

260

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 260

# ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ

СБОРНИК СТАТЕЙ

IV



ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ

СБОРНИК СТАТЕЙ

IV

ТАЛЛИН 1968



Ep. 8488

*Л. Г. Талве*

УДК 622.83

## ЗАКОНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проведение научных исследований в широких масштабах характеризуется двумя основными направлениями, которые в то же время представляют собой единую совокупность. С одной стороны, исследования направляют в глубь намеченных узких вопросов и, с другой стороны, параллельно устанавливают закономерности между смежными дисциплинами. Следует отметить на практике частое отставание обобщающих исследований, что существенно тормозит проведение детальных исследований:

При исследовании природных процессов оказывается, что они характеризуются одним общим признаком, которым является участие энергии при протекании любого процесса. Соответственно следует считать вполне обоснованным принимать энергетический принцип за основу обобщения природных процессов [1].

Современное представление о сущности энергии и форм ее проявления объясняется исчерпывающе и объективно общепризнанной теорией относительности. На базе последней создана модель энергетического мира, разделяемого условно на области микро- и макроявлений. Исследование окружающих нас макроявлений базируется на законах микроявлений, основные принципы протекания которых освещены в специальной литературе.

Элементарная частица и поле являются объектами с противоположными свойствами, в то же время они обуславливают друг друга и между ними существует тесная связь. Такая же связь имеется между полем, пространством и временем [2].

Предполагают, что совокупность всех существующих полей в пространстве представляет собой вакуум, где все поля сохраняют состояние с минимальной энергией. При подводе к

такому полю энергии со стороны возникают в нем элементарные частицы, например, в электромагнитном поле фотоны и т. д. В природе существует столько полей, сколько имеется различных частиц. Наличие частиц показывает, что существующее поле имеет свободную энергию. Следовательно, процессы с наличием элементарных частиц являются процессами обмена энергии между полями. Свободная энергия может перейти от одного поля к другому, при этом соответственно частицы первого поля исчезают и возникают частицы нового поля.

Такое теоретическое представление поля позволяет просто описывать процессы превращения частиц. В настоящее время насчитывается элементарных полей более 30. В природе встречаются только такие процессы, которые протекают в согласии со всеми законами сохранения. Таких процессов имеется практически многие тысячи. Предпосылкой перехода энергии от одного поля к другому является наличие физической связи между этими полями, т. е. эти поля должны находиться в интеракции. Каждая интеракция соединяет три или четыре поля. Скорость процесса элементарных частей зависит от силы интеракции между соответствующими полями — чем сильнее интеракция, тем быстрее протекает процесс.

Существует четыре группы интеракции (в последовательности ослабления): сильная, электромагнитная, слабая и гравитационная интеракции. Установлено правило — чем слабее интеракция, тем с большим числом полей она реагирует. Соответственно гравитационная интеракция существует между всеми полями. Это обстоятельство указывает на особенно важную роль гравитации в природе.

Законы классической физики являются разрешающими, а современная физика подчеркивает, что в природе допускается все, что не запрещено. Запрещающими законами являются законы сохранения. Не обязательно, чтобы после данного события последовало другое определенное событие, как высказывает классическая физика. Число последующих событий может быть большое, только у каждого из них разная вероятность возникновения. Возможно, что законы сохранения являются единственными основными законами, на которые могут базироваться все природные процессы. Такое мнение является реальным, но пока еще не доказано.

В настоящее время известно 8 абсолютных законов сохранения, которые действительны везде и во всех процессах: закон сохранения энергии, закон сохранения импульса, закон сохранения импульсного момента и др. Кроме основных имеются еще частные законы сохранения. Чем слабее интеракция, тем меньшее число законов сохранения ее регулируют. Число за-

конов сохранения, регулирующих гравитационную интеракцию, до настоящего времени не установлено. Сегодня еще не известно, является ли гравитационное поле одним из видов существования энергии или нет — подобно электро-магнитному полю. Также не обнаружена пока предполагаемая элементарная частица гравитационного поля — гравитон.

При исследовании макроявлений энергетического мира до настоящего времени разработаны частные энергетические теории, которые разделяются по видам проявления энергии — термодинамика, электродинамика и др. или по видам агрегатного состояния среды — газодинамика и гидродинамика. Но пока не разработана энергетическая теория сплошной среды, поэтому и отсутствует обобщающая теория, называем ее условно энергодинамикой, которая изучает энергетические процессы независимо от характера среды.

Ниже сделана очередная попытка разработать основы энергетической теории сплошной среды, которая названа стра-

Таблица 1

По фазе По состоянию форме среды энергии		Энергодинамика		
		Стратодинамика	Гидродинамика	Газодинамика
		Сплошная среда	Жидкая среда	Газовая среда
Энергодинамика	Гравитодинамика	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ↑
	Термодинамика	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ↑
	Электродинамика	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ↑
	.....	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ↑
	динамика	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ← — — — — — ○ ↑	○ ← — — — — — ○ ↑

Схема энергодинамики

тодинамикой [3]. Она разделяется по отдельным видам существования энергии — на гравидинамику, термодинамику, электродинамику и т. д. Соответственно гравидинамика является разделом стратодинамики, изучающая процессы превращения гравитационной энергии в сплошной среде (табл.).

Предполагая возможность разработки общей энергетической теории — энергодинамики, необходимо обеспечить тесную связь между частными энергетическими теориями, являющимися механическими дисциплинами. Учитывая, что предметами исследования являются масса, энергия, усилие, пространство и время, за основу решения задачи приняты принципы релятивистской механики, которые при рассмотрении частных вопросов могут быть заменены принципами классической механики [4].

Из-за ограниченности объема данной работы ниже рассматриваются главным образом основы теории части стратодинамики — гравидинамики. При изучении форм существования и превращения гравитационной энергии ограничиваемся конкретной, пространственно и энергетически строго изолированной системой, в качестве которой можно рассматривать, например, определенную часть горного массива.

### Формы существования и преобразования энергии в изолированной системе

Энергия системы по релятивистской теории выражается в самой общей форме уравнением [4]

$$E_r = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + C, \quad (1)$$

где  $E_r$  — релятивистская кинетическая энергия,

$m_0$  — масса покоя,

$c$  — скорость света,

$v$  — скорость движения тела,

$C$  — постоянная интегрирования.

Релятивистскую энергию можно выражать также в форме бесконечного ряда [5]

$$E_r = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2} + \frac{3}{8} \frac{m_0 v^4}{c^2} + \dots, \quad (2)$$

где член

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (3)$$

называется энергией покоя и член

$$E = \frac{m_0 v^2}{2} \quad (4)$$

— классической кинетической энергией.

Следовательно, при малых скоростях движения тела его релятивистская энергия равняется практически сумме энергии  $E_0$  покоя и классической кинетической энергии

$$E_r = E_0 + E = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \quad (5)$$

По уравнению (5) видно, что если кинетическая энергия изолированной системы уменьшается, должна соответственно увеличиться ее энергия покоя, т. е. по крайней мере некоторые из входящих в систему масс покоя должны увеличиться [4]. По релятивистскому закону сохранения энергии установлена эквивалентность энергии и массы — все формы энергии связаны с массой отношением

$$\Delta E = c^2 \Delta m. \quad (6)$$

По принципу релятивистской механики массы покоя системы меняются при переходе кинетической энергии в другие формы энергии, и наоборот. Масса материального тела остается практически постоянной, пока основная часть его энергии, энергия покоя, не участвует в процессе превращения энергии. Масса покоя меняется только тогда существенно, если энергии взаимодействия примерно того же порядка величины, что и энергия покоя, например, в ядерных реакциях.

