

26  
439

BOUR INSTITUTE

1.  
THE CENTRAL LA

MOSKOW

RESEARCH OF

ЦИТ

ИССЛЕДОВАНИЯ



МОСКВА  
1923

FORSCHUNGEN DES  
ZENTRALEN  
ARBEITSINSTITUTS  
M O S K A U.

БИБЛИОТЕКА  
ЦЕНТРАЛЬНОГО РАБОЧЕГО  
ИНСТИТУТА

# ИССЛЕДОВАНИЯ.

I, 1.

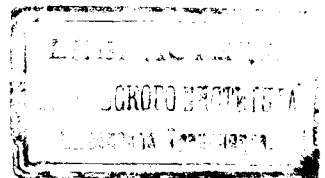
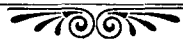
## ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ.

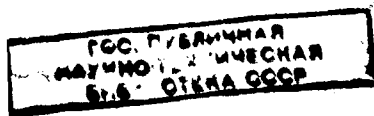
**Н. П. ТИХОНОВ:** Изучение трудовых движений при помощи циклографического метода.

**Н. А. БЕРНШТЕЙН:** Исследования по биомеханике удара с помощью световой записи.

**А. П. БРУЖЕС:** Метод экспериментального исследования мышечных напряжений при трудовых движениях. (Метод миограмм).

**А. П. БРУЖЕС:** Прибор для непосредственной записи колебаний центра тяжести живой машины. (Предварительное сообщение).





Шифр книги  
(для библиотек):

331.87
Ц 39

Обложка работы **Б. С. Никифорова.**

Книгоиздательство ЦИТ отмечает исключительную энергию, проявленную заведующим и рабочими типографии ЦИТ: В. Г. Смирновым, И. П. Новиковым, К. С. Заволокиным, П. А. Митюшиным, А. И. Гавриличевым, И. С. Амосовым, А. А. Зильберманом, С. Ф. Дербышевым, П. Г. Смирновым, Н. В. Барановым, М. Ф. Федотовым, С. Е. Киселевым, М. М. Костюриным, И. Д. Новиковым, М. И. Бубенцовым и А. Е. Шленовой,—набравшими и напечатавшими настоящую книгу в короткий срок при малоблагоприятных технических условиях.

## От редакции.

Предлагаемая вниманию читателей книжка «Исследований Ц. И. Т.» является первым выпуском серии, содержащей в себе результаты работы лабораторий, входящих в состав Отдела Изысканий Ц. И. Т.

Проблема изучения профессионального труда является проблемой очень сложной и многогранной, как по количеству объектов изучения, так и по разнообразию подходов и методов. Ни одно учреждение в мире не может охватить всю эту проблему в целом, и мы действительно видим, как различные институты в разных странах специализируются на той или иной стороне всей проблемы.

Комитет Изысканий (Ученый Совет) Ц. И. Т. в самом начале организации изысканий посвятил много времени выбору объекта исследований и методов изучения этого объекта.

Центральный Институт Труда решил тогда сосредоточить внимание всех лабораторий на объекте, сравнительно, небольшом, но изучать его возможно полнее и равностороннее, со всех точек зрения, а именно, с точки зрения технической, био-механической, физиологической, психологической, педагогической и организационной.

Сужение поля внимания лабораторий диктовалось необходимостью выработать методологию исследования и создать заново весь кадр научных работников Института, так как вопросами труда до создания ЦИТ'а в России почти не интересовались. Этот подход оказался совершенно правильным. Институт не расплылся в многообразии объектов, а сосредоточил свое внимание на очень малом количестве объектов, изучая их всесторонне, и выработал свой собственный метод исследования.

База, на которой Институт начал свою работу, была, по необходимости, узкой, и лишь по мере своего роста, Институт стал переходить мало по малу к проблемам более сложным.

В качестве объекта для изучения всех 7-ми лабораторий Института, была избрана, по плану заведующего Инститutom тов. А. К. Гастева, не отдельная профессия, представляющая собой нечто весьма сложное, даже не отдельная специальность, а элемент всякой профессиональной работы—рабочая операция.

В качестве таковых были выбраны операции ударная и нажимная, являющиеся типичными и характерными для одной специальности профессии металлиста,—для специальности слесаря.

Но эти операции встречаются не только в профессии металлиста. Они являются принадлежностью целого ряда других профессий, и выводы, полученные вследствие изучения операций, применяемых при обработке металла, могут с небольшими изменениями быть приложены и к другим профессиям.

Выше уже было указано, что эти две операции,—ударная и нажимная, являются предметом исследования всех 7-ми лабораторий Института. Последние—связаны между собой операционной зависимостью, и данные, полученные в одной лаборатории, поступают в следующую, которая свои исследования строит на основании изучения данных предыдущих лабораторий.

Лаборатория № 1, Фото-кино, является лабораторией наблюдения и фиксажа изучаемых явлений и, как таковая, представляет в распоряжение следующих за ней лабораторий, главным образом, био-механической, фото-и кино-снимки операций.

Лаборатория № 2, Техническая, занята изучением технико-обработочных методов, в приложении к операциям ударным и нажимным; она изучает материал, форму и вес инструментов, применяемых в этих операциях—молотка, зубила и напильника.

Лаборатория № 3, Био-механическая, изучает трудовые движения человека, определяя их траекторию, скорость и ускорение, силу и, на основании анализа, создает **нормали** движений.

Настоящий выпуск «Исследований» содержит работу 2-х лабораторий—Фото-кино и Био-механической над одним только объектом—рубкой зубилом, типичной ударной операцией.

Лаборатория №4, Физио-техническая, изучает работу человека, т.-е, обмен веществ и энергетический баланс в теле работающего человека и изменение физиологических состояний при работе.

Лаборатория № 5, Психотехническая, сосредоточивает свое внимание на изучении психологии работы и создает психogramмы отдельных операций, а не профессий, на основании анализа работ с психологической точки зрения.

Первые 5 лабораторий представляют собой, уподобляя Отдел Изысканий Ц. И. Т.—заводу, обработочные цеха; сборочным же цехом являются лаборатории Педагогическая и Социально-инженерная, которые, на основании данных, полученных первыми 5-ю лабораториями, вырабатывают методы обучения трудовым операциям и организации самой работы.

Лаборатория № 6, Педагогическая, вырабатывает методы тренировки для совершения тех или иных рабочих операций и, путем постепенного усложнения движений, достигает окончания обучения в значительно более короткий срок, чем обычно.

Лаборатория № 7, Социально-инженерная, изучает работу не одного человека, как предыдущие, а работу коллектива, работу целой мастерской, целой канцелярии, целого учреждения. Вопросы расстановки рабочих мест и помещений, движения материала, движения рабочих листков, учета работы, все это входит в сферу ведения лаборатории № 7.

Работы, помещенные в настоящей книге, являются результатом изучения движений при слесарной рубке зубилом. Но они имеют значение и для большинства человеческих трудовых движений, благодаря универсальности применяемых методов. Наиболее далеко идущим в этом отношении является метод *хроноциклографический*, позволяющий, не внося расстройств в самое изучаемое движение, графически, с очень большой точностью записать основные его элементы и затем, на основании анализа этих элементов, устранять часть движений, физиологически нецелесообразных, заменяя их более соответствующими анатомо-физиологическому устройству человеческого организма. Но и такой циклогра-

фический метод все же не дает совершенно полного представления об изучаемом движении.

Лаборатории Ц. И. Т. в качестве подсобного метода применяли метод миографический, значительно менее разработанный, чем первый метод. Миографический метод позволяет изучать время вступления различных мышц в работу и характер их сокращений в тот или иной момент движения. Сопоставляя данные изучения трудовых движений одновременно обоими методами и анализ данных, полученных таким образом, оказывается возможным действительно выяснить весь механизм изучаемого движения.

Это обстоятельство дает надежду на то, что Ц. И. Т'у удастся в дальнейшем конструировать трудовые движения человека не путем механической экономизации движений, как применял ее Джильбрет, а путем изменения их в точном соответствии с физиологическим устройством человеческого организма.

**Б. Бабин.**

**А. Гастев.**

**К. Кекчев.**



# Изучение трудовых движений при помощи циклографического метода.

Проф. Н. П. Тихонов, Завед. Фото-Кино Лабораторией (№ 1).

1. История развития метода.—2. Пространственное изображение временных процессов.—3. Фотографические основы циклографического метода.—4. Аппаратура для с'емки.—а) Помещение.—б) Фон.—в) Камера.—г) Стереоскопическая камера.—д) Диск для отметки времени.—е) Лампочки для с'емки.—ж) Схема электрической установки.—5. Аппараты для анализа.—а) Увеличительный прибор.—б) Измерение стереоскопических циклограмм.—в) Измерение стереомикрометром.—6. Изучение удара и специальная методика ЦИТ'а.—7. Синтез движений.

Интерес, вызванный в России после 1-й Всероссийской Конференции по научной организации труда в 1921 году, к изучению движений помощью научных фото и кинематографических методов в окончательном своем виде вылился в способ циклографический, предварительное сообщение о котором автор настоящей статьи и д-р К. Х. Кекчеев сделали на упомянутой конференции.

Центральный Институт Труда, который является основным учреждением России по изучению трудовых процессов, в своей брошюре «Структура ученой работы ЦИТ'а» (1) определенно указывает на преобладающее значение циклографической фотографии в деле изучения движений. Им организована и специальная лаборатория (№ 1, Фото-Кино), в которой мне и удалось подробно разработать методику при непосредственном участии Инспектора Изысканий ЦИТ'а д-ра К. Х. Кекчеева, научных сотрудников И-та д-ров А. П. Бружес, Н. А. Бернштейна и моего непосредственного помощника инженера А. А. Ялового.

За истекшие два года от момента появления книжки Таунсенда (2) «Волшебство в изучении движений»—(первой на русском языке) до сегодняшнего дня мы должны отметить громадный прогресс в применении циклограмм, не только, как быстрого способа регистрации, но и как точного метода исследования, обладающего уже математическим фундаментом и дающего определенные формулы.

ЦИТ определенно формулирует задачу нашей лаборатории: «Она должна раскрывать разложенную картину трудовых процессов и движений. В этой же лаборатории несомненно будут получаться и наиболее ценные научные выводы. Лаборатория в результате своей аналитической работы должна давать механическую формулу трудовых движений, которые далее будут использованы биомеханически.» Лаборатория движений, аналитически вскрывая трудовые движения, дает синтетическую формулу должных движений, но это еще не решает вопроса о том, каким образом давать инструкцию работы. Лаборатория лишь отбрасывает все

ненужные, засоряющие движения, оставляет движения основные, но своими лабораторными средствами не может научить вполне, «как надо работать».

Сейчас наша лаборатория еще более с'узила свою задачу. Она только «фиксирует» движения; анализ их—дело органически связанной с нами биомеханической лаборатории. Выработанные ею нормальные приемы снова направляются к нам для вторичной проверки сокращенных движений, и конечный результат—кино-картина, иллюстрация, показывающая в разложенном—замедленном и нормальном темпе, как и какими приемами производится данная работа, также изготавливается нами.

## 1. История развития метода.

Начало метода циклограмм мы должны отнести к началу 70-х годов, когда Muybridge E.—(3), пользуясь несколькими, поставленными в ряд аппаратами, снимал последовательные фазы движения с промежутками в  $\frac{1}{5}$  сек. Anschütz (4) (1885 г.) повторил эти опыты с большим успехом, благодаря значительному усовершенствованию фотографии в это время. Проф. Marey E. (5) в 1879 г. изучал ходьбу, в 1891 г. Braune и Fischer (6) также начали изучать ходьбу, пользуясь методом Marey'я, т.-е. снимая идущего человека несколько раз на одну пластинку, но введя и значительное усовершенствование: прикрепляя к соответствующим членам Гейслеровы трубки, работая прерывистым током и получая таким образом график движения в определенных сочленениях. В этом же направлении работали Mach и Salcher—(7).

В последнее время Gilbreth (1910—12 г.) использовал метод Marey'я, Braune-Fischer'a, заменив трубки электрическими лампочками. Эти лампочки очерчивают путь движения в виде световой линии. Для измерения времени ток прерывался через определенные промежутки времени, в среднем через  $\frac{1}{30}$  сек., благодаря применению или переменного тока или особого прерывателя. Аналогичное приспособление употреблял и Schlesinger при исследовании движения инвалидов и Tramm K. при изучении тормозящих движений трамвайного вагоновожатого.

Употребляемый нашей лабораторией метод циклограмм есть модификация упомянутых способов, разработанная совершенно самостоятельно, с той разницей, что снимки Braune-Fischer дают темные паузы больше времени свечения, способ Gilbreth'a—обратное отношение. Мы при помощи особого obtюратора (круга с вырезами в виде секторов), прерывателя, стоящего перед объективом камеры, не изменяя силы света лампочек, имеем возможность варьировать перерывы и длину их по желанию и, кроме того, регистрировать время, как пауз, так и светящихся точек и линий.

## 2. Пространственное изображение временных процессов.

Michel E. в своей книге (10) называет пространственным изучением времени или пространственным изучением (Formzeitstudien-Bahnzeitstudien)—анализ двигательного процесса с точки зрения времени. Пространственный образ времени может быть получен при помощи масштаба и секундомера и изображен помощью чертежа и описания с необходимыми числовыми данными. Но невозможность избежать ошибок наблюдателя, особенно при быстро протекающих движениях и трудность



фиксирования пути иными способами, чем фотографический, и выдвинули метод циклографический. Мы принимаем это название, как более простое и уже установившееся в русском языке, так же, как его употребляет Gilbreth, хотя другие авторы называют его круговым движением (Schlesinger), или изображением формы и времени (Lassally) (11), пути и времени (Thun) (12).

Циклографические снимки дают возможность запечатлеть и измерить следующие величины движений, как это формулирует Thun:

- а) пространственное положение пути движения;
- б) относительную величину пути движения;
- в) положение пути движения по отношению к инструменту, рабочему месту и т. п.;
- г) направление движения;
- д) скорость движения в отдельных точках пути;
- е) замедление и ускорение движения;
- ж) продолжительность всего процесса.

Конечно, такое общее исследование не всегда имеет место, и тогда метод может быть сокращен сообразно требованиям, и наоборот, иногда совершенно невозможно изучать какую либо одну из величин, так как ее значение для всего процесса может быть выведено только во время анализа других движений. Возможность применения стереоскопических снимков расширяет эти возможности и дает в руки исследователю непосредственное получение точных цифровых данных, при помощи несложных вспомогательных приборов, о которых мы сообщим ниже.

