

287

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

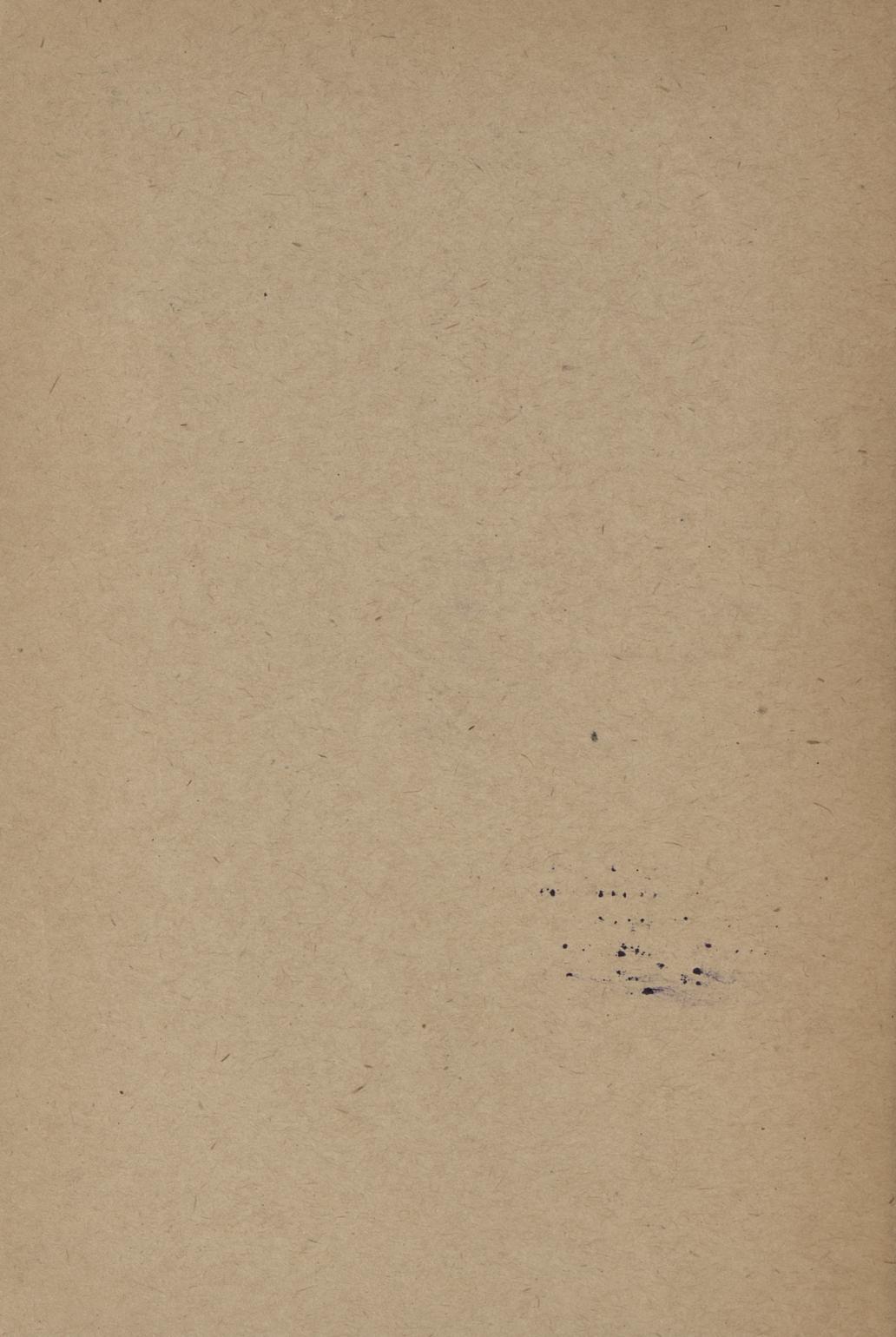
СЕРИЯ А

№ 287

ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ

СБОРНИК СТАТЕЙ

V



Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 287

1970

УДК 622

ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ

СБОРНИК СТАТЕЙ

V

ТАЛЛИН 1970

Ep. 10050

1.0.9

INSTITUT FOR CHEMISTRY
ATMOSPHERIC CHEMISTRY
1970 No 287

ИЗДАНИЕ ПО ТЕМЕ
СЕРИИ СТАТИИ



Ep. 10050

0701 HILJAN

Л. Г. Талве.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВЕДЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Процессы, протекающие в горном массиве в результате ведения эксплуатационных работ, целесообразно исследовать на энергетическом принципе с применением термодинамического метода [1]. По аналогии можно соответственно исследовать явления, связанные с превращением энергии в гравитационном поле на базе классической теории термо- и электродинамики. Горный массив рассматривается закрытой энергетической системой, энергетическое равновесие которой нарушается путем образования полостей в ней. Процесс восстановления нового статического равновесия системы заключается в конвергенции — в сползании массива в направлении ликвидации полостей.

Понятия электродинамики, связанные с энергообменом, как конденсатор, омическая и индуктивная сопротивляемости имеют в стратодинамике при известной аналитической форме новое содержание [2]. Именно конденсатор характеризует упругое и омическое сопротивляемое пластическое поведение горного массива, т.е. относительно медленно протекающие процессы. В то же время явления, связанные с колебательным или бурным движением частиц массива, характеризуются индуктивностью.

Анализ изменения состояния горного массива как энергетической системы удобно осуществить с помощью гидродинамического аналога, обеспечивающего наглядность и взаимную связь между параметрами, определяющими характер протекания процесса.

Горную крепь рассматривают как составляющую системы порода-крепь. Сопротивление данной системы к восстановлению энергетического равновесия складывается из естественного (порода) и искусственного (крепь) составляющих. Горная крепь должна компенсировать недостающую часть сопротивления горных пород, чтобы обеспечить необходимую степень устойчивости системы. Процессы нарушения и восстановления энерге-

тического состояния системы рассматриваются как динамические на основе основного уравнения стратодинамики. Характер поведения упруго-пластической системы оценивается энергетически коэффициентом пластичности.

Используя закономерности термодинамики и электродинамики (токи проводимости и смещения, резонанс и др.) можно на аналоговой вычислительной машине имитировать интересующие нас задачи, описываемые известными уравнениями, но имеющие новое содержание.

1. Упруго-пластическое поведение системы

Поведение системы при ее нагружении характеризуется в общем случае как упругими, так и пластическими признаками. Учет последних оказывается на практике особенно сложным. Вязкие свойства твердого тела при его нагружении определяются по зависимости Ньютона [3]

$$R = \eta' F \frac{v}{\Delta h} \quad \text{или} \quad \tau = \eta' \frac{v}{\Delta h}. \quad (1)$$

Где R — сила сопротивления движению; η' — коэффициент трения между слоями жидкости; F — площадь сечения; v — относительная скорость деформации; Δh — толщина рассматриваемого слоя жидкости.

Верхняя плоскость слоя жидкости перемещается за время dt на величину

$$dc = v dt = \Delta h d(r).$$

откуда

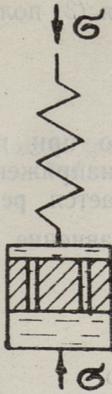
$$\frac{v}{\Delta h} = \frac{dr}{dt} \quad \text{или} \quad \tau = \eta' \frac{dr}{dt}.$$

Нормальное напряжение определяется по аналогичной формуле

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

где η — коэффициент линейной вязкости; ε — относительная деформация.

При исследовании поведения упругопластических систем используют соответствующие механические аналоги или модели. Первая модель такого рода была предложена Максвеллом (фиг. 1). Благодаря последовательному соединению элементов упругости и пластичности можно изучать поведение системы при одинаковом напряжении и разных упругой и пластической деформациях.



Фиг. 1. Модель среды Максвелла

Скорость упругой деформации равняется

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

и скорость пластической деформации

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$$

Уравнение изменения деформации во времени имеет общий вид

$$\eta = \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \left(\frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \right) = \sigma + \frac{\eta}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (3)$$

При постоянном напряжении $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} = \text{const}$$

следовательно, при постоянной скорости деформации возможно течение системы с постоянным напряжением и пластичностью подобно вязкой жидкости.

Изменение деформации во времени равно

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0 t}{\eta} + C$$

При $t=0$ постоянная $C = \varepsilon_0$, а

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0 t}{\eta}$$

При постоянной деформации из уравнения (3) получим

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t - t_0 \epsilon}{\tau}}. \quad (4)$$

Из полученного уравнения следует, что при постоянной деформации в упруго-пластической системе напряжение уменьшается во времени. Такое явление называется **релаксацией**.

Обозначая период релаксации $\tau = \frac{\eta}{E}$, уравнение (4) принимает при $t_0 = 0$ вид

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

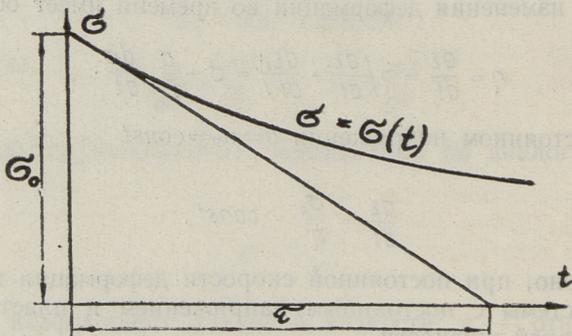
Изменение напряжения во времени равно

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

откуда при $t=0$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma_0}{\tau}.$$

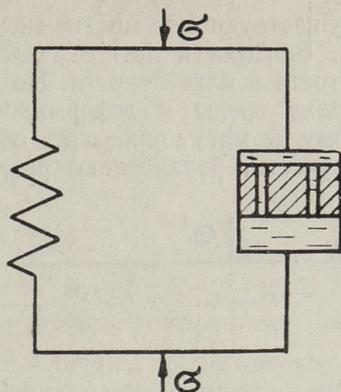
Графически период релаксации выражается отрезком оси времени τ , отсекаемый касательной к кривой $\sigma = \sigma(t)$ в точке $t=0$, где $\sigma = \sigma_0$ (фиг. 2).



Фиг. 2. Графическое определение периода релаксации

По модели среды Максвелла рост деформации при постоянном напряжении протекает линейно, релаксация напряжений при постоянной деформации — по экспоненциальному закону. Эта схема только качественно отражает свойства реальных тел, а количественные результаты плохо согласуются с экспериментальными.

Фиг. 3. Модель среды Кельвина-Фойгта



При параллельном соединении элементов упругости и пластичности получим модель среды Кельвина-Фойгта (фиг. 3), по которой уравнение напряженного состояния имеет вид

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (6)$$

где E — модуль упругости или постоянная пружины.

Рассматриваемая модель не позволяет исследовать изменение напряжения в системе во времени при постоянной деформации, потому что при $\varepsilon = \text{const}$ напряжение $\sigma = E\varepsilon$, т.е. пластичность системы теряет свое значение.

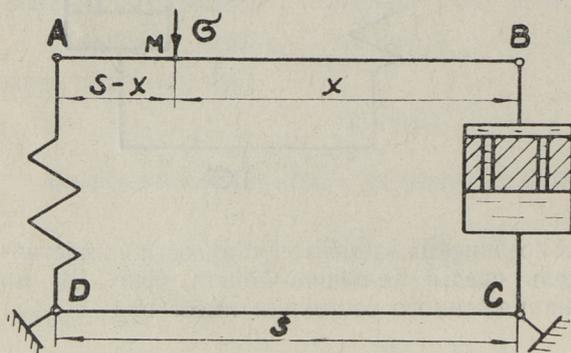
По уравнению состояния среды Кельвина-Фойгта можно объяснить поведение системы при исследовании изменения ее напряжения. При $\sigma = 0$ $\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = -\frac{Et}{\eta}$ и получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{Et}{\eta}}. \quad (7)$$

Это уравнение описывает упругое последствие, т.е. уменьшение деформации во времени после разгрузки системы. При постоянной деформации $\varepsilon = \text{const}$ напряжение $\sigma = E\varepsilon = \text{const}$. Поскольку постоянной деформации соответствует постоянное напряжение, то пластичность системы опять теряет свое значение.

Таким образом модель среды Кельвина-Фойгта также не объясняет изменение напряжения в системе при $\varepsilon = \text{const}$, хотя в этом случае происходит перераспределение напряжений. Кроме того, при $\sigma = \text{const}$ и значительном времени нагружения возможно течение системы.

Существуют еще многие модели (Пойнтинга-Томсона, Сен-Венана, Бингама и др.) с различными комбинациями элементов упругости и пластичности. Но все эти модели принимают сопротивление среды к деформированию величиной постоянной и поэтому не могут описывать объективно пластическое поведение (ползучесть, релаксацию) реальных систем.



Фиг. 4.
Модель среды
В. В. Царицына

Интересной является модель, предложенная В. В. Царицыным [1964]. Последняя представляет собой усовершенствованную модель Кельвина-Фойгта (фиг. 4). Все звенья четырехзвенника ABCD с элементами упругости и пластичности соединены между собой шарнирами.