При малых значениях отношения  $\frac{v}{c}$  рассматриваемая система в течение исследуемого процесса практически не изменяет свою массу покоя и в этом случае энергия определяется только по классическому уравнению

$$E = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Как отмечено выше, при определенных обстоятельствах энергия может перейти из одной формы в другую, причем число форм и превращений энергии не ограничено. Соответственно уравнение (5) энергии можно выражать в виде

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (7)$$

Энергетически изолированная система, например, горный массив характеризуется определенной массой и энергией. При исследовании динамики изменения энергии системы нас не интересуют абсолютные величины энергии, а характер нарушения его энергетического баланса, поэтому при анализе

является более целесообразным применение дифференциального исчисления.

Рассматриваемая система сохраняет полное энергетическое равновесие до тех пор, пока к ней не подводят со стороны или не отводят энергию

$$dE = dE_1 + dE_2 + dE_3 + \dots = \sum_{i=1}^n dE_i = 0. \quad (8)$$

Другими словами, нарушение стратодинамического баланса возможно осуществить только с помощью внешней энергии.

Горный массив как система характеризуется наличием различных форм энергии, из которых на практике наибольшее значение имеют гравитационная  $dE_g$  и тепловая  $dE_t$  составляющие энергии. Следовательно, ниже удобно использовать уравнение (8) в виде

$$dE = dE_g + dE_t + \dots = 0.$$

Нарушение стратодинамического равновесия может быть обусловлено как природными, так и искусственными факторами. Закон сохранения энергии может быть представлен в виде

$$dE = dE_1 + dE_k = 0,$$

где  $dE_1$  — природная составляющая нарушения энергетического равновесия,  $dE_k$  — искусственная составляющая нарушения энергетического равновесия.

Поверхность горного массива подвергается действию природных факторов, как из космоса излучение, влияние атмосферных процессов — давления, температуры, осадков, испарения и др. Например, на каждый  $\text{см}^2$  атмосферы земного шара падает за год  $654 \text{ Мгж}$  энергии из космоса излучения, от него достигает поверхности земли  $470 \text{ Мгж}$  (70 %), а оставшая часть отражается в космос. Из полученной энергии 80% истраходуется на испарение воды (слой воды толщиной 7 м), за счет чего совершаются атмосферные процессы. Для сравнения — человечество воспроизводит за год энергию  $0,08 \text{ Мгж/см}^2$  или 0,02% от энергии излучения.

С боков на изолированный массив действуют сжимающие и растягивающие усилия в результате геодинамических процессов, энергия которых не установлена. Важное значение имеют также гидрогеологические процессы, которые перемещают значительные массивы воды и пород.

Снизу действуют на рассматриваемую систему геотермические и другие процессы, протекающие внутри земного шара. Практическое значение имеет также гравитационное поле луны и др.

Природные факторы характеризуются в основном значительной продолжительностью, но небольшой интенсивностью. Необходимо отметить также периодический характер действия природных факторов (суточный, месячный, годовой и более длительные периоды).

Искусственные факторы вызваны в основном деятельностью, связанной с добычей полезного ископаемого. Искусственными факторами являются результаты действия мощных стационарных энергетических установок, как подъемных, насосных, вентиляторных, компрессорных, холодильных и калориферных. Искусственные факторы по сравнению с природными характеризуются большей интенсивностью, поэтому ниже ограничиваемся в основном искусственными факторами при исследовании изменения энергетического баланса горного массива.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время термодинамика имеет детально разработанную, соответствующими экспериментами доказанную и всеобще признанную классическую теорию. Хотя последняя изучает в основном явления микромира — диффузию, теплообмен, кристаллизацию, испарение и др., но по аналогии и подобию можно с помощью метода термодинамики обобщить гравитационные, термические и другие энергетические процессы, протекающие в сплошной среде, например, в горном массиве в результате ведения горных работ.

### Законы стратодинамики

Изменение энергетического состояния изолированной системы под действием энергии, подводимой со стороны, регулируется законами стратодинамики [6]. При формулировке законов использован термодинамический метод [7], но форма и содержание их приспособлены к изучаемому предмету.

Первый закон стратодинамики является законом сохранения энергии, второй закон регулирует процессы превращения форм энергии и третий закон определяет энтропию энергетической системы. Законы характеризуют динамику изменения состояния в виде мощности изменения энергетического баланса системы. При этом фактор времени учтен в категорической форме.

I. Энергетически изолированная система сохраняет энергетическое равновесие, пока ей со стороны не сообщают энергию

$$N_u = \frac{du}{dt} = 0, \quad (9)$$

где  $N_u$  — мощность изменения энергетического равновесия системы,

$u$  — внутренняя энергия рассматриваемой системы,

$t$  — время протекания процесса.

Труды по горному делу

10 К-на

Общий энергетический баланс системы обеспечивается при сохранении парциального энергетического баланса ее отдельных форм существования энергии.

$$du = \sum_{i=1}^n du_i = du_g + du_t + \dots = 0, \quad (10)$$

где  $u_g$  — гравитационная составляющая внутренней энергии,  $u_t$  — тепловая составляющая внутренней энергии.

II. Подводимая к системе энергия может превращаться из одной формы ее существования в другую, но не полностью

$$d\omega = \sum_{i=1}^n (du_i + d\omega_i'), \quad (11)$$

где  $\omega$  и  $\omega'$  соответственно энергия нарушения и энергия восстановления энергетического равновесия системы.

Превращение гравитационной энергии описывается уравнением

$$d\omega_g = du_g + d\omega_g', \quad (12)$$

где  $\omega_g$  — энергия нарушения гравитационного равновесия,

$\omega_g'$  — энергия восстановления гравитационного равновесия,

$u_g$  — внутренняя гравитационная энергия.

$$du_g = mgdh = v\gamma dh = v\varrho gdh = vdp_g, \quad (13)$$

где  $m$  — единица массы,  $g$  — гравитационное ускорение,  $h$  — гравитационная высота,  $v$  — удельный объем,  $\gamma$  — удельное гравитационное усилие,  $\varrho$  — плотность,  $p_g$  — гравитационное давление;

$$d\omega_g' = \gamma h dv = p_g dv. \quad (14)$$

По уравнениям (13) и (14) уравнение (12) превращения гравитационной энергии можно выразить в виде

$$d\omega_g = vdp_g + p_g dv, \text{ где } p_g = p_g(h). \quad (15)$$

Превращение тепловой энергии системы описывается аналогично

$$d\omega_t = du_t + d\omega_t', \quad (16)$$

где  $\omega_t$  — энергия нарушения и  $\omega_t'$  соответственно энергия восстановления теплового равновесия системы

$$du_t = c_t mgdT = c_t v\gamma dT = c_t v\varrho gdT \quad (17)$$

и

$$d\omega_t' = p_t dv.$$

Следовательно, уравнение (16) можно переписать в форме

$$d\omega_t = c_t v \gamma dT + p_t dv,$$

где

$$p_t = p_t(T) \text{ и } c_t \text{ — удельная теплоемкость.}$$

По аналогии можно выразить и превращение других форм энергии системы.