### 3. Фотографические основы циклографического способа.

Так как конечный результат полученной циклограммы есть фиксированная проекция снимаемой электрической лампочки, то с'емка производится в достаточно затемненном помещении, чтобы посторонние предметы не выходили ярко и не заслоняли собой тонких линий циклограммы. Костюм испытуемого по возможности должен быть неактивных цветов: черный, коричневый, красный. Самое большое внимание следует уделить силе света лампочек. Одни, в зависимости от быстроты движения (длины проходимого в единицу времени пути), должны быть соответственно сильнее или слабее других. Очень сильный свет дает ореолы на пластинках (употребление противоореольных пластинок весьма желательно), слабый—недостаточно отчетливо зачерчивает световой путь. В этом случае применение реостата играет существенную роль. Детали его устройства мы описываем в аппаратуре для с'емки. Камеру можно употреблять любую, небольшого формата, размером  $6 \times 9$ ,  $9 \times 12$  см., с анастигматическим светосильным объективом (1 : 3,5—1 : 4,5). Штатив также должен быть солидным и устойчивым. Пластинки по возможности высокочувствительные (Агфа-Рапид, Истмен и т. п.)

Для удобства исследования полученное изображение следует выполнить таким образом, чтобы пути движений были вполне отчетливы, но в то же время окружающие предметы были различимы лишь настолько, чтобы по ним можно было ориентироваться относительно полученной циклограммы. Только в исключительных случаях мы прибегаем к с'емке «чистой» циклограммы. Такой график очень трудно читается, требует большего напряжения и для демонстрационных целей совершенно не пригоден.

#### 4. Аппаратура для с'емки.

**А) Помещение.** Для изучения движений необходимо пользоваться двумя основными приемами: изучать детали движений в лаборатории и производить с'емку в фабричной обстановке и в мастерских. Лаборатория ЦИТа для изучения движений (рис. 1) состоит из большой комнаты  $8 \times 20$  метров с пятью окнами, выходящими на восток, обычно завешенными черными занавесами. В лаборатории имеется подводка тока как для включения фотографируемых лампочек (напряж.  $3,5 \text{ V}$ ), так и для основного освещения ( $120 \text{ V}$ ). Общее освещение производится при помощи полуваттных ламп накаливания и 2-х «Юнитеров» — дуговых ламп в 30 ампер для с'емки с кинематографом.

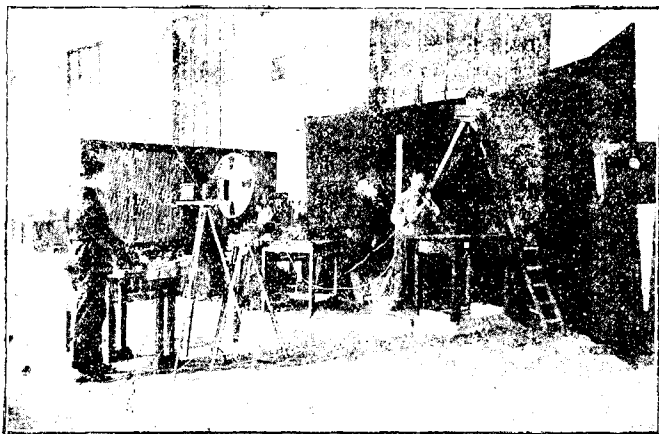


Рис. 1. Фото-Кино лаборатория

**Б) Фон.** С'емка невытуманных проеходит на черном фоне, чтобы линии фиксируемых движений были возможно более резкими и ясными. Фон имеет 8 м. длины и 3 м. вышины и может отгибаться под углом в  $30^\circ$  справа и слева для специальных с'емок под различными углами. Gilbreth рекомендует для установления размеров движений разлиповать фон продольными и поперечными линиями белой краской. В нашей лаборатории этот прием не употребляется и заменен одной линией, с делениями в 10 см., нанесенной на край особых подмостков, служащих для с'емки походов.

**В) Камера.** Фотографирование выполняется обычной камерой Цейсса «Пальмос» разм.  $9 \times 12$  см. (или  $6 \times 9$  см.) с объективами Цейсса—Унар. Опыт показал, что размер больший, чем  $9 \times 12$ , мало удобен, так как с ним трудно манипулировать; особенно большая камера вызывает массу неудобств в различных мастерских, где нет достаточного места для ее установки.

Штатив для камеры должен быть устойчивым. Мы употребляем три Рауппа, фирмы Ика-Дрезден.

**Г) Стереоскопическая камера.** (Рис. 4. стр. 13.) Для получения точных промеров циклограмм и для непосредственного наблюдения трехмерности, мы прибегаем к стереоскопической камере, но обычные расстояния в 65 мм. между объективами нас не удовлетворяют и мы для этой цели, работая на увеличенной базе, устанавливаем 2 одинаковых камеры на расстоянии в 40 и больше см. между оптическими осями объективов.

Для дальнейшей обработки материалов наиболее удобно пользоваться установкой, смонтированной нами и состоящей из специального штатива от профессионального кинематографического аппарата и двух камер  $9 \times 12$  с одинаковыми объективами. Камеры помещаются на одной общей доске, совершенно горизонтальной, к которой и привинчивают камеры. Предварительная установка камер должна быть выполнена строго параллельно осям объективов, причем матовые стекла камер также должны стоять в одной плоскости.

Дальнейшая установка всего аппарата требует исключительно проверки по ватерпасу и измерения в см. расстояния от снимаемого субъекта.

**Д. Диск для отметки времени.** Для получения временных отметок на циклограмме мы употребляем диск, похожий на кинематографический обтюратор, приводимый в движение мотором.

Он расположен спереди объектива и во время с'емки дает отдельные пунктирные линии или точки на фотографии. В зависимости от угловых величин вырезанных секторов и их расположения на диске, возможно получить и изображения скоростей движений. Чем линия длиннее, тем движение в действительности совершалось быстрее и наоборот. Употребляя попеременно широкие и узкие прорезы и получая линии движений в виде тире и точек, несимметрично расположенных, возможно читать и направление движений.

В последнее время мы применяем для простой циклограммы диск трехпрорезный с секторами в  $60^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $30^\circ$ , для стереоскопической с'емки 4-х раздельный с равными промежутками (по  $45^\circ$ ).

На рис. 2 изображена фотография такого обтюратора. С—диск обтюратора с прорезами, М—мотор, К—камера. На рис. 3 изображено общее расположение аппарата.

Для получения точного времени, взамен предложенных Тшп'ом часов с быстро вращающейся стрелкой, мы по идее д-ра Бернштейна на окружности диска ввели сирену Seebeck'a, состоящую из ряда дырочек, расположенных равномерно. При продувании через стеклянную трубочку струи воздуха, она дает определенный тон, число колебаний которого определяется камертоном, и правильное вращение диска при помощи реостата может быть отрегулировано очень точно.

**Е) Лампочки для с'емки.** (Рис. 5) Получение циклограмм происходит от фотографирования маленькой лампочки накаливания, укрепленной на исследуемом органе. Такие лампочки обычно употребляются в карманных фонариках и требуют напряжения в 3,5V. Прикрепляют лампочки или при помощи липкого пластыря с полоской ленты или специальными кожаными ремнями с патронами. Соединение происходит при помощи гибкого проводника. Необходимо отметить, что шнур, соединяющий лампочки с током, должен быть темных цветов, красного или зеленого, чтобы не проявиться на снимке и не портить его дополнительными слабыми линиями.

При работе в мастерской или при съемках, не требующих специального разделения силы света, мы употребляем карманные фонарики с длинными шнурами; батарейки легко помещаются в кармане испытуемого и не мешают своими шнурами в его передвижениях.

При лабораторных же работах нами сконструирован специальный распределительный стол с трансформатором тока и реостатами для регулирования силы света (рис. 6, 7, 8).

**Ж) Схема электрической установки.** Для циклографической съемки очень удобен постоянный ток. Во-первых, применение для вращения обтюратора моторчика постоянного тока с параллельным соединением

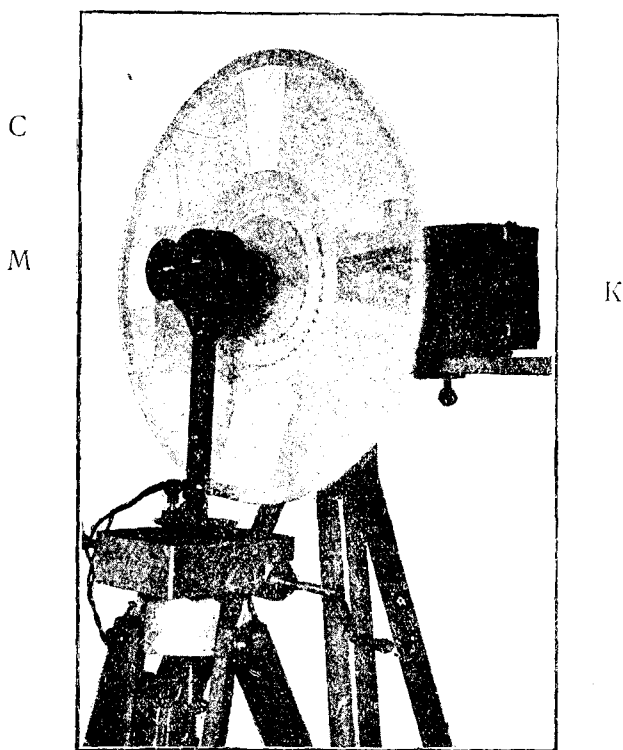


Рис. 2. Диск для отметки времени.

обмоток магнитов особенно удобно ввиду легкой и сравнительно широкой возможности регулировки реостатом числа его оборотов. Во-вторых, свет циклографических лампочек получается равномерный, а не пульсирующий, как при переменном токе.

С другой стороны, переменный ток представляет большие удобства, благодаря легкости его трансформации и наличия его всюду на фабриках и заводах в виде ввода от городской сети. Наша лаборатория, поэтому, остановилась на нем, тем более, что при простейших цикло-съемках, не требующих особенно точных замеров, можно снимать без обтюратора, пользуясь затуханиями лампочек между периодами переменного тока для

приблизительной оценки времени. Но не следует забывать, что здесь время мы имеем только приблизительно, так как число периодов в городской сети непостоянно и колеблется между 45 и 52 в секунду.

Небольшая распределительная доска для удобства работы экспериментатора устроена в виде распределительного столика с наклонной доской, на подобие пюпитра, и устанавливается около фотографической камеры. Верхняя доска со всей ее арматурой легко снимается с ножек и, закрыв ее крышкой, мы имеем довольно портативный распределитель для сенок на местах, т. е., на фабриках и заводах. На рис. 8 изображена примерная схема такой доски на 4 цикло-лампочки для переменного тока. Жирный пунктир обозначает провода для тока городской сети (110—120 V), тонкие линии показывают путь слабого, трансформированного тока. Буквами и цифрами на схеме обозначено:

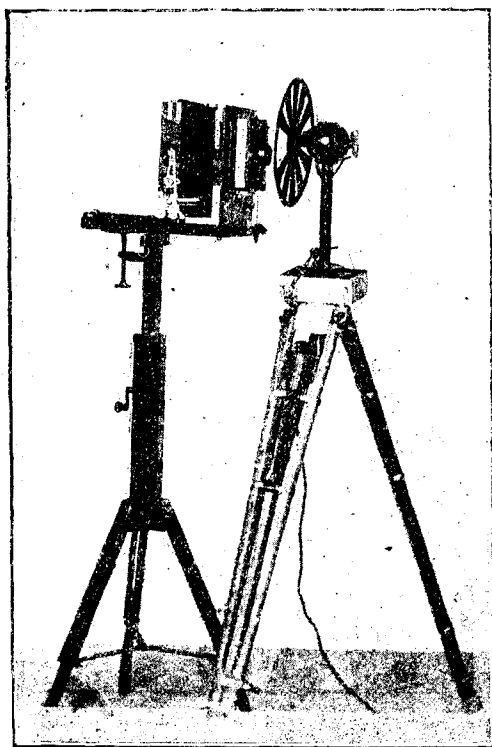


Рис. 3. Общее расположение аппарата.

- К —выключатель общего ввода в распределительный столик.
- Кг—выключатель моторчика обтюратора.
- Кl — « рефлектора.
- К t— « трансформатора.
- К z— « цикло-лампочек.
- Т —трансформатор переменного тока.
- В—реостат моторчика обтюратора.
- г<sup>1</sup>, г<sub>2</sub>, г<sub>3</sub>, г<sub>4</sub>—реостаты отдельных цикло-лампочек.
- С—запасный штепсель.

- 1—ввод от сети городского тока.
- 2—отвод к моторчику обтюратора.
- 3— « к рефлектору.
- 4— « к цикло-лампочкам.

Схема настолько несложна, что не требует пояснений. Практика показала, что четырех лампочек вполне достаточно в подавляющем большинстве случаев. Чаще всего приходится снимать с 2-мя и 3-мя лампочками, при необходимости же большего количества их, дополнительные лампочки присоединяются параллельно к этим четырем.

Здесь уместно будет сказать несколько слов об отдельных деталях установки.

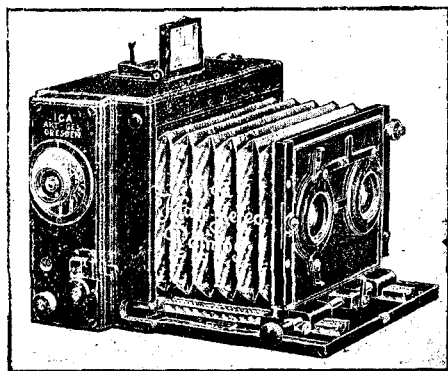


Рис. 4. Стереоскопическая камера.

Моторчик обтюратора достаточен маленького вентиляторного типа в  $\Psi_{10}$ — $\Psi_{16}$  НР. Более удобен моторчик, применяющийся обычно для вращения кино-проекторных аппаратов, как лучше поддающийся регулировке и позволяющий установку большого обтюратора для съемки стереоциклограмм с увеличенным базисом, но он не так компактен. Моторчик укрепляется на доске, привинчивающейся на устойчивый, массивный штатив геодезического или кинематографического типа. На той же доске укреплен Г-образный кронштейн из двух шарнирно-соединенных стержней.

На верхнем конце кронштейна сидит во втулочке ось обтюратора со шкивом. Привод от моторчика производится или круглым ремнем, или спиральным гибким шнуром. Такой кронштейн дает возможность, изменяя угол между стержнями, точно пригнать обтюратор для любой фото-установки, начиная с обычной фотографической камеры и до стереоустановки и кино-съемки. С другой стороны, благодаря такому кронштейну, моторчик не заслоняет собой прорезов обтюратора.