Главным преимуществом этой модели следует считать возможность изменения мгновенного значения сопротивления системы к деформированию путем изменения взаимного отношения элементов упругости и пластичности в диапазоне — от полного упругого до полного пластического поведения системы. Это преимущество реализуется возможностью перемещения точки приложения вектора σ напряжения по всей длине звена AB. Если вектор напряжения находится в точке A, т.е. над элементом упругости, то система ведет себя упругой и в точке B — над элементом пластичности, система ведет себя соответственно пластически. При расположении вектора напряжения в точке M мгновенное значение упругости и пластичности будет зависеть от соотношения плеч AM и MB.

Общее напряжение выразится формулой

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_p, \quad (8)$$

где σ_e — напряжение упругости, σ_p — напряжение пластичности.

Пользуясь обозначениями из фиг. 4, получим

$$\sigma_p = \sigma \frac{x}{s} \quad \text{и} \quad \sigma_\varepsilon = \sigma \frac{s-x}{s}.$$

Заменяя в уравнении (8)

$$\sigma_p = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt},$$

оно принимает вид

$$\sigma = \sigma \frac{s-x}{s} + \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}.$$

Обозначаем $\frac{s-x}{s} = \Theta$ — структурный коэффициент, характеризующий мгновенное значение величины сопротивления системы. Тогда напряжение пластичности можно определить как

$$\sigma_p = \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt} - \sigma(1-\Theta). \quad (9)$$

При нагружении твердого тела его поверхность может перемещаться параллельно себе, но, несмотря на это напряжения в различных точках этой поверхности и в целом по образцу не постоянны. Принимаем линейное изменение условной деформации по поверхности и находим ее среднее значение

$$|\varepsilon| = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}.$$

где ε_1 — условная деформация края образца,

ε_2 — условная деформация центральной части, которая равняется

$$\varepsilon_2 = 2\varepsilon - \varepsilon_1 = 2\varepsilon - \frac{1}{E} \sigma_1.$$

Заменяя $\sigma_\varepsilon = \sigma\Theta$, получим

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\Theta}{E} \frac{d\sigma}{dt}$$

и по уравнению (9)

$$\frac{\sigma(1-\Theta)}{\eta} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\Theta}{E} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (10)$$

Полученная зависимость является основным уравнением модели среды В. Царицына. Структурный коэффициент изменяется от нуля при полной пластичности до единицы при полной упругости.

По уравнению (10) можно объяснить явление релаксации, а также упругое последствие в реальных телах.

При $\varepsilon = \text{const}$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\eta}(\frac{t}{\theta} - 1)} = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}(\frac{t}{\theta} - 1)}. \quad (11)$$

При упругом поведении $\Theta = 1$ и $\sigma = \sigma_0$, следовательно, система не проявляет релаксации.

При наличии только пластичности ($\Theta = 0$) система разгружается и напряжение стремится к нулю.

Уруго-пластическое поведение системы можно исследовать по уравнению (10), согласно которого

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\sigma t}{2\eta} (1 - \Theta). \quad (12)$$

По последнему уравнению приращение деформации при уруго-пластическом поведении системы зависит от времени t и структурного коэффициента Θ . При чисто упругом поведении ($\Theta = 1$) приращение деформации во времени в напряженной системе невозможно. Оно возможно только при определенной степени пластичности.

Какую роль имеет скорость нагружения при изменении состояния системы?

В процессе нагружения пластичность системы меняется и соответственно должен изменяться коэффициент вязкости. Это наглядно вытекает из основного уравнения (10), которое при замене

$$\eta = E\tau, \text{ где } \tau = (1 - \Theta)t \quad (13)$$

и после некоторых преобразований принимает вид

$$\sigma = \frac{2E\varepsilon}{1 + \Theta}. \quad (14)$$

При упругом поведении системы $\Theta = 1$ и $\sigma = E\varepsilon$. При пластическом поведении $\Theta = 0$ и $\sigma = 2E\varepsilon$, т.е. получаем удвоенную величину σ при той же величине деформации. Но величина E тоже изменяется в зависимости от коэффициента Θ . В. В. Царицын отмечает, что модуль упругости увеличивается по мере роста напряжения и деформации до перехода тела в пластическое состояние и рекомендует пользоваться техническим модулем упругости

$$E_0 = \frac{2E}{1 + \Theta}. \quad (15)$$

При уруго-пластическом изменении состояния системы имеет важное значение скорость ее нагружения. Если период релаксации в течение всего процесса сжатия меньше времени деформирования — $\tau < t$, то система успевает распределять напряжение по своей массе и, рассуждая по уравнению (13), коэффициент Θ остается на протяжении всего времени деформирования положительным.

По упомянутому уравнению коэффициент Θ получит отрицательное значение при $t < \tau$, чему соответствует ударный режим нагружения системы. При $t < \tau$ уравнение (15) принимает вид

$$\sigma = \frac{2E}{1-\Theta}, \quad (16)$$

а модуль упругости

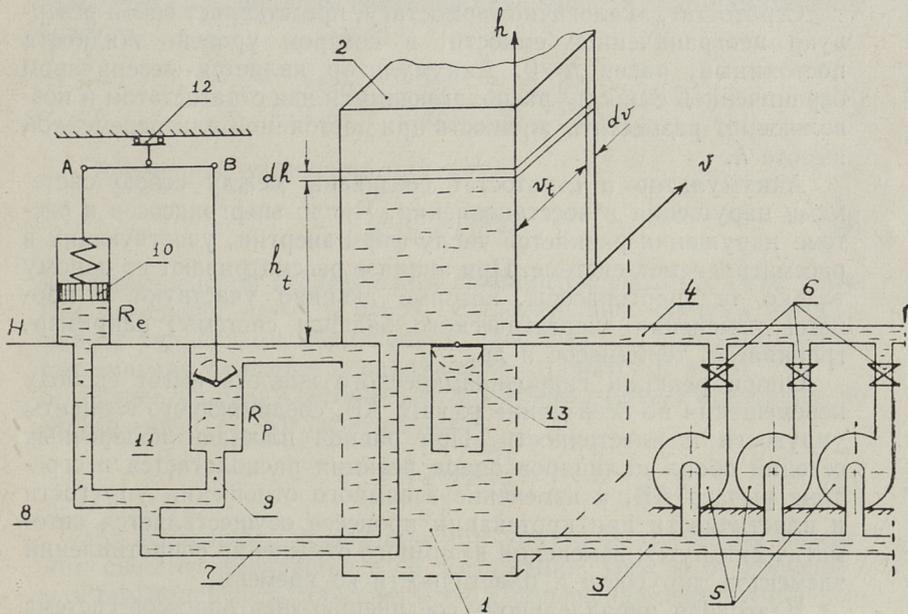
$$E_0 = \frac{2E}{1-\Theta}$$

увеличивается.

О. Грегер указывает, что временное сопротивление горных пород одноосному сжатию существенно зависит от скорости нагружения — с увеличением скорости сопротивление сжатию возрастает.

В. Д. Кузнецов отмечает, что при разрушении твердых тел меньшей, но более продолжительной силой, можно вызвать большую остаточную деформацию, чем значительной, но кратковременной силой.

При ударной нагрузке ($\tau > t$) разрушается часть образца, а при статической ($\tau \leq t$) — разрушается весь образец. При увеличении скорости нагружения повышается сопротивление системы разрушению или, выражаясь иначе, сопротивление системы уменьшается по мере увеличения продолжительности действия внешней нагрузки.



Фиг. 5. Гидродинамический аналог энергетической системы

2. Гидродинамический аналог энергетической системы

Выше было отмечено, что из известных моделей среды следует предпочитать модель В. Царицына, преимуществом которой является наибольшая реальность описывания упруго-пластического поведения системы. Это достигнуто реализацией способности системы изменить мгновенное значение взаимного отношения упругости и пластичности.

В целях более глубокого и наглядного исследования процесса изменения состояния энергетической системы предлагаем гидродинамический аналог (фиг. 5). Последний имеет в качестве системы отсчета уровень гравитационной энергии — плоскость $h=0$. Основными узлами аналога являются стратостат 1, аккумулятор 2, системы нарушения и восстановления энергетического равновесия.

Система нарушения состоит из нижнего 3 и верхнего 4 коллекторов, энергонасосов 5 и сопротивлений 6 в нагнетательном трубопроводе. Система восстановления состоит из узлов естественного и искусственного восстановления. Узел естественного восстановления состоит из магистрального 7 и разветвляющих 8, 9 трубопроводов, элементов естественного восстановления — упругого 10, пластического 11 и узла реакции 12. Узел искусственного восстановления состоит из элементов сопротивления 13.

Стратостат, аналогично термостату, представляет собой резервуар неограниченной емкости, в котором уровень жидкости постоянный, равен $h=0$. Аккумулятор является резервуаром ограниченной емкости, располагающимся над стратостатом и позволяющим разместить жидкость при постоянной или переменной высоте h .

Аккумулятор и стратостат соединены между собою системами нарушения и восстановления. Число энергонасосов в системе нарушения равняется числу форм энергии, участвующих в рассматриваемой системе. При анализе рассматривают по одному только те энергонасосы, которые активно участвуют в процессе изменения энергетического баланса системы, например, гравинасос, термонасос и др.

Опора реакции гидродинамического аналога имеет свободу перемещения по всей длине рычага АВ, соединяющего элементы упругости и пластичности. При равной площади поперечных сечений обоих цилиндров опора реакции располагается в середине рычага АВ, а изменение взаимного отношения упругости и пластичности при протекании процесса осуществляется автоматически путем изменения взаимного отношения сопротивлений элементов упругости и пластичности во времени.

Благодаря параллельному соединению энергонасосов система нарушения позволяет кроме различных видов представления

энергии изучать также взаимную связь между смежными энергетическими процессами, как природными, так и искусственными — горное давление, горный удар, взрывные работы, бурение, разрушение и др. Это обстоятельство является необходимой предпосылкой обобщения явлений и процессов, связанных с изменением энергетического состояния исследуемой системы.

При описании поведения системы по гидродинамическому аналогу принимаем за основу модель среды В. В. Царицына с некоторыми изменениями. Мгновенное значение взаимного отношения упругости и пластичности В. В. Царицын учитывает структурным коэффициентом Θ , который в сущности является коэффициентом упругости. При $\Theta=1$ имеется тело с упругим и при $\Theta=0$ пластическим поведением.

При гидродинамическом аналоге используем коэффициент пластичности κ_p , являющийся энергетическим параметром $\kappa_p + \Theta = 1$, откуда $\kappa_p = 1 - \Theta$.

Коэффициент пластичности является отношением энергии $d\omega_p$ пластического восстановления к энергии $d\omega'$ восстановления

$$\kappa_p = \frac{d\omega_p}{d\omega'}. \quad (17)$$

Коэффициент κ_p изменяется от нуля — при полной упругости до единицы — при полной пластичности.

Заменяя в основном уравнении (10) модели среды В. В. Царицына $\Theta=1-\kappa_p$ получим основное уравнение гидродинамического аналога

$$\frac{\kappa_p \sigma}{\eta} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{1-\kappa_p}{E} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (18)$$

Полученное уравнение при $\varepsilon=0$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau} \left(\frac{\kappa_p}{1-\kappa_p} \right)} \quad (19)$$

является основой исследования явлений релаксации. При упругом поведении $\kappa_p=0$ и $\sigma=\sigma_0$, следовательно, система не проявляет релаксации. При полном пластическом поведении $\kappa_p=1$, система разгружается и напряжение стремится к нулю.

Общее упруго-пластическое поведение системы исследуют по уравнению (18), согласно которого

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \kappa_p \frac{\sigma t}{2\eta}. \quad (20)$$

По последнему уравнению при упруго-пластическом поведении системы прекращение ее деформации зависит от времени t и коэффициента κ_p пластичности. Приращение деформации возможно при определенной степени пластичности ($\kappa_p > 0$).

Модуль упругости выражаем уравнением

$$E_0 = \frac{2E}{2 - k_p} = \frac{E}{1 - 0,5k_p}. \quad (21)$$

По основному уравнению гидродинамического аналога можно сделать вывод, что поведение энергетической системы зависит от мгновенного значения коэффициента пластичности, т.е. от мгновенного отношения упругого и пластического деформирования системы.

Аналог не учитывает абсолютное количество энергии системы, хотя это принципиально возможно путем замены стратостата аккумулятором конечной емкости. В целях упрощения при анализе нарушения энергетического баланса не различают направление движения внешней энергии относительно системы, т.е. отвод или подвод энергии к системе рассматриваются аналогично, отличающимися друг от друга по знаку.

Следим по аналогу процессы нарушения и восстановления энергетического баланса системы при образовании горизонтальной полости площадью F постоянного поперечного сечения при глубине h . Среднюю скорость образования полости обозначаем $\frac{d\delta}{dt}$ и среднее удельное усилие тяжести среды γ . В целях упрощения учитываем только изменение гравитационного состояния системы.