III. Полная энтропия энергетической системы изменяется по мере изменения парциальной энтропии ее отдельных форм существования энергии

$$ds = \sum_{i=1}^n ds_i = ds_g + ds_t + \dots, \quad (18)$$

где  $s_g$  — гравитационная составляющая энтропии,

$s_t$  — тепловая составляющая энтропии системы.

$$ds_g = \frac{d\omega_g}{h} \quad \text{и} \quad ds_t = \frac{d\omega_t}{T}.$$

Изменение энтропии системы можно выразить по уравнению (18) в виде

$$ds = \frac{d\omega_g}{h} + \frac{d\omega_t}{T} + \dots$$

### Основные уравнения состояния

Параметры состояния. Стратодинамика разделяется по формам существования энергии на гравидинамику, термодинамику и др. Общее состояние энергетической системы, т. е. стратодинамическое состояние является совокупностью парциальных состояний отдельных форм энергии, как гравитационного, термического и т. п. Общее как и частные состояния системы характеризуются соответствующими параметрами.

Стратодинамическими координатами или основными параметрами состояния энергетической системы рассматриваются давление  $p$ , удельный объем  $v$  и время  $t$ . Стратодинамические координаты изменяются по мере изменения энергетического состояния системы, т. е. основные параметры состояния связаны между собой через энергию. По первому закону стратодинамики мощность  $N_u$  изменения состояния системы равняется

$$N_u = \frac{du}{dt} = \frac{d}{dt}(pv). \quad (19)$$

Кроме основных параметров существуют еще вспомогательные параметры, характеризующие парциальные состояния системы. Между всеми параметрами, как основными, так и вспомогательными существует определенная функциональная зависимость. Например, давление  $p$  является функцией параметров, характеризующих энергетическую напряженность соответствующих парциальных состояний:  $h$  — гравитационную,  $T$  — термическую,  $U$  — электрическую и т. п.

$$p = p(h, T, U, \dots).$$

Основные параметры определяют состояние энергетической системы как в определенные моменты ( $t = \text{const}$ ), так и в стадии изменения состояния системы согласно определенному стратодинамическому процессу. Это обстоятельство позволяет прогнозировать будущее состояние системы через определенный промежуток времени. Для решения установленной задачи необходимо решить уравнения

$$p_1(p, v) = 0; p_2(p, t) = 0; p_3(v, t) = 0.$$

Основные параметры определяют состояние энергетической системы в пространстве  $pvt$ , которое ниже называем реологическим пространством.

Выше приведенные уравнения позволяют проектировать траекторию смещения точки, определяющей состояние системы, на соответствующую плоскость. Наиболее важным из них является первое, позволяющее определить ход изменения параметров  $p$  и  $v$  во функций времени  $t$  на плоскости  $pv$ , т. е. на рабочей диаграмме.

Параметры гравитационного состояния системы —  $p$ ,  $v$  и  $h$  связаны между собой основным уравнением гравитационного состояния, выражаемым символически

$$F(p, v, h) = 0.$$

В этом уравнении можно на два произвольно выбранных параметра смотреть как на независимые переменные, но в то же время третий параметр является ими едино определяемой функцией. Следовательно

$$v = v(p, h); p = p(v, h); h = h(p, v).$$

Аналогично параметры термического состояния системы  $p$ ,  $v$  и  $T$  связаны между собой основным уравнением термического состояния

$$F(p, v, T) = 0.$$

Основное уравнение стратодинамики. Второй закон стратодинамики можно определить основным уравне-

нием стратодинамической системы. Аналитическая форма уравнения зависит от характера протекающего стратодинамического процесса [8].

Выведем уравнение состояния в начале в общей форме, захватывающей все стратодинамические процессы. Рассматриваем изолированную стратодинамическую систему, которая содержит  $G$  кг идеальной среды. Подводим к системе со стороны  $W$   $dW$  энергии. Предполагаем по аналогии с термодинамикой, что за счет подводимой энергии в системе протекает какой-то стратодинамический процесс, при котором часть энергии расходуется на увеличение внутренней энергии, часть на увеличение внешней кинетической энергии, а на основе второго закона стратодинамики остаток внешней энергии должен превращаться в другой вид энергии.

На основе закона сохранения энергии и второго закона стратодинамики можно доказать, что подводимая к системе внешняя энергия  $W$  должна равняться сумме изменений внутренней энергии  $\Delta U$  и внешней кинетической энергии

$$G \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g},$$

а в системе совершенной механической работе—энергии восстановления  $W'$ .

$$W = \Delta U + G \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + W',$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорость движения среды соответственно в начале и в конце процесса.

Разделим все члены уравнения на количество  $G$  среды и получим уравнение на единицу массы среды

$$w = \Delta u + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + w'.$$

Полученное уравнение является аналитической формой второго закона стратодинамики для 1 кг среды. В общем случае в стратодинамике по аналогии с процессами, протекающими в поршневых машинах, член  $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$  равняется практически нулю. Следовательно, уравнение при принятых условиях принимает вид

$$w = \Delta u + w',$$

после дифференцирования которого получим основное уравнение стратодинамики в удобной для применения форме

$$dw = du + dw'. \quad (20)$$

Мощность  $N_w$  изменения энергетического равновесия стратодинамической системы на 1 кг среды равняется

$$N_w = \frac{dw}{dt} = \frac{du}{dt} + \frac{dw'}{dt}.$$

Основное уравнение гравидинамики. Основное уравнение термического состояния — известное уравнение Клапейрона имеет вид

$$pv = RT. \quad (21)$$

Заменяя в этом уравнении термическое напряжение  $T$  гравитационным напряжением  $h$ , уравнение (21) принимает вид

$$pv = R_g h, \quad (22)$$

где  $R_g$  — гравитационная постоянная среды.

Уравнение (22), составленное по аналогии из термодинамики и выдвигаемое постулатом, является основным уравнением гравидинамики при идеальной среде.

После дифференцирования уравнения (22) получим

$$d(pv) = d(R_g h)$$

или

$$vdp + pdv = R_g dh,$$

откуда гравитационная постоянная среды

$$R_g = \frac{vdp + pdv}{dh}.$$

При постоянном объеме  $dv = 0$  и

$$R_g = \frac{vdp}{dh} = \frac{du}{dh} = \frac{c_{vg} dh}{dh} = c_{vg},$$

где  $c_{vg}$  — удельная энергоемкость среды системы при постоянном объеме.

Принимая  $dh = 1$  м, получим

$$R_g = vdp = v\gamma dh,$$

т. е. гравитационная постоянная среды  $R_g$  равняется работе, затрачиваемой на перемещение единицы объема по вертикали на расстояние 1 м. Выражая другими словами, постоянная  $R_g$  равняется изменению внутренней гравитационной энергии системы при перемещении единицы объема на 1 м или удельной энергоемкости при  $dv = 0$ .

При постоянном давлении  $dp = 0$  постоянная  $R_g$  равняется

$$R_g = \frac{pdv}{dh} = \frac{dw'}{dh},$$

т. е. гравитационную постоянную среды можно рассматривать как количество энергии, необходимое для образования или

восстановления полости единичным объемом при гравитационной высоте  $dh = 1 \text{ м}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Кв а п и л. Новые взгляды в теории горного давления и горных ударов. Перевод с чешского. Углетехиздат, М. 1959.
2. Н. O i g l a n e. Mikrofüüsika ja jäävusseadused. «Horisont», nr. 2, 1967.
3. П. М. Ц и м б а р е в и ч. Работа горного давления как термодинамический процесс. Известия АН СССР № 7, 1946.
4. П. Г. Б е р г м а н. Введение в теорию относительности. Перевод с английского. Гос. изд. иностр. лит., М. 1947.
5. Н. O i g l a n e. Vestlus relatiivsusteooriast. «Valgus», Tallinn 1965.
6. Л. Т а л в е. Основы стратодинамической теории крепления горных выработок штангами. Добыча и переработка горючих сланцев, вып. 14. «Недра», Л. 1965.
7. К. Х у а н г. Статистическая механика. Перевод с английского. «Мир», 1966.
8. I. I v a n d. Tehniline termodünaamika I. RK «Teaduslik Kirjandus», Tartu 1947.