Трансформатор берется обычно звонкового типа 110—120 V на  $\times$  V с двумя секциями обмоток (на 3 и 3 V каждая). Для съемок с 4-мя лампочками он вполне достаточен. Если же необходим более сильный ток, то берется сеть городского тока параллельно, а вторичная—последовательно с первым трансформатором, что дает возможность путем различных комбинаций секций получить 9 вариаций вольтажа в пределах от 3 до 16 V.

Рефлектор служит для предварительного освещения установки испытуемого, наводки аппарата на фокус и, наконец, для освещения исходного положения объекта и различных масштабов и шифров, заснимаемых на одну и ту же пластинку с циклограммой. Рефлектор состоит из массивной стойки, на которой укреплена полувагтная лампа достаточной силы света (600—1000 свечей) с матовым отражателем. При самой цикло-съемке—рефлектор выключается.

Выключатель для цикло-лампы предпочтительно делать типа ключа Морзе, но с более сильной пружиной и с собачкой для длительного контакта. Такой выключатель особенно полезен там, где экспериментатор



Рис. 5. Крепление лампочек

должен из непрерывного движения выхватить и заснять определенный цикл или его часть. Это осуществляется нажатием и отпусканием ключа контакта. Для комбинированных исследований, где с одного и того же цикла работы одновременно снимается запись и многограмм, и барограмм и др. желательно иметь на ключе несколько изолированных контактов, дающих возможность точно в один и тот же момент включить и выключить как цикло-лампочки, так и все другие установленные саморегистрирующие приборы. Наконец, для ряда съемок, напр., удара молотом, полезно устроить простой электромагнитный прибор, автоматически включающий цикло-лампочки при одном ударе и выключающий при другом, что даст возможность получить особенно точно выхваченный из общего процесса элементарный цикл.

## 5) Аппараты для анализа.

Полученные негативы циклограмм для дальнейшего изучения или копируются непосредственно на бумаге и затем размечаются при помощи измерительной линейки и циркуля, или, для более легкого установления отдельных точек, увеличиваются при помощи проекционного фонаря.

**а) Увеличительный прибор.** Для этого пригоден обычный проекционный фонарь с лампой накаливания, позволяющий вставлять в него негативы размера  $9 \times 12$ . Конденсатор фонаря должен быть диаметром не менее 120 мм. для полного покрывания всей пластинки. Ввиду искажения рисунка, наиболее целесообразно увеличение производить с тем же объективом, которым была произведена и съемка циклограмм. Увеличения делают на клетчатой миллиметровой бумаге, доводя их до натуральной величины и проходя по кривым курвиметром или, в определенном масштабе, занося в особый лист цифровой материал.

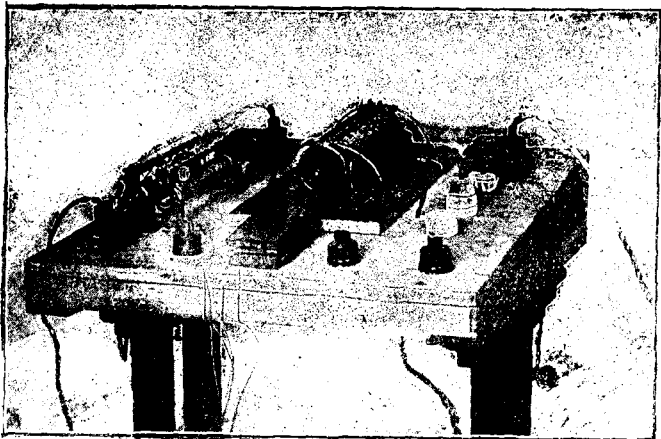


Рис. 6. Распределительный стол.

**в) Измерение стереоскопических циклограмм.** Для рассматривания стерео-изображений наиболее удобны стеклянные диапозитивы. Для примеров, во избежание деформации слоя и смещения определенных точек — непосредственно оригинальные негативы. Очень удобным прибором в этом случае является новый стереоскоп Цейсса, который позволяет с большой точностью и удобством рассматривать картины.

Этот стереоскоп имеет две пары окуляров: простых линз с фокусным расстоянием в 15 см. и ахроматических с коротким фокусом в 10 см. Окуляры в 10 см. применяются при снимках с современными короткофокусными камерами и с большой ясностью определяют противление между планами в глубину и правдивее передают натуре. 15 см. окуляры применяются при снимках с длиннофокусными объективами.

Установка окуляров на фокусе производится одновременно для обоих глаз, посредством передвижения верхней части прибора на стержне, соединяющем его с подставкой. Гайка нажимается на них, и, освободив ее, окуляры можно двигать вверх и вниз до нахождения места ясного зрения.

**в) Измерение стереомикрометром.** Применяя со стереоскопом Цейсса специальный прибор Пудльфриха для измерения стереоскопических сним-



ков по способу блуждающих точек, возможно измерять все точки движений во всех плоскостях для детального исследования пути и времени движений. Этот «Стереомикрометр», изготавливаемый фирмой Цейсса, дает возможность помимо вертикальной и горизонтальной проекции, получать и точные цифровые данные точек, расположенных в пространстве в глубину снимка. Этим способом мы можем получить достаточно точные цифры всего пути, проходимого точкой, и вычислить его длину.

Инструмент состоит из металлической рамки с двумя квадратными отверстиями, которые накладываются прямо на стереоскопическое изображение, положение на столик стереоскопа (см. рис. 9).

Описание работы инструмента можно найти в каталоге фирмы «Иохим» или в специальных каталогах Цейсса.

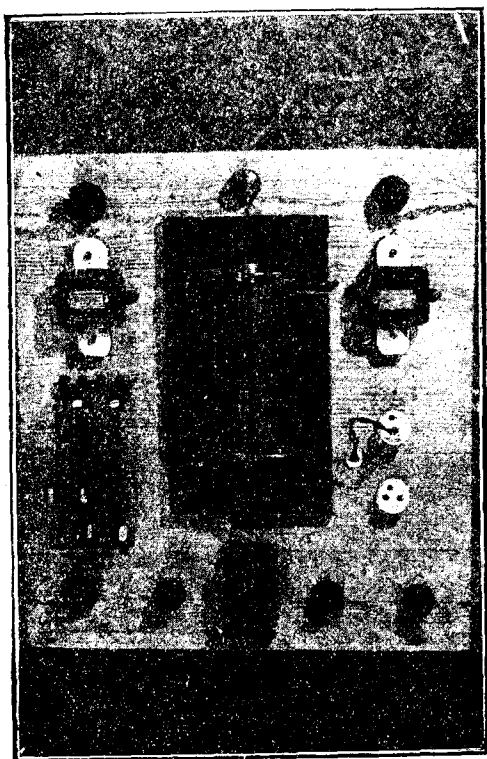


Рис. 7. Распределительный стол, вид сверху.

## 6. Изучение удара и специальная методика ЦИТ в этом направлении.

Описанная выше аппаратура фото-кино лабораторией была применена, согласно общим заданиям отдела изысканий ЦИТ'а, для изучения механики удара. Съемки производились и простой цикло-съемкой, и стереоскопической для получения предварительных нормалей и обработки их математическим путем в биомеханической лаборатории.

Работа по цикло-съемке выполнена на ряде испытуемых, причем для всех их употребляется общий прием. Лампочки прикреплялись к центру тяжести молотка, кисти руки и к сочленениям.

Опыт показал, что в зависимости от быстроты движения следует силу света ламп расположить в нисходящей градации от молотка к плечу, иначе слишком светлые лампочки дают ореолы и отдельные световые пунктиры сливаются в общую линию.

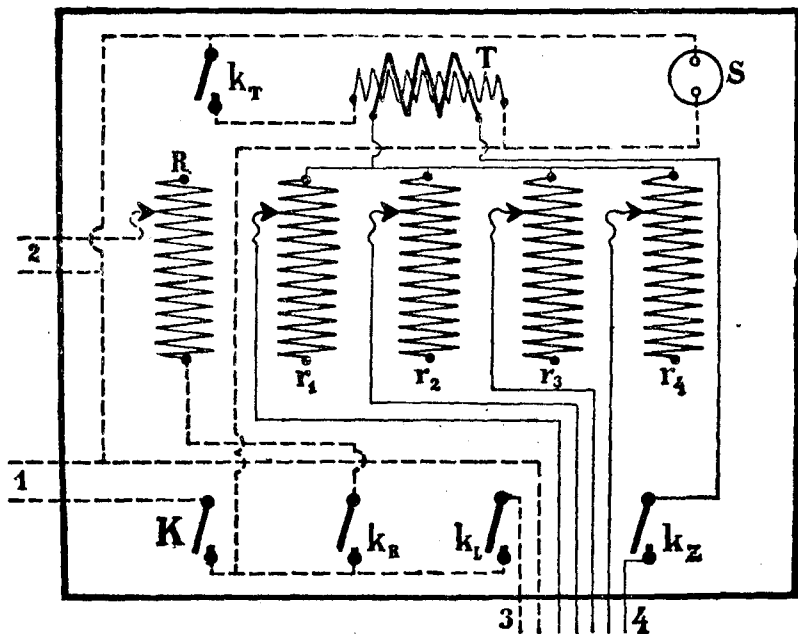


Рис. 8. Схема распределительного стола.

В настоящее время определены общие типы удара, и теперь, в связи с работами по записи миографическим и барографическим методом в биомеханической лаборатории, начинаются съёмки соединёнными приборами одновременно. Такое усложнение в то же время дает возможность получить и общие для всех приборов цифровые величины и, следовательно, проверить и координировать их показания.

Расположение такой установки приводится в помещенной ниже статье д-ра **А. П. Бружес**.

**Синтез движений.** Изучение движений в конце концов должно привести к нормальным приемам работы и созданию «стандартов». В полученных снимках, путем сравнения, находят лишние движения и, выбрасывая их и повторяя съёмку с постепенным тренированием испытуемого, добиваются желаемой нормы. В этом направлении мы пользуемся кинематографом для съёмки многочисленного ряда отдельных моментов и для создания «учебной» фильмы, демонстрация которой показывает все приемы работы в их последовательных операциях, а также на основании полученных биомеханической лабораторией данных имеем возможность продемонстрировать и оживленные чертежи этих движений.

Эта часть в конечном результате, понятно, имеет значение педагогическое и уже выходит за пределы научно-исследовательской работы по изучению трудовых движений.

ГЭС. ПУБЛИЧНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА СССР

4062  $\frac{2}{66}$

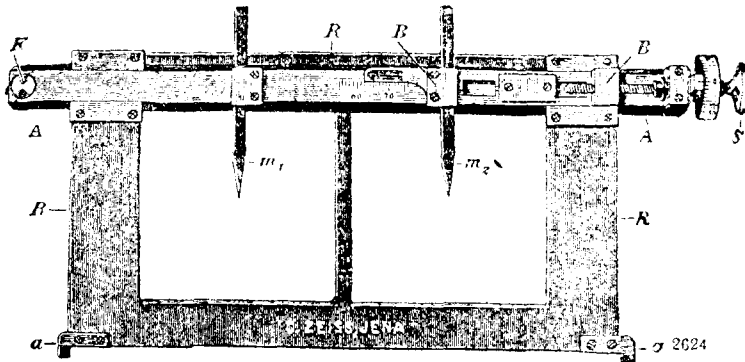


Рис. 9. Стере-микроскоп Пульфриха.

## Л и т е р а т у р а.

1. Структура ученой работы ЦНТ'а. (На правах рукописи). М., 1921 г.
2. Таунсенд. Волшебство в изучении движений 1915 г.
3. Muirbridge E. Animal Locomotion, an electrophotographic investigation of consecutive phases of animal movements. (Philadelphia 1887).
4. Anschütz. Physiologie artistique. Soc. des Editions scientifiques, Paris, 1890.
5. Marey E. Le Mouvement. Paris, 1894.  
« « La machine animale. Paris, 1873—  
и большое количество статей в Comptes rendus.
6. Braune und Fischer. Der Gang des Menschen. Leipzig. 1895.
7. Mach E. et Salcher. P. Fixation, par la photographie, des phénomènes produits dans l'air par le passage des projectiles. S. de Physique. 1888. p. 500.
8. Gilbreth. Motion study. New-York, 1909.
9. Шлезингер. Психотехника и наука о производстве. 1922 г.
10. Михель, Е. Как производится изучение рабочего времени. Сборн. и монограф. по вопросам науки и техники. ИГО, ВСНХ (ВИИТ) 1921. вып. 7. стр. 200, там же дана и литература.
11. Lassally A. „Der Betrieb“ 1921; II 12.
12. Тинн. Вспомогательные средства для изучения движений. „Betrieb.“ 1923/22. № 24, стр. 771—779.
13. Кекчеев К. „Хроноциклографический Метод.“ Журнал Психологин, Неврологии и Психиатрии. Прил. 1 к № 1. М., 1922 г.



# ИССЛЕДОВАНИЯ ПО БИОМЕХАНИКЕ УДАРА

с помощью световой записи.

Д-р Н. А. Бернштейн. Био-механическая лаборатория ЦИТ.

## I. Методика циклограмметрии.

1. Методика световой записи в применении к теме.
2. Методика измерений.
3. Интерполяция с помощью полиномов.
4. Определение скоростей и ускорений.
5. Определение силы, живой силы и кинетической энергии. Нахождение максимумов.
6. Нахождение траекторий центров тяжести и действующих в них усилий.
7. Определение моментов пар и проекция силовых векторов на мышечные группы.
8. Ряды Fourier. Мотивировка применения.
9. Ряды Fourier. Методика разложения.
10. Ряды Fourier. Формы получающихся кривых. Сходимость.
11. Формы представления рядов и тригонометрических сумм.
12. Эллипсы. Определение их элементов.
13. Уравнения скоростей и ускорений.

## II. Исследование биомеханики удара.

14. Методика световой записи удара.
15. Описание удара. Типы. Течение движения.
16. Распределение скоростей и ускорений. Отдача. Изменения углов. Действующие усилия.
17. Разложение в ряды Fourier. Сходимость. Эллипсы, их элементы и значение.
18. Биомеханическое значение эллипсов. Упругие маятники.
19. Общие выводы.
20. Очередные задачи.

## Обозначения.

### I. Координаты и общие обозначения.

- |             |                                |   |                              |
|-------------|--------------------------------|---|------------------------------|
| $x$         | — сагиттальная ось.            | } | пространственные координаты. |
| $y$         | — вертикальная ось.            |   |                              |
| $z$         | — фронтальная ось.             |   |                              |
| $r, \theta$ | — плоские полярные координаты. |   |                              |
| $\theta$    | — долгота                      | } | сферические координаты.      |
| $\varphi$   | — широта                       |   |                              |
| $t$         | — переменная времени.          |   |                              |
| $ds$        | — дифференциал пути.           |   |                              |
| $d\psi$     | —                              |   | изменения угла.              |

$\alpha, \beta, \gamma$  — углы прямой с осями  $x, y, z$ .