Мощность N_w нарушения гравитационного составляющего энергетического баланса системы можно определить по следующим признакам:

а) по скорости образования полости, т.е. по количеству dV удаляемой в единицу времени dt из системы среды определенной гравитационной энергоемкостью из глубины h

$$N_w = \frac{dw}{dt} = F \frac{d\delta}{dt} \gamma h = \rho \frac{dV}{dt};$$

б) по параметрам работы гравинасоса

$$N_w = Q \gamma h = \frac{dV}{dt} \gamma h = \rho \frac{dV}{dt},$$

где $Q = \frac{dV}{dt}$ — производительность гравинасоса и h — напор;

в) по сопротивлению R_w системы нарушения и гравитационному напряжению U_g

$$N_w = \frac{U_g^2}{R_w} = \frac{(\gamma h)^2 dV}{\gamma h dt} = \frac{\rho^2 dV}{\rho dt} = \rho \frac{dV}{dt},$$

где

$$U_g = \gamma h = \rho \quad \text{и} \quad R_w = \rho \frac{dt}{dV};$$

г) по гравитационному напряжению U_g и току I_w нарушения системы

$$N_w = U_g J_w = \delta h \frac{dV}{dt} = \rho \frac{dV}{dt},$$

где

$$J_w = \frac{U_g}{R_w} = \frac{\rho dV}{\rho dt} = \frac{dV}{dt}.$$

Из изложенного выше следует что при образовании горизонтальной полости мощность нарушения гравитационного равновесия является функцией гравитационного напряжения ρ и скорости $\frac{dV}{dt}$ образования полости при постоянном ее поперечном сечении, т.е.

$$N_w = N_w(\rho, \frac{dV}{dt})$$

Процесс восстановления энергетического равновесия системы состоит из естественных и искусственных составляющих. Естественное восстановление имеет в общем случае упруго-пластический характер. Элемент 10 упругости с сопротивлением R_w' описывает упругое и элемент 11 пластичности с сопротивлением R_w'' соответственно пластическое поведение при восстановлении равновесия.

3. Токи проводимости и смещения при восстановлении энергетического равновесия

Мощность N изменения энергетического равновесия системы является функцией напряжения и тока — $N = N(U_g, I)$, где ток является функцией напряжения и сопротивления — $I = I(U_g, R)$. Последний является функцией напряжения и времени — $R = R(U_g, t)$. Кроме этого сопротивление зависит существенно от способа нагружения и может в определенной среде при протекании какого-либо энергетического процесса колебаться от нуля до бесконечности. На основе изложенного следует, что абсолютное распределение сред на упругие, пластические и упруго-пластические не соответствуют действительному положению. Одна определенная среда может себя вести в зависимости от условий нагружения различно. Поэтому понятия упругое, пластическое и упруго-пластическое не характеризуют систему (тело), а только ее поведение, т.е. изменение энергетического состояния системы.

Взаимное отношение сопротивлений элементов упругости и пластичности диктует общий, т.е. упруго-пластический характер процесса восстановления.

Мощность N_w' естественного восстановления гравитационного равновесия системы равняется сумме упругой $N_{w'e}$ и пластической $N_{w'p}$ составляющих мощности

$$N_w = N_{w'e} + N_{w'p}. \quad (22)$$

Мощность упругого восстановления равняется

$$N_{w'e} = U_g J_{w'e}, \quad \text{где } J_{w'e} = \frac{U_g}{R_{w'e}} -$$

ток упругого восстановления.

Мощность пластического восстановления

$$N_{w'p} = U_g J_{w'p}, \quad \text{где } J_{w'p} = \frac{U_g}{R_{w'p}} -$$

ток пластического восстановления.

По уравнению (22) мощность N_w' естественного восстановления равняется

$$N_w' = U_g J_{w'e} + U_g J_{w'p} = \frac{U_g^2}{R_{w'e}} + \frac{U_g^2}{R_{w'p}}, \quad (23)$$

откуда ток I_w' упруго-пластического восстановления выражается

$$I_w' = I_{w'e} + I_{w'p}$$

с соответственно сопротивлением R_w' упруго-пластическому восстановлению энергетического равновесия системы

$$\frac{1}{R_w'} = \frac{1}{R_{w'e}} + \frac{1}{R_{w'p}}.$$

Мощность N_u изменения внутренней гравитационной энергии определяется (при $N_w' = 0$)

$$N_u = \frac{du}{dt} = v \frac{dp}{dt} + p \frac{dv}{dt}$$

Изменение мощности N_u наглядно демонстрируется на гидродинамическом аналоге путем изменения объема среды и ее уровня h в аккумуляторе.

Полная мощность N_w нарушения энергетического равновесия системы является суммой мощностей N_u изменения внутренней энергии системы и мощностей N_w' восстановления

$$N_w = N_u + N_w'.$$

Необходимо отметить аналогию между электрическим и гравитационным процессами восстановления энергетического равновесия системы. Электропроводность и гравитационное восстановление направлены на выравнивание энергетических потенциалов.

Мощность восстановления гравитационного равновесия

$$N_{w'} = \frac{dw'}{dt}. \quad (24)$$

По аналогии с известными уравнениями мощности из электродинамики

$$N_{w'} = U_g J_{w'}. \quad (25)$$

Приравнявая уравнения (24) и (25), получим

$$\frac{dw'}{dt} = U_g I_{w'}, \quad (26)$$

Подставляя $dw' = pdv$, получим после преобразования выражение для тока $I_{w'}$ пластического восстановления

$$J_{w'} = \frac{dw'}{U_g dt} = \frac{pdv}{pdv} = \frac{dv}{dt}. \quad (27)$$

По уравнению (27) ток гравитационного восстановления представляет собой количество массива, протекающего в единицу времени под действием гравитационного напряжения в полость через ее начальную контурную поверхность с целью восстановления гидростатического равновесия. Уравнение (27) можно преобразовать в форму

$$J_{w'} = \frac{dw'}{U_g dt} = \frac{pdv}{U_g dt} = \frac{U_g}{R}, \quad (28)$$

где

$$R = \rho \frac{dt}{dv}, \quad \frac{\text{нсек}}{\text{м}^3} \quad (29)$$

— сопротивление стратодинамической системы к восстановлению энергетического равновесия.

Уравнение (28), устанавливающее зависимость между током энергии — $I_{w'}$ напряжением системы $U_g = p$ и ее сопротивлением R можно представить в форме

$$J_{w'} = \frac{dv}{dt} = \frac{p}{R}. \quad (30)$$

Полученное уравнение является законом Ома в гравитинамике, выведенном в частности применительно к изменению гравитационной энергии системы: система восстанавливает равновесие гравитационной энергии прямо пропорционально гравитационному напряжению и обратно пропорционально ее энергетическому сопротивлению. Последнее изменяется во времени и по мере изменения характера напряженного состояния системы

$$R = R(p, v, t).$$

Полная плотность δ тока определяется по уравнению [4]

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (31)$$

где δ_1 — плотность тока проводимости; δ_2 — плотность тока смещения; σ — удельная проводимость; E — напряженность; ε — абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Это уравнение в интегральной форме имеет вид [5]

$$J = J_1 + J_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad (32)$$

где I — полный ток, I_1 — ток проводимости; I_2 — ток смещения; U — напряжение; R_1 — сопротивление проводимости; R_2 — сопротивление смещения.

По электропроводности все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. При проводниках $R_2 \approx \infty$ и ток системы равняется току проводимости $I \approx I_1$. При диэлектриках $R_1 \approx \infty$ и полный ток равняется току смещения $I \approx I_2$ при полупроводниках $R_1 \neq 0$ и $R_2 \neq 0$; следовательно, при них полный ток равняется

$$I = I_1 + I_2$$

Ток гравитационного восстановления по уравнению (23) имеет вид

$$J_w - J_{w'e} + J_{w'p} = \frac{U_g}{R_{w'p}} + \frac{U_g}{R_{w'e}} \quad (33)$$

По уравнениям (32) и (33) видна полная аналогия между уравнениями полного тока, токов проводимости и смещения, с одной стороны, и токов восстановления, пластичности и упругости, с другой стороны. Можно также указать на аналогичное поведение полупроводников, проводников и диэлектриков, с одной стороны, и упруго-пластического, пластического и упругого поведения сплошной среды, с другой стороны.

В. В. Ржевский (1964) отмечает, что изучение горных пород нельзя вести изолированно. Все свойства пород взаимосвязаны,

изменение одного из них неизбежно приводит к изменению других.

Л. И. Седов указывает, что «эффективность учета динамических, тепловых и других физических эффектов и их взаимодействия характерная особенность современных задач».

А. А. Воробьев пишет по исследованиям в области твердых диэлектриков: «При современных сложных условиях использования диэлектриков практический интерес представляет то, как происходит одновременно изменение свойств диэлектрика, если изменяются условия, в которых он находится». В то же время «современная теория твердого тела не устанавливает взаимной связи между различными свойствами твердых диэлектриков и не позволяет предвычислять важнейшие их характеристики».

Дальше отмечает В. В. Ржевский: «Наиболее четко взаимосвязь между свойствами выявляется у однородных диэлектриков и одиночных кристаллов. Так, между тепловым, механическим и электрическим разрушением ионных кристаллов существует взаимосвязь: наиболее механически прочный диэлектрик обладает наибольшей электрической прочностью и более высокой температурой плавления».

Мощность $N_{w'k}$ искусственного восстановления гравитационного равновесия системы равняется

$$N_{w'k} = \frac{dw'_k}{dt} = \rho \frac{dv}{dt} = \gamma h \frac{dv}{dt}, \quad (34)$$

т.е. для восстановления энергетического равновесия необходимо созданную полость заполнить средой с удельным гравитационным усилием γ , опущенной на глубину h . Таким процессом на практике является закладка.

Восстанавливать равновесие можно также по уравнению

$$N_{w'k} = \frac{U_g}{R_{w'k}} \quad (35)$$

В этом случае, требуется уменьшить сопротивление $R_{w'k}$ к восстановлению. Осуществление такого метода восстановления на практике называется обрушением толщи покрывающих пород.

Восстановление равновесия по уравнению.

$$N_{w'k} = U_g J_{w'k}, \quad \text{где } J_{w'k} = \frac{U_g}{R_{w'k}} \quad (36)$$

заключается в уменьшении тока восстановления путем искусственного увеличения сопротивления системы. На практике это осуществляется путем выкладки бутовых полос.

Полная мощность восстановления является суммой естественного $N_{w'1}$ и искусственного $N_{w'к}$, составляющих

$$N_{w'} = N_{w'l} + N_{w'к}. \quad (37)$$

Характер изменения энергетического состояния рассматриваемой системы зависит от мощностей N изменения энергетического равновесия системы, т.е. от взаимного отношения мощностей нарушения и восстановления

$$N = N_w - N_{w'} = N_w - (N_{w'l} + N_{w'к})$$

или
$$du = N_{wt} - N_{w't} = dw - dw'$$

Предпосылкой создания устойчивого состояния системы является требование, чтобы разность энергии dw нарушения и восстановления dw' стремилась к минимуму. Это условно можно выполнить, если энергетическое равновесие системы восстанавливают по мере нарушения его. Этот принцип в горном производстве в основном соблюдают (лавная выемка и др.). Исключением является, например, технология добычи при камерной системе разработки, при которой роль энергии восстановления является ничтожной — $dw' \approx 0$. Следовательно, по мере отработки шахтного поля энергетический баланс системы все больше отклоняется от равновесного состояния по мере накопления энергии нарушения

$$du \approx dw.$$

Такая технология на практике часто сопровождается серьезными последствиями [6].

4. Гравитационный резонанс

В электродинамике, как и в других различных областях превращения энергии, явление резонанса нашло самые широкие технические применения. Для данной цели электрическая цепь собирается из трех пассивных элементов — емкости C , сопротивления R и индуктивности L .

Разность U потенциалов между концами емкости пропорциональна заряду q

$$U = \frac{q}{C}. \quad (38)$$

Электрический ток в проводнике $I = dq/dt$ будет пропорционален приложенной разности потенциалов

$$U = RI = Rdq/dt.$$

Изменение магнитного поля порождает на концах соленоида

разность потенциалов, пропорциональную dI/dt . Магнитное поле пропорционально току, а наведенная разность потенциалов пропорциональна скорости изменения тока в цепи индуктивности

$$U = L \frac{dJ}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2}. \quad (39)$$

Собирая цепь из трех последовательно соединенных элементов, разность потенциалов заставляет заряд двигаться по цепи. На концах каждого элемента цепи возникает разность потенциалов — на концах индуктивности $U_L = L(d^2q/dt^2)$, на сопротивлении $U_R = R(dq/dt)$, а на емкости $U_C = q/c$. Сумма этих напряжений дает полное напряжение [7]:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U(t).$$

Между прочем, уравнение в точности совпадает с уравнением механического резонанса

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = P,$$

где m — масса; x — положение; c — коэффициент трения; k — жесткость; P — внешняя сила.

На основе аналогии напомним уравнение резонанса для гравитодинамики

$$L_g \frac{d^2v}{dt^2} + R \frac{dv}{dt} + \frac{v}{C_g} = p(t), \quad (40)$$

где L_g — коэффициент гравитационной индукции; C_g — емкость гравитационной системы.

