МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УССР
ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ШАХТНОМ ПОЕЗДЕ И ПРИВОДНЫХ СТАНЦИЯХ БЕЗЛОКОМОТИВНОЙ ОТКАТКИ

ДОНЕЦК — 1982

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УССР

ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Утверждаю

Заместитель начальника Энерго-
механического управления
Минуглепрома УССР

В.А.Сидоренко
26 марта 1982 г.

Утверждаю

Проректор ДПИ по
научной работе

М.П.Зборщик
25 марта 1982 г.

Согласовано

Заместитель директора института
геотехнической механики

С.А.Полуянский
30 марта 1982 г.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ШАХТНОМ ПОЕЗДЕ И ПРИВОДНЫХ СТАНЦИЯХ БЕЗЛОКОМОТИВНОЙ ОТКАТКИ

Донецк - 1982 г.

I. ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXУI съезда КПСС предусматривается обеспечить добычу угля в 1985 году в количестве 770...880 млн.тонн. Для достижения этой цели необходимо "расширить создание и внедрение автоматизированных средств добычи угля на шахтах без постоянного присутствия людей в очистных забоях" [I].

Главными задачами совершенствования шахтного транспорта являются значительное повышение надежности и производительности транспортных магистралей, снижение трудоемкости работ, ликвидация многоступенчатости и повышение нагрузки на транспортные выработки за счет применения поточных транспортных систем, высококачественных, высокопроизводительных горных транспортных машин и механизмов.

Для транспорта полезного ископаемого угольных и рудных шахт применяются различные средства [2,3], но и в настоящее время главным видом транспорта по горизонтальным выработкам является локомотивная откатка. Основным видом рудничных локомотивов в нашей стране служат аккумуляторные электровозы, составляющие 85% локомотивного парка угольной промышленности. Несмотря на продолжающийся курс повышения производительности электровозного транспорта за счет увеличения грузоподъемности вагонеток, сцепной массы локомотивов, применения тяжелых рельсов, внедрения спаренных электровозов и других мероприятий, доля расходов локомотивного транспорта в общей себестоимости угля остается значительной по сравнению с другими видами транспорта. Кроме того, рост производительности электровозного транспорта и, соответственно, пропускная способность главных выработок ограничены спецификой работы откатки с помощью аккумуляторных электровозов.

В связи с этим есть основания считать актуальным вопрос о создании средств непрерывного автоматизированного транспорта по главным горизонтальным выработкам с большими грузопотоками.

2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работы по созданию автоматизированных средств транспорта на горизонтальных выработках проводятся по двум направлениям.

I. Создание автоматизированной откатки на базе существующей технологии транспорта с использованием локомотивов в качестве средств тяги.

2. Создание автоматизированных комплексов безлокомотивной откатки на базе поточной технологии непрерывного транспорта с использованием стационарных приводных станций как средств тяги.

Первое направление в настоящее время развивается по пути полной автоматизации, т.е. без участия машинистов локомотивов в процессе транспортирования. Определенные успехи здесь достигнуты в работах ряда зарубежных фирм и отечественных организаций. Наиболее широкое признание получили средства автоматизированной откатки шведской фирмы АЗЕА [4]. Однако все эти работы проводятся для автоматизации управления контактными электровозами, которых на отечественных шахтах работает небольшое количество, а в дальнейшем, с переходом на более глубокие горизонты, их число будет сокращаться.

В нашей стране институтами Гипроуглеавтоматизация, ДонУГИ, МакНИИ и Автоматуглепром ведутся работы по созданию комплекса технических средств для системы автоматизированного управления шахтными поездами на базе применения аккумуляторных электровозов. Создание такой системы встретило определенные трудности, основными из которых являются обеспечение связи центрального пульта управления с аккумуляторными электровозами, которые должны работать без машинистов, а также автоматизация замены батареи.

Второе направление может оказаться более приемлемым решением вопроса автоматизации рельсового транспорта [5,6]. Одним из путей развития этого направления является создание автоматизированных комплексов безлокомотивной откатки на базе существующих, се-

рийно выпускаемых типов подвижного состава, в частности, составов вагонеток с автосцепками или секционных поездов. Новым элементом в этом способе откатки является только стационарный привод, который заменяет локомотив.

Комплекс безлокомотивной откатки представляет собой распределенные вдоль трассы транспортирования стационарные приводные станции, расстояние между которыми не превышает длину поезда. Приводные станции состоят из установленных с двух сторон рельсового пути напротив друг друга движителей, воздействующих на боковые стенки кузова подвижного состава. Число движителей на приводной станции определяется требуемым тяговым усилием для перемещения поезда заданной длины. При входе головы состава в активную зону приводной станции автоматически включаются движители и перемещают состав к следующей приводной станции, которая автоматически включается при входе головы состава в ее активную зону, при этом предыдущая станция отключается. Таким образом осуществляется эстафетная передача подвижного состава от одной станции к другой. Движители могут быть цепные, канатные, реечно-зубчатые, фрикционные (пневмошинные), магнитно-фрикционные и электромагнитные. В качестве движителей могут также быть применены линейные индукционные двигатели (ЛИД). Приводные станции могут быть оборудованы цепными, канатными или другими толкателями шахтных вагонеток.

При разработке комплексов безлокомотивной откатки перед проектировщиками ставится задача: необходимо так выбрать и рассчитать параметры приводных станций, чтобы нагрузки в основных узлах принятого типа подвижного состава не превышали допустимых при работе откатки. Расчет динамических нагрузок в сцепных устройствах поезда и разработка рекомендаций по расчету и выбору параметров работы безлокомотивной откатки со стационарными приводными станциями производятся в следующей последовательности:

I) выбор и обоснование расчетной схемы шахтного поезда в комплексе безлокомотивной откатки;

2) описание математической модели поезда в комплексе безлокомотивной откатки;

3) определение влияния межвагонного пространства на тяговое усилие приводной станции;

4) составление алгоритма и программы решения дифференциальных уравнений движения поезда при работе безлокомотивной откатки;

5) расчет продольно-динамических нагрузок, действующих на буферно-сцепные устройства подвижного состава при различных режимах работы комплекса безлокомотивной откатки;

6) разработка рекомендаций по расчету и выбору параметров работы безлокомотивной откатки со стационарными приводными станциями.

3. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ШАХТНОГО ПОЕЗДА В КОМПЛЕКСЕ БЕЗЛОКОМОТИВНОЙ ОТКАТКИ

При работе локомотивной откатки максимальные продольные усилия в сцепных устройствах возникают во время трогания и торможения поезда. Для безлокомотивной откатки с помощью стационарных приводных станций неблагоприятным является также и режим движения с заданной средней скоростью, так как в этом случае на одни из вагонеток поезда действуют растягивающие усилия, а на другие - сжимающие, т.е. весь поезд или отдельная его часть то сжимается, то растягивается, в результате чего происходят продольные колебания. Расчетная схема поезда должна учитывать все эти особенности.

Для исследования динамики шахтного поезда при работе локомотивной откатки используются две расчетные схемы, предложенные Н.Е.Жуковским [7]. В первой схеме поезд с локомотивом рассмат-

ривался как система абсолютно твердых тел, соединенных упругими связями. Во второй схеме поезд представлен как сплошной упругий стержень с грузом на одном из концов.

В работах Шахтаря П.С. поезд представлен в виде упругого стержня, имеющего распределенную массу, и сосредоточенных масс [8]. В распределенную массу стержня принята масса упругой связи - вагонетки без колесных пар и сцепного устройства. Сосредоточенные массы - это массы грузов в вагонетках и массы колесных пар. Причем, в качестве упругого стержня принята головная часть поезда. Длина стержня после каждого очередного удара возрастает на длину вагонетки с растянутыми сцепками. Допущение, что головная часть поезда представляется вагонетками с растянутыми сцепками, может быть справедливо для локомотивной откатки, когда локомотив находится в голове поезда. Такое допущение не может быть принято при безлокомотивной откатке. Кроме этого, по методике Шахтаря П.С. нельзя определить мгновенные значения параметров движения каждой вагонетки в любой момент времени, что необходимо при определении нагрузок на приводную станцию.

При выборе расчетной схемы поезда при безлокомотивной откатке за основу принимается расчетная схема шахтного поезда, предложенная Поляковым Н.С. и Новиковым Е.Е. для локомотивной откатки [9]. В этом случае поезд представляется в виде системы твердых тел, соединенных связями с упругими элементами, т.е. в виде системы с конечным числом степеней свободы.

Расчетная схема шахтного поезда при безлокомотивной откатке показана на рис. 3.1. Определяющим фактором при расчете продольных нагрузок в поезде является внешняя возмущающая сила, т.е. тяговое усилие приводной станции. На поезд одновременно могут воздействовать одна, две или большее число приводных станций. Закон изменения тягового усилия приводной станции зависит от типа

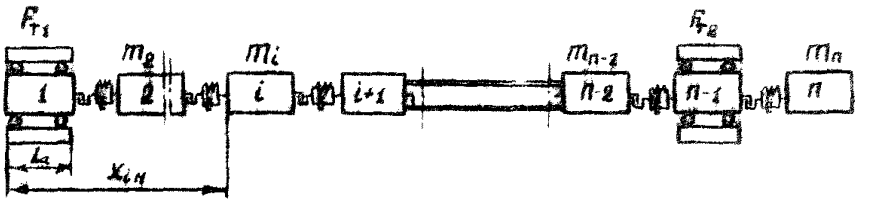


Рис.3.1.Расчетная схема шахтного поезда при безлокомотивной откатке:

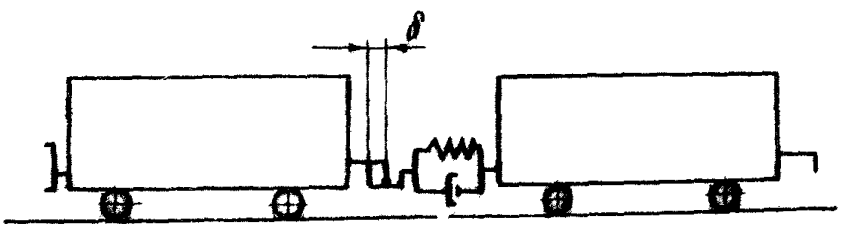
$1, 2, \ldots i \ldots n$ - порядковый номер вагонетки;

$m_1, m_2, \ldots m_i \ldots m_n$ - масса соответствующей вагонетки;

L_a - длина активной зоны;

$x_{iн}$ - начальная координата вагонетки;

$F_{т1}, F_{т2}$ - тяговое усилие 1-й и 2-й приводной станции соответственно.



Рис,3.2.Схема межвагонных связей.

применяемого дв. ителя. Межвагонные связи в расчетной схеме должны учесть, что в современных сцепных устройствах имеется зазор и амортизатор в виде пружины или резино-металлических деталей. Схема межвагонных связей с учетом этих требований представлена на рис. 3.2.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЕЗДА В КОМПЛЕКСЕ БЕЗЛОКОМОТИВНОЙ ОТКАТКИ

При составлении математической модели для определения продольных нагрузок введем следующие допущения.

I. Комплекс безлокомотивной откатки снабжен приводными станциями с движителями, имеющими одинаковые параметры.

2. Поезд рассматривается как система твердых тел, соединенных упругими связями с некоторым зазором.

3. В начальном положении зазоры между телами одинаковы.

4. Удары между массами – центральные, т.е. действуют по продольной оси.

5. Кузов жестко соединен с рамой и колесными парами вагонетки.

6. Тяговое усилие приводной станции распределяется поровну на боковые стенки вагонетки.

7. Уклон пути неизменен.

Система дифференциальных уравнений движения шахтного поезда, возникающего под действием силы тяги приводных станций, состоят из дифференциальных уравнений движения каждой вагонетки:

$$m_i \cdot a_i = \Sigma F_i, \qquad (4.I)$$

где m_i – масса i-й вагонетки;

a_i – ускорение i-й вагонетки;

ΣF_i – сумма сил, действующих на вагонетку.