$\omega$  — угловая скорость.

$k, K, c$  — коэффициенты пропорциональности.

$n$  — порядковый номер.

$N$  — количество.

$\delta = 1/N$  —

$A_n, B_n$  — коэффиц. при  $\cos$ . resp.  $\sin$ .  $n$ -ого члена разложения по Fourier.

$S_n$  — " "  $n$ -ом члене сжатой формы ряда Fourier.

**A, B, C** — см. формулу (32).

$\Theta, \Phi$  — начальные фазы.

$e$  — эксцентриситет эллипса.

$L, I$  — оси эллипса.

$a, b$  — амплитуды сферического эллипса.

## II. Промерные обозначения.

$G$  — промеряемая точка.

$D$  — расстояние ее.

$p$  — параллакс ее (стереоскопический).

$D_0$  — расстояние масштаба.

$p_0$  — параллакс масштаба.

$B$  — оптическая база.

$f$  — фокусное расстояние об'ективов.

$f_0$  — фокусное расстояние, сопряженное с  $D_0$ .

$x_1, y_1$  ) — значения промеров на пластинках 1 и 2 при стереоскоп. с'емке.

$x_2, y_2$  )

$x_1, z_2$  — значения промеров на пластинках 1 и 2 при конвергирующей с'емке.

## III. Механические обозначения.

$w$  — вектор ускорения.

$W$  — вектор силы.

$g$  — ускорение силы тяжести.

$J$  — кинетическая энергия.

$M$  — масса.

$M$  — момент.

## IV. Био-механические обозначения.

$XD$  и т. д. — координаты дистального сустава звена.

$XP$  и т. д. — " " проксимального "

$Xg$  и т. д. — " " центра тяжести.

$e_1, e_2$  — см. Таблицу I.

$m$  — молоток.

$a$  — предплечье.

$h$  — плечо.

$M$  — *m-lus biceps*.

$Xm, Ym, Zm$  — координаты центра тяжести молотка.

$Xd$ , и т. д. — " пястно-фалангов. сустава 3-го пальца.

$Xp$ , и т. д. — " лучезапястного сустава.

$Xc$ , и т. д. — " локтевого сустава.

$Xs$ , и т. д. — " плечевого.

$Xr$ , и т. д. — " *tuberculi radii*.

## 1. Методика световой записи в применении к теме.

Основная задача, предшествующая всякому биомеханическому исследованию движений, состоит в нахождении удобной методики записи этих движений, которая позволила бы зафиксировать быстропротекающие картины движения с точностью, достаточной для количественного его изучения. Такая запись должна не только подметить и закрепить неуловимые при непосредственном наблюдении качественные особенности движения, но и воспроизвести всю его количественную сторону, давая этим возможность математического изучения такого движения совершенно тем же приемами, какими движение вообще изучается в прикладной механике.

Основными элементами всякого вообще движения являются те четыре переменные, которые в общей совокупности характеризуют это движение: три переменных пространства и переменная времени. Задача био-кинематического исследования должна состоять в нахождении функциональной зависимости между ними, причем удобнее всего для механических целей оказывается определение зависимости каждой из трех первых переменных от последней, т.-е. выражение движения каждой точки движущегося органа в виде серии параметрических уравнений, с переменной времени в качестве независимого параметра.

Изю всех, предложенных до настоящего времени, приемов записи движений, единственный метод, вполне удовлетворяющий вышеизложенным принципиальным требованиям,—это метод световой записи. Метод этот осуществляется или с помощью кинематографии, обыкновенной или ускоренной, или же с помощью циклографии, т.-е. записи светового следа блестящих предметов или светящихся лампочек фотографическим путем на неподвижной светочувствительной пластинке. Циклографический метод оказывается при этом несравненно более удобным, как в силу того, что траектория движения непосредственно в виде кривой запечатлевается на пластинке, в то время, как при кинорегистрации эта траектория определяется только после кропотливого и, при малейшей неточности проекционного промерного аппарата, недостоверного измерения, так, и особенно, в силу того, что кинематографическая запись в настоящее время совершенно устраняет возможность стереоскопической фотографии движений с широкой оптической базой, требуя для этого весьма сложных и совершенно недоступных при настоящих условиях установок. Циклографическим путем такая возможность достигается сравнительно просто.

Не входя по существу в описание общей циклографической методики, подробно разработанной в Центральном Институте Труда д-ром К. Кекчеевым и Н. Тихоновым, я остановлюсь на той ее форме, которая применяется в настоящее время для съемок движений, подлежащих биомеханической аналитической обработке, и направлена к непосредственному получению последовательных значений четырех вышеупомянутых переменных.

Легко видеть, что для получения точных данных о движении каждой точки участвующего в движении органа нет никакой необходимости непосредственно фиксировать движение всех этих точек. Для всякого крупного движения (каково изучавшееся нами движение удара) можно свободно принять, что работающий орган состоит из негибких и нерастяжимых звеньев, сочлененных между собою так, что между ними возможны лишь вращения около оси или точки, не изменяющей своего положения относительно каждого из сочлененных звеньев. Это приближение остается для крупных движений, во всяком случае, ниже ошибки наблюдения. Поэтому для получения полной картины движения необходимо и достаточно запечатлеть перемещения сочленений. При съемке движений руки, напр., лампочки, предназначенные для получения светового следа, помещаются над плечевым, локтевым, лучезапястным и пястнофаланговым суставом 3-го пальца. То обстоятельство, что лампочки лежат не в точках пересечения осей звеньев работающего органа, а на продолжении осей сочленений, может легко быть принято в расчет.

Для получения 3-х пространственных координат необходима или съемка двумя камерами с параллельными осями (стереоскопическая съемка), или же двумя камерами с конвергирующими осями. Как в том, так и в другом случае, определение 3-й координаты ведется путем триангуляции.

Для первого случая выгоднее пользоваться не обычной стереоскопической камерой, а двумя самостоятельными аппаратами с совершенно тождественными объективами, т. к. база первой, иначе говоря, расстояние между ее оптическими осями, равна 60—70 мм., при двух же раздельных камерах она может быть увеличена до 300—400 мм. Такая увеличенная база выгоднее для промеров, т. к. пропорционально ей увеличиваются и параллаксы, определяющие различия глубин. Субъект с укрепленными к испытываемому органу лампочками слабо заснимается на той же пластинке перед началом опыта рядом с вертикальной стойкой-масштабом, расположенной на точно измеренном расстоянии от объективов камер и служащей для определения исходного параллакса, после чего само движение фотографируется обычным циклографическим способом одновременно на обеих пластинках.

Снятая таким образом циклограмма имела бы вид непрерывной кривой и, хотя и давала бы нам координаты пространства, но не содержала бы никаких данных о протекании движения во времени. Поэтому перед обоими объективами помещается диск—обтюратор, подобный кинематографическому, снабженный прорезами и приводимый в движение электромотором. Расположение прорезов на таком обтюраторе обуславливает характер получающегося при этом на циклограмме, вместо сплошной кривой, светового пунктира. Для стереоскопических целей прорезы обтюратора, пробегающие поочередно мимо обоих объективов, должны, очевидно, быть симметричны относительно оси, так, чтобы оба объектива одновременно открывались и закрывались; кроме того, для точности промеров, которые могут быть произведены только на конечном числе точек кривой, выгоднее иметь кривую хотя-бы и менее наглядную при непосредственном рассматривании, но зато наиболее отчетливо отмечающую последовательные точки одной, и соответственные точки нескольких смежных кривых. В силу всех этих соображений, после ряда опытов, наиболее удобным для стереоскопической промерной съемки оказался обтюратор с двумя или четырьмя равными узкими прорезами, равноот-

стоящими друг от друга. При равномерном вращении такой обтюратор будет допускать до светочувствительного слоя изображения таких отрезков кривой движения, центральные точки которых отстоят друг от друга на равные промежутки времени. Скорость вращения такого обтюратора, обычно колеблющаяся между 600—1200 оборотами в минуту, (что соответствует для 2-х прорезов 20—40, для четырех—40—80 точкам в секунду), определяется с помощью серии мелких расположенных по окружности отверстий на обтюраторе, которыми экспериментатор пользуется, во время самой с'емки, как сиреной Seebeck'a, вдувая в них воздух через сплюснутую на конце стеклянную трубочку и определяя высоту получающегося тона по камертону. Такой обтюратор изображен на рис. 2, вся установка—на рис. 1-м статьи проф. Н. Тихонова.

Во втором случае, когда оси двух камер конвергируют в некоторой точке, требуются два синхронно работающих отдельных обтюратора. В этом случае, применяемом тогда, когда движение не может быть полностью охвачено с одного места, камеры располагаются под прямым углом друг к другу на равных расстояниях от точки пересечения их оптических осей.

## 2. Методика измерений.

После того, как циклографический снимок получен, он подвергается тщательному измерению. Для такого измерения можно пользоваться стереомикрометром Zeiss—Pulfrich'a, позволяющим непосредственно определять параллаксы отдельных точек; но можно и без его помощи, с меньшей точностью, измерить координаты длины,  $x$ , и координаты высоты,  $y$ , центров всех световых штрихов, отдельно для каждой половины стереоскопического снимка, процируя их поочередно, при большом увеличении, на миллиметровую бумагу, и принимая в обоих случаях за ось ординат один из обрезов вертикальной стойки-масштаба, за ось абсцисс—на высоте оптических осей восстановленный к ней перпендикуляр.

Если расстояние от объектива (левого) до масштаба равно  $D_0$ , расстояние от объектива до пластинки— $f_0$ , то между тем и другим существует, как известно, зависимость в виде

$$\frac{1}{f_0} + \frac{1}{D_0} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где  $f$ —фокусное расстояние объектива. Отсюда —

$$f_0 = \frac{fD_0}{D_0 - f} \quad (1a)$$

Пусть оптическая база системы, т.е. расстояние между параллельными осями объективов, равно  $B$ , искомое расстояние от левого объектива до данной заснятой точки— $D$ , параллакс ее, т.е. разность расстояний ее изображений от прямых, перпендикулярных к базе и к оптической оси соответственного объектива, и лежащих в плоскости пластинок—равен  $p$ . Тогда, как то ясно вытекает из рис. 1,

$$D = \frac{f_0 B}{p} \quad (2)$$

Из уравнений (1a) и (2) следует, что параллакс масштаба,

$$p_0 = \frac{fB}{D_0 - f}, \quad (1b)$$



а так как, при взятии обреза масштаба при измерении циклограмм за ось абсцисс,

$$p = p_0 + (x_2 - x_1), \quad (2a)$$

то из уравнения (2) непосредственно получается значение  $D$  для всякой точки, промеренные абсциссы которой для левого и правого снимка суть соотв.  $x_1$  и  $x_2$ . Если за ось абсцисс принять перпендикуляр к стойке-масштабу, то координата глубины,

$$z = D_0 - D \quad (2b)$$

Из того же рис. 1 следует, что

$$y = \frac{By_1}{p} = \frac{By_2}{p}, \quad \text{и} \quad x = \frac{Bx_1}{p}, \quad (3)$$

где  $y$  и  $x$  обозначают действительные пространственные координаты точек,  $y_1$  и  $x_1$ ,  $y_2$  и  $x_2$  — соотв. промеры координат на левой и правой пластинках. \*)

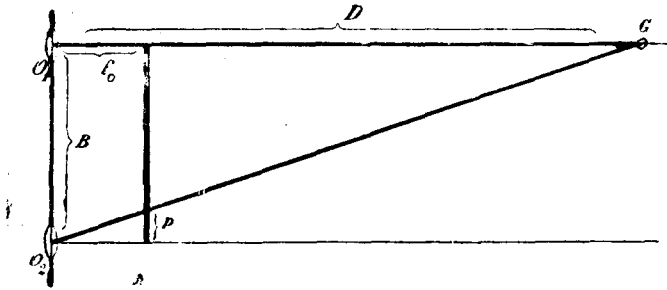


Рис. 1. Стереоскопическая (параллактическая) установка.  $O_1$  и  $O_2$ —объективы,  $G$ —фотографируемый объект. Линия, проходящая через  $P$ , параллельно  $O_1O_2$ , представляет фотографическую пластинку (для ясности рисунка изображена перед объективом).

Если измерение ведется с помощью проекции на миллиметровый экран, то выгодно привести промеренные на нем координаты точек к масштабу проекции на плоскость стойки. Это достигается умножением промеров на отношение действительной величины стойки к масштабу ее изображения на экране,  $k$ . Тогда, очевидно,

$$D_0 = \frac{f_0 B}{p_0} = f_0 k, \quad \text{и}$$

$$kp_0 = B;$$

$$D = \frac{D_0 B}{B + k(x_2 - x_1)}, \quad kp = B + k(x_2 - x_1), \quad (2c)$$

$$\text{откуда} \quad y = \frac{By_1 k}{kp} \quad \text{и} \quad x = \frac{Bx_1 k}{kp} \quad (3a)$$

\*) Стойка должна быть расположена так, чтобы оптическая ось левого объектива проходила через ее обрез. В противном случае приходится вносить поправку, отсчитывая координаты промеров,  $x_1$  и  $y_1$ , не от среза стойки, но от линии, параллельной ему и проходящей через центр левой пластинки.

Во втором случае, т.-е. при конвергирующих оптических осях обеих камер, пусть две совершенно одинаковые камеры с тождественными объективами расположены под прямым углом друг к другу, так, чтобы точка пересечения их оптических осей,  $O$ , находилась на равных расстояниях,  $D_0$ , от объективов обеих камер. Пусть также  $x_1$  и  $z_2$  — расстояния изображений некоторой точки  $G$  на обеих пластинках от вертикали, лежащей в плоскости пластинки и проходящей через оптическую ось,  $x$  и  $z$  — подлежащие определению координаты точки  $G$  относительно оптических осей объективов, как осей координат,  $d_1 = D_0 - x$  и  $d_2 = D_0 - z$ . Тогда, как то следует из рис. 2,

$$\frac{x_1 d_2}{f_0} + d_1 = \frac{z_2 d_1}{f_0} + d_2 = D_0 \quad (4)$$

где  $f_0$  определяется по формуле (1а).