## Die Gesetze der Veränderung des Zustands des energetischen Systems

### Zusammenfassung

Nach Schaffen des Hohlraumes versucht das Gebirge sich in den Hohlraum hineinzuschieben. Mit der Zeit entstehen und wachsen in der Umgebung des Hohlraumes inelastische Verformungen und das Gebirge strebt dem ehemaligen Gleichgewichtszustand entgegen.

Bei Forschungen der Mikro- und Makroerscheinungen der Gebirgsmechanik ist zweckmäßig, das energetische Prinzip und die thermodynamische Methode zu benützen. Die Untersuchungen im Gebiet der Gebirgsmechanik führt man im energetisch isolierten Raum, im Gravitationsfeld und bei der kategorischen Berücksichtigung der Zeitfaktor durch.

Analogisch der Thermodynamik werden die Gesetzmäßigkeiten der Verformungen des Gebirges auf dem Grunde der gegebenen Grundsätze untersucht.

УДК 622. 625. 28—83

*А. А. Ренгевич, Э. Я. Йоосеп,  
М. К. Мехеда, А. К. Быля, В. А. Салов*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ НА ЭСТОНСКИХ СЛАНЦЕВЫХ ШАХТАХ

Основным видом подземного транспорта в шахтах эстонского месторождения горючего сланца является электровозная откатка. В 1966 году объем транспортных работ по перевозке ископаемого распределился по видам транспорта: электровозная откатка 88,7%, конвейерный транспорт (все виды) 11,3%.

Удельный вес рельсового транспорта непрерывно увеличивается в связи с переходом на валовую выемку пласта. Электровозная откатка занимает преимущественное положение при больших длинах транспорта и при сравнительно малых грузопотоках. Граница экономической целесообразности применения электровозного транспорта дана во многих источниках [1, 2, 7]. Она зависит от большого числа факторов. Однако при любой величине грузопотока выработки предельным расстоянием конвейерного транспорта в условиях сланцевых шахт является 2... 3 км.

В угольных шахтах США, где достигнута высокая эффективность производства (производительность труда 3... 4 раза больше, чем на сланцевых шахтах), основным видом подземного транспорта является также электровозная откатка [8]. Несмотря на то, что в зарубежной периодике в последнее время опубликовано много статей в пользу конвейерного транспорта, в США, Англии и других странах с развитой горной промышленностью и ныне строятся мощные угольные шахты с электровозной откаткой [6, 7, 8]. Так, например, в Северной Виргинии запроектировано в 1963 году 4 шахты с суточной производительностью в среднем 7250 т каждая, где последним звеном транспорта является электровозная откатка.

В американских шахтах эксплуатируются мощные электровозы сцепным весом до 45 т и вагоны грузоподъемностью 10, 15 и 20 т, движущиеся со скоростью до 15 м/сек [9, 10]. Откаточные пути на главных выработках проложены из рельсов особо тяжелого типа (100 кг/м), а на панельных штреках с малой транспортной нагрузкой из рельсов тяжелого типа (48 кг/м). При таких параметрах откаточного оборудования и при высокой степени использования его достигается высокая эффективность подземного транспорта.

В сланцевых шахтах работают в настоящее время мало-мощные электровозы и вагонетки емкостью до 3,3 м<sup>3</sup>. Экономическим ограничением увеличения габаритов откаточного оборудования являются большие затраты на проведение и содержание выработок. Однако в сланцевых шахтах этот фактор не может быть определяющим. Наоборот, проведение выработок большим поперечным сечением может оказаться экономически более выгодным при условии, что шахты получают универсальные механизмы, которые будут эксплуатироваться с должной эффективностью как в очистных камерах, так и при прохождении откаточных выработок. Кроме того, проветривание очистных камер сланцевых шахт связано с большими трудностями, обуславливающими нарушение нормального производственного цикла, но которые в значительной степени могут быть устранены при увеличении сечения выработок, служащих одновременно для электровозной откатки и пропуска струи чистого воздуха.

Откаточные пути в сланцевых шахтах уложены в основном из рельсов типа Р-24 и только в последнее время осуществляется их медленная замена на рельсы Р-33.

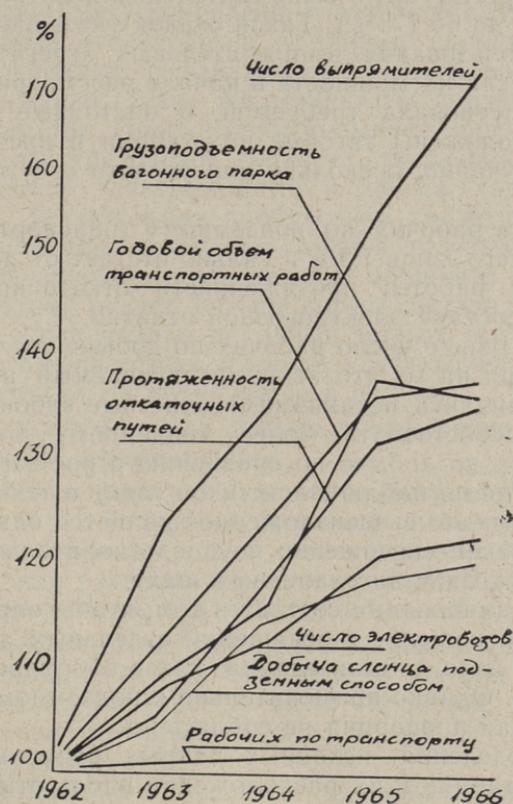
Такое отставание в оснащении электровозной откатки не позволяет достичь высоких показателей этого вида транспорта. В то же время при эксплуатации существующего оборудования имеются серьезные пробелы. Основными причинами, препятствующими оптимальному использованию его, являются:

- 1) неудовлетворительное состояние сети питания электровозов электроэнергией;
- 2) недопустимое состояние рельсовых путей на многих шахтах.

Несмотря на некоторые положительные стороны конвейерного транспорта, его применение на панельных и главных выработках сланцевых шахт явно нецелесообразно.

Основной проблемой транспорта ископаемого на этих шахтах является устранение вышеуказанных недостатков, что позволяет существенно повысить эффективность электровоз-

ной откатки, в настоящее время часто задерживающей работу очистных забоев, а с увеличением объема транспортной работы при переходе на валовую выемку может оказаться узким звеном в технологической цепи добычи сланца.



Фиг. 1. Динамика показателей электровозной откатки на шахтах Эстонского сланцевого бассейна

На графиках (фиг. 1) изображена динамика подземной добычи сланца и показателей электровозной откатки за последние пять лет (1962—1966). За этот период при увеличении добычи с 10,3 до 12,5 млн. т в год (на 21%) объем транспортной работы увеличился на 37%. В еще большей степени увеличилась протяженность откаточных путей (на 43%), что связано с интенсификацией прохождения откаточных выработок в целях предварительного осушения шахтных полей.