Правая часть уравнения (I) также, как и при локомотивной откатке, включает в себя разность усилий в сцепных приборах впереди и позади вагонетки и силы сопротивлению движения. В рассматриваемой системе откатки на каждую вагонетку в какой-то момент времени воздействует тяговое усилие приводной станции, которое также должно быть включено в правую часть уравнения (I). Кроме того, каждая вагонетка при прохождении ею активной зоны приводной станции испытывает дополнительное сопротивление движению, силы которого необходимо учесть в правой части. Причем, тяговое усилие приводной станции и усилие дополнительного сопротивления должны принимать значения для данной вагонетки только на время нахождения ее в активной зоне приводной станции. В общем случае как тяговое усилие, так и усилие дополнительного сопротивления зависят от координаты вагонетки, т.е. от степени перекрытия ею активной зоны приводной станции.

Таким образом, уравнение (I) можно записать в виде

$$m_i \cdot a_i = \left[F_T(x_i) - W_{cT}(x_i) \right] \cdot \sigma_{вых} \cdot \sigma_{вх} + \\ + F_i - F_{(i+1)} - W_i , \qquad (4.2)$$

где $F_T(x_i)$ – закон изменения тягового усилия приводной станции;

$W_{cT}(x_i)$ – закон изменения силы дополнительного сопротивления;

$\sigma_{вх}, \sigma_{вых}$ – единичные функции, принимающие значения 0 или I в зависимости от координаты x_i, для момента входа вагонетки в приводную станцию и выхода из нее соответственно;

$F_i, F_{(i+1)}$ – усилия, возникающие в сцепных приборах впереди и позади вагонетки соответственно;

W_i – силы сопротивления движению вагонетки.

Силы сопротивления движению вагонеток определяются по формуле

$$W_i = m_i \cdot g \cdot (A + B \cdot |v_i|) \operatorname{sign} v_i \pm m_i g U_k, \quad (4.3)$$

где g – ускорение силы тяжести;

A, B – коэффициенты, постоянные для данного типа вагонеток;

v_i – скорость i-й вагонетки;

U_k – уклон пути.

Усилие, возникающее в $(i+1)$-й связи в процессе движения предварительно осаженного шахтного поезда, можно списать также, как и в работе [9]:

$$F_{(i+1)} = [c \cdot (x_i - x_{(i+1)} - \delta) + \alpha \cdot (v_i - v_{(i+1)})] \cdot \sigma_0 (x_i - x_{(i+1)} - \delta) +$$

$$+ [c \cdot (x_i - x_{(i+1)}) + \alpha \cdot (v_i - v_{(i+1)})] \cdot \sigma_0 (x_{(i+1)} - x_i), \quad (4.4)$$

где c – жесткость упругой связи;

α – вязкость связи или коэффициент вязкого сопротивления;

δ – зазор в сцепке, соединяющей i-ю и $(i+1)$-ю вагонетки;

$\sigma_0(x_i - x_{i+1} - \delta)$, $\sigma_0(x_{i+1} - x_i)$ – единичные функции.

Усилие в $(i+1)$-й связи в процессе движения предварительно растянутого поезда равно

$$F_{(i+1)} = [c \cdot (x_i - x_{(i+1)}) + \alpha \cdot (v_i - v_{(i+1)})] \cdot \sigma_0 (x_{(i+1)} - x_i) +$$

$$+ [c \cdot (x_i - x_{(i+1)} + \delta) + \alpha \cdot (v_i - v_{(i+1)})] \cdot \sigma_0 (x_{(i+1)} - x_i + \delta). \quad (4.5)$$

Запишем дифференциальные уравнения движения предварительно осаженного шахтного поезда

$$m_1 \cdot a_1 = [F_{т1}(1) - W_{ст1}(1)] \cdot \sigma_0 (x_1 - x_{1н} + l_a) \cdot \sigma_0 (x_{1н} + l_к - x_1) +$$

$$+ [F_{т2}(1) - W_{ст2}(1)] \sigma_0 (x_1 - x_{1н} - l_c + l_a) \cdot \sigma_0 (x_{1н} + l_c + l_к - x_1) +$$

. . . . . .

$$+ [F_{тj}(1) - W_{стj}(1)] \cdot \sigma_0 (x_1 - x_{1н} - (j-1) l_c + l_a) \cdot \sigma_0 (x_{1н} + (j-1) l_c + l_к - x_1) +$$

. . . . . .

$$+ F_1 - F_2 - m_1 \cdot g \cdot [U_k + (A + B|v_1|) \operatorname{sign} v_1];$$

$$m_2 a_2 = [F_{T1}(2) - W_{cT1}(2)] \cdot \sigma_0(x_2 - x_{2H} + l_a) \cdot \sigma_0(x_{2H} + l_k - x_2) +$$
$$+ [F_{T2}(2) - W_{cT2}(2)] \cdot \sigma_0(x_2 - x_{2H} - l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{2H} + l_c + l_k - x_2) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ [F_{Tj}(2) - W_{cTj}(2)] \cdot \sigma_0(x_2 - x_{2H} - (j-1)l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{2H} + (j-1)l_c + l_k - x_2) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ F_2 - F_3 - m_2 g [U_k + (A + B|v_2|) sign v_2] ;$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$m_i a_i = [F_{T1}(i) - W_{cT1}(i)] \cdot \sigma_0(x_i - x_{iH} + l_a) \cdot \sigma_0(x_{iH} + l_k - x_i) +$$
$$+ [F_{T2}(i) - W_{cT2}(i)] \cdot \sigma_0(x_i - x_{iH} - l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{iH} + l_c + l_k - x_i) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ [F_{Tj}(i) - W_{cTj}(i)] \cdot \sigma_0(x_i - x_{iH} - (j-1)l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{iH} + (j-1)l_c + l_k - x_i) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ F_i - F_{(i+1)} - m_i g [U_k + (A + B|v_i|) sign v_i] ;$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$m_n a_n = [F_{T1}(n) - W_{cT1}(n)] \cdot \sigma_0(x_n - x_{nH} + l_a) \cdot \sigma_0(x_{nH} + l_k - x_n) +$$
$$+ [F_{T2}(n) - W_{cT2}(n)] \cdot \sigma_0(x_n - x_{nH} - l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{nH} + l_c + l_k - x_n) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ [F_{Tj}(n) - W_{cTj}(n)] \cdot \sigma_0(x_n - x_{nH} - (j-1)l_c + l_a) \cdot \sigma_0(x_{nH} + (j-1)l_c + l_k - x_n) +$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ F_n - F_{(n+1)} - m_n g [U_k + (A + B|v_n|) sign v_n] ,$$