Подставляя в уравнение (39) $\frac{dq}{dt} = \frac{dv}{dt}$, $U = p$ и $L = L_d$, получим

$$p_L = L_g \frac{dJ}{dt} = L_g \frac{d^2v}{dt^2}. \quad (41)$$

Выражая через массу и ускорение, получим

$$p = ma = m \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

или на единицу площади

$$p = m \frac{d^2v}{dt^2}. \quad (42)$$

Аналогия между механическими, электрическими и гравитационными величинами

Общие характеристики	Величины		
	Механические	Электрические	Гравитационные
Независимая переменная	Время (t)	Время (t)	Время (t)
Зависимая переменная	Положение (δ)	Заряд (q)	Удельный объем (v)
Инерция	Масса (m)	Индуктивность (L)	Гравитационная индуктивность (L_g)
Сопротивление	Коэффициент трения ($c = \gamma m$)	Сопротивление ($R = \gamma L$)	Сопротивление ($R_g = \gamma L_g$)
Жесткость	Жесткость (κ)	(Емкость) $^{-1}$ ($1/C$)	(Грав. емкость) $^{-1}$ ($1/C^g$)
Резонансная частота	$\omega_0^2 = \kappa/m$	$\omega_0 = 1/LC$	$\omega_0^g = 1/L_g C_g$
Период	$t_0 = 2\pi\sqrt{m/\kappa}$	$t_0 = 2\pi\sqrt{LC}$	$t_0 = 2\pi\sqrt{L_g C_g}$
Добротность	$Q = \omega_0/\gamma$	$Q = \omega_0 L/R$	$Q = \omega_0 L_g/R_g$
Напряжение	$\sigma = P/F$	$U = IR$	$p = IR_g$
Работа	$W = \int_0^{\delta} P d\delta$	$W = \int_0^q U dq$	$W = \int_0^v p dv$

Приравнивая уравнения (41) и (42), получим

$$L_g = m,$$

т.е. в качестве коэффициента L_g гравитационной индуктивности рассматривается масса. Следовательно явления, связанные сравнительно быстрыми перемещениями горного массива, можно исследовать аналогично явлениям индуктивности в электродинамике.

Явление индуктивности встречается только при наличии переменного по величине тока. Подводимая энергия поглотится в системе из-за сопротивления, описываемого членом $L_g \frac{d^2 v}{dt^2}$. Поэтому в системах со значительным сопротивлением, например, в горном массиве потребная возбуждающая энергия для осуществления резонанса возрастает по мере увеличения сопротивления системы. Чем больше сопротивление системы, тем ниже пик кривой резонанса. Если сопротивление очень велико или энергия возбуждения ограничена, система вообще не осциллирует.

Подставляя в уравнение (38) $q = v$ и $C = C_g$ получим уравнение для гравитационной емкости

$$p = \frac{v}{C_g}. \quad (3)$$

Величина коэффициента $\frac{1}{C}$ характеризует жесткость пружины, имитирующую упругие свойства системы. Изменение объема за счет упругих свойств системы происходит пропорционально гравитационному напряжению p .

В таблице приведен перечень аналогий между механическими, электрическими и гравитационными величинами.

По изложенному выше следует, что предлагаемый гидродинамический аналог энергетической системы позволяет осуществить детальный анализ динамики состояния горного массива по энергетическому принципу на основе общепринятых закономерностей электро-, термо- и гидродинамики. При этом обеспечивается необходимая сопоставимость и наглядность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Талве. Основы стратодинамической теории крепления горных выработок штангами. Добыча и переработка горючих сланцев, вып. 14. «Недра», Л. 1965.
2. Л. Талве. Законы изменения состояния энергетической системы. Труды по горному делу. Сб. статей IV. ТПИ, Таллин 1968.
3. В. Царицын. Технологическое разрушение горных пород. «Техника», Киев 1964.
4. В. Ржевский, Г. Новик. Основы физики горных пород. «Недра», М. 1967.
5. Э. Арш. Применение токов высокой частоты в горном деле. «Недра», М. 1967.
6. Л. Талве. Об управлении потенциальной энергией толщи покрывающих пород при камерной системе разработки. Добыча и переработка горючих сланцев, вып. 17. «Недра», Л. 1968.
7. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэнде. Фейнмановские лекции по физике, том 2. Перевод с английского. «Мир», М. 1965.

L. Talve

About Modelling Behaviour of Strata as Energetic System

Summary

Useful comprehension of the problems of strata control in mining can be derived from studies of energy change of system that are brought about by the act of making underground excavation.

Change in gravitational energy can be studied by the theory and methods of classical thermo- and electrodynamics. Strata is considered as an isolated energetic system, imbalance of which can be resulted from making excavations. Analysis of dynamic strata situation is made by hydrodynamical analogue, which gives functional relations between variables, determining the character of process sequence.

Energetic balance of system is considered dynamically. Mining supports are considered as rock-support system. Resistance of this system can be divided into natural and artificial components.

Behaviour of elastic-plastic system can be estimated energetically by coefficient of placticity.

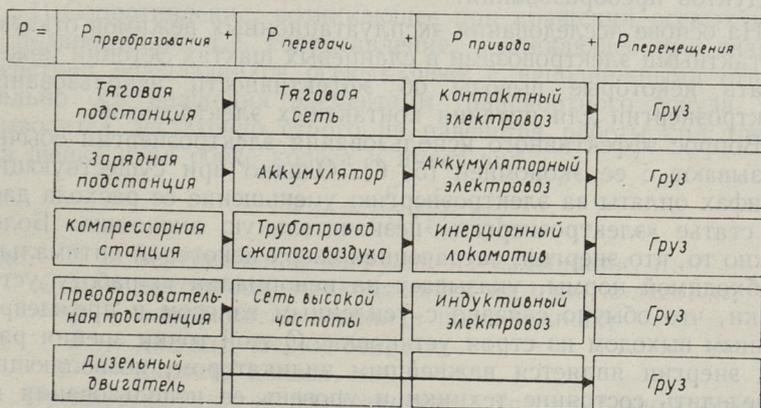
Э. Я. Йоосен

РАСХОД ЭНЕРГИИ КАК КРИТЕРИЙ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

Расход энергии на выполнение какой-либо работы характеризует степень совершенства применяемой техники. При этом под техникой следует понимать как средства, используемые для выполнения данной работы, так и методы овладения этими средствами, умение их правильно использовать.

Здесь рассматривается эффективность использования энергии при транспортировании ископаемого по рельсовым путям. В настоящее время откатка на шахтах СССР в основном осуществляется контактными и аккумуляторными электровозами. Доля инерционных локомотивов незначительная; применение дизельных и индуктивных локомотивов находится в стадии внедрения; перспективными являются локомотивы, снабженные топливными элементами как источниками энергии.

Поток энергии, прилагаемый к грузу с целью его перемещения, проходит обычно ряд последовательно включенных звеньев цепи энергоснабжения (фиг. 1). Каждая из них может быть с энергетической точки зрения более или менее совершенна.



Фиг. 1. Схема прохождения потока энергии через звенья энергоснабжающей цепи

Степень совершенства передачи и преобразования энергии характеризуется энергетическим коэффициентом полезного действия звена. Общим недостатком аккумуляторных, инерционных и индуктивных локомотивов является их низкий к.п.д. преобразования энергии. Это препятствует их более широкому распространению, несмотря на то, что они имеют для шахтных условий выгодные положительные стороны (безопасность, автономность и т.д.).

Дизельный привод является автономным преобразователем, в связи с чем отсутствуют потери передачи и предварительного преобразования энергии. Однако к.п.д. дизельных приводов, находящийся в пределах 25... 30%, также низкий. Кроме того, работа дизельного двигателя связана с выбрасыванием вредных для организма человека и опасных с точки зрения взрыва рудничной атмосферы газов. Поэтому применение дизельного привода в подземных условиях затруднено. Однако вопрос обезвреживания выхлопных газов требует быстрого решения в автомобильной промышленности [1]. Несомненно, работы в этой области ускоряют внедрение дизельного привода в горнотранспортном оборудовании.

Успехи практического применения топливных элементов в качестве источника энергии транспортных механизмов позволяют надеяться, что в недалеком будущем они будут применяться для питания рудничных локомотивов и самоходного оборудования электрической энергией [2, 3, 4]. Непосредственное преобразование химической энергии топлива в электрическую в топливных элементах обеспечит наибольший к.п.д. преобразования при автономном питании привода и отсутствии вредных продуктов преобразования.

На основе исследования эксплуатационных режимов откатки контактными электровозами в сланцевых шахтах Эстонии можно делать некоторые выводы об эффективности использования электроэнергии для питания контактных электровозов.

Вопрос эффективного использования электроэнергии обычно связывают с ее экономией [5, 6]. Однако при существующих тарифах оплаты за электроэнергию уменьшение ее расхода дает по статье «электроэнергия» незначительную экономию. Более важно то, что энергия, затраченная сверх некоторой оптимально необходимой нормы, указывает на ненормальную работу установки, что обычно связано с усиленным износом и преждевременным выходом из строя установки. С этой точки зрения расход энергии является важнейшим индикатором, позволяющим определить состояние техники и уровень ее использования не только при транспортировании грузов, но и при выполнении любой работы.

Энергия, затраченная в транспортных механизмах для перемещения груза, расходуется в основном для преодоления сопротивления движению, величина которого определяется характером взаимодействия подвижного состава и рельсового пути. Увеличенный расход энергии указывает на ненормальное взаимодействие, вызываемое неудовлетворительным состоянием подвижного состава или пути. При этом дополнительный расход энергии затрачивается на разрушение как подвижного состава так и пути.

Энергетический баланс электровозной откатки включает следующие статьи:

- 1) энергия на преодоление сопротивления движению электровоза с составом вагонов — A_p ;
- 2) энергия на покрытие потерь в приводе электровоза — $A_э$;
- 3) энергия на покрытие потерь в тяговой сети — $A_с$;
- 4) энергия на покрытие потерь в тяговой подстанции — $A_п$;
- 5) энергия на маневровые операции; перевозку людей, материалов, оборудования, а также на выполнение работ, не связанных с транспортом (питание сварочных и бурильных агрегатов из тяговой сети и т.п.) — $A_в$.

Итак $A = A_p + A_э + A_с + A_п + A_в$ дж.

Энергия, необходимая для перемещения груза массой m (m) при удельном сопротивлении движению ω ($н/т$) на расстоянии L ($м$) выражается формулой

$$A = m\omega L \text{ дж.}$$

Основное сопротивление движению, возникающее при движении по прямолинейному горизонтальному пути без ускорения, складывается из следующих составляющих.

1) Сопротивление, возникающее при вращении осевых шеек в подшипниках, т.е. сопротивление, возникающее при взаимодействии вращающихся осевых шеек с неподвижными относительно оси вращения элементами транспортного сосуда. Оно выводится достаточно строго из равенства работы сил трения на шейке и на ободе колеса и имеет вид

$$W_{00} = \frac{F}{G/4} \varphi \frac{d}{D} н/т,$$

- где F — вертикальная нагрузка на подшипник, $н$;
 $G/4$ — вес вагона, приходящийся на одно колесо, $т$;
 φ — коэффициент трения в подшипниках;
 d — диаметр шейки оси, $мм$;
 D — диаметр колеса, $мм$.

При нормальных эксплуатационных условиях оно составляет для вагонов УВД — 3,3—3,8 $н/т$. При ненормальной смазке, наличии посторонних тел или грязи в подшипниках и поврежде-

ниях подшипника значение W_{00} может оказаться значительно большим.

2) Сопротивление трения колес по рельсам, возникающее при перекатывании и скольжении колес по рельсам. Движущиеся колеса гонят перед собой упругую волну по головке рельса. За колесами также следует волна, но несколько меньших размеров из-за наличия остаточных деформаций в рельсах. При этом, чем тверже материал контактирующих тел, тем меньше глубина вдавливания и сопутствующая ей величина трения перекатывания, тем меньше упругая деформация контактирующих тел. Под влиянием коничности бандажей, периодического вливания состава в рельсовую колею, неправильной формы бандажей, пластических деформаций материала и т.д. качение сопровождается проскальзыванием колес по рельсу. Разнообразие сочетания этих факторов и обстоятельств в эксплуатации чрезвычайно затрудняет его количественную оценку.

В качестве расчетной величины для шахтных условий следует принимать

$$W_{op} = 10 \dots 13 \text{ н/тк.}$$

3) Сопротивление от рассеяния энергии в пути и в подвижном составе вызывается силами изгиба рельса, относительного перемещения рельсов, подкладок и шпал, ударов на стыках и других неровностях рельсов.

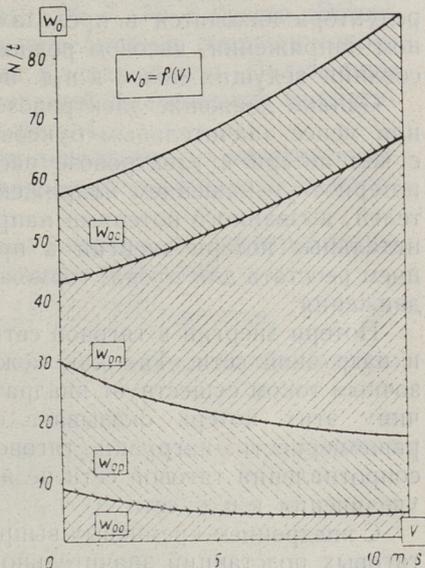
В литературных источниках [7] рекомендуется расчетное значение основного сопротивления движению при откатке по промежуточным штрекам, а также по участковым выработкам, где рельсовые пути находятся в худшем состоянии, чем на капитальных выработках, увеличивать на 50... 60%. Другие авторы указывают, что при плохом состоянии пути (изношенные стыки, неравномерная подбивка шпал, неправильная рихтовка, отступление в ширине колес, грязь, пыль, песок и т.п.) величина основного сопротивления движению может увеличиться в 2... 3 раза [8].