Росту объема транспортной работы соответствовало пополнение подвижного состава; суммарная грузоподъемность

вагонеток увеличилась с 11,6 до 15,8 тыс. т (36%) и число электровозов со 150 до 182 (21%), в том числе сцепным весом 10 т и выше на 75%, что указывает на значительный качественный сдвиг в локомотивном хозяйстве.

Резко возросло число выпрямителей для питания контактной сети с 37 до 64 (73%). Такой скачок указывает, что коэффициент использования выпрямительных агрегатов, даже в том случае, если их мощность в начале рассматриваемого периода соответствовала требуемой, в настоящее время очень низкий. Расположены тяговые подстанции в пределах шахтного поля случайно, поскольку для расчета отсутствует методика.

Рост числа рабочих по подземному транспорту за 5 лет составляет всего лишь 1,5% и сильно отстает от роста объема транспортной работы, протяженности откаточных путей и подвижного состава электровозной откатки.

При этом общее число рабочих по добыче увеличилось на 3,5%, несмотря на то, что за рассматриваемый период в основном пополнялись механизмами очистные забои. Это должно было способствовать более медленному росту общего числа рабочих по добыче по сравнению с ростом рабочих по транспорту, где не наблюдался такой сдвиг в техническом оснащении. Очевидно вышеизложенное является одной из более серьезных причин совершенно неудовлетворительного состояния путевого хозяйства сланцевых шахт.

Задача планирования состоит в том, чтобы определить оптимальное соотношение в оснащении отдельных звеньев технологической цепи добычи сланца как в оборудовании, так и в живой силе. Однако применительно к подземному транспорту необходимая пропорция не соблюдена.

Для определения исходных данных расчета мощности тяговых подстанций и их расположения вдоль откаточных путей летом 1966 года Днепропетровским горным институтом совместно с Таллинским политехническим институтом\* были проведены исследования эксплуатационных режимов электровозной откатки на шахтах № 7 и № 8 треста «Эстонсланец», с применением шахтного измерительного вагона конструкции Днепропетровского горного института [11].

В результате математической обработки экспериментальных данных получены:

1) коэффициент сцепления при тяге и торможении в условиях сланцевых шахт;

---

\* Состав испытательной группы: от ДГИ—кн Мехеда М. К., кнт Быля А. К., инженеры — Салов В. А., Колпаков В. А.; от ТПИ — инж. Иоосеп Э. Я. Руководитель работы — проф. Ренгевич А. А. (ДГИ).

2) удельное основное сопротивление движению вагонеток типов ВШ-5Т и УВД-3,3, в зависимости от скорости движения поезда;

3) выяснена эффективность различных способов торможения поезда.

Исследованиями установлено, что в ряде случаев на шахтах при работе электровозов возникает пробуксовка колес ведущих полускатов, составляющая 30—40% поступательной скорости движения. Такие же результаты получены на шахтах Донбасса [13]. Пробуксовка вызывает пропорциональное уменьшение поступательной скорости движения поезда, увеличение расхода электроэнергии и износа ходовых частей электровоза. Значительная пробуксовка также связана с перегревом и сокращением срока службы тяговых двигателей, требует необоснованного увеличения мощности тяговых подстанций. Поэтому расчет весовой нормы состава должен базироваться на обоснованных исходных данных, прежде всего на достоверном в конкретных условиях коэффициенте сцепления, значение которого на исход расчета велико.

Значение коэффициента сцепления определено на основании порядка 650 опытных точек.

Для наиболее распространенного состояния рельсов на сланцевых шахтах (влажные, грязные) расчетный коэффициент сцепления равен 0,11, т. е. значительно меньше, чем рекомендуется для расчетов электровозной откатки железорудных шахт, но больше, чем для угольных шахт.

Однако, несмотря на это, ограничивающим при определении весовой нормы состава являются не условия сцепления, а условия торможения (при больших скоростях движения) и при протяженности откатки больше 1,5—2,5 км — условия нагрева тяговых двигателей.

Одним из основных расчетных элементов, определяющим весовые нормы состава, скорости движения поездов, мощности тяговых подстанций и расход электроэнергии на электровозный транспорт, является сопротивление движению вагонеток в составе.

Правильное определение этих показателей в соответствии с действительными величинами сопротивления движению позволяет рационально использовать подвижной состав, питающие тяговую сеть выпрямители и прочее оборудование электровозного транспорта, а также правильно планировать расход электроэнергии для электровозной откатки.

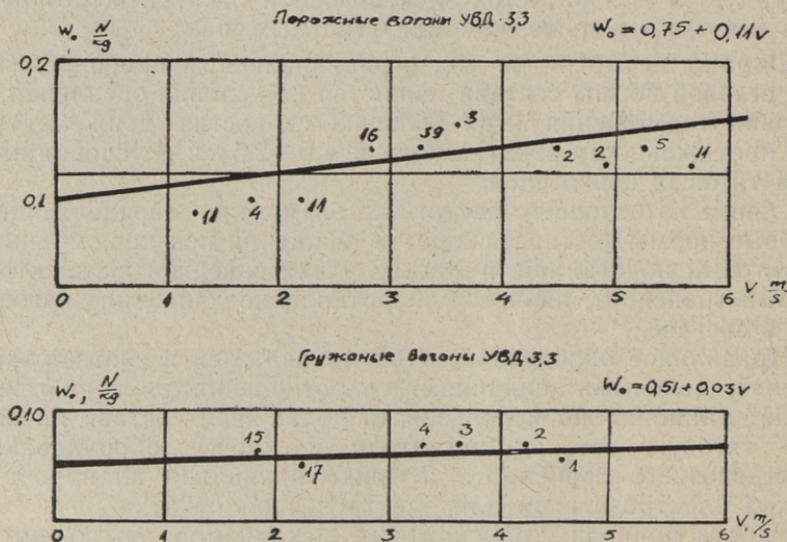
Работа привода транспортных механизмов заключается, главным образом, в преодолении основного сопротивления движению. Поэтому определению его уделяется большое вни-

мание как в области рудничной электровозной тяги, так и во всех видах транспорта [14].

Спротивление движению одиночных вагонеток может быть определено методом скатывания. Но этот метод не приемлем для определения основного сопротивления движению вагонеток в составе. Последнее может быть определено в шахтных условиях, применяя динамометрическую аппаратуру, используемую и при определении коэффициента сцепления.

Спротивление движению вагонов в составе зависит от их ходовых качеств и состояния рельсового пути. К сожалению в настоящее время отсутствует аппаратура, быстро дающая объективную оценку о качестве путей. Поэтому для проведения исследований на шахтах № 7 и № 8 были выбраны участки откаточных путей, качество которых по внешнему осмотру было признано удовлетворительным.

На шахте № 7 эксплуатируются вагоны типа УВД-3,3 Киселевского машиностроительного завода, которые ранее не подвергались исследованиям с целью определения основного сопротивления движению в составе поезда. В результате обработки экспериментальных данных получено основное удельное сопротивление движению порожних и груженых вагонеток в составе, как функция скорости движения поезда, которая изображена на фиг. 2.



Фиг. 2. Удельное сопротивление движению вагонов УВД-3,3 в составе

На шахте № 8 такие же данные получены для вагонов типа ВШ—5Т. Обработка опытных точек, полученных через каждые 20 м пути, дали уравнения  $\omega = f(v)$ , приведенные в таблице.