где $F_{T1}(1), F_{T2}(1), \ldots F_{Tj}(1)$ – тяговое усилие I-й, 2-й, ... j-й приводной станции, воздействующее на I-ю вагонетку в зависимости от ее координаты соответственно;

$W_{cT1}(1), W_{cT2}(1), \ldots W_{cTj}(1)$ – сила дополнительного сопротивления движению I-й вагонетки в I-й, 2-й, ... j-й приводной станции соответственно;

$\sigma_0(x_i - x_{iH} - (j-1)l_c + l_a)$; $\sigma_0(x_{iH} + (j-1)l_c + l_к - x_i)$ – единичные функции;

x_i – текущее значение координаты (пути) i-й вагонетки;

x_{iH} – начальное значение координаты i-й вагонетки относительно первой станции по ходу движения;

j – номер приводной станции;

l_c – расстояние между приводными станциями;

l_a – длина активной зоны приводной станции;

$l_к$ – длина кузова вагонетки.

Число вагонеток в поезде (i) может быть от I до n , число приводных станций (j) от 1 до $к$. Количество дифференциальных уравнений равно числу вагонеток в поезде. Если принять допущение, что массы всех вагонеток одинаковы ($m_1 = m_2 = \ldots m_i = \ldots m_n = m$), и в начальных условиях принять усилия в голове и хвосте состава равными нулю ($F_1 = 0$; $F_{(n+1)} = 0$), то все дифференциальные уравнения будут однотипными по структуре, а слагаемые в правой части для каждой вагонетки зависят только от координаты этой вагонетки. Это позволяет значительно сократить запись уравнений при решении их на ЭВМ.

Система дифференциальных уравнений (4.6) решается на ЭЦВМ "ЕС-1020" или "ЕС-1022" численным методом Рунге-Кутта, имеющем удовлетворительную точность. Для решения необходимо привести систему (4.6) к нормальному виду:

$$\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dt} = x_{(n+1)};\\
&\ldots\ldots\ldots\\
&\frac{dx_i}{dt} = x_{(n+i)};\\
&\ldots\ldots\ldots\\
&\frac{dx_n}{dt} = x_{(2n+1)};
\end{aligned} \qquad (4.7)$$

$$\frac{dx_{(n+1)}}{dt}=\frac{1}{m}\cdot\left[\sum_{j=1}^{K}(F_{тj}-W_{стj})\cdot\sigma_{вх1}\cdot\sigma_{вых1}+F_1-F_2-W_1\right];$$

. . . . . .

$$\frac{dx_{(n+i)}}{dt}=\frac{1}{m}\cdot\left[\sum_{j=1}^{K}(F_{тj}-W_{стj})\cdot\sigma_{вхi}\cdot\sigma_{вых i}+F_i-F_{(i+1)}-W_i\right];$$

. . . . . .

$$\frac{dx_{(2n+1)}}{dt}=\frac{1}{m}\cdot\left[\sum_{j=1}^{K}(F_{тj}-W_{стj})\cdot\sigma_{вхn}\cdot\sigma_{вых n}+F_n-F_{(n+1)}-W_n\right].$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (4.7) составлена программа расчета на языке ФОРТРАН с использованием стандартной программы метода Рунге-Кутта. Блок-схема решения представлена на рис. 4.I. Разработанная программа позволяет определять мгновенные значения текущей координаты x_i величины усилия в буферно-сцепных устройствах, скорость движения, ускорение для каждой вагонетки состава, состоящего из десяти, двадцати и тридцати вагонеток. Принципиально программа позволяет решать задачу и для большего числа вагонеток в составе, для чего требуется заменить несколько карт.

Путем изменения значений величин, входящих в правые части дифференциальных уравнений, в результате решения получаются рациональные параметры режима трогания и торможения.

Одним из основных параметров является тяговое усилие приводной станции, которое в общем случае изменяется в функции пути по периодическому закону, обусловленному чередованием полного перекрытия активной зоны при прохождении ею кузова вагонетки и частичного перекрытия при прохождении межвагонного пространства. Например, для j-й приводной станции с линейным электроприводом, представляющей установленные на стойках с двух сторон рельсового пути индукторы бегущего магнитного поля, которое индутирует в

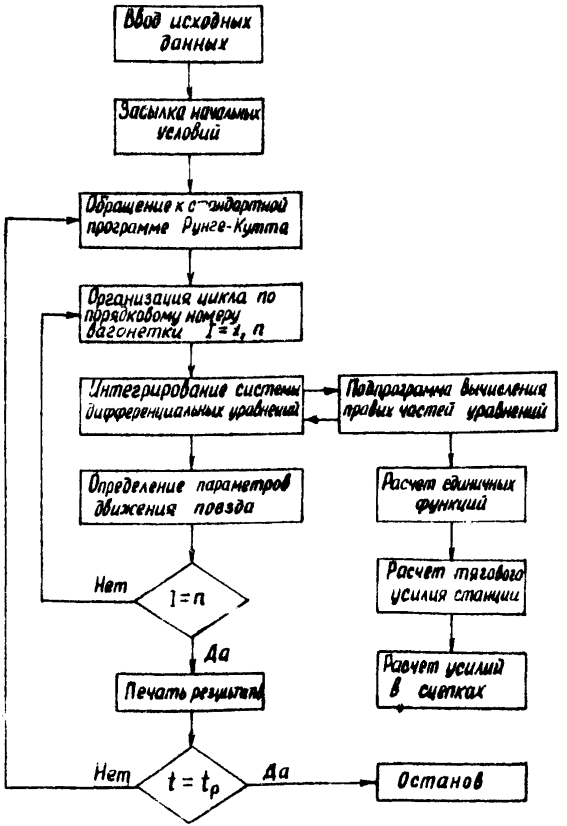


Рис.4.I.Блок-схема решения дифференциальных уравнений движения поезда

боковых стенках вагонетки вихревые токи, взаимодействует с ними. и в результате происходит движение вагонетки [10, 11] , тяговое усилие, действующее на i-ю вагонетку, описывается уравнением

$$F_{ij}(i) = \frac{1}{3,9} \cdot F_0 \cdot K_{naji} \cdot \ell n\left(25 \cdot K_{nj} + \sqrt{625 \cdot K_{nj}^2 + 1}\right), \qquad (4.8)$$