Элиминируя  $d_1$ , получаем

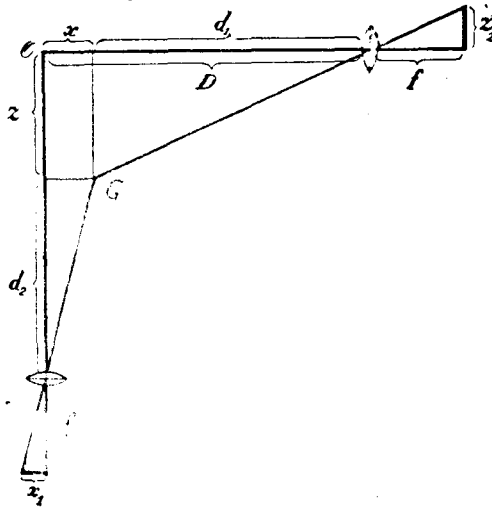


Рис. 2. Конвергирующая установка с'емки.

$$d_2 = D_0 f_0 \left( \frac{f_0 - z_2}{f_0^2 - z_2 x_1} \right)$$

и следовательно:

$$z = D_0 z_2 \left( \frac{f_0 - x_1}{f_0^2 - z_2 x_1} \right); \quad x = D_0 x_1 \left( \frac{f_0 - z_2}{f_0^2 - z_2 x_1} \right), \quad (5)$$

и координату высоты,

$$y = \frac{z_1 d_1}{f_0} = \frac{z_2 d_2}{f_0} = D_0 y_1 \left( \frac{f_0 - x_1}{f_0^2 - z_2 x_1} \right) \quad (6)$$

Таким путем мы приходим к определению действительных пространственных координат последовательных световых точек изучаемой циклограммы. Так как эти последовательные точки траектории движения проходились движущимся органом через равные промежутки времени,

то каждое движение может быть теперь же представлено в виде 3-х график, параметрически изображающих слагающую пути по каждой из координатных осей, как функцию времени, конечные приращения которого заданы равными интервалами. Серия таких параметрических график для перемещения центра тяжести молотка при полном цикле удара (рубка зубилом) изображена на рис. 3.

### 3. Интерполяция с помощью полиномов.

С того момента, как измерения закончены и результаты их изображены графически, мы вправе считать, что полученные нами эмпирические кривые определяются некоторой функциональной зависимостью слагающих движения по координатным осям от переменной времени. Эту функциональную зависимость мы постоянно будем изображать в общем виде серии параметрических уравнений

$$x_i = f_i(t); \quad y_i = \varphi_i(t); \quad z_i = \psi_i(t) \quad (7)$$

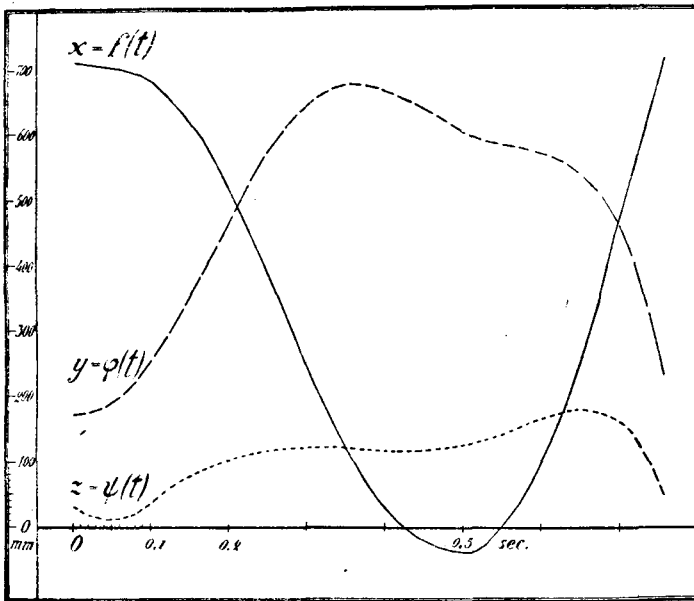


Рис. 3. Три слагающие движения центра тяжести молотка по координатным осям в течение одного цикла удара.  
 x — сагитальное перемещение,  
 y — вертикальное перемещение,  
 z — фронтальное перемещение.

(Негатив № 20819).

Нашей ближайшей задачей является найти такие приближенные аналитические выражения этих кривых, которые дали бы нам возможность математически разобраться в их особенностях, найти аппроксимативные уравнения слагающих скоростей, ускорений и т. д., чтобы отсюда перейти к выражениям живой силы, кинетической энергии, векториальным уравнениям сил, моментов и т. п.

Пока наше внимание устремлено на чисто количественную сторону явления, на отдельные отрезки и детали получаемого движения, наиболее удобной формой приближенного аналитического выражения является интерполяция с помощью полиномов. Особенно просто преобразуется для нашей цели известная интерполяционная формула Lagrange'a.

В самом деле, уравнение Lagrange'a для полинома, принимающего в точках  $a, b, c, d, \dots, k, l$  значения  $f(a), f(b), f(c), \dots, f(l)$ ,

$$f(t) = f(a) \frac{(t-b)(t-c)\dots(t-l)}{(a-b)(a-c)\dots(a-l)} + f(b) \frac{(t-a)(t-c)\dots(t-l)}{(b-a)(b-c)\dots(b-l)} + \dots + f(l) \frac{(t-a)(t-b)\dots(t-k)}{(l-a)(l-b)\dots(l-k)} \quad (8)$$

может быть развернуто в виде полинома  $(l-1)$ -й степени относительно  $t$ . Пусть  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n+1}$  суть  $n+1$  значений независимого переменного;  $f(a_1), f(a_2), \dots, f(a_{n+1})$ —соответствующие значения интерполируемой функции. Тогда

$$f(t) = f_n \left( \sum_{i=1}^{n+1} A_i \right) + (-1)^{n-1} t^{n-1} \left[ \sum_1^{n+1} (A_i \sum a_j) \right] + (-1)^2 t^{n-2} \left[ \sum_1^{n+1} (A_i \sum \Pi a_j) \binom{n}{2} \right] + \dots + (-1)^{n-1} t^{n-1} \left[ \sum_1^{n+1} (A_i \sum \Pi a_j) \binom{n}{1} \right] + \dots + (-1)^n \left[ \sum_1^{n+1} (A_i \Pi a_j) \right], \quad (9)$$

где  $A_i = \frac{f(a_i)}{\prod (a_i - a_j)}$ ,  $j$  принимает в каждом случае значения  $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n+1$ .

$$\text{и } \left[ \sum \Pi a_j \binom{n}{1} \right]$$

есть сумма произведений всех значений независимого переменного,  $a_j$ , во всевозможных сочетаниях из  $n$  по  $l$ .

Вследствие того, что в интересующем нас случае значения независимого переменного, соответствующие эмпирически заданным значениям функции, отстоят друг от друга, в силу равномерности вращения обтюратора, на равные промежутки, вышеприведенное общее уравнение (9) может быть преобразовано в крайне простом виде.

Пусть избранные нами значения независимого переменного симметрично расположены относительно нулевой точки (в выборе которой мы ничем не связаны) и отстоят друг от друга на единицу (в выборе которой мы, опять таки, ничем не связаны, и за которую можем, внося лишь небольшую поправку при дальнейшей обработке, принять интервал времени между двумя последовательными световыми точками

циклограммы); тогда полином (9) принимает следующую, весьма простую и симметричную форму, с коэффициентами, линейными относительно заданных значений функции:

1) По 5-ти значениям независимого переменного:

$$\begin{array}{cccccc} t = & -2 & -1 & 0 & +1 & +2 \\ f(t) = & c & d & e & f & g \end{array}$$

$$f(t) = \frac{\gamma - 4\delta + 6\varepsilon}{24} t^4 - \frac{\theta - 2\iota}{12} t^3 - \frac{\gamma - 16\delta + 30\varepsilon}{24} t^2 + \frac{\theta - 8\iota}{12} t + \varepsilon \quad (10a)$$

2) По 7-ми значениям t:

$$\begin{array}{ccccccc} t = & -3 & -2 & -1 & 0 & +1 & +2 & +3 \\ f(t) = & b & c & d & e & f & g & h \end{array}$$

$$\begin{aligned} f(t) = & \frac{\beta - 6\gamma + 15\delta - 20\varepsilon}{720} t^6 - \frac{\eta - 4\theta + 5\iota}{240} t^5 - \frac{\beta - 12\gamma + 39\delta - 56\varepsilon}{144} t^4 + \\ & + \frac{\eta - 8\theta + 13\iota}{48} t^3 + \frac{2\zeta - 27\gamma + 270\delta - 490\varepsilon}{360} t^2 - \frac{\eta - 9\theta + 45\iota}{60} t + \varepsilon \end{aligned} \quad (10b)$$

3) По 9-ти значениям t:

$$\begin{array}{cccccccccc} t = & -4 & -3 & -2 & -1 & 0 & +1 & +2 & +3 & +4 \\ f(t) = & a & b & c & d & e & f & g & h & i \end{array}$$

$$\begin{aligned} f(t) = & \frac{\alpha - 8\beta + 28\gamma - 56\delta + 70\varepsilon}{40320} t^8 - \frac{\zeta - 6\gamma + 14\theta - 14\iota}{10080} t^7 - \\ & - \frac{\alpha - 12\beta + 52\gamma - 116\delta + 150\varepsilon}{2880} t^6 + \frac{\zeta - 9\eta + 26\theta - 29\iota}{720} t^5 + \\ & + \frac{7\alpha - 96\beta + 676\gamma - 1952\delta + 2730\varepsilon}{5760} t^4 - \frac{7\zeta - 72\eta + 338\theta - 488\iota}{1440} t^3 - \\ & - \frac{9\alpha - 128\beta + 1008\gamma - 8064\delta + 14350\varepsilon}{10080} t^2 + \frac{3\zeta - 32\eta + 168\theta - 672\iota}{840} t + \varepsilon, \end{aligned} \quad (10c)$$

где

$$\begin{array}{ll} \alpha = a + i & \zeta = a - i \\ \beta = b + h & \eta = b - h \\ \gamma = c + g & \theta = c - g \\ \delta = d + f & \iota = d - f \\ \varepsilon = e & \end{array}$$

Так как действительное значение интервала времени между двумя последовательными значениями интерполируемой функции, зависящее в нашем случае от скорости вращения обтюратора, равно  $1/Nk$  секунды, где N—число оборотов в секунду, а k—число прорезов на диске, то окончательный вид полинома, интерполирующего нашу кривую, будет:

$$A_m (Nkt)^m + A_{m-1} (Nkt)^{m-1} + \dots + A_1 Nkt + A_0 \quad (11).$$

#### 4. Определение скоростей и ускорений. Чтение график.

С того момента, как изучаемое движение приближенно выражено с помощью многочлена, представляющего собой как бы первое приближение к разложению изучаемой функции в ряд Taylor'a, его три параметрические составляющие (7) становятся доступны обычной аналитической обработке.

Дифференцируя эти 3 уравнения по времени, мы получаем значения проекций **скорости** движения на оси координат, опять таки в параметрической форме функций времени:

$$\frac{dx}{dt}, \quad \frac{dy}{dt}, \quad \frac{dz}{dt} \quad (12)$$

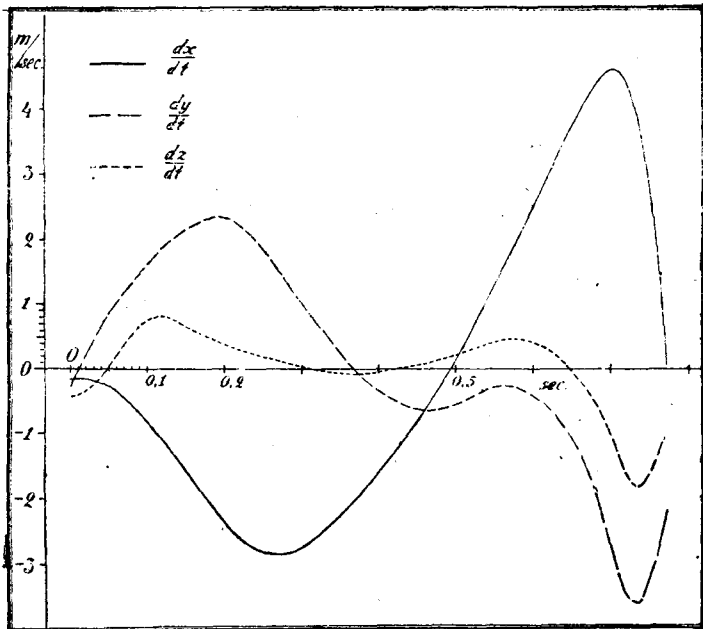


Рис. 4. Слагающие скорости движения, изображенного на рис. 3.

Эти уравнения скоростей могут быть изображены графически, в виде рис. 4. Общая скорость движения по траектории,

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (12a)$$

дает нам количественное значение вектора скорости, направление которого в каждый момент совпадает с направлением касательной к изучаемой кривой.

Чтение график скоростей понятно само собой. Помимо непосредственных данных о величине скоростей в каждый момент, сопоставление

в одном графике слагающих скорости нескольких одновременно движущихся точек изучаемого органа может дать много характерного для деталей движения.

Так напр., если слагающие скорости по одной из осей в некоторый момент времени равны для двух смежных сочленений, координаты которых суть соответственно  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$ , то заключенное между ними звено движется в этот момент по винтовой линии, с осью, параллельной рассматриваемой оси координат. Если определить слагающие скорости для некоторой промежуточной точки жесткого звена по общей формуле:

$$\frac{dx_k}{dt} = k \frac{dx_1}{dt} + (1-k) \frac{dx_2}{dt}, \quad [0 < k < 1] \quad (13)$$

и построить график ее суммарной скорости  $\frac{ds_k}{dt}$ , то для всех моментов времени, для которых

$$\frac{ds_1}{dt} > \frac{ds_k}{dt} > \frac{ds_2}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{ds_1}{dt} < \frac{ds_k}{dt} < \frac{ds_2}{dt},$$

мгновенный центр вращения лежит вне изучаемого звена; для тех же моментов, для которых

$$\frac{ds_1}{dt} > \frac{ds_2}{dt} > \frac{ds_k}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{ds_2}{dt} > \frac{ds_1}{dt} > \frac{ds_k}{dt},$$

он лежит на самом звене, если уравнение  $\frac{ds_k}{dt} = 0$  имеет действительные корни для  $k$ ; и лежит в этот момент в точке  $kx_1 + (1-k)x_2$ ,  $ky_1 + (1-k)y_2$ ,  $kz_1 + (1-k)z_2$ .