Все это указывает, что состояние рельсового пути имеет большое значение для основного сопротивления, которое в шахтных условиях в основном проявляется в потерях от рассеяния энергии в пути. Очевидно, в этом кроется причина значительно большего удельного сопротивления движению на шахтных путях по сравнению с магистральными железнодорожными (~ в 10 раз) и трамвайными (~ 5 раз) путями.

На фиг. 2 показан баланс основного сопротивления движению состава по шахтным путям.

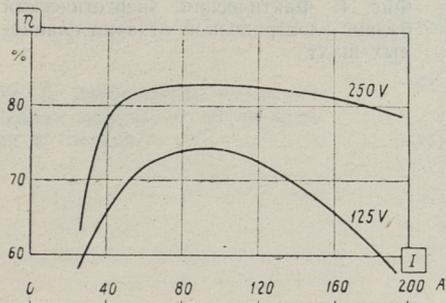
Дополнительное сопротивление не всегда сопровождается движением, оно появляется только при определенных условиях. Его компоненты следующие:

Фиг. 2. Баланс основного сопротивления движению



- 1) сопротивление от подъема;
- 2) сопротивление кривизны пути;
- 3) сопротивление ускорения;
- 4) сопротивление от движущегося воздуха;
- 5) сопротивление в разгрузочных кривых при применении вагонеток с разгрузкой через дно.

Потери в приводе определяются коэффициентами полезного действия тягового двигателя, редуктора и ведущих колес электроваза. К.п.д. двигателя дается на электрохимической характеристике как функция от потребляемого двигателем тока при различных значениях напряжения на зажимах двигателя. На фиг. 3 дана такая зависимость для тягового двигателя ДК-809А



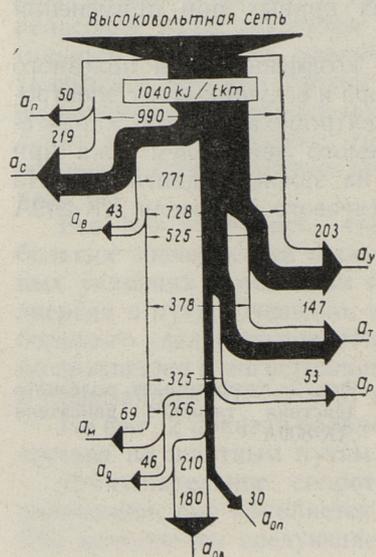
Фиг. 3. Коэффициент полезного действия тягового двигателя ДК-809А

электровоза 14КР-1. Учитывая, что к.п.д. двухступенчатого редуктора находится в пределах 0,90, получим при номинальном напряжении, часовом режиме нагрузки и отсутствии буксования ведущих колес к.п.д. не более 75%.

Однако движение электровозов сопровождается всегда более или менее значительным буксованием ведущих колес, в связи с чем потери в электровозе растут [9]. Также увеличиваются потери с уменьшением напряжения на зажимах тяговых двигателей, вызванного потерями напряжения в тяговой сети. Дополнительные потери энергии в приводе вызываются использованием реостата для пуска, торможения и регулирования скорости движения.

Потери энергии в тяговой сети определяются сопротивлением и нагрузкой сети. Так как между потерями энергии и нагрузочным током существует квадратичная зависимость, то на величину этих потерь оказывает существенное влияние степень равномерности нагрузки тяговой сети. Поэтому уменьшение сопротивления тяговой сети не является единственным способом увеличения к.п.д. сети.

С внедрением кремневых выпрямителей взамен ртутных к.п.д. тяговых подстанций значительно повысился и составляет с учетом к.п.д. питающего силового трансформатора более 95%, что на 7...8% превышает к.п.д. подстанции с ртутными выпрямителями.



Фиг. 4. Фактический энергетический баланс электровозной откатки сланцевых шахт

Автором проведено в течение продолжительного периода (1958... 1967 г.г.) на шахтах №10, № 7, № 8 треста «Эстон-сланец» ряд измерений с целью определения энергетического баланса электровозной откатки на шахтах треста. Полученные данные позволили составить примерный фактический энергетический баланс, изображенный на фиг. 4.

Для определения эффективности использования энергии необходимо рассчитать оптимальный энергетический баланс электровозной откатки сланцевых шахт.

Теоретический удельный расход энергии на электровозную откатку по прямому пути определяется формулой

$$\alpha = \frac{\alpha[(G_{л} + zG_{в})(\omega_{г} + \omega_{х}) + z(\omega_{г} + \omega_{у})]G}{zG\eta_{п}} \text{ Дж/ткм};$$

где $G_{л}$, $G_{в}$, G — соответственно вес локомотива, вагона и груза в вагоне;

z — число вагонов в составе;

$\omega_{г}$, $\omega_{х}$ — удельное сопротивление движению груженого и холостого составов;

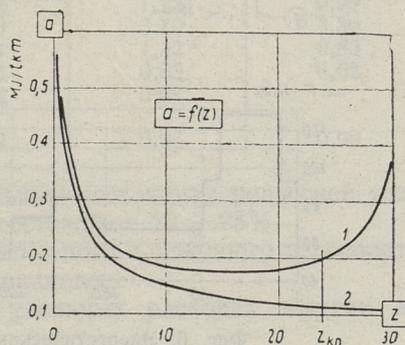
$\omega_{у}$ — удельное сопротивление движению от уклона пути;

$\eta_{п}$ — к.п.д. привода электровоза;

α — коэффициент, учитывающий маневровые работы.

В сланцевых шахтах Эстонии груженные составы движутся, в зависимости от расположения околостольного двора в шахтном поле, как по уклону, так и против уклона. Удельный расход энергии, затраченной в электровозе в зависимости от этого изменяется в пределах 10... 20%.

Сравнивание расчетного удельного расхода энергии на перевозку груза с результатами измерения показывает их существенную разницу; расчетный составляет всего лишь 35... 65% от измеренного. Движение составов связано со значительным бук-



Фиг. 5. Зависимость удельного расхода энергии от числа вагонов в составе

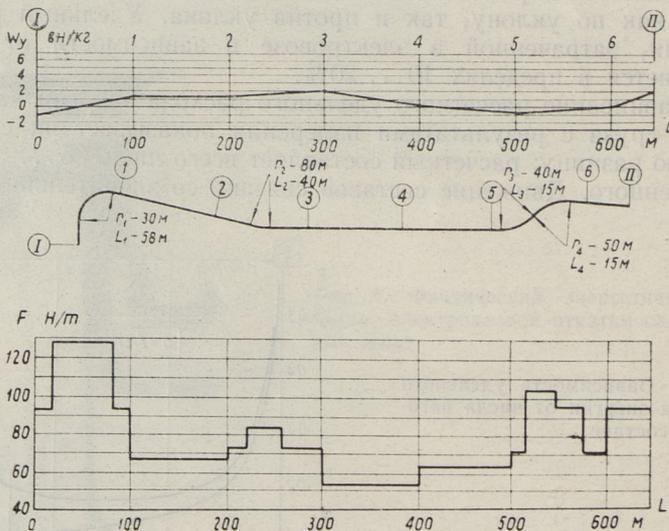
сованием ведущих колес, уменьшающим к.п.д. электровоза. Также израсходуется некоторая часть энергии в реостате, который особенно интенсивно используется при неудовлетворительном состоянии рельсовых путей.

На фиг. 5 дана зависимость $a=f(z)$. Верхняя кривая определяет эту зависимость с учетом пробуксовки ведущих колес электровоза. Как видно, начиная с некоторого значения $z_{кр}$ кривая подымается резко вверх. Критическое число вагонов зависит от состояния пути, с его ухудшением оно принимает меньшее значение.

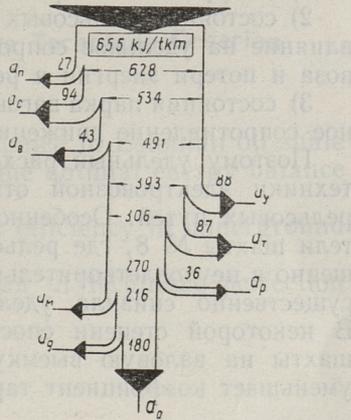
Следовательно, фактическое значение энергетического к.п.д. электровозов в сланцевых шахтах находится в пределах 40... 50%.

Для того, чтобы воспользоваться расходом энергии на перевозку ископаемого как показателем, характеризующим состояние пути, необходимо иметь энергетические характеристики пути (фиг. 6). Фактическая энергетическая характеристика некоторого участка пути может быть получена при перевозке состава с помощью электровоза, снабженного счетчиком электроэнергии. Ее сравнение с расчетной характеристикой (фиг. 7) позволяет определить состояние отрезка пути.

Для учета общего расхода энергии на электровозную откатку с учетом всех маневровых операций, вспомогательного транспорта, посторонних работ, связанных с потреблением энергии



Фиг. 6. Энергетическая характеристика пути



Фиг. 7. Оптимальный энергетический баланс электровозной откатки

из контактной сети и потерь в сети измерялся расход на тяговых подстанциях.

Результаты измерения приведены в таблице.

Таблица 1

Удельный расход энергии на электровозную откатку по шахтам треста «Эстонсланец»

№№ пп	Шахта	Удельный расход энергии Мдж/ткм		
		1965	1966	1967
1	Кява	0,86	0,73	0,78
2	Кохтла	1,40	1,28	1,33
3	Кивиыли	0,99	0,99	1,06
4	№ 2	0,89	1,00	0,78
5	№ 4	0,89	0,91	0,96
6	№ 6	1,09	1,22	0,99
7	№ 7	7,70	3,70	3,30
8	№ 8	1,44	1,32	0,83
9	№ 10	0,56	0,65	0,62
10	Кукрузе	0,62	0,67	—
	Трест «Эстон- сланец»	0,92	0,96	0,90

В связи с неудовлетворительным состоянием рельсовой сети потери электроэнергии в нем составляют 20...25%.

Отношение объемов вспомогательного и основного транспорта на шахтах треста примерно одинаковое.

Следовательно, разность в удельных расходах энергии на откатку зависит от:

- 1) коэффициента тары вагонов;
- 2) состояния рельсовых путей, оказывающего существенное влияние на удельное сопротивление движению, к.п.д. электровоза и потери энергии в рельсовой сети;
- 3) состояния парка вагонов, оказывающего влияние на удельное сопротивление движению.

Поэтому удельный расход энергии характеризует состояние техники электровозной откатки, в первую очередь качество рельсовых путей. Особенно выразительными являются показатели шахты № 8, где рельсовые пути в 1965 году были совершенно в неудовлетворительном состоянии. Реконструкция путей существенно снизила удельный расход энергии на откатку. В некоторой степени способствовало к этому также переход шахты на валовую выемку: транспортирование горной массы уменьшает коэффициент тары.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Костров. Методы борьбы с токсичностью выпускных газов за рубежом. НИИ Автопром, Москва 1968.
2. В. А. Тафт, Ф. Я. Либерман. Прямое преобразование энергии с помощью топливных элементов и перспективы их применения на железнодорожном транспорте. Труды Московского института инженеров железнодорожного транспорта. Выпуск 261. «Транспорт», Москва 1968.
3. Swedish research engineer foresees fuel cell power for mining. «Engineering and mining journal» Nr. 9, 1966.
4. Methanol—Sauerstoff—Zellen. «Deutsches Elektrohandwerk» 2. April—Heft, 1968.
5. Н. М. Алябьев, В. К. Ефремов. Экономия электроэнергии на угольной шахте. Углетехиздат, Москва 1959.
6. Б. Н. Авиллов-Карнаухов. Нормирование электроэнергии для угольных шахт. Углетехиздат, Москва 1958.
7. Н. С. Поляков, И. Г. Штокман. Основы теории и расчеты рудничных транспортных установок. Госгортехиздат, Москва 1962.
8. М. П. Кутыловский, В. С. Сургучев. Электрическая тяга на городском транспорте. Издательство литературы по строительству, Москва 1964.
9. А. А. Ренгевич. Показатели рейсовой работы рудничных контактных электровозов. Сб. «Вопросы рудничного транспорта», вып. 5. Госгортехиздат, Москва 1961.

Energy Consumption as Haulage Technique Criterion

Summary

The actual loco haulage energy balance in Estonian oil shale mines is given; it is compared with the optimal energy balance for this purpose.

Main reasons of low electric power efficiency in underground locomotive haulage are given.

Energy consumption as an indicator of technique perfection criterion is suggested.

Э. Я. Йоосен

СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ СЛАНЦЕВЫХ ШАХТ

Определение значения сопротивления необходимо для расчета электроснабжения тяговой сети и для установления реальной опасности преждевременного взрывания электродетонаторов блуждающими токами. Поэтому в течение всего существования электровозной откатки исследователи занимаются измерениями сопротивления тяговой сети [1, 2, 3, 4].

Тяговая сеть состоит из питающих и отсасывающих фидеров, контактной и рельсовой сетей; для снижения потери напряжения в некоторых случаях применяются усиливающие кабели и дополнительные провода. Все элементы, обладающие определенным электрическим сопротивлением, принимают участие в создании общего падения напряжения в тяговой сети. Длина питающего и отсасывающего кабелей в сланцевых шахтах сравнительно небольшая, поэтому фактическое напряжение тяговой сети в основном зависит от сопротивления контактной и рельсовой сетей.

Поскольку электровзрывание в условиях протекания значительных токов утечки, обусловленных чрезмерно большим сопротивлением тяговой сети, недопустимо, то, в основном, целью измерений было установление зависимости величины блуждающих токов от сопротивления рельсовой сети. При этом всеми исследованиями выявлено неудовлетворительное состояние тяговой сети угольных шахт.