где F_0 – тяговое усилие приводной станции при полностью перекрытой активной зоне индуктора вторичным элементом;

K_{nj} – полный коэффициент перекрытия активной зоны j-й станции (одновременно от двух, трех или большего числа вагонеток);

K_{naji} – коэффициент долевого участия i-й вагонетки в общем перекрытии j-й приводной станции.

Величина полного коэффициента перекрытия определяется суммой коэффициентов долевого участия отдельных вагонеток на данный момент времени

$$K_{nj} = \sum_{i=1}^{n} K_{naji} . \qquad (4.9)$$

Коэффициент долевого участия i-й вагонетки в общем перекрытии j-й станции при $\ell_a \leq \ell_к$ равен

$$K_{naji} = \left[1 - \frac{x_{in} + (j-1)\ell_c - x_i}{\ell_a}\right] \cdot E_{1ji} \cdot E_{2ji} +$$

$$+ E_{3ji} \cdot E_{4ji} + \frac{x_{in} + (j-1)\ell_c - x_i}{\ell_a} \cdot E_{5ji} \cdot E_{6ji} , \qquad (4.10)$$

где E_{1ji}, E_{2ji} – единичные функции, определяющие вход переднего борта i-й вагонетки в активную зону j-й станции и выход из нее;

E_{3ji}, E_{4ji} – единичные функции, определяющие начало и конец полного перекрытия;

E_{5ji}, E_{6ji} – единичные функции, определяющие вход заднего

борта i-й вагонетки в активную зону j-й станции и выход из нее.

Единичные функции описываются выражениями

$$
\begin{aligned}
E_{1ji} &= \sigma_0[x_i - x_{iH} - (j-1)\ell_c + \ell_a]\ ;\\
E_{2ji} &= \sigma_0[x_{iH} - (j-1)\ell_c - x_i]\ ;\\
E_{3ji} &= \sigma_0[x_{iH} - (j-1)\ell_c - x_i + \ell_K - \ell_a]\ ;\\
E_{4ji} &= \sigma_0[x_i - x_{iH} - (j-1)\ell_c]\ ;\\
E_{5ji} &= \sigma_0[x_{iH} + (j-1)\ell_c + \ell_K - x_i]\ ;\\
E_{6ji} &= \sigma_0[x_i - x_{iH} - (j-1)\ell_c + \ell_K - \ell_a].
\end{aligned}
\qquad (4.11)
$$

Силы дополнительного сопротивления движению вагонетки в приводной станции определяются перекатыванием опорных роликов по бортам вагонетки. Коэффициент сопротивления движению вагонеток от перекатывания роликов равен

$$\omega_p = \frac{\beta r_ц + f}{R_p}\ , \qquad (4.12)$$

где β – коэффициент трения скольжения,

$\beta = (8.10^{-4}\ .\ .\ .\ 15.10^{-4})$;

$r_ц$ – радиус цапфы;

f – коэффициент трения качения, $f = 5.10^{-4}$м;

R_p – радиус ролика.

Величина силы дополнительного сопротивления движению зависит от сил давления борта вагонетки на ролики, т.е. от сил одностороннего притяжения борта вагонетки к индуктору. Отношение силы притяжения $F_{пр}$ к силе тяги $F_т$ индуктора определяется коэффициентом γ

$$\gamma = \frac{F_{пр}}{F_т}\ . \qquad (4.13)$$

С учетом (4.12) и (4.13) можно записать, что для j-й приводной станции

$$F_{тj}(i) \cdot W_{стj}(i) = (1 - \gamma \cdot \omega_p) \cdot F_{тj}(i). \qquad (4.14)$$

Энергетические затраты на перемещение поезда при воздействии на него только поочередно одной из станций равно ($\frac{Вт}{кг \cdot м}$):

$$W_э = \frac{\sqrt{3} \cdot U_н \cdot J_н \cdot (2 - K_{пср}) \cdot [\cos\varphi_0 + (\cos\varphi_н - \cos\varphi_0) K_{пср}]}{n \cdot m \cdot X}, \qquad (4.15)$$

где $U_н$ – номинальное напряжение питающей сети;

$J_н$ – номинальный ток приводной станции при полностью перекрытой активной зоне;

$\cos\varphi_0$ – коэффициент мощности приводной станции при открытой активной зоне ($K_{пj}=0$);

$\cos\varphi_н$ – коэффициент мощности приводной станции при полностью перекрытой активной зоне ($K_{пj}=1$);

$K_{пср}$ – среднее значение коэффициента перекрытия активной зоны;

$$K_{пср} = \frac{t_ш}{t_р} \sum K_{пi};$$

$t_ш$ – шаг интегрирования;

$t_р$ – реальное время работы комплекса безлокомотивной откатки.

По изложенной методике составлена программа расчета параметров движения поезда в комплексе безлокомотивной откатки.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В СЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВАХ ПОЕЗДА

Решение задач проводилось для работы комплекса безлокомотивной откатки с составом вагонеток ВДК-2,5, оборудованных автосцепками. Инерция вращающихся частей учитывалась путем умножения массы вагонетки на коэффициент $(1+\gamma_u)$ =1,03. Величина зазора в автосцепках принята равной 10 мм.