Угловая скорость звена определяется из уравнения:

$$d\psi = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(dx_1 - dx_2)^2 + (dy_1 - dy_2)^2 + (dz_1 - dz_2)^2}, \quad (14)$$

$$\text{где} \quad \lambda = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

есть длина данного жесткого звена.

Таким образом, все данные о скорости движения как непосредственно заснятых точек наблюдаемого органа, так и всех промежуточных точек его жестких звеньев, могут быть получены (приблизительно) из основных уравнений движения (7).

Совершенно аналогичным образом определяются, путем дальнейшего дифференцирования по времени, уравнения ускорений.

$$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{d^2y}{dt^2}, \frac{d^2z}{dt^2}, \frac{d^2s}{dt^2} \text{ и } \frac{d^2\psi}{dt^2} \quad (15).$$

Необходимо, однако, оговориться, что, при аппроксимации движения полиномами, степень точности получающихся вторых производных значительно ниже, чем для самих уравнений движения.

### 5. Определение силы, живой силы и кинетической энергии. Нахождение максимумов.

Определение ускорений представляется особенно интересным в силу того, что ускорения направлены по линии действия результирующих усилий и пропорциональны последним по величине. Поэтому, если нам даны массы последовательных звеньев работающего органа, и тем или иным способом зафиксировано движение его центра тяжести, то мы непосредственно из уравнений этого движения получаем полные слагающие результирующих, действующих на эти центры тяжести, сил в виде:

$$W_x = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad W_y = m \frac{d^2y}{dt^2}, \quad W_z = m \frac{d^2z}{dt^2}, \quad (16).$$

и абсолютную величину полного силового вектора,

$$W = m \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}, \quad (16a).$$

(где  $m$ —масса движущейся части), причем углы, образуемые направлением этого вектора с осями координат, соотв. определяются из уравнений:

$$\cos \alpha = \frac{W_x}{W}, \quad \cos \beta = \frac{W_y}{W}, \quad \cos \gamma = \frac{W_z}{W} \quad (16 b).$$

Ввиду того, что при живом движении мы постоянно имеем дело со связанной системой, определяемые таким образом векторы сил представляют собою полные равнодействующие, включающие в себя и результаты взаимодействия моментов пар с сопротивлением жестких опорных частей и (принимаемых за нерастяжимые) связочных механизмов сочленений; о выделении и определении этих моментов пар будет сказано ниже.

С другой стороны, не следует забывать, что при таком определении усилий мы постоянно получаем только **равнодействующие** всех, принимающих в действительности участие в движении, сил. Силы, участвующие в образовании этих равнодействующих и направленные на растяжение, сжатие, изгибание и кручение жесткой опоры звеньев, неизбежно ускользают от наблюдения при световой записи совершенного движения. Те усилия, которые определяются при анализе циклограмм в виде уравнений (16), суть только силовые векторы, которые необходимо и достаточно приложить к идеальной системе рычагов, имеющих длины и распределение масс, соответствующие работающему органу, и сочлененных между собою без трения с 2-мя степенями свободы, в их центрах тяжести, чтобы получить движение, тождественное с запечатленным на циклограмме. Но, не давая нам сведений о полной игре сил в изучаемом процессе, эти уравнения, тем не менее, позволяют судить о **необходимом**



и достаточном минимуме усилий, что имеет немаловажные преимущества для чисто-прикладных целей.

Из определенных уже уравнений слагающих скорости (12) мы получаем непосредственно величины количества движения,

$$M \frac{ds}{dt} \quad (17).$$

и кинетической энергии и живой силы:

$$J = \frac{M}{2} \left( \frac{ds}{dt} \right)^2 = \frac{M}{2} \left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Определение последних особенно важно для практических целей при изучении удара, т.-к. эффект удара определяется именно живой силой действующей массы (по причинам, изложенным в специальной части, этой массой является почти исключительно масса молотка). Но, в то время, как все обычно применяемые методы определения эффекта удара (из последних опытов в этой области следует упомянуть о методе контактов Frois) дают величину кинетической энергии только для самого мгновения удара, из уравнения (18) мы получаем эту величину для всего периода движения. Иначе говоря, мы можем определить, каков был бы эффект удара, если бы во время данного движения молоток наткнулся на препятствие в любой точке его пути. Это дает нам возможность определения максимума живой силы, а следовательно и оптимального положения объекта, на который направляется удар. Действительно, если нам желательно определить оптимальную для данного субъекта высоту тисков или наковальни, мы фотографируем его работу на заведомо-низко расположенном объекте и, определив значение  $t$ , соответствующее максимуму его полной скорости, из уравнений

$$\frac{ds}{dt} = \max., \text{ т.-е. } \frac{d^2s}{dt^2} = 0,$$

и подставив решение этого уравнения в параметрическое уравнение  $y = \varphi(t)$  центра тяжести молотка, получаем оптимальное в смысле эффекта значение высоты центра тяжести молотка в момент удара, а следовательно, и оптимальную высоту тисков.

Тем же путем производится и определение максимумов действительных результирующих усилий, при чем уравнение строится по типу

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right)^2 + \left( \frac{d^2y}{dt^2} - g \right)^2 + \left( \frac{d^2z}{dt^2} \right)^2 \right] = 0,$$

чтобы исключить влияние силы тяжести.

## 6. Нахождение траекторий центров тяжести и действующих в них усилий.

Как уже сказано, задача изучения движений у человека сильно облегчается тем, что работающий орган представляет из себя систему звеньев, каждое из которых с большой степенью приближения можно считать неизменяемой системой. Ввиду этого движение каждой точки оси такого звена известно, если известны движения некоторой пары его точек, напр., его концов.

Поэтому то и представляется особенно целесообразным помещать предназначенные для циклографической съемки лампочки на продолжении осей последовательных, вовлеченных в движение, сочленений. В частности, такое расположение лампочек позволяет изучать движение некоторых особых точек работающей системы—и, в первую очередь, центров тяжести элементов этой системы.

Можно избежать, при первоначальном исследовании, непосредственного экспериментального определения положений частичных центров тяжести, тем более, что такое определение представляется *in vivo* очень трудной и мало обеспеченной от ошибок задачей. O. Fischer'ом было произведено такое определение парциальных масс и положений центров тяжести на трупах, при чем статистика дала незначительно колеблющиеся относительно средних значений величины.

Можно смело принять, что относительные значения масс последовательных звеньев и положения их центров тяжести имеют общее для обычно - сложенных индивидуумов значение. По O. Fischer'у,<sup>1)</sup> если длину соотв. члена принять за единицу, то центр тяжести его помещается почти на одной прямой с центрами ограничивающих его суставов, в следующих расстояниях от его концов:

Таблица I.

З В Е Н О:	Расстояние от прокс. сустава, $\epsilon_1$	Расстояние от дистальн. суст., $\epsilon_2$
Плечо . . . . .	0,47	0,53
Предплечье. . . . .	0,42	0,58

Центр тяжести кисти значительно перемещается в зависимости от положения пальцев; при согнутой кисти, (как во время работы молотком), O. Fischer помещает центр тяжести ее вблизи ладонной поверхности, на уровне пястнофалангового сочленения 3-го пальца.

Отношения масс отдельных членов тела к общему его весу, по O. Fischer'у, следующие:

<sup>1)</sup> Handb. der physiol. Methodik. Tigerstedt. Bd. 2, Haelfte 1, S. 186.

Таблица II.

Все тело. . . . .	1
Плечо . . . . .	0,0336
Предплечье. . . . .	0,0228
Кисть . . . . .	0,0084

Если обозначить координаты сочленений, ограничивающих данное звено с проксимального и дистального конца, соотв. через  $XP, YP, ZP$  и  $XD, YD, ZD$ , то координаты центра тяжести данного звена будут:

$$\left. \begin{aligned} X_g &= \varepsilon_1 XD + \varepsilon_2 XP \\ Y_g &= \varepsilon_1 YD + \varepsilon_2 YP \\ Z_g &= \varepsilon_1 ZD + \varepsilon_2 ZP, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  суть величины, содержащиеся в таблице I. Так, для плеча—

$$x_{gh} = 0,53 x_s + 0,47 x_c,$$

для предплечья—

$$x_{ga} = 0,58 x_c + 0,42 x_p,$$

если индексами  $s, c, p$  обозначить соотв. координаты плечевого, локтевого и лучезапястного сочленений. Те же равенства (19) действительны, в силу их линейности, и для уравнений слагающих движения, скоростей и ускорений. Так общее уравнение слагающей скорости центра тяжести будет:

$$\frac{dx_g}{dt} = \varepsilon_1 \frac{dx_D}{dt} + \varepsilon_2 \frac{dx_P}{dt}, \quad (19a)$$

слагающая силового вектора  $W$ , приложенного к центру тяжести звена  $i$ ,

$$W_{x,i} = M_i \left[ \varepsilon_1 \frac{d^2x_D}{dt^2} + \varepsilon_2 \frac{d^2x_P}{dt^2} \right] \quad (19b)$$

Если массы последовательных звеньев работающего органа, определенные умножением массы всего тела изучаемого индивидуума на коэффициенты таблицы II, обозначить через  $m_1, m_2, \dots, m_k$ , координаты центров тяжести соответствующих звеньев—через:

$$\begin{aligned} &x_1, y_1, z_1 \\ &x_2, y_2, z_2 \\ &\dots \dots \dots \\ &x_k, y_k, z_k, \end{aligned}$$

то уравнение движения общего центра тяжести всей системы будет:

$$\left. \begin{aligned} x_g &= \frac{\sum x_i m_i}{\sum m_i} \\ y_g &= \frac{\sum y_i m_i}{\sum m_i} \\ z_g &= \frac{\sum z_i m_i}{\sum m_i} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

причем, опять таки в силу линейности, эти уравнения можно дифференцировать так же, как и уравнения (19).

### 7. Определение моментов пар и проекция силовых векторов на мышечные группы.

При всяком перемещении в пространстве связанной системы с неизменяемыми звеньями (какою мы все время, пренебрегая деформациями мышц и неправильностями суставных поверхностей, будем считать работающий орган), усилия, действующие на каждое из звеньев, могут быть расчленены на группу сообщающих этим звеньям поступательное ускорение и на группу вращающих моментов. Если с помощью изложенного выше подсчета определить результирующий вектор усилия, действующего на центр тяжести данного звена, то вектор этот, будь он приложен к независимому звену, сообщил бы ему поступательное ускорение по направлению своего действия. Но так как и проксимальный и дистальный конец звена встречают сопротивление со стороны соседних звеньев, как в силу их инерции, так и в силу их собственных активных движений, то возникающие сопротивления, вместе с приложенным в центре тяжести звена вектором, образуют пары сил, частью преобразующие движение звена из поступательного во вращательное относительно соседних звеньев и сочленений.

Должно оговориться, что мы не совершаем принципиальной ошибки, говоря о подсчитанном нами равнодействующем векторе, как о причине, а не как о следствии или выводе движения. Можно с полной уверенностью установить эквивалентность между действительно наблюдаемыми ускорениями и вызывающими их усилиями. И если в действительности усилие возникло как следствие взаимодействия мышечных импульсов и сопротивлений инертных звеньев, и в результате этого взаимодействия выразилось в определенном угловом ускорении работающего звена, то мы можем смело пойти обратным путем, по результирующему ускорению звена определяя участвовавшие в движении моменты пар и совокупные мышечные усилия главнейших групп синергистов.

Как было указано выше, вектор действующей на центр тяжести звена силы определяется из уравнения (19b). Момент этой силы по отношению к проксимальному суставу определяется произведением этой

силы на плечо, т. е. расстояние центра тяжести от проксимального сустава, или  $\epsilon_1 \gamma$  и на синус угла между направлением силы и осью изучаемого звена. Обозначая через  $w_x, w_y, w_z$  составляющие ускорения данного центра тяжести по координатным осям, через  $X_p, Y_p, Z_p$  и  $x_d, y_d, z_d$ , как и раньше, координаты проксимального и дистального сочленений, мы получим для абсолютной величины момента

$$M = \epsilon_1 m \sqrt{\left| \begin{matrix} x_p - x_d & w_x \\ y_p - y_d & w_y \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y_p - y_d & w_y \\ z_p - z_d & w_z \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z_p - z_d & w_z \\ x_p - x_d & w_x \end{matrix} \right|^2} \quad (21)$$

Для некоторых из групп синергистов можно, далее, приближенно получить величину проекции силового вектора на ось мышцы, иначе говоря, подойти весьма близко к вопросу об участии в работе данной группы мышц.

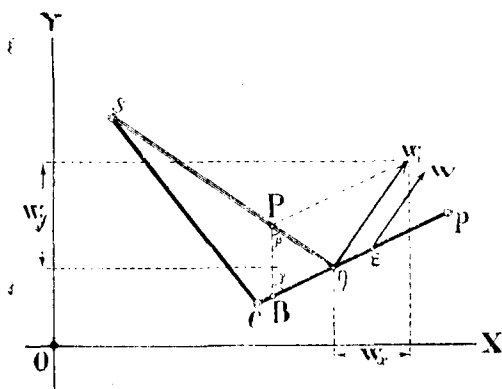


Рис. 5. Схема определения мышечных усилий.

Пусть  $s, c$  и  $p$  (рис. 5) изображают соотв. плечевой, локтевой и лучезапястный суставы,  $\eta$ —*tuberculum radii*,  $sc$ —плечо,  $cp$ —предплечье,  $\epsilon$ —центр тяжести последнего, и  $s\eta$ —*m. biceps* (отвлекаясь от длинной, соединенной с *proc. coracoideus*, головки). Пусть также  $W$ —приложенный в центре тяжести предплечья силовой вектор. Перенесем вектор  $W$  в точку прикрепления *biceps*'а,  $\eta$ , и спроецируем полученный вектор  $W_1$  на прямую  $s\eta$ ) параллельно прямой  $cp$ .

Обозначим плечо, предплечье и мышцу соотв. буквами  $h, a, M$ , а проекции каждого из этих отрезков на оси—прибавлением к их обозначениям соответствующих индексов.