Таблица 1

Тип вагонеток	Загрузка вагонеток	Удельное основное сопротивление движению, $H/T$
УВД — 3,3 (шахта № 7)	груженные порожние	$51 + 3v^*$ $78 + 11v$
ВШ—5Т (шахта № 8)	груженные порожние	$66 + 7v$ $9 + 2v$

\*  $v$  — м/сек.

Третья серия опытов была проведена с целью получения исходных данных для решения тормозных задач. В результате обработки экспериментальных данных получены значения коэффициента сцепления, реализуемые при торможении в зависимости от скорости скольжения тормозных колес  $U$  (м/сек) — при динамическом и механическом (с помощью пневмопривода) торможении, а также при торможении противовключением:

при динамическом торможении

$$\Psi = 0,144 - 0,012 U;$$

при торможении противовключением

$$\Psi = 0,143 - 0,0002 U;$$

при механическом торможении с применением пневмопривода

$$\Psi = 0,089 - 0,007 U.$$

В качестве расчетного значения коэффициента сцепления при электрическом торможении можно рекомендовать величину  $\Psi = 0,12 - 0,13$ , которая получается умножением потенциальной величины его (0,144) на коэффициент запаса 0,9.

С точки зрения реализации касательной тормозной силы наиболее эффективным является динамическое торможение. При этом можно осуществить достаточно быстрый переход от режима тяги к режиму торможения. Несмотря на то, что и этот вид торможения сопровождается пробуксовкой колес электровоза, здесь полной блокировки осей наступить не может, поскольку прекращение вращения тормозных колес вызывает потерю тормозного момента на оси. Однако при динамическом торможении нельзя затормозить поезд до полной останов-

ки; поэтому необходимо пользоваться механическим торможением.

Полученные данные позволили установить, что весовая норма в сланцевых шахтах, как правило, определяется нагревом тяговых двигателей. Нагрев двигателей вносит ограничения при большой длине откатки, что связано с увеличением эквивалентного тока при постоянной величине весовой нормы. Особенно заметно влияние длины откатки на весовую норму при наличии подъемов в грузовом направлении. Поэтому при вывозке ископаемого на подъем нужно чаще перерасчитывать весовые нормы электровозной откатки по мере изменения расстояния транспортирования.

При больших скоростях движения (3—3,5 м/сек и более) ограничивающим фактором является условие торможения.

Расчеты весовой нормы состава по существующим методам не учитывают отклонения напряжения контактной сети от номинального или же учитывают введением некоторого постоянного коэффициента. Такое пренебрежение этим важным фактором может привести к неправильным выводам при определении весовых норм.

Скорость вращения двигателей постоянного тока прямо пропорциональна напряжению на их зажимах. Поэтому отклонение напряжения контактной сети от номинального вызывает примерно такое же отклонение скорости движения электровоза от скорости, определяемой по характеристике двигателей. Следовательно, при пониженном напряжении уменьшается скорость и увеличивается время движения, что вызывает увеличение среднеквадратичного тока за цикл.

Потери напряжения пропорциональны току и сопротивлению тяговой сети.

Исследования на шахтах № 10 и № 8 показали, что сопротивление сети может достичь 10-кратной величины от расчетного сопротивления. Потери напряжения контактной сети в связи с этим далеко превосходят допустимые [1]. По данным измерений, произведенных на шахте № 10, напряжение на удаленных точках тяговой сети находится в пределах 120—140 в при напряжении на шинах тяговой подстанции 280 в. Следовательно, падение напряжения в тяговой сети достигло 160 в, т. е. 57%. Примерно такие же результаты получила кафедра электротехники и электрических машин Ленинградского горного института при измерениях на других сланцевых шахтах.

Основным мероприятием по улучшению проводимости тяговой сети является обеспечение хорошего электрического соединения рельсов. К сожалению в настоящее время этому вопросу на сланцевых шахтах не уделяется достаточного вни-

мания. Если даже удастся обеспечить идеальные, с точки зрения электрической проводимости, соединения и тем самым получить действительное сопротивление тяговой сети, близкое к расчетному сопротивлению, значительные нагрузки на сеть, имеющие место в сланцевых шахтах, вызывают при существующей схеме питания недопустимые потери напряжения.

Увеличение проводимости тяговой сети при помощи дополнительных подпитывающих проводов и кабелей связано с неоправданными затратами.

Уменьшение тока в тяговой сети может быть достигнуто сокращением расстояния между точками питания и потребления электроэнергии, т. е. между электровозами и тяговыми подстанциями.

В настоящее время осуществляется замена ртутных выпрямителей на кремниевые. При этом нужно использовать преимущества последних, заключающиеся в компактности и простоте обслуживания. Ртутные выпрямители работали плохо при отрицательных температурах, поэтому они могли быть установлены только на главных подстанциях или в подземных камерах. Устройство последних в соответствии с правилами безопасности связано со значительными затратами. Поэтому наблюдалось стремление обойтись меньшим числом тяговых подстанций, концентрируя в них большие мощности. По традиции такой же подход наблюдается к кремниевым выпрямителям.

Расчет показывает, что выпрямительный агрегат для питания тяговой сети подземной электровозной откатки номинальным током 500 а при номинальном напряжении сети 250 в не может быть эффективно использован из-за недопустимой потери напряжения в конце плеча питания. Наличие кремниевых вентилях большой шкалы номинального тока позволяет комплектовать выпрямители любой мощности, шкала которой будет определяться в основном мощностью трансформаторов.

Такие агрегаты могут быть установлены в трансформаторных киосках и питать тяговую сеть через скважины. Это позволяет располагать их в наиболее удобном месте, с точки зрения обеспечения необходимого уровня напряжения тяговой сети, и оперативно изменять место расположения точки питания в зависимости от изменения транспортных потоков в подземных выработках.

Однако использованию повышенной скорости, достигаемой в результате нормализации напряжения, может препятствовать неудовлетворительное состояние откаточных путей сланцевых шахт. Поэтому одновременно с упорядочением питания тяговой сети необходимо привести откаточные пути в соответствие с требованиями правил безопасности.

## Выводы

1. В связи с переходом на валовую добычу пласта объем транспортных работ в сланцевых шахтах резко увеличивается.

2. Преимущества применения более мощного оборудования электровозной откатки на сланцевых шахтах очевидны.

3. Основными причинами, препятствующими оптимальному использованию существующего оборудования электровозного транспорта являются недостатки в системе питания тяговой сети и неудовлетворительное состояние рельсовых путей.

4. Экспериментально определены:

а) коэффициент сцепления при тяге и торможении,

б) удельное сопротивление движению вагонов ВШ-5Т и УВД-3,3.

5. Весовая норма состава в сланцевых шахтах определяется в основном нагревом двигателей.

6. Повышение напряжения тяговой сети позволяет увеличить весовую норму состава и улучшить основные показатели работы электровозной откатки.