Масса порожней вагонетки 1500 кг, груженой - 5000 кг. Жесткость амортизаторов в сцепном устройстве изменялась от $5 \cdot 10^5$ Н/м до $3 \cdot 10^6$ Н/м. Вязкость амортизаторов принята равной $2 \cdot 10^4$ Н·с/м.

На рис. 5.1 представлены графики изменения максимальных значений динамических нагрузок в сцепных устройствах при трогании предварительно осаженного порожнего поезда из 20 вагонеток на уклон 0,005 приводной станцией с тяговым усилием 8000 Н. При жесткости амортизаторов $5 \cdot 10^5$ Н/м нагрузки в сцепках незначительно отличаются от величины тягового усилия привода. Наибольшее усилие по длине поезда при этом имеет место в сцепном устройстве, соединяющем 1-ю и 2-ю вагонетки. С увеличением жесткости амортизаторов величина максимальных усилий повышается и при жесткости $c=3 \cdot 10^6$ Н/м, т.е. при увеличении ее в 6 раз, усилия в сцепках повышаются в 2,6...5,1 раза. Наибольшие усилия при этом наблюдаются в 6-й сцепке и составляют $4,16 \cdot 10^4$ Н, что значительно ниже допустимого усилия в автосцепках ($7 \cdot 10^4$ Н). Таким образом, ограничений по жесткости автосцепок при пуске порожнего состава приводными станциями комплекса безлокомотивной откатки практически нет, так как жесткость автосцепок составляет не более $2 \cdot 10^6$ Н/м.

На математической модели исследовано также влияние величины тягового усилия приводных станций на значения максимальных усилий в сцепных устройствах. На рис. 5.2 представлены графики распределения максимальных динамических нагрузок в сцепных устройствах с жесткостью амортизаторов $c=1,2 \cdot 10^6$ Н/м при трогании порожнего поезда на уклон 0,005 для различных значений тягового усилия. Кривая 1 соответствует тяговому усилию приводной станции $1 \cdot 10^4$ Н. Максимальные динамические нагрузки наблюдаются в 7-й сцепке и составляют 19200 Н, что выше тягового усилия приводной станции в 1,92 раза. При увеличении тягового усилия в 2 раза максимальные нагрузки в сцепных устройствах повышаются в 1,8 раза (кривая 2);

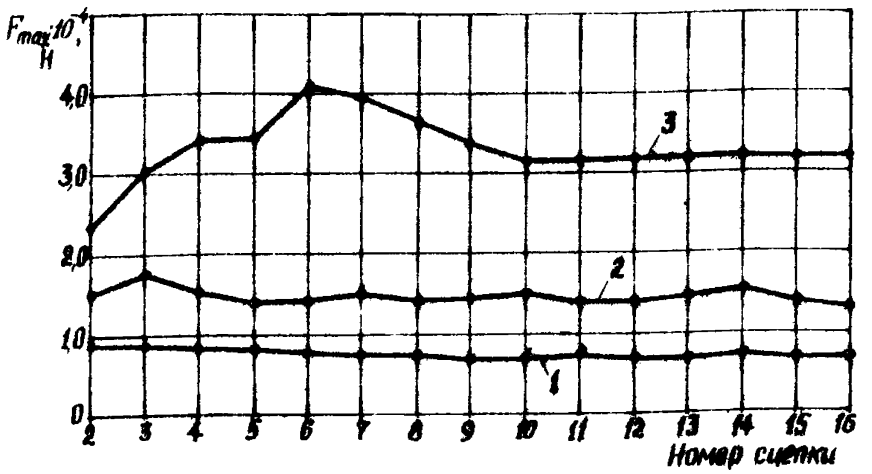


Рис.5.I. Максимальные динамические усилия в сцепных устройствах при трогании порожнего поезда на уклон 0,005 при различных значениях жесткости амортизаторов, Н/м·10^{-6}: кривая I - 0,5; 2 - I,5; 3 - 3,0.

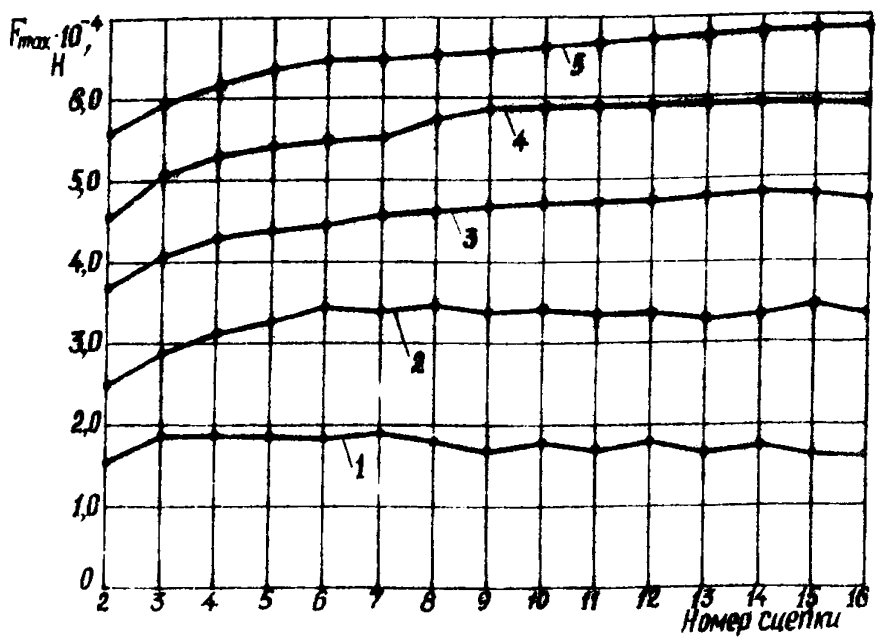


Рис 5.2. Максимальные динамические усилия в сцепных устройствах при трогании порожнего поезда на уклон 0,005 и различных величинах тягового усилия станции, кН: кривая I - I0; 2 - 20; 3 - 30; 4 - 40; 5 - 50.

