.

Как установлено выше, при наличии люфта в сцепках между вагонами в связи с резкими изменениями скорости движения поезда, могут возникать ударные нагрузки на электровоз. Как при пуске, так и на ходу, они возникают преимущественно в моменты развития максимального тягового усилия электровоза независимо от числа вагонов в составе. Разница при этом может быть только в величине скорости и ускорения при движении. Таким образом, ударная нагрузка как бы накладывается на основную, обусловленную пределами по сцеплению колес электровоза с рельсами. Очевидно, в некоторые моменты будет действовать суммарная величина нагрузки, превышающая допустимые пределы по сцеплению и, естественно, поэтому вызывающая скольжение колес электровоза с рельсами.

Практически перегрузку электровоза можно ожидать при любом массовом ударе, а не только в моменты максимальных значений силы удара (табл. 2 и 4). Кроме того, в моменты ударов происходит резкое изменение скорости движения электровоза в сторону уменьшения. Следовательно, существует некоторый момент, при котором скорость движения электровоза не соответствует скорости вращения колес электровоза, якоря двигателя и передач. Нетрудно убедиться, что инерция вращающихся масс увеличивает ударную нагрузку на ободе колес и, следовательно, способствует скольжению колес в моменты ударов. Таким образом, в некоторые моменты движения состава наступают условия равенства движущих сил с силами сопротивления движению при скольжении колес электровоза.

Из теории тяги и практики известно, что коэффициенты трения колес о рельсы при скольжении значительно снижаются. Они иногда достигают половинных значений по сравнению с коэффициентами трения покоя. Таким образом, при новых условиях равенства движущих

сил электровоза с имеющимися сопротивлениями движению состава коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами резко уменьшается. Чтобы при этих условиях движение состава могло продолжаться, чтобы мог автоматически восстановиться нормальный режим работы электровоза без скольжения, сила тяги при новом, меньшем коэффициенте сцепления должна обеспечивать хотя бы равномерное движение состава без замедления. Естественно, при этом максимально допустимая величина состава поезда пропорциональна уменьшению коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами. При новых условиях равенства сил максимально допустимая величина состава поезда по условиям разгона будет

$$P+Q=\frac{1000P\psi_2}{w_0 \pm i}\ m, \qquad (21)$$

где ψ_2 — коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами при наличии скольжения;

w_0 — ходовое сопротивление движению при условии, что удары происходят при наличии движения состава поезда.

Коэффициент будет величиной переменной, зависящей от величины скольжения колес. Максимальный коэффициент скольжения колес с рельсами при отсутствии скольжения в точках касания колес равен 0,2—0,25. Минимальной величиной будет коэффициент трения колес о рельсы при 100% скольжении колес, когда при включенных двигателях поступательное движение электровоза равно нулю. В последнем случае величина ψ колеблется в более широких пределах от 0,0344 до 0,08 [4]. Безусловно, в последнем случае коэффициент сцепления может быть увеличен за счет подсыпания песка на рельсы. Но этот метод увеличения сцепления является не вполне надежным средством, дающим неопределенную переменную величину и, кроме того, вызывающим весьма сильный износ ходовых частей электровоза. Подсыпание песка в крайнем случае можно рекомендовать лишь при пуске электровоза в ход, но все случаи ударной нагрузки на ходу, вызывающие скольжение колес, должны ликвидироваться автоматически. Для этого должна быть правильно выбрана величина состава поезда с учетом ударной нагрузки при всех резких изменениях величины скорости движения.

Очевидно, правильность выбора величины состава, при прочих равных условиях, будет зависеть от правильного выбора величины ψ. Имея в виду весьма важное значение этой величины в теории рудничной электровозной откатки, крайне необходимо поставить широкие экспериментальные работы по исследованию коэффициентов сцепления колес электровоза с рельсами при различных условиях эксплуатации электровозов.

В настоящее время на основании исследований, проведенных в условиях шахт Черемховского и Карагандинского угольных бассейнов, можно рекомендовать величину ψ при наличии скольжения принимать равной 0,07—0,09, что фактически совпадает с результатами наблюдений работников завода „Динамо" им. Кирова при испытании электровозов на шахте им. Челюскинцев треста Сталинуголь в Донбассе [4].

Величина ψ в наших исследованиях была определена при условии скольжения колес и одновременного подсыпания песка под колеса. При испытаниях электровозов в Донбассе также применялся песок и не только в периоды разгона. Таким образом, рекомендуемая величина коэффициента сцепления в условиях скольжения колес является

максимальной. Очевидно, без применения песка в моменты скольжения величина ψ будет еще меньше, и для автоматической ликвидации ненормальных режимов работы электровоза в данных условиях потребуется дальнейшее уменьшение величины состава.