7. Основным мероприятием повышения напряжения тяговой сети является раздробление питающей мощности и распределение ее по всему полю потребления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шахтный транспорт. Справочник. «Недра», Москва 1964.
2. В. А. Леонов, В. М. Кузнецов. Область эффективного применения локомотивного и конвейерного транспорта на откаточных выработках шахт. «Уголь Украины», № 12, 1963.
3. K. Brandt. Wirtschaftliche Zuförderung unter Tage. Glückauf Forschungshefte № 3, 1965.
4. П. З. Звягин, С. М. Гаркави, А. Ю. Саховалер, В. П. Рыбаков, Р. Ф. Шютц. Опыт реконструкции шахт в Великобритании, Франции и ФРГ. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований угольной промышленности. Москва 1966.
5. Underground Transportation (foreword). Mechanization, «The Magazine of Modern Coal» № 4, 1962.
6. Ян Зламал. Уникальное решение способа разгрузки шахтных вагонеток. «Чехословацкая тяжелая промышленность» № 11, 1966.
7. Mining Projection in Northern Virginia. Transaction of the Society of Mining Engineers of AIME. Vol 223, 1962.
8. Thoresby Colliery. «Colliery Engineers» № 3, 1965.
9. Present Mine Transportation Trends. «Coal, Gold and Base Minerals of South Africa» № 8, 1966.
10. Die Entwicklung der Fahrdrat-Lokomotive in ostfranzösischen Erzbergbau «Schlägel und Eisen» № 11, 1966.

11. А. А. Ренгевич, Б. А. Кузнецов. Шахтная динамометрическая вагонетка и ее аппаратура. Вопросы рудничного транспорта. Выпуск 2. Углетехиздат, Москва 1957.
12. А. В. Рысев. Новые исследования в теории рудничной откатки. Транспорт шахт и карьеров в социалистических странах. Госгортехиздат, Москва 1962.
13. А. А. Ренгевич. Некоторые выводы по исследованиям электровозной откатки, проведенным на шахтах Донбасса. Транспорт шахт и карьеров в социалистических странах. Госгортехиздат, Москва 1962.
14. П. Н. Астахов. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. «Транспорт», Москва 1966.
15. Экспериментальные исследования методов увеличения производительности ведущих осей рудничных электровозов. Отчет по теме № 503. Ленинградский горный институт, Ленинград, 1958.

*A. Rengevitsh, E. Joosep,  
K. Meheda, A. Boelja, V. Salov*

## Experimental Studies of Underground Loco Transportation in Estonian Oil Shale Mines

### Summary

Introductory remarks on the great importance of trolley wire loco haulage in Estonian oil shale mines for transportation of rock pile, materials and men. Due to increasing overall output and haulage distance it is necessary to discover potentialities to increase the intensification of underground main haulage.

The studies show that principle possibilities to increase the haulage capacity are:

1. Diminution of voltage drop in the trolley network.
2. Improvement of underground track conditions.

The paper describes results obtained by tests in Estonian oil shale mines No 7 and No 8 to determine direct measuring value of the limit of adhesive force for all conditions of haulage track.

They are followed by a description of practical experiments made to determine the running resistance. For the train resistance linary dependent on the speed  $v$  ( $m/s$ ), the equation may be written as follows:

1. For the empties train consisting of cars УВД-3,3

$$w_0 = 78 + 11v N.$$

2. For the ore train consisting of cars УВД-3,3.

$$w_0 = 51 + 3v N.$$

3. For the empties train consisting of cars ВШ-5Т

$$w_0 = 90 + 2v N.$$

4. For the ore train consisting of cars BIII-5T

$$w_0 = 66 + 7v N.$$

For diminution a voltage drop it is necessary to increase the number of haulage powersubstations and dissipate them over the mine field.

Conclusions are drawn from the results obtained and are advisable to be used in future project planning of underground hauling.

Э. А. Люютре

## О КОЭФФИЦИЕНТЕ ТРЕНИЯ ПРИ БУРЕНИИ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Для количественного определения сил трения, возникающих при бурении-резании горных пород твердосплавным инструментом, нужно определить коэффициент трения между твердым сплавом и породой.

По классическим законам Кулона коэффициент трения не зависит от удельного давления между скользящими поверхностями, а также от скорости скольжения. И хотя общеизвестно, что законы Кулона весьма приближенные, однако, исследователи часто не обращают на это должного внимания.

В настоящей работе исследовано влияние удельного давления и скорости скольжения на коэффициент трения между твердым сплавом ВК-8 и известняком (Ласнамяэский горизонт,  $\sigma_{сж} = 1100 \text{ кг/см}^2$ ).

В шпинделе сверлильного станка укреплен стержень диаметром  $D = 13 \text{ мм}$ , торцевая площадка которого армирована пластинкой из твердого сплава ВК-8. Стержень силой  $Q$  прижат к поверхности породы и вращается с угловой скоростью  $\omega$ . При испытании определили вращающий момент  $M$  на шпинделе, который вычисляли по показаниям самопишущего ваттметра, силу  $Q$  и угловую скорость  $\omega$ . Использование круглой пластинки твердого сплава, вращающейся на поверхности породы, предотвращает внедрение последнего в породу при довольно высоких удельных давлениях.

Данные испытания приведены в таблице 1.

На фиг. 1 приведена зависимость  $M = \varphi(\omega)$ . Математическая обработка опытов 1 — 9 устанавливает следующую зависимость:

$$M = 0,72 e^{-0,035\omega} + 0,38 \text{ кгм},$$

при удельном давлении  $283 \text{ кг/см}^2$ .

Момент сил трения между известняком и вращающим диском твердого сплава ВК-8

№	$\omega$ 1/сек	Q кГ	M кГм	q кГ/см <sup>2</sup>	Коэффициент трения	
					по формуле (I)	по формуле (III)
1	10	375	0,92	283		
2	14	375	0,80	283		
3	21	375	0,68	283		
4	28	375	0,73	283		
5	40	375	0,54	283		
6	57	375	0,46	283		
7	71	375	0,43	283		
8	100	375	0,40	283		
9	142	357	0,38	283	0,23	0,23
10	142	287	0,29	216	0,23	0,25
11	142	200	0,27	151	0,31	0,29
12	142	160	0,26	121	0,27	0,33
13	142	116	0,19	88	0,38	0,39
14	142	75	0,16	57	0,49	0,51
15	142	36	0,13	27	0,83	0,90

Видно, что при увеличении скорости скольжения момент сил трения быстро снижается и принимает постоянное значение  $M = 0,38$  кГм. Коэффициент трения вычисляется по формуле

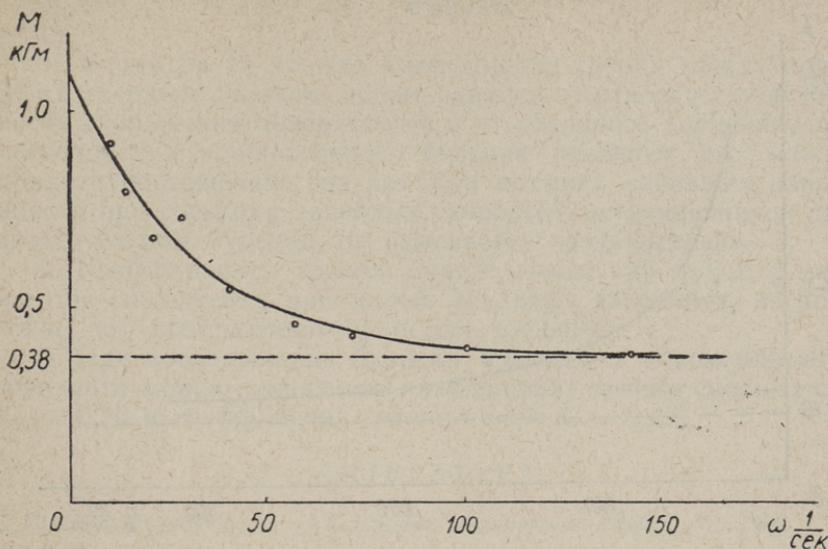
$$f = \frac{3M}{2QR}, \quad (1)$$

приведенной в литературе [1]. Вычисленный по этой формуле коэффициент трения является коэффициентом трения при спектре скоростей от 0 (на оси вращения) до  $v_{\max}$  (на краю пластинки). При вращательном бурении в породах  $f \approx 10$  применяемые максимальные линейные скорости резания достигают порядка 1,0 м/сек. В нашем опыте этому спектру скоростей соответствует угловая скорость