при увеличении F_0 в 5 раз - в 3,6 раза, т.е. при этом максимальные динамические нагрузки в сцепках превышают значение тягового усилия всего на 38%. При дальнейшем увеличении тягового усилия станции (выше 500000Н) динамические нагрузки в сцепных приборах будут превышать допустимое значение (700000 Н), однако приводные станции с такими тяговыми усилиями нецелесообразны из-за больших размеров.

Характер изменения усилий в сцепных устройствах с жесткостью связи $c=1{,}75\cdot10^6$ Н/м при трогании порожнего состава на уклон 0,005 приводной станцией с тяговым усилием 10^4 Н представлен на рис. 5.3. После включения приводной станции вначале движется 1-я вагонетка, выбирается зазор в автосцепке между 1-й и 2-й вагонетками, затем усилие в этой автосцепке растет до $1{,}5\cdot10^4$ Н, при этом начинает двигаться 2-я вагонетка, ее скорость выше, чем скорость 1-й вагонетки, так как к 1-й вагонетке приложено тяговое усилие 10^4 Н, а ко второй - большее. В результате выбирается зазор между 2-й и 3-й вагонетками, усилие в этой автосцепке начинает увеличиваться, а во 2-й - уменьшаться. Начинает двигаться 3-я вагонетка и т.д.

Усилие в каждой автосцепке в начале колеблется около значения, равного тяговому усилию приводной станции, затем колебания затухают. Частота колебаний зависит от величины тягового усилия и жескости амортизаторов, а время затухания - от вязкости связи. При вязкости, равной нулю, колебания усилия во 2-й автосцепке продолжаются до тех пор, пока не тронется последняя вагонетка. При этом волна упругих продольных колебаний отражается от хвоста поезда, частота собственных колебаний и частота вынужденных колебаний накладываются, в результате чего наблюдаются повторные рывки в сцепках. На рис. 5.3 это наблюдается при t =0,7 с.

На модели исследован также другой характерный режим движе-

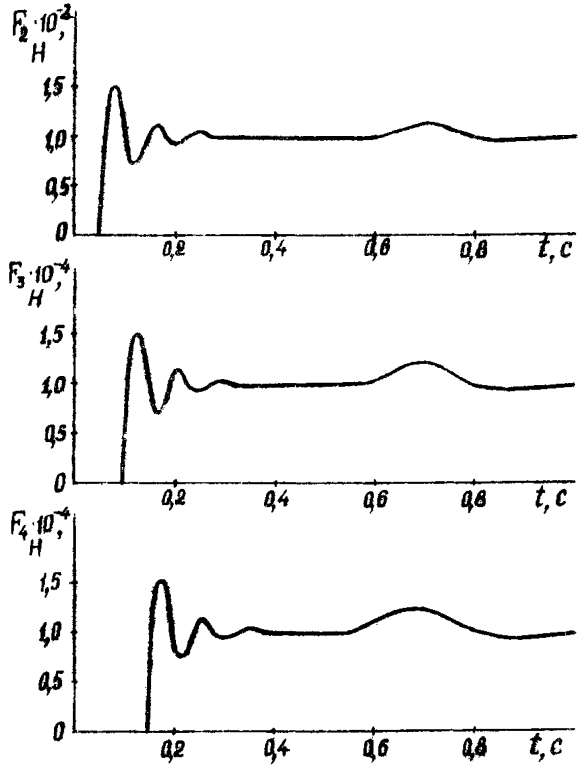


Рис.5.3.Характер изменения усилий во второй, третьей и четвертой сцепках при трогании поезда приводной станцией с тяговым усилием 10 000 Н, $C = 1{,}75 \cdot 10^6$ Н/м; $\alpha = 2 \cdot 10^4$ Н·с/м.

ния поезда - торможение движущегося со скоростью 4 м/с под уклон (-0,005) предварительно растянутого груженого поезда приводной станцией, работающей в режиме противовключения. На рис.5.4 представлен график распределения максимальных динамических нагрузок в сцепных устройствах с жесткостью амортизаторов $c=1,2\cdot10^6$ Н/м при тормозном усилии станции 10^4 Н (кривая I).Наибольшие усилия при этом имеют место во 2-й и 3-й сцепках. На этом же рисунке приведен график распределения максимальных нагрузок при пуске порожнего поезда для одинаковых значений жесткости связи и параметров приводной станции. Сравнение графиков позволяет сделать вывод, что режим торможения груженого состава не накладывает ограничений на применение безлокомотивной откатки.

Одним из режимов работы безлокомотивной откатки, при котором имеют место динамические нагрузки в сцепных устройствах поезда, является режим квазиустановившегося движения, когда поезд входит в активную зону приводной станции с номинальной скоростью. График 3 на рис. 5.4 иллюстрирует распределение максимальных усилий в сцепных устройствах при включении приводной станции с тяговым усилием 10^4 Н на головную вагонетку предварительно сжатого порожнего поезда, движущегося с начальной скоростью 4 м/с, причем в начальный момент все вагонетки движутся с одинаковыми скоростями и начальные усилия в сцепных устройствах равны нулю, начальные ускорения вагонеток также равны нулю. После включения приводной станции первая вагонетка ускоряется, практически мгновенно выбирается зазор в автосцепке и начинает возрастать усилие во 2-й сцепке (рис. 5.5, кривая I). По мере роста этого усилия ускоряется вторая вагонетка, ее скорость становится больше скорости I-й вагонетки, она догоняет последнюю, в результате чего происходит уменьшение усилия во 2-й сцепке. Усилие в 3-й автосцепке (кривая 2)в это время достигает максимального значения, начинает воз

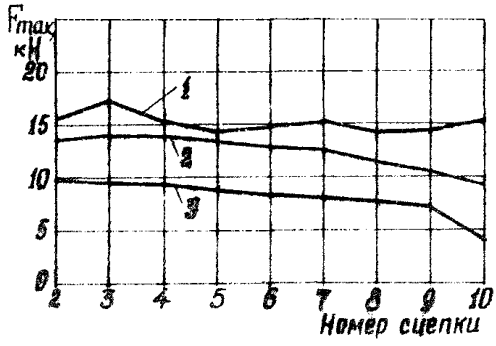


Рис.5.4. Максимальные динамические усилия в сцепных устройствах: кривая I – при трогании порожнего поезда; 2 – при квазиустановившемся режиме движения поезда; 3 – при торможении груженого поезда.