Влияние сопротивления тяговой сети на качество электроснабжения контактных электровозов сравнительно мало изучено. В то же время измерения показали, что потери напряжения в тяговой сети сланцевых шахт достигают 50...60% номинального напряжения. Понижение напряжения контактной сети обуславливает:

1) пропорциональное уменьшение скорости движения электровоза и, следовательно, сокращение производительности электровозного транспорта:

$$v = \frac{U - I_e \Sigma R}{c v \phi},$$

где v — скорость движения электровоза, $м/сек$;
 U — напряжение на зажимах тягового двигателя, $в$;
 I_e — ток электровоза, $а$;
 ΣR — сопротивление цепи якоря, $ом$;
 Φ — магнитный поток обмотки возбуждения, $вб$;
 c_v — коэффициент, объединяющий постоянные величины;

2) перегрев и преждевременный выход из строя тяговых двигателей в связи с увеличением времени движения электровоза и, следовательно, увеличением эквивалентного тока. Так, например, во избежание их перегрева при средней длине откатки в 3 км, понижение напряжения тяговой сети на 30% требует уменьшения веса состава на 25...40%;

3) перегрев и преждевременный выход из строя двигателей компрессоров в связи с увеличением периода включения:

$$t_B = \frac{V}{Q_k} = \frac{V}{cv}, \text{ сек},$$

где V — объем пневмосистемы, $м^3$;
 v — скорость наполнения системы (производительность компрессора) $м^3/сек$;
 c — коэффициент, учитывающий конструктивные данные компрессора и передачи;

4) увеличение потери энергии в тяговой сети, поскольку при неизменном значении тока электровоза или при некотором его увеличении (уменьшается к.п.д. электрической части электровоза) увеличивается время протекания. Дополнительные потери определяются формулой

$$a_1 = I_e U_n \Delta t_g, \text{ дж},$$

где I_e — суммарный ток, потребляемый электровозом, $а$;
 U_n — напряжение на шинах тяговой подстанции, $в$;
 Δt_g — дополнительное время движения, $сек$;

5) ухудшение условий безопасности движения и вождения электровоза в связи с уменьшением светового потока фар.

Кроме того, увеличение сопротивления тяговой сети влечет за собой:

1) увеличение потери энергии, определяемой формулой:

$$\Delta a_2 = I_e \Delta R (t_g + \Delta t_g), \text{ дж},$$

где ΔR — значение дополнительного сопротивления, $ом$;
 t_g — время движения электровоза при номинальном напряжении тяговой сети, $сек$;

2) увеличение блуждающих токов и в связи с этим:

а) усиленную электрокоррозию металлических предметов, особенно оболочек кабелей, оказавшихся в анодной зоне прохождения этих токов;

б) повышенную опасность преждевременного взрывания электродетонаторов при применении электрозажигательных зарядов.

Уменьшение сопротивления тяговой сети предусматривают и правила безопасности [5]:

1) электрическое соединение рельсов так, чтобы сопротивление стыка не превышало бы сопротивления рельса длиной 3 м (следовательно, допускается за счет стыковых соединений увеличение сопротивления пути до 27%);

2) запрещается эксплуатировать контактный провод, износ которого превышает 20... 30%.

Существующие методики расчета тяговой сети [6, 7, 8] рекомендуют принимать:

1) коэффициент, учитывающий сопротивление стыков 1,2, в то время, как правилами безопасности допускаются 1,3... 1,4 (с учетом износа рельсов);

2) коэффициент, учитывающий износ контактного провода 0,85, в то время как правилами безопасности допускаются 0,7... 0,8.

Фактическая величина дополнительного сопротивления рельсовых стыков зависит от их конструкции и состояния.

На сланцевых шахтах распространены следующие виды стыковых соединений:

1) тросовые мосты, изготовленные из отдельных прядей изношенных канатов подъемных машин, экскаваторов и т.п. По требованию правил безопасности электрическое соединение должно выполняться проводом, сопротивление которого эквивалентно сопротивлению медного проводника сечением не менее 50 мм².

Проводимость стали примерно в 10 раз меньше проводимости меди, следовательно, сечение тросового моста должно быть не меньше 500 мм² ($d > 25$ мм). Фактическое сечение стальных тросовых мостов на шахтных путях значительно (5... 10 раз) меньше, при этом надежность их небольшая;

2) прутковые мосты (вышеизложенное относится и к этому виду соединения);

3) мосты из изношенного контактного провода; по проводимости отвечают ПБ, но надежность соединения также небольшая;

4) сварка стыковых накладок, что обеспечит выполнение требования правил.

Всем применяемым видам соединений свойственен небольшой срок службы и, следовательно, значительная трудоемкость содержания. Поэтому часто электрический контакт между соседними рельсами осуществляется только за счет стальных рельсовых накладок. Так как последние подвергаются коррозии, то электрическая проводимость рельсовых стыков мала.

В угольных шахтах США широко применяются сварные стыки [9]. Сравнительные расчеты в условиях американских шахт показывают, что разовые расходы на изготовление сварного

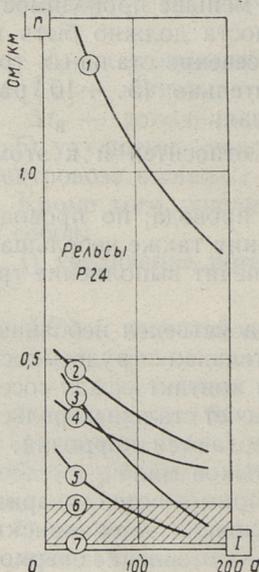
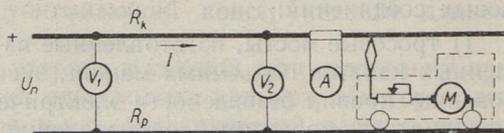
стыка примерно на 50% меньше, чем на стык с болтовым соединением и гибким электрическим мостом. Сварка стыков дает, при сравнительно высокой стоимости соединительных деталей и рабочей силы в США, 300 долларов экономии на 1 км пути.

В настоящее время термитная сварка рельсов Р38 и более тяжелых, способом промежуточного литья, распространена и внедрена на всех железных дорогах СССР [10].

Электрическая проводимость сварных стыков мало отличается от проводимости самого рельса. Существенным преимуществом сварных соединений рельсов является и то, что они обеспечивают плавное движение состава. Отсутствие ударов на стыках увеличивает межремонтный период подвижного состава и пути. Также уменьшается рассеивание энергии в стыках и, следовательно, сопротивление движению поезда.

С целью определения фактического электрического сопротивления тяговой сети были проведены измерения на сланцевых шахтах № 8, № 10 и Кява. Использовался метод амперметра и вольтметра, позволяющий определить сопротивление:

Фиг. 1. Схема измерения



Фиг. 2. Величина сопротивления рельсовой цепи;

1. Шахта № 10, почва выработки сухая, электрическое соединение рельсов отсутствует;
2. Шахта Кява, рельсы в воде, специальное электрическое соединение отсутствует;
3. Шахта № 8, выработка сухая, стыковые соединения приварены;
4. Шахта № 10, почва выработки сухая, электрическое соединение рельсов отсутствует, параллельно рельсам проложен контактный провод;
5. Шахта Кява, выработка сухая, тросовые стыковые соединения;
6. Расчетное сопротивление рельсов;
7. Расчетное сопротивление тяговой сети

1) при протекании тока в тяговой сети, т.е. при режиме сети, близком к эксплуатационному;

2) отрезка сети произвольной длины без применения дополнительных проводов в измерительной схеме. Увеличение длины измеряемого отрезка компенсирует в некоторой степени ограниченную точность метода измерения.

Источником тока служила тяговая выпрямительная установка (фиг. 1), в качестве регулируемой нагрузки использовались заторможенные электровозы 10 КР. Ток регулировался пусковыми реостатами электровозов с помощью контроллеров.

Измерения производились магнитоэлектрическими приборами М106/1 и М80. Испытывалась тяговая сеть различной технической характеристики и состояния.

Измерения показали, что:

1) сопротивление рельсовой сети — нелинейная величина, с увеличением тока оно уменьшается (фиг. 2), особенно ярко проявляется нелинейность на путях без стыковых соединений;

2) фактическое сопротивление рельсового пути может быть значительно (десятки раз) больше расчетного;

3) если по расчету основную долю сопротивления тяговой сети составляет сопротивление контактного провода, то фактически сопротивление рельсовой сети почти всегда значительно больше сопротивления контактного провода;

4) с увеличением обводненности выработок увеличивается проводимость рельсовой сети;

5) при малых токах в тяговой сети даже по требованию ПБ выполненные стыковые соединения не обеспечивают проводимости стыка равной проводимости рельса длиной 3 м.

Рельсы, служащие обратным токопроводом, не полностью изолированы от земли. Поэтому часть тягового тока стекает по ним в землю. При неблагоприятных условиях, способствующих утечке тока в землю (отсутствие стыковых соединителей, загрязненность балласта и др.), величина стекающего тока может достигать 70...80% от общего тягового тока. Блуждающие токи, возникающие в земле при работе электрической тяги постоянного тока, могут распространяться на большие расстояния. Поэтому рельсовую сеть можно рассматривать как трехмерный проводник, в котором электрический ток распределяется по законам, аналогичным с законами гидродинамики [11]. В таком случае распределение тока описывается направлением и плотностью токовых линий, которые ортогональны поверхности равных потенциалов (эквипотенциальные поверхности).

Если во всех сечениях линейных проводников удельное сопротивление принимается одинаковым, то в объемных проводниках такие случаи наблюдаются редко. Всякая горная

порода является сложной средой. Механически она состоит из частиц твердого (твердые минералы), жидкого (растворы в порах) и газообразного состояния (воздух или сильно сжатые газы). Поэтому особенно горные породы по электрическим свойствам не однородные.

Между сопротивлением тяговой сети и величиной протекающего через нее тока существует зависимость

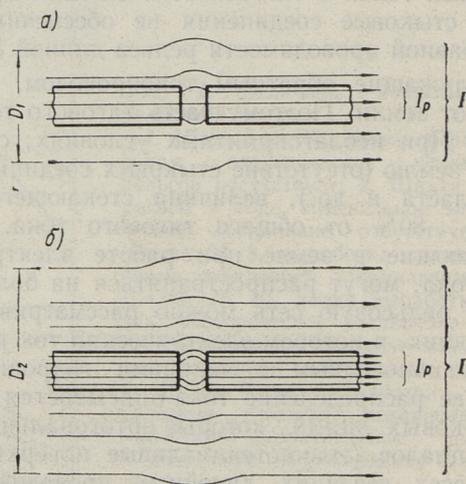
$$R = R_0(1 + \lambda I \kappa),$$

где R_0 — сопротивление обесточенной тяговой сети;

λ, κ — постоянные, характеризующие электрические свойства почвы выработки и верхнего строения пути.

Природа нелинейности следующая. Хорошо проводящие частицы горных пород бывают изолированы тонкими, плохо проводящими слоями. При достаточно высоком напряжении эти слои пробиваются и тогда хорошо проводящие частицы чаще всего образуют контактные мостики спекания вследствие электрической дуги. При этом сопротивление породы значительно понижается.

Еще более существенным является обстоятельство, что с увеличением тока он вытесняется из рельсов и занимает большее сечение почвы вокруг рельсов. Сравнительные изображения распределения токов различной величины в рельсовой сети приведены на фиг. 3.



Фиг. 3. Распределение тока: а) при малом значении, б) при большом значении

Чем выше удельное сопротивление земли, тем (при прочих равных условиях) на большие расстояния распространяются блуждающие токи [12].

Нелинейность сопротивления рельсовой сети вызывает усложнения в расчетах электроснабжения откатки контактными электровозами.

Однако стыковые соединения, выполненные по правилам, уменьшают нелинейность сопротивления. Это позволяет ограничить инженерные расчеты до приемлемого объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Озерной. Экспериментальное исследование блуждающих токов при рудничной электровозной откатке. Уголь, № 150 (6), 1938.
2. М. И. Озерной. Экспериментальное исследование электрических параметров шахтных рельсовых цепей. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 3, 1958.
3. И. Т. Сидоренко. Электрическое сопротивление рудничных рельсовых путей с учетом шунтирующего влияния. Сб. «Вопросы рудничного транспорта». Выпуск 9, «НЕДРА», 1965.
4. В. Ф. Ермошин. Исследование влияния электротяговых блуждающих токов на преждевременное взрывание электродетонаторов в условиях подземных выработок шахт. Диссертация. Московский Горный институт, 1966.
5. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. «НЕДРА», 1964.
6. Шахтный транспорт. Справочник «НЕДРА», 1964.
7. С. А. Волотковский. Рудничная электровозная тяга. Углетехиздат, 1955.
8. В. Н. Стасюк. Электровозный рудничный подземный транспорт. Издат. лит. по черной и цветной металлургии, 1957.
9. D. Jones. Underground haulage II. Mechanization. The Magazine of Modern Coal. April, 1962.
10. В. Н. Шепелев. Термитная сварка рельсов. «Транспорт», 1966.
11. V. Fritsch. Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern besonders in der angewandten Geoelektrik. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1960.
12. В. В. Красноярский, Л. Я. Цикерман. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. Высшая школа, 1968.