Из рис. 5 ясно, что:

$$PB = W_{1,y} - W_{1,x} \frac{ay}{ax}$$

( $PB$  проведено параллельно оси  $y$ ,  $W_1P$ —параллельно предплечью  $a$ ). В треугольнике  $PB\eta$  нам известны, таким образом, сторона и 2 угла; решая его, находим:

<sup>1)</sup> На такое перенесение силы в точку, лежащую вне центра тяжести, мы имеем право в силу того, что только нормальная к оси предплечья слагающая может действовать изолированно на предплечье, и одна только может обуславливаться действием мышцы, окружающих локтевой сустав.

$$P\eta = PB \frac{ax M}{M_x ay + M_y ax}$$

Рисунок наш представляет собой, однако, плоскую проекцию действительной системы, и, как  $M$ , так и  $P\eta$ , суть в вышеполученном уравнении только проекции действительных величин на плоскость  $(x, y)$ . Заменяя  $P\eta$  через  $(P\eta)y$ , и подставляя значение  $PB$ , получаем окончательно слагающие по осям координат для напряжения  $\text{в} \text{ис} \text{р} \text{и} \text{т} \text{аль} \text{ной}$  группы:

$$\left. \begin{aligned} (P\eta)_x &= M_x \frac{W^{1,x} az - W^{1,z} ax}{M_x az + M_z ax} \\ (P\eta)_y &= M_y \frac{W^{1,y} ax - W^{1,x} ay}{M_y ax + M_x ay} \\ (P\eta)_z &= M_z \frac{W^{1,z} ay - W^{1,y} az}{M_z ay + M_y az} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} ax &= xp - xc, \quad M_x = x\eta - xs = kxp + (1-k)xc - xs, \\ ay &= yp - yc, \quad M_y = y\eta - ys = kyp + (1-k)yc - ys, \\ az &= zp - zc, \quad M_z = z\eta - zs = kzp + (1-k)zc - zs, \end{aligned}$$

и  $k$  есть отношение расстояния от точки  $\eta$  до локтевого сустава к длине всего предплечья.

## 8. Ряды FOURIER. Мотивировка.

Тот прием, к которому мы первоначально прибегли для приближительного определения движения работающего органа, именно интерполяция полиномами, позволяет изучить только отдельные детали рабочего движения, только заключенные в известных границах отрезки этого движения. Действительно, интерполяционные полиномы, которыми мы исключительно пользовались во всем вышеизложенном анализе, не допускают экстраполяции. Таким образом, они позволяют нам изучать только те резко отграниченные процессы, которые протекают между крайними вовлеченными в интерполяцию значениями времени. Всякий полином стремится к бесконечности при достаточно больших значениях независимого переменного. Вследствие этого является очень важным найти другой прием приближенного представления функциональной зависимости между элементами движения, который сделал бы такую экстраполяцию возможной и позволил бы, таким образом, подойти к исследованию произвольно больших интервалов работы. Нам представляется важным не только подробное определение деталей и нюансов движения; гораздо важнее для проникновения в биомеханическую суть рабочего процесса иметь возможность обозреть аналитически весь процесс и рассматривать его течение, как нечто целое, органически связанное.

Другим пробелом интерполяционных полиномов является то, что они дают нам только количественные даты изучаемых механических функций, обуславливающих и определяющих течение рабочего процесса, не имея

возможности ни как-нибудь ближе определить их механическую природу и происхождение, ни дать нам какие-либо сведения о их аналитических свойствах. Действительная форма этих функций, обуславливаемая какими-то внутренними биомеханическими и физиологическими соотношениями, остается скрытой под индифферентной внешностью аппроксимативных полиномов—этих эмбрионов Тэйлора ряда. Поскольку для нас важна не только количественная, но и качественная и каузальная оценка рабочего процесса, мы не можем удовлетвориться, пока не овладеем действительной, вытекающей из общемеханических и биомеханических соотношений, формой изучаемых функций.

В третьих, наконец, элементарные рабочие процессы протекают в огромном большинстве случаев циклически; иначе говоря, состоят из более или менее одинаковых, периодически-повторяющихся приемов, и это основное свойство движения опять таки не поддается изображению на языке полиномов. Каждое циклическое движение только-что определенного вида, т.е. состоящее из периодически-возвращающихся приемов с индивидуальными вариантами, может быть представлено в виде суммы двух слагаемых, из которых одно периодически, другое аperiodично:

$$F(t) = f_p(t) + f_a(t).$$

При этом первое, периодическое слагаемое в изучаемых нами случаях много значительнее второго. Чем опытнее и искуснее работник, тем сходнее последовательные циклы его работы, иначе говоря, тем ничтожнее второе слагаемое. Таким образом почти во всех случаях первое слагаемое представляет собою основную, существенную часть рабочего движения; второе же, выступающее всего яснее у неопытных и непригодных субъектов, обычно совпадает с подлежащей устранению, возмущающей его частью. Поэтому в первую очередь подлежит исследованию первый, периодический компонент, и как наиболее закономерный и как наиболее существенный элемент движения и, при этом, подлежит представлению в виде периодической функции. Только после этого следует перейти к изучению второй, аperiodической составляющей, чтобы определить, устранима ли она вообще и, если устранима, то каким путем, в каких целях и в какой степени.

Все эти соображения естественно приводят к мысли применить к изучению кривых движения периодические функции и, в частности, тригонометрические полиномы и ряды Fourier. Весьма простой и хорошо знакомый имевшим дело с сложными гармоническими волнами вид кривых слагающих движения (см. рис. 3, 4 и, особенно, 12) еще более убеждает нас в правильности такого подхода.

## 9. Ряды FOURIER. Методика разложения.

Как известно, ряд Fourier имеет следующую общую форму:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + \dots + A_n \cos nt + \dots + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + \dots + B_n \sin nt + \dots, \quad (23)$$

где 
$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt,$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos nt \, dt,$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin nt \, dt$$

В нашу задачу входит, следовательно, представление параметрических слагающих изучаемого периодического движения в виде тригонометрических рядов, иначе говоря, определение последовательных коэффициентов членов ряда.

Мы не имеем возможности в рамках настоящей статьи останавливаться ни на исследовании свойств эмпирически - получаемых рядов Fourier, ни на подробном описании приборов, предложенных для гармонического анализа эмпирических кривых. Весьма обстоятельные данные о разложении эмпирических кривых в ряды Fourier можно найти в работах *А. Крылова*<sup>1)</sup> и *Carse & Shearer*<sup>2)</sup>. Из приборов, предложенных для указанной цели, упомянем дорогой и сложный анализатор *Henrici*, анализатор *O. Mader'a*,<sup>3)</sup> и гармонический анализатор *Michelson'a u Stratton'a*<sup>4)</sup>; несколько ниже опишем 2 предложенные нами приспособления, крайне просто позволяющие с достаточной точностью находить интересующие нас коэффициенты.

Прежде всего необходимо определить длительность периода или цикла отдельного, подлежащего анализу, движения. Для этой цели выгодно иметь на циклографическом снимке завсёмо несколько более одного цикла движения, так, чтобы напр., при изучении удара съёмка началась на несколько сотых секунды раньше и окончилась на столько же позже каждого из двух последовательных ударов.

Так или иначе, на циклографическом снимке мы должны получить несколько заходящие друг на друга концы двух смежных циклов. Теперь, пользуясь тем, что световые точки циклограммы равно отстоят друг от друга по времени, иначе говоря, принимая световой интервал за единицу отсчета времени, сосчитываем с любого, ещё захваченного началом следующего цикла, пункта, световые интервалы изучаемого цикла вплоть до возвращения к исходному пункту. Так как, вообще говоря, положения световых точек следующего цикла не совпадают с таковыми изучаемого цикла, то за заключительный неполный интервал можно приблизительно принять ту дробную часть светового интервала, которая отделяет последнюю, еще входящую в изучаемый цикл, световую точку от исходной точки отсчета и, таким образом, перейти снова к первоначальному движению, замыкая таким путем цикл и исключая аperiodическую слагающую<sup>5)</sup>.

Если количество световых интервалов, составляющих полный цикл движения, равно  $k$  (где  $k$ , вообще говоря, есть некоторая неправильная

1) А. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях. СПб, 1911.

2) G. Carse and P. Shearer. A. Course in Fourier's Analysis. London, Bell and Sons, 1915.

3) Elektrotechnische Zeitschr., 1909, № 36.

4) Philosophical Magazine 1898. По-русски: Майкельсон. Световые волны и их применения. Матезис 1912.

5) В виду того, что эта аperiodическая слагающая, в свою очередь, обычно распадается на весьма медленно текущую переменную и на систему случайных вариантов, мы вправе считать первую часть ее меняющейся скачкообразно; вторую же исключить сравнительным изучением многих циклов.



дробь), а продолжительность одного интервала, т.е. обратная величина числу световых точек в секунду, равна  $\delta = \frac{1}{N}$ , то полный период цикла равен  $k\delta$ . Подставляя это значение периода в общее уравнение ряда (23), где в интересах общности период принят равным  $2\pi$ , получаем общий вид интересующего нас ряда данного движения (по одному из циклов)

$$f(t) = \frac{1}{k\delta} \int_0^{k\delta} f(t) dt + \left[ \frac{2}{k\delta} \int_0^{k\delta} f(t) \cos 2\pi \frac{t}{k\delta} dt \right] \cos 2\pi \frac{t}{k\delta} + \dots +$$

$$+ \left[ \frac{2}{k\delta} \int_0^{k\delta} f(t) \cos 2\pi \frac{nt}{k\delta} dt \right] \cos 2\pi \frac{nt}{k\delta} + \dots +$$

$$+ \left[ \frac{2}{k\delta} \int_0^{k\delta} f(t) \sin 2\pi \frac{t}{k\delta} dt \right] \sin 2\pi \frac{t}{k\delta} + \dots, \quad (24)$$

в котором теперь, для данного конкретного цикла, необходимо определить числовые значения определенных интегралов, заключенных в квадратные скобки. В настоящем отделе статьи мы будем иметь дело исключительно с разложением в ряды параметрических слагающих движения по осям прямоугольных координат, т.е. функций вида (7).

В Центральном Институте Труда конструируется в настоящее время по моему проекту гармонический анализатор весьма простого устройства, отдаленно напоминающий анализатор Негиси, но обладающий преимуществами простоты и дешевизны. Прибор этот, названный нами кимометром, состоит из прямоугольного продолговатого ящика, одна из длинных стенок которого представляет собою кассету для светочувствительной бумаги. Внутри этого ящика находится вращающийся на оси зажим, в который помещается вырезанный из бумаги силуэт подлежащей анализу кривой так, что последний может вместе с зажимом вращаться вокруг оси абсцисс, параллельной продольной оси ящика. На самом ящике помещается на рельсах каретка, которая может катиться по роликам вдоль открытой, противоположной кассете, стороны ящика. Каретка эта несет на себе электрическую лампочку с осветительным прибором, могущим посылать в ящик пучек параллельных лучей, и соединена с щелевым затвором, передвигающимся вместе с нею вдоль кассеты с светочувствительной бумагой.

Каретка соединяется с земными полугайками с серией из 4-х винтовых шпинделей, оси которых параллельны длинной оси ящика; шаг этих шпинделей рассчитан так, что каретка проходит всю длину ящика в то время, как ось последнего, несущая на себе силуэт кривой, успевает совершить как раз один, два, три или четыре полных оборота, смотря по тому, с каким из четырех шпинделей будет соединена каретка.

Если в некоторый момент  $t_a$  плоскость силуэта кривой наклонена к плоскости светочувствительного слоя под углом  $\theta$ , то изображение тени той из ее ординат, которая лежит против щели затвора, запечатленное параллельным пучком на чувствительной бумаге, будет представлять собою ортогональную проекцию этой ординаты и равняться  $F(t_a) \cos \theta$ . Но так как ось ящика совершает целое число полных обращений за время прохождения щелью затвора вдоль всего периода силуэтированной кривой, то  $\theta = 2\pi n \frac{t}{T}$ , где  $T$ —период прохождения каретки, а  $n$ —со-

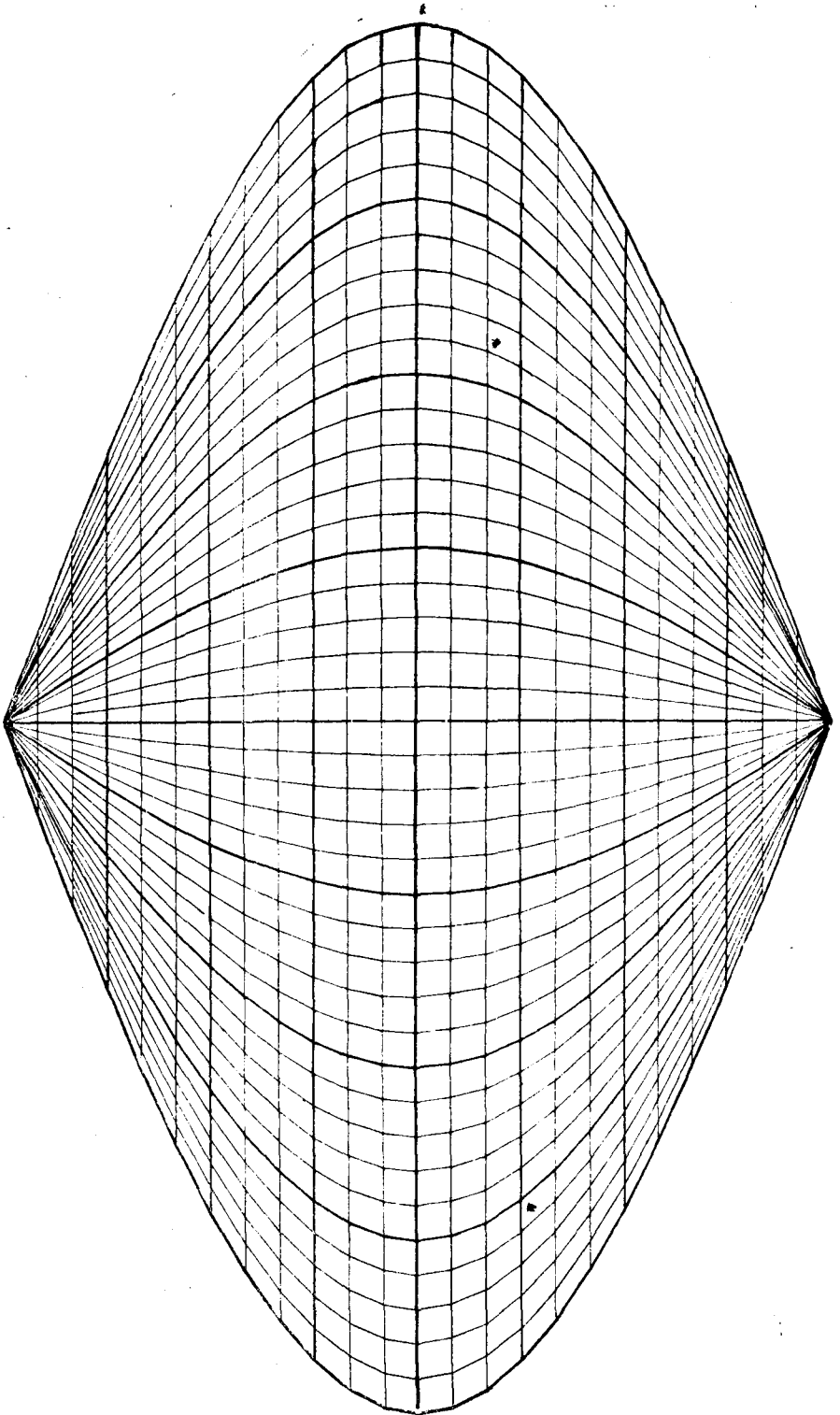


Рис. 6 Синусоидн. координатн. сетка для определения коэффициентов ряда Fourier.