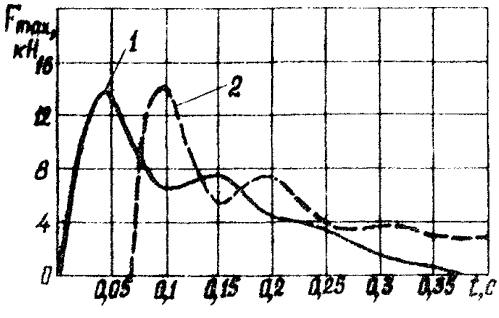


Рис.5.5. Характер изменения усилий во 2-й (кривая I) и 3-й сцепках при квазиустановившемся режиме движения поезда.

растать усилие в 4-й сцепке и т.д. В каждой автосцепке наблюдаются повторные ударные нагрузки, количество ударов зависит от вязкости, при $\alpha = 2 \cdot 10^4$ Н·с/м количество ударов равно 3. Затем усилие во второй автосцепке плавно уменьшается , 2-я вагонетка выходит из активной зоны, а в 3-й автосцепке усилие плавно повышается - вагонетка входит в активную зону.

Анализ результатов исследования квазиустановившегося режима позволяет сделать вывод о том, что продольные динамические нагрузки в сцепных устройствах при тяговом усилии станции 10^5 Н имеют максимальное значение, которое соизмеримо с допустимым усилием в сцепке. Однако, как было указано выше, нецелесообразно принимать тяговое усилие станции выше $5 \cdot 10^4$ Н. При этом значения динамических нагрузок будут меньше, чем в случае, описанном выше. Таким образом, квазиустановившийся режим не накладывает ограничений по условиям максимальных динамических нагрузок.

Исследования режимов трогания груженого состава под уклон 0,005 показали, что в этом режиме максимальные значения усилий в сцепных устройствах практически не отличаются от величины тягового усилия приводной станции. Объясняется это уменьшенным значением ускорения по сравнению с ускорением при трогании порожнего состава из-за того, что масса каждой вагонетки значительно возросла. Таким образом, этот режим не является определяющим при расчете максимальных продольных нагрузок в поезде.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные методические положения позволяют определить для заданных условий транспортирования полезного ископаемого в составах вагонеток или секционных поездах по горизонтальным выработкам с помощью стационарных приводных станций или толкателей шахтных вагонеток мгновенные значения: пути, скорости и ускорения каждой из вагонеток; усилие, возникающее в каждой связи между вагонетками; усилие приводной станции, действующее на каждую из вагонеток; сопротивление движению каждой из вагонеток. На основании анализа математической модели поезда установлено, что при работе безлокомотивной откатки, оборудованной приводными станциями с тяговыми усилиями, величина которых соизмерима с тяговым усилием современных шахтных электровозов, величина и характер динамических нагрузок в сцепных устройствах поезда находятся в пределах допустимого.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными для безлокомотивной откатки с линейными электроприводами показало хорошую сходимость результатов исследования - максимальное отклонение составляет не более 18%. Это подтверждает правильность принятых допущений и приемлемость методических положений для расчета динамических нагрузок и параметров движения поезда, работающего в комплексе безлокомотивной откатки со стационарными приводными станциями.

Разработал методические положения инж. Апухтин А.С.

Л И Т Е Р А Т У Р А

I. Материалы XXУI съезда КПСС. - М.: Политиздат, I98I, 223 с.

2. Шахтный транспорт. Справочник под общ.ред. проф. Штокмана И.Г., М., "Недра", I964, - 427 с.

3. Справочник по шахтному транспорту. Под ред. Г.Я.Пейсаховича, И.П.Ремизова. М., "Недра", I977. - 623 с.

4. Оборудование фирмы ASEA для автоматизации рудничного транспорта. "Экспресс-информация". Серия "Промышленный транспорт", № 9, I968, с. I-8.

5. Конвейерные поезда в горной промышленности (Под ред.акад. Н.С.Полякова)- Киев: Наукова думка, I974, 208 с.

6. Чаповский А.З. Применение линейных асинхронных двигателей на горном транспорте за рубежом. М., ЦНИЭИуголь, I974, 50с.

7. Жуковский Н.Б. Полное собрание сочинений. т.УШ, М,I937.

8. Шахтарь П.С., Степанов Я.Б. Исследование продольной динамики шахтного поезда и определение максимальных нагрузок в буферно-сцепных устройствах локомотивов и вагонеток - В кн.: "Технология добычи угля подземным способом". М., "Недра", I973, с.I87-I97.

9. Поляков Н.С., Новиков Е.Е.Динамика шахтного рельсового транспорта. - "Наукова думка", Киев, -I973 г. 200 с.

I0. Штокман И.Г., Сулима А.А., Апухтин А.С., Максецкий А.И. Применение линейных электроприводов в комплексе безлокомотивной откатки составов вагонеток . - В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Киев, Техника, I98I, вып.58, с. 9-I2.

II. Палант Г.Я., Химченко В.А., Апухтин А.С. и др.Исследование комплекса откатки в шахтных вагонетках с применением линейных электродвигателей. - В кн.: Механизация производственных процессов на угольных шахтах Украины. Донецк, ДонУГИ, I980, с.I42-I48.

Подп. в печ. 8.09.82. БП I6358. Формат 60x84/16. Бум. тип.
Офсетная печать. Усл.печ.л. I,I. Уч.-изд.л. I,2. Тираж 50 экз.
Заказ 433I. Бесплатно.
Донецкий политехнический институт,
340066, Донецк, ул. Артема,58

Межвуз. полиграфпредприятие при ДПИ, 340066, Донецк,
ул. Артема, 96, Ш уч. корп.

gost.e-ecolog.ru