Trolley Network Resistance in Oil Shale Mines

Summary

The influence of trolley network resistance on electric energy transmit quality for locomotive haulage is discussed. The paper shows that the demands of valid Safety Rules for Coal and Oil Shale Mining are not in line with the recommended calculating methods.

Electrical rail joints in use are described. The results of the trolley network resistance measuring are given. Experimental studies determined the nonlinear character of trolley network resistance, that may be expressed by the formula

$$R=R_0(1+I^k).$$

Х. Х. Арукюла, Э. А. Люютре

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ШАХТНОГО ПОЛЯ № 14 ЭСТОНСКОГО СЛАНЦЕВОГО БАССЕЙНА

Дальнейшее развитие сланцедобывающей промышленности в Эстонской ССР требует строительства новых шахт и карьеров. Уже строится самая крупная сланцевая шахта в мире № 9 с годовой добычей 9 миллионов тонн горной массы. Выделено для строительства шахтное поле № 14 в юго-восточной части Эстонского сланцевого месторождения.

При решении вопросов технологии вскрытия сланцевого пласта, добычи и использования сланца требуется знание физико-механических свойств пород, определение которых и явилось целью настоящей работы.

Сланцевый пласт в пределах шахтного поля залегает на глубине 50... 70 метров. Покрывающие породы представлены в основном известняками.

Пробы были отобраны из 14 скважин по всей толще пород от дневной поверхности до почвы (включительно) промышленного пласта.

По покрывающим породам проводят только немногочисленные вскрывающие выработки, а по почве канавы и зумпфы, поэтому по соответствующим пробам был определен лишь предел прочности на одноосное сжатие.

Механические свойства пород непосредственной кровли и сланцевого пласта являются исходными данными при решении вопросов управления и крепления кровли, поэтому для пород непосредственной кровли определили пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение и на изгиб, а для пород сланцевого пласта предел прочности на одноосное сжатие, модуль упругости и показатели объемной прочности.

Методика определения физико-механических свойств была выбрана по ВНИМИ [1], обработка данных испытаний проводилась методами математической статистики. Определение предела прочности при одноосном сжатии проводилось методом

соосных пуансонов, при одноосном растяжении путем раскалывания цилиндрических образцов и при изгибе методом соосного прогиба породных дисков. Крепость пород сланцевого пласта определена методом толчения, модуль упругости определили на цилиндрических образцах (диаметром 42 и 74 мм) под прессом, при помощи механических тензометров. Показатели объемной прочности были определены методом косоого среза на полуматрицах.

Сводные данные по определению прочности пород шахтного поля № 14 приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Интервалы изменения и средние показатели прочности пород шахтного поля № 14

Место отбора пробы	Вид нагрузки	Предел прочности пород, $кг/см^2$			Коэффициент вариации, %
		миним.	макс.	средний	
Покрывающие породы	сжатие	230	1060	435	45
Непосредственная кровля	сжатие	135	940	411	41,5
	растяжение	18	66	47	23,4
	изгиб	45	220	115	34
Промышленный пласт.	сжатие	140	325	250	29
Сланец	сжатие	380	970	710	37
Почва. Породы	сжатие	125	820	375	43

Наиболее вероятный интервал предела прочности пород при одноосном сжатии составил 200 — 600 $кг/см^2$, при этом наблюдалось уменьшение средней крепости от покрывающих пород к почве, хотя отдельные слои имели большую и меньшую прочность. Самыми слабыми породами оказались алевролиты и глины, самыми крепкими — монолитные известняки.

Модуль упругости составил для сланцевых прослоев 0,9 — 1,3 10^4 $кг/см^2$ и для известняковых прослоев 3,6 — 5,2 10^5 $кг/см^2$.

Показатели объемной прочности для пород промышленного пласта были определены впервые и оказались: для сланцевого прослоя В коэффициент смещения $C=68$ $кг/см^2$ и угол внутреннего трения $\varphi=33^\circ$, для известнякового прослоя С/D соответственно $C=120$ $кг/см^2$ и $\varphi=38^\circ$.

Средние коэффициенты крепости f , определенные методом толчения, для пород промышленного пласта шахтного поля

№ 14 составили для сланца 1,9 и для известняка 4,6, что несколько выше средних значений по другим шахтам [2].

Результаты определения физико-механических свойств пород для шахтного поля № 14 показали, что соответствующие показатели находятся в пределах, которые были определены другими исследованиями для других шахтных полей эстонского месторождения [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. Временные требования по составу и методам механических испытаний горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых для проектирования подземной разработки. Изд. ВНИМИ, Ленинград 1965.
2. Х. Х. А р у к ю л а. Исследование физических свойств пород сланцевого пласта Эстонского месторождения. Ротапринт ТПИ, Таллин 1968.
3. Эстонское республиканское научно-техническое горное общество. Технический бюллетень № 5, г. Йыхви 1959.

H. Aruküla, E. Lüütre

Determination of Physical-Mechanical Properties of Rock from Mining Field Nr. 14 Estonian Oil Shale Basin

Summary

From 14 bore holes in mining field Nr. 14 following physical-mechanical properties of rock have been determined: for overlying rocks and bottom rocks — limit of strength by one axis pressure, for immediate roof rocks-limit of strength by one axis pressure, pull and bend, for rock of oil shale beam-limit of strength by one axis pressure, modul of elasticity, and parametres of room strength.

Э. А. Люютре

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН В КРЕПКИХ ИЗВЕСТНЯКАХ ЭСТОНИИ

Экономически целесообразным является такой режим бурения, при котором стоимость одного метра скважины будет минимальной.

При исследовании мы допускаем, что стоимость машино-смены бурового станка, обеспечивающего наивыгоднейший режим бурения, равна стоимости машино-смены станка СВБ-2 при диаметре взрывных скважин 120 мм. Все стоимостные показатели взяты при работе в карьере Маардуского химкомбината.

Стоимость одного метра скважины

$$A = \frac{A_1}{H_1} + \frac{A_2}{H_2} + \frac{A_3}{H_3}, \text{ руб./м} \quad (1)$$

где A_1 — стоимость машино-смены;
 A_2 — стоимость буровой коронки;
 A_3 — стоимость буровой штанги;
 H_1 — расчетная сменная норма бурения.

$$H_1 = \frac{T - T_n}{(t_0 + t_a) \left(1 + \frac{\kappa_1}{100}\right)}, \text{ м,}$$

где T — продолжительность смены, мин.;
 T_n — продолжительность подготовительно-заключительных операций в течение смены, мин.;
 t_a — продолжительность вспомогательных операций на 1 бурометр по хронометражным наблюдениям, мин/м;
 κ_1 — коэффициент, который учитывает время на отдых, %;
 t_0 — продолжительность основных операций на 1 бурометр, мин/м:

$$t_0 = \frac{1}{60v},$$

где $v = f(P, \omega)$ — определена по аналитическим и экспериментальным исследованиям (P — осевое усилие бурстанка, кг; ω — угловая скорость вращения шпинделя бурстанка, 1/сек).

H_2 — стойкость буровой коронки. По экспериментальным данным

$$H_2 = \frac{207}{\omega} \text{ м.}$$

H_3 — стойкость буровой штанги.

Подставляя все числовые значения в формулу (1), получим

$$A = \frac{\omega^{1,28} + 5,6\omega P \cdot 10^{-4} + 14,0}{33,7\omega P \cdot 10^{-4}} + 0,02\omega + 0,06, \text{ руб./м} \quad (2)$$

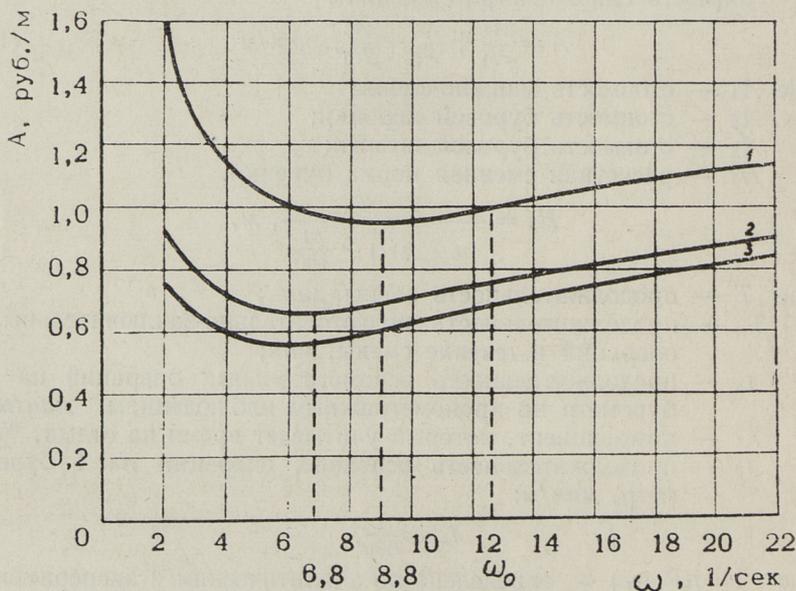
Зависимость $A = \varphi(\omega)$ при разных значениях P представлена на фиг. 1. Видно, что $A = \varphi(\omega)$ имеет минимум. При увеличении ω , начиная от минимального значения функции, стоимость бурометра скважины растет медленно. Это дает возможность выбирать угловую скорость вращения шпинделя в довольно широких пределах при незначительном увеличении стоимости бурометра.

Исследуем, при каком значении ω стоимость одного метра скважины будет минимальной. При минимуме

$$\frac{dA}{d\omega} = 0.$$

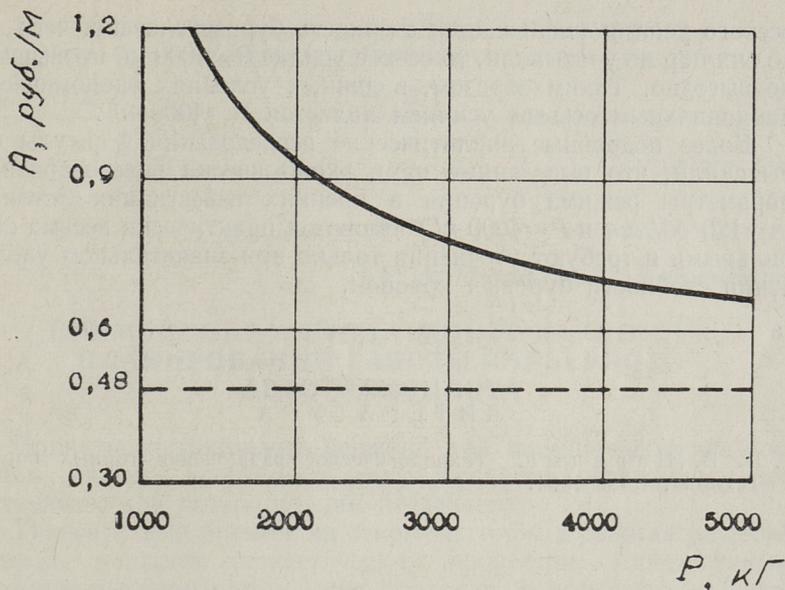
Отсюда получим

$$9,45 \omega^{1,28} = 472 - 22,7 \cdot 10^{-4} \omega^2 P.$$



Фиг. 1. Зависимость стоимости скважины от угловой скорости вращения бурового инструмента.

1 — $P = 1800 \text{ кг}$; 2 — $P = 3600 \text{ кг}$; 3 — $P = 5000 \text{ кг}$



Фиг. 2. Зависимость стоимости скважины от осевого усилия при $n = 120$ об/мин

Полученное уравнение решается графически для разных значений P . Стоимость одного метра скважины является минимальной при $\omega = 8,8$ 1/сек ($P = 1800$ кг). Этому соответствует скорость вращения шпинделя $n \approx 85$ об/мин. При увеличении осевого усилия экономически рациональная скорость вращения шпинделя уменьшается.

Вычисления по формулам В. В. Царицына [1] показывают, что минимальной скоростью вращения шнека, которая обеспечивает надежную выдачу буровой мелочи при бурении взрывных скважин в крепких известняках Эстонии, 120 об/мин.

Таким образом можно заключить, что рациональной угловой скоростью вращения шпинделя бурового станка при бурении скважин диаметром 120 мм в крепких известняках Эстонии является 120 об/мин.

Чтобы выяснить рациональное осевое усилие, построим зависимость $A = \varphi(P)$ при $n = 120$ об/мин (фиг. 2). Указанная зависимость определяется уравнением

$$A = \frac{2,02P + 3960}{4,24P}, \text{ руб./м.}$$

Видно, что при $P < 4000$ кг стоимость метра скважины уменьшается весьма медленно. Если учитывать, что при увеличении

осевого усилия уменьшается стойкость буровых штанг, чего мы до сих пор не учитывали, то осевое усилие $P=4000$ кг превышать не выгодно. Таким образом, в данных условиях экономически рациональным осевым усилием является $P=4000$ кг.

Более подробные аналитические исследования формулы (2) выяснили, что выведенные нами экономически целесообразные параметры режима бурения в крепких известняках Эстонии ($n=120$ об/мин и $P=4000$ кг) являются практически весьма стабильными и требуют уточнения только при значительном увеличении стойкости буровых коронок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ц а р и ц ы н. Технологическое разрушение горных пород. Техника, Киев 1964.