С принятыми в наших примерах условиями (семитонного электровоза с двигателем типа ДК-801А, имеющим часовую силу тяги 700 *кг* и двухтонной вагонетки с собственным весом 1400 *кг*) максимальная величина состава определится, согласно формуле (21)

$$P+Q=\frac{1000\cdot 7\quad 0{,}08}{8+3}=51\ m,$$

т. е. порядка 14 вагонов в составе.

При определении величины состава по формуле (21) проверки по нагреву тяговых двигателей не требуется, так как значения величины состава поезда при проверке получаются всегда больше. Проверка же величины состава на длину тормозного пути, как показала практика, не дает удовлетворительного решения ни для одного из контактных электровозов. Для электровоза II-ТР-1 получается длина состава слишком большая, а для других более быстроходных электровозов несоразмерно малая, особенно при начале торможения с установившейся величины скорости.

Если учесть, что тормозной вес $P_т$ всегда может быть увеличен за счет тормозных вагонеток, очевидно, при прочих удовлетворительных условиях ограничивать величину состава по торможению вряд ли целесообразно. Тем более, что для рудничных электровозов большого сцепного веса, начиная от 10 *m* и выше, это условие удовлетворяется лишь при наличии тормозных вагонов или искусственного снижения скорости движения перед торможением.

Как показывают исследования [3], наиболее верным способом выбора величины состава поезда является технико-экономическое сравнение, с учетом всех расходов, связанных с электровозной откаткой. Однако все эти способы в настоящее время пока не получили еще достаточного распространения в расчетной практике. Для их внедрения в производство необходимо упростить теорию расчета и определить на основании новых цен более твердые сравнительные коэффициенты. На наш взгляд, упрощение техники расчета может пойти по методу графического определения сцепного веса электровоза и величины состава.

Выводы

Паразитные побочные движения элементов состава поезда в рудничной электровозной откатке существенно влияют на работу собственно электровозов. Особенно удары вагонов в моменты резких изменений скорости приводят к скольжению колес электровоза, а следовательно, к снижению скорости движения поезда, к перерасходу энергии и сильному износу ходовых частей электровоза.

Если величина силы ударов при данном сцепном весе электровоза зависит от трех факторов (величины состава поезда, разности скоростей движущихся масс и длины люфта в сцепках), то восстановление нормального режима работы электровоза после удара зависит только от величины состава поезда. Это условие позволяет установить зависимость величины состава поезда от силы тяги с учетом наличия ударной нагрузки и автоматического восстановления нормального

режима работы электровоза после удара, вызвавшего скольжение колес.

При наличии скольжения колес коэффициент сцепления колес электровоза резко снижается. Как показывает практика, ψ при этом равен 0,08—0,09, что, естественно, приводит к соответственному снижению силы тяги электровоза.

Для автоматического восстановления нормального режима работы электровоза при разгоне после удара необходимо иметь движение без замедления, для чего сила тяги при меньшем ψ должна быть равна имеющимся сопротивлениям движению состава. Это равенство дает возможность определить величину состава, при которой не будет затяжного характера скольжения колес.

Как показывают примеры, величина состава, определяемая по этому условию, находится ближе к рекомендуемым практикой, чем те же величины, найденные по обычным формулам.

Этот метод определения величины состава особенно может быть рекомендован для условий откатки при неспокойном профиле откаточных путей, при наличии сцепок с большим люфтом (двойной крюк с промежуточным кольцом), при сравнительно малой емкости вагонов для крупных электровозов, а следовательно, при длинном составе или при наличии ограничений максимальной скорости движения поезда по технике безопасности или производственным условиям.

Поступило 3/I 1952 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шклярский Ф. Н., Горная электромеханика, часть I. Рудничная откатка электровозами, 1936.
2. Волотковский С. А., Рудничная электровозная тяга, Углетехиздат, 1950.
3. Рысьев А. В., Технико-экономический метод определения элементов подземной электровозной откатки, Записки Ленинградского горного института, 1949, т. XXIV.
4. Рысьев А. В., К некоторым вопросам теории рудничной электровозной откатки, Записки Ленинградского горного института, 1948, т. XXII.
5. Рысьев А. В., Новый метод определения элементов движения рудничной электровозной откатки, Записки Ленинградского горного института, 1951, т. XXV.