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{1,0}{0,0065} \approx 150 \text{ 1/сек.}$$

Как видно из фиг. 1, момент сил трения при этом спектре скоростей является практически постоянным. Отсюда следует, что при интересующих нас скоростях вращения шпинделя коэффициент трения скольжения является постоянным и по формуле (1) равен

$$f_{\text{скл}} = \frac{3 \cdot 0,38}{2 \cdot 275 \cdot 0,0065} = 0,23.$$



Фиг. 1

Коэффициент трения покоя

$$f_{n1} = \frac{3 \cdot 1,1}{2 \cdot 375 \cdot 0,0065} = 0,68.$$

Оба коэффициента вычислены при удельном давлении 283 кг/см<sup>2</sup>.

Выясним, как влияет удельное давление между скользящими поверхностями на величину коэффициента трения. Математическая обработка опытов 9—15 устанавливает между величинами  $M$  и  $Q$  зависимость вида

$$M = M_0 + aQ.$$

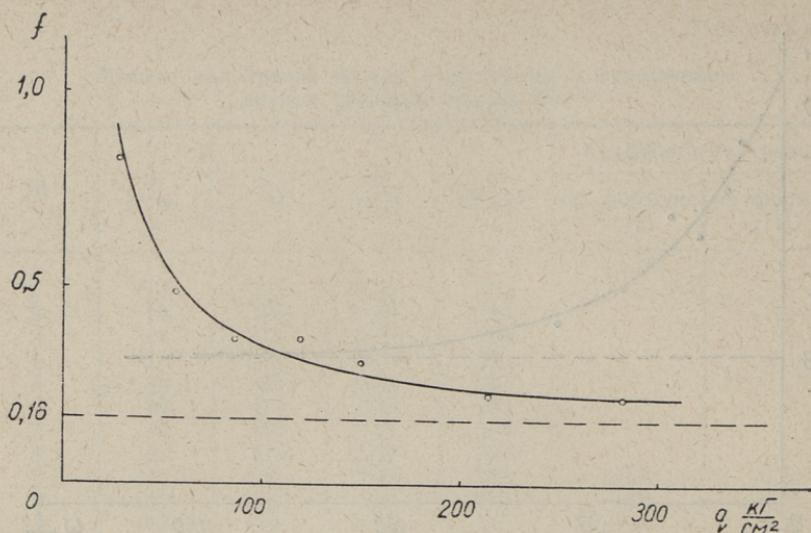
Отсюда следует, что момент сил трения включает в себе величину  $aQ$ , которая пропорциональна давлению между скользящими поверхностями, и величину  $M_0$ , которая не зависит от давления, но зависит от способностей соприкасающихся поверхностей к предварительной сцепленности.

Подставляя  $M$  в формуле (1), получим

$$f = \frac{3M_0}{2QR} + \frac{3a}{2R}.$$

Так как  $Q = \pi R^2 q$ , где  $q$  удельное давление, получим

$$f = \frac{3M_0}{2q\pi R^3} + \frac{3a}{2R}. \quad (2)$$



Фиг. 2

Определяя по методу наименьших квадратов  $M_0$  и  $a$ , и подставляя все численные величины в формулу (2), получим

$$f = \frac{20}{q} + 0,16. \quad (3)$$

где  $q$  — удельное давление,  $кг/см^2$ .

Формула (3) выведена при условии  $q > 25$   $кг/см^2$ . На фиг. 2 приведен график  $f = \varphi(q)$ , из которого видно, что коэффициент трения при увеличении удельного давления быстро уменьшается и имеет предельное значение  $f = 0,16$ , когда  $q \rightarrow \infty$ . Учитывая это, можно без особой погрешности принимать коэффициент трения скольжения при спектре скоростей резания от 0 до 1,0  $м/сек$ ,  $f_{ск} = 0,16$ .

Предполагая, что коэффициенты трения покоя при разных удельных давлениях относятся как коэффициенты трения скольжения, коэффициент трения покоя под резцом будет равен

$$f_n = \frac{f_{n1} \cdot f_{ск}}{f_{ск1}} = \frac{0,68 \cdot 0,16}{0,23} = 0,47.$$

Все полученные результаты качественно хорошо согласуются с положениями, изложенными акад. И. И. Артоболовским [1].

## Выводы

1. Несмотря на то, что коэффициент трения между породой и твердым сплавом сильно зависит от относительной скорости скольжения поверхностей и от удельного давления, при исследовании вращательного бурения резанием его можно принять постоянным, так как при высоких удельных давлениях и при спектрах линейных скоростей, встречающихся при вращательном бурении, он изменяется незначительно.

2. Коэффициенты трения, определенные при покое, а также при скольжении при малых удельных давлениях, не пригодны для исследований процессов бурения.

3. При исследовании бурения известняка Ласнамяэского горизонта можно принимать коэффициент трения скольжения  $f_{ск} = 0,16$  и коэффициент трения покоя  $f_n = 0,47$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Артоболевский. Теория механизмов. Наука, М., 1965.

*E. Lüütte*

## The Coefficient of Friction in Rotary Boring

### Summary

This article deals with the influence of the specific pressure and the sliding speed to the coefficient of friction between the hard-facing alloy BK-8 and limestone.

It has been experimentally determined that the coefficient of friction becomes smaller when the sliding speed increases and at specific pressure 283 kg/cm<sup>2</sup> has its minimum limit of 0.16.

The dependence of the coefficient of friction on the specific pressure may be expressed as a formula

$$f = \frac{20}{q} + 0,16,$$

where  $q$  is specific pressure expressed in terms of kg/cm<sup>2</sup>.

This formula is applicable if  $q > 25$  kg/cm<sup>2</sup>.

The results of the investigation may be used to calculate the force of friction in drilling hard limestone.

1. Л. Г. Талве. Законы изменения состояния энергетической системы Die Gesetze der Veränderung des Zustands des energetischen Systems (Zusammenfassung) . . . . .	3 16
2. А. А. Ренгевич, Э. Я. Йоосеп, М. К. Мехеда, А. К. Быля, В. А. Салов. Исследование эксплуатационных режимов электро- возной откатки на эстонских сланцевых шахтах . . . . . Experimental Studies of Underground Loco Transportation in Estonian Oil Shale Mines (Summary) . . . . .	17 27
3. Э. А. Люютре. О коэффициенте трения при бурении режущим инструментом . . . . . The Coefficient of Friction in Rotary Boring (Summary) . . . . .	29 33





ТРУДЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ  
СБОРНИК СТАТЕЙ IV

Таллинсий политехнический институт

Редактор Х. Арукюла

Технический редактор Я. Мыттус

Сдано в набор 28 XII 1967. Подписано к печати  
29 V 1968. Бумага 60×90<sup>1/16</sup>. Печатных листов  
2,25. Учетно-издательских листов 1,75. Тираж 500.

МВ 05086. Заказ № 3829.

Типография «Пунане Тяхт», Таллин,  
ул. Пикк 54/58.

Цена 17 коп.



Цена 17 коп.