ответствующее число полных оборотов оси. Ординаты изображения на чувствительном слое будут равны

$$f(t) \cos 2\pi n \frac{t}{T}, \quad (25)$$

т.е. получающаяся на чувствительной бумаге кривая будет представлять собою подинтегральную функцию коэффициентов уравнения (24). Простым планиметрированием этой кривой с помощью планиметра Amsler'a мы получаем числовые значения интересующих нас коэффициентов ряда. Подробное описание прибора и получаемых с помощью его кривых будет дано в особой статье.

Тот же результат может быть получен еще более простым путем. Как и в вышеописанном приборе, задача сводится к графическому получению функции (25), с последующим планиметрированием ее в определенных границах.

На рис. 6 приведена в натуральную величину употребляемая нами для этой цели координатная сетка. Ординаты этой сетки идут под прямым углом к оси абсцисс, как и в декартовых координатах; абсциссы же представляют собою синусоиды одного и того же периода, но разных амплитуд. Полагая длительность изучаемого цикла последовательно равною двум, четырем, шести и т. д. длинам сетки по ее оси абсцисс, нанося на размеченные соответственно числу световых точек ординаты сетки последовательные значения анализируемой функции, в масштабах, заданных величиной делений на соответствующей ординате, и соединяя полученные точки приближенной кривой, мы получаем графическое изображение опять-таки той же функции (25). Действительно, обозначая коэффициент пропорциональности, определяемый избранным нами масштабом по ординате максимума сетки, через  $k$ , имеем для каждой, нанесенной нами точки функции  $f(t)$  значение ординаты

$$kf(t) \sin 2\pi n \frac{t}{T} \quad \text{или} \quad kf(t) \cos 2\pi n \frac{t}{T},$$

в зависимости от того, возьмем ли мы за начало графики нуль или максимум сетки. Планиметрируя полученные графики, получаем снова числовые значения соответствующих коэффициентов. Я решаюсь описывать этот весьма простой прием лишь потому, что не встречал указаний на него в литературе.

Если в нашем распоряжении нет ни гармонического анализатора, ни синусоидной сетки, анализ кривых делается несколько более громоздким. Из предложенных для последнего способов мы пользуемся следующей схемой.

С помощью логарифмической линейки составляем следующую таблицу:

$f(t)$	0	$f(t) \cos t$	0	$f(t) \cos 2t$	...	0	$f(t) \sin t$	...
$f(t_0)$	0°	$f(t_0)$	0°	$f(t_0)$	...	0°	0	...
$f(t_1)$	$\frac{360^\circ}{q}$	$f(t_1) \cos \frac{360^\circ}{q}$	$2 \cdot \frac{360^\circ}{q}$	$f(t_1) \cos 2 \cdot \frac{360^\circ}{q}$	...	$\frac{360^\circ}{q}$	$f(t_1) \sin \frac{360^\circ}{q}$	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$f(t_{q-1})$	$\frac{(q-1)360^\circ}{q}$	$f(t_{q-1}) \cos (q-1) \frac{360^\circ}{q}$	$2(q-1) \frac{360^\circ}{q}$	$f(t_{q-1}) \cos 2(q-1) \frac{360^\circ}{q}$	...	$(q-1) \frac{360^\circ}{q}$	$f(t_{q-1}) \sin (q-1) \frac{360^\circ}{q}$	...
$f(t_q)$	360°	$f(t_q) = f(t_0)$	$2 \cdot 360^\circ$	$f(t_0)$	...	360°	0	...

Например, для 19,2 световых интервалов на цикл ( $q=19,2$ ):

F (t)	$0$	F(t) cos t	$90_p$	F(t)cos 2t	$0$	F(t) sint
539mm	90°	539	90 <sub>p</sub>	539	0	0
527 "	71°15'	498	52°30'	418	18°45'	169
526 "	52°30'	416	15 <sub>p</sub>	136	37°30'	320
515 "	33°15'	286	-22°30'	-197	56°15'	428
491 »	15 <sub>p</sub>	127	-60 <sub>p</sub>	-125	75 <sub>p</sub>	474

(Градусы в столбиках приведены, для удобства пользования таблицами или логарифмической линейкой, к первому квадранту; для косинусов заменены значениями дополнительных углов).

В этой таблице мы вносим в первый столбец полученные из промеров последовательных световых точек значения анализируемой функции, в следующие столбцы—произведения этих значений с синусами и косинусами последовательных кратных от  $\frac{360^{\circ}}{q}$ ,  $2 \cdot \frac{360^{\circ}}{q}$  и т. д. Затем каждый полученный столбец планиметрируется приближенно с помощью общеизвестных интеграционных формул. В качестве примеров таких укажу здесь:

$$\begin{aligned}
 & F = 0,3 b [y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3] \text{ (по 4-м значен.)} \\
 & F = \frac{2}{45} b \left[ 7(y_0 + y_1) + 32(y_1 + y_3) + 12y_2 \right] \text{ (по 5 значен.)} \\
 & F = 0,3 b [y_0 + y_2 + y_4 + y_6 + 5(y_1 + y_5) + 6y_3] \text{ (по 7 значен.)}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

где  $b$  есть длина интервала между последовательными значениями функции,  $y_0, y_1, \dots, y_6$  — соответствующие значения последней.

### 10. Ряды FOURIER. Формы получающихся кривых. Сходимость.

Общим и основным свойством тригонометрических рядов слагающих движения, для большого числа произведенных нами разложений, в числе которых было и взятое нами для сравнения движение крыла голубя, записанное Marey<sup>1)</sup>, оказалась чрезвычайно быстрая сходимость. Если коэффициент при  $\cos 2\pi \frac{t}{k\delta}$  принять за единицу, то в среднем, для всех, полученных нами разложений живого движения, коэффициенты остальных членов разложения будут:

Член разложения:	Коэффициент:
$\left( \begin{array}{l} \cos 2\pi \frac{t}{k\delta} \text{ см.} \\ \sin 2\pi \frac{t}{k\delta} \end{array} \right)$	$\left( \begin{array}{l} 1 \\ 0,364 \end{array} \right)$
$\left( \begin{array}{l} \cos 2\pi \frac{2t}{k\delta} \\ \sin 2\pi \frac{2t}{k\delta} \end{array} \right)$	$\left( \begin{array}{l} 0,229 \\ 0,143 \end{array} \right)$
$\left( \begin{array}{l} \cos 2\pi \frac{3t}{k\delta} \\ \sin 2\pi \frac{3t}{k\delta} \end{array} \right)$	$\left( \begin{array}{l} 0,077 \\ 0,048 \end{array} \right)$

составляя для третьего члена разложения, (т.-е. для пары членов с вдвое меньшим периодом) не более 6% коэффициента при первой паре. Еще более важным для био-механика является то, что остаточный член ряда после трех первых представляется почти во всех случаях *quantité négligeable*, не выходящей за пределы ошибки наблюдения. Эта сходимость несколько слабее только для движений, чем либо насильственно прерываемых; поэтому тригонометрические полиномы, аппроксимирующие движение бойка бьющего молотка, обладают несколько меньшей степенью сходимости, и представляемые ими кривые сильнее уклоняются от эмпирических в области ударного толчка.

1) J Marey. La machine animale. Paris 1873.

Такая сходимость отнюдь не обязательна для всякой, более или менее плавной кривой; доказательством этому служит то, что те же эмпирические кривые, которые давали нам такую быструю сходимость, начинают сходиться значительно медленнее, если для опыта расстояние между какими-либо двумя соседними точками изменить на незначительную величину. Таким образом, здесь мы имеем дело с некоторым общим законом, имеющим силу для всевозможных форм живого движения, при одном только условии ритмичности последнего. Ниже мы вернемся к формулировке этого общего принципа; пока же отметим только его большую методическую выгоду, позволяющую нам от гармонического ряда перейти к конечным тригонометрическим суммам, и притом к таким, где нам почти во всех случаях достаточно трех членов, не принимая в расчет аддитивной константы и объединяя между собой члены одинаковых периодов.

## 11. Формы представления рядов и тригонометрических сумм.

Как известно, ряды Фурье могут быть представлены еще в другой форме. Действительно, сумма двух гармонических колебаний, одинаково направленных и с одинаковым периодом есть, в свою очередь, гармоническое колебание того же периода. Если, как в нашем случае, слагающие с общим периодом имеют вид  $A_n \cos nt$  и  $B_n \sin nt$ , то сумма их равна

$$S_n \sin n(t + \Theta_n), \quad (27)$$

$$\text{где } S_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \text{и} \quad \Theta_n = \operatorname{arctg} \frac{A_n}{B_n}$$

Таким образом весь ряд получает следующую сжатую форму

$$F(t) = A_0 + S_1 \sin(t + \Theta_1) + S_2 \sin 2(t + \Theta_2) + \dots, \quad (28)$$

имеющую то преимущество, что коэффициенты при ее членах уже не зависят от начальной точки отсчета времени, а начальные фазы  $\Theta$  преобразуются при перемене начала координат путем простого алгебраического сложения. Эта форма особенно выгодна для сравнения фаз и моментов вступления как отдельных слагающих синусоид, так и движений различных точек.

## 12. Эллипсы. Определение их элементов.

После того, как разложение всех трех слагающих движения закончено, каждая из этих слагающих приобретает вид (28). Если теперь выделить из каждой из трех полученных нами для трех слагающих движения по координатным осям тригонометрических сумм в особую группу члены, содержащие синусоиды одного и того же периода, то результат анализа движения может быть представлен в гораздо более наглядной и выгодной форме.

В самом деле, если мы имеем два взаимно перпендикулярных гармонических колебательных движения с одинаковым периодом  $T$ , так что

$$x = a \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + \Theta_1 \right) \text{ и } y = b \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + \Theta_2 \right), \text{ го}$$

$$\frac{x}{a} = \sin 2\pi \frac{t}{T} \cos \Theta_1 + \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin \Theta_1, \text{ и следовательно}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{a} \cos \Theta_2 - \frac{y}{b} \cos \Theta_1 &= \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin (\Theta_1 - \Theta_2) \\ \frac{x}{a} \sin \Theta_2 - \frac{y}{b} \sin \Theta_1 &= \sin 2\pi \frac{t}{T} \sin (\Theta_2 - \Theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Взяв сумму квадратов обоих равенств (29), получаем

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2 \frac{xy}{ab} \cos (\Theta_1 - \Theta_2) = \sin^2 (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (30)$$

Обозначим разность фаз  $(\Theta_1 - \Theta_2)$  через  $\Phi$ ; тогда из (30) следует

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2 \frac{xy}{ab} \cos \Phi = \sin^2 \Phi, \quad (31)$$

а это есть уравнение **эллипса**.<sup>1)</sup>

Если рассматривать **все три** слагающие движения с одним и тем же периодом, то нетрудно показать, что и при этом условии траектория результирующего движения будет попрежнему эллипсом. Уравнения вида (31) определяют его проекции на координатные плоскости; определение же элементов самого эллипса может быть произведено следующим образом.

Пусть три слагающих движения выражены в тригонометрических полиномах

$$\begin{aligned} x &= A_{x,0} + A_{x,1} \cos t + B_{x,1} \sin t + A_{x,2} \cos 2t + \dots \\ y &= A_{y,0} + A_{y,1} \cos t + B_{y,1} \sin t + A_{y,2} \cos 2t + \dots \\ z &= A_{z,0} + A_{z,1} \cos t + B_{z,1} \sin t + A_{z,2} \cos 2t + \dots, \end{aligned}$$

пренебрегаем коэффициентом  $\frac{2\pi}{T}$  при  $t$ , не имеющим значения для данной задачи.

Координаты центра каждого из совершающихся по эллипсу гармонических колебаний данного периода суть, очевидно  $A_{x,0}$ ,  $A_{y,0}$ ,  $A_{z,0}$ . Обозначим радиус вектор одного из эллипсов через  $R_n$ .

<sup>1)</sup> См. О. Хвольсон. Курс физики. СПб. Риккер 1914. Том I, стр. 134.





рии их суть эллипсы, лежащие, вообще говоря, в разных плоскостях.

Составляющие колебания по каждому из эллипсов совершаются, по обычному закону гармонических колебаний, так, что площади, описываемых ими эллиптических секторов пропорциональны времени. Всю систему движения можно представлять себе таким образом, что центр второго эллипса подвижен и колеблется гармонически около точки равновесия, обегая первый эллипс; в то же время третий, наименьший эллипс обегает тем же порядком второй, и, наконец, на этом наименьшем эллипсе колеблется, обегая его кругом, точка, принадлежащая живому, движущемуся телу.

Эта, несколько громоздкая в такой интерпретации, и напоминающая эпициклические движения Птолемея, система в действительности более напоминает обращение спутника около планеты, и планеты около центрального светила, с той основной разницей, что центры колебаний постоянно расползены в живом движении в центрах, а не в фокусах эллипсов. Но даже и эта кажущаяся искусственность и тяжеловесность исчезает, если мы сопоставим такое сочетанное колебательное движение с тем изящным и простым явлением, с которым оно по существу наиболее сходно — именно с фигурами Lissajons.

Точка, служащая центром эллипсов, и определяемая свободными членами тригонометрических полиномов, как координатами, может быть рассматриваема, как некоторый идеальный центр равновесия, около которого колеблется изучаемая нами точка работающего органа. Каждая прямая этого органа описывает около прямой, соединяющей идеальные центры колебания двух ее точек, систему эллиптических конусов, сумма которых дает в общей совокупности сложную поверхность, хорошо видимую на стерео-таблице 2, где она представляется в виде некоторой линейчатой поверхности. Для каждой точки из континуума точек работающего органа должен существовать при этом свой идеальный центр равновесия; и континуум этих идеальных центров, имеющий, очевидно, форму самого работающего органа, можно называть идеальным положением равновесия, около которого совершаются только что описанные сочетанные колебания.

Интересно отметить еще следующую особенность сложного колебания около только что определенной точки равновесия, особенность, независящую от количества полученных фактически членов разложения, т.-е. справедливую во всяком случае