E. Lüütre

Estimation of Economically Efficient Regime of Rotary Drilling of Blast Holes into Hard Limestones of Estonia

Summary

The paper deals with the problems of minimum cost by rotary drilling of blast holes into limestones of Estonian quarries.

Cost dependence on rotation speed and pressing weight per one meter hole are given. Both of these functions have a minimum and by analytical method they are estimated in the paper.

Р. А. Пязок, М. Г. Рябовыйтра

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА

Принятие оптимальных решений при планировании организации любого производственного процесса невозможно без математической интерпретации последнего.

Транспортный процесс на открытых горных работах по своей природе является стохастическим процессом, подверженным влиянию различных случайных факторов. Математически любой стохастический процесс может быть описан соответствующими распределениями вероятностей, заданными на множестве реализаций процесса, при этом искомые параметры определяются как средние значения по данным большого количества реализаций. Естественно, для получения достоверных результатов необходим обширный статистический материал.

Накопление статистического материала принципиально возможно путем постановки промышленного эксперимента. Однако промышленный эксперимент в условиях горного производства трудоемок, связан со срывом выполнения плана на экспериментальном предприятии и, самое главное, продолжителен во времени. Последнее обстоятельство приводит к «старению» и утере ценности статистической информации.

Наиболее целесообразным средством исследования стохастических процессов является имитация их на ЭВМ. При этом в практически приемлемые сроки можно накопить соответствующий «статистический» материал.

Процесс представляется в виде математической модели, учитывающей влияние случайных факторов. Модель испытывается на ЭВМ по методу Монте-Карло, основанному на многократном проигрывании одного и того же моделирующего алгоритма [1, 2].

Сущность метода заключается в том, что процесс дифференцируется на составляющие его операции, переход от одной операции к другой и состояния каждой единицы оборудования периодически фиксируются на ЭВМ через определенный про-

межутков времени. Продолжительность каждой операции задана в виде кривой распределения плотности вероятности. При моделировании продолжительность выбирается в соответствии с кривой распределения, характерной для данной операции в натуре. По истечении заданного интервала моделирования вычисления прекращаются и на печать выдаются результаты.

Модель транспортного процесса, позволяющая одновременно моделировать работу нескольких экскаваторов и закрепленных за ними автосамосвалов, была составлена применительно к условиям Маардуского фосфоритного карьера. На автотранспорт работают 3 экскаватора, два из них заняты погрузкой руды, транспортируемой до промежуточного склада, один производит погрузку известняка, транспортируемого на щебеночный завод. Каждая система «экскаватор-разгрузочный пункт» имеет различную емкость ковша экскаватора и дальность транспортирования, кроме того при транспортировании известняка возникают простои автосамосвалов при разгрузке, обусловленные техническими неполадками приемного устройства.

Транспортный процесс при моделировании был расчленен на следующие элементарные операции: движение порожнего автосамосвала от разгрузочного пункта к экскаватору, ожидание погрузки — технологический простой, маневрирование автосамосвала перед погрузкой, погрузка, движение груженого автосамосвала от экскаватора к разгрузочному пункту, ожидание разгрузки — технологический простой у приемного бункера, маневрирование перед разгрузкой и разгрузка.

Хронометражные наблюдения показали, что все перечисленные операции имеют вероятностное содержание и отличаются между собой лишь характером кривой распределения и основными статистическими показателями. Большинство операций описывается нормальным законом распределения, ожидание погрузки и разгрузки — экспоненциальным законом.

Время оперативной работы у экскаваторов в смену принято равным 455 минутам, у автосамосвалов — 415 минутам. В соответствии с этим в начале и конце смены предусмотрено время на движение автосамосвалов из гаража в карьер и обратно, а также время на производство подготовительно-заключительных операций.

Процесс моделирования сводится к поочередному моделированию нескольких отдельных систем «экскаватор-разгрузочный пункт», очередность моделирования рейсов в каждой системе соответствует очередности движения автосамосвалов.

В ЭВМ вводятся исходные данные, соответствующие производственной ситуации: количество автосамосвалов, закрепленных за каждым экскаватором, количество моделируемых смен, веро-

распределения и случайной величины S , равномерно распределенной в интервале $(0,1)$, т.е.

$$X_{kj} = f(X_{kj}, S).$$

Все исходные данные являются переменными параметрами, их значения можно изменять в интересующих нас пределах. Общий алгоритм моделирования состоит из следующих алгоритмов:

- 1) моделирование работы экскаваторов,
- 2) моделирование работы автосамосвалов,
- 3) генерирование случайных чисел,
- 4) печать,
- 5) останов.

Большинство из перечисленных алгоритмов являются сложными и состоят из частных алгоритмов и логических условий. Общая блок-схема модели приведена на фиг. 1. Основные обозначения на блок-схеме следующие:

- j — номер экскаватора;
- i — номер автосамосвала;
- y_j — время отправления автосамосвалов в гараж;
- P_j — текущее время экскаватора;
- Q — текущее время приемного бункера щебеночного завода;
- U_{kj} — текущее время автосамосвала от момента окончания разгрузки до момента окончания погрузки;
- V_{kj} — текущее время автосамосвалов от момента окончания погрузки до момента окончания разгрузки;
- C_j — количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором;
- $S1$ — время от начала смены до прибытия автосамосвала к экскаватору;
- $S2$ — начальный интервал времени между выездом автосамосвалов в карьер;
- $S3$ — время подготовительных операций экскаватора;
- H — константа ($H > y_j$);
- $D1-D4$ — рабочие ячейки;
- $X1j$ — время движения порожняком;
- $X2j$ — время движения с грузом;
- $X3j$ — время погрузки;
- $X4j$ — время маневрирования перед погрузкой;
- $X5j$ — ожидание погрузки;
- $X6j$ — время маневрирования перед разгрузкой;
- $X7j$ — время разгрузки;
- $X8j$ — время ожидания разгрузки.

Общая блок-схема состоит из нескольких обособленных блоков, назначение которых следующее.

Блок А — Ввод исходных данных.

Блок Б — Оператор, осуществляющий очередность моделирования по системам «экскаватор-разгрузочный пункт».

Блок В — Моделирование работы экскаваторов.

Блок Г — Моделирование движения автосамосвалов с известняком.

Блок Д — Моделирование разгрузки автосамосвалов с известняком.

Блок Е — Моделирование движения порожних автосамосвалов от разгрузочного бункера щебеночного завода в карьер.

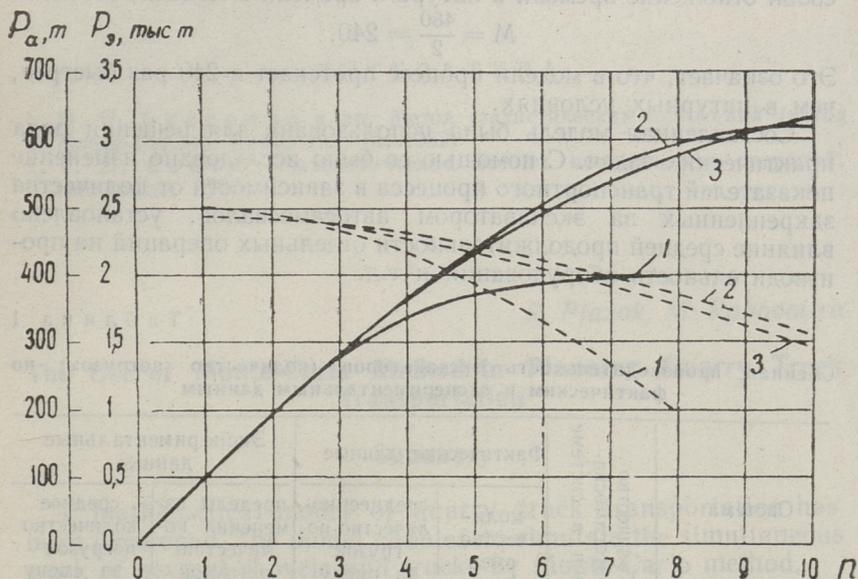
Блок Ж — Моделирование движения автосамосвалов с рудой.

Блок З — Моделирование разгрузки автосамосвалов с рудой.

Блок И — Моделирование движения порожних автосамосвалов от рудного склада в карьер.

Блок К — Формирование показателей транспортного процесса и выдача на печать результатов.

На печать поступают следующие данные:



Фиг. 2. Изменение производительности горно-транспортного оборудования в зависимости от количества закрепленных за экскаватором автосамосвалов. (Сплошная линия — производительность экскаватора, пунктирная линия — средняя производительность автосамосвала).

- 1 — система «ЭКГ-3 — щебеночный завод» (средняя дальность транспортирования 2,15 км);
- 2 — система «ЭКГ-4 — рудный склад» (средняя дальность транспортирования 2,0 км);
- 3 — система «ЭКГ-4,6 — рудный склад» (средняя дальность транспортирования 2,1 км)

1. Коэффициент использования экскаватора;
2. Коэффициент использования автосамосвалов;
3. Общее количество погрузок, произведенных экскаватором;
4. Суммарное время организационных простоев экскаватора;
5. Суммарное время простоев автосамосвалов;
6. Суммарное время простоев щебеночного завода из-за отсутствия известняка.

Моделирование производилось в вычислительном центре ТПИ на ЭВМ «Минск-22». По каждому варианту выполнялось 25—30 реализаций. Время моделирования работы 1 смены (8 часов) зависит от количества автосамосвалов, закрепленных за экскаватором, и составляет в среднем 2 минуты. Таким образом, моделирование одного варианта (при 30 реализациях) занимает 1 час. Это вполне удовлетворительный результат, если учесть, что моделируется сразу работа трех экскаваторов.

Ритм моделирования (временный масштаб), представляющий собой отношение времени в натуре к времени в модели, составил

$$M = \frac{480}{2} = 240.$$

Это означает, что в модели процесс протекает в 240 раз быстрее, чем в натуральных условиях.

Составленная модель была использована для решения ряда практических задач. С помощью ее было исследовано изменение показателей транспортного процесса в зависимости от количества закрепленных за экскаватором автосамосвалов, установлено влияние средней продолжительности отдельных операций на производительность оборудования и т.д.

Т а б л и ц а 1

Сменная производительность экскаваторов (количество погрузок) по фактическим и экспериментальным данным

Система	Количество автосамосвалов в системе	Фактические данные		Экспериментальные данные	
		количество смен	среднее количество погрузок за смену	пределы изменения количества погрузок	среднее количество погрузок за смену
«ЭКГ-3 — щебеночный завод	3	3	48	40—70	56
	4	4	69	49—81	68
	5	1	78	50—91	74
«ЭКГ-4 — рудный склад	4	1	68	65—80	74
	5	2	87	80—92	87
	6	1	101	90—112	100
«ЭКГ-4,6 — рудный склад	7	1	123	105—133	119
	6	1	87	81—113	98
	7	2	117	87—124	108

На графиках фиг. 2 показано изменение производительности оборудования в зависимости от количества автосамосвалов, закрепленных за экскаватором.

Результаты проведенных экспериментов были сопоставлены с фактическими данными промышленных наблюдений с целью оценки качества модели и установления степени соответствия экспериментальных данных фактическим (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что сопоставимость экспериментальных и фактических данных вполне удовлетворительная. Все фактические данные находятся в пределах колебания экспериментальных данных. Средние значения также близки. Следовательно, модель может считаться пригодной для решения практических задач карьерного автотранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Бусленко и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Физматгиз, М. 1962.
2. Т. Л. Саати. Математические методы исследования операций. Оборонгиз, 1963.

R. Pjazok, M. Rabovoitra

The Use of Monte-Carlo Method in Planning Quarry Truck Transportation

Summary

A mathematical model of quarry truck transportation has been developed. The model enables to simulate the simultaneous work of several shovels and trucks by Monte-Carlo method.

At the same time the work of three separated «shovel-truck» systems has been modelled, each of them with different probability-statistical characteristics. Modelling was performed by computer «Минск-22», the average time for modelling an 8-hour shift was about 2 minutes.

The model was used for the solution of several problems of prompt planning of excavation and transportation work at Maardu phosphorite quarry.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Л. Г. Талве. О моделировании поведения горного массива как энергетической системы	3
2. Э. Я. Иоосеп. Расход энергии как критерий состояния техники транспортирования.	25
3. Э. Я. Иоосеп. Сопротивление тяговой сети сланцевых шахт.	37
4. Х. Х. Арукюла, Э. А. Люютре. Исследование физико-механических свойств пород шахтного поля № 14 Эстонского сланцевого бассейна.	45
5. Э. А. Люютре. Определение экономически целесообразного режима вращательного бурения взрывных скважин в крепких известняках Эстонии.	49
6. Р. А. Пязок, М. Г. Рябовыйтра. Применение метода Монте-Карло при планировании работы карьерного автотранспорта.	53

ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ СБОРНИК СТАТЕЙ V.

Таллинский политехнический институт.

Редактор Х. Арукюла.

Технический редактор Я. Мыттус.

Сдано в набор 6/IV 1969. Подписано к печати 23/VIII 1970. Бумага 60×90/16. Печатных листов 3,75 + прилож. Учетно-изд. листов 2,80. Тираж 350. МВ-07644. Заказ № 2105. Типография «Пунане Тяхт», Таллин, ул. Пикк, 54/58. Цена 28 коп.



Цена 28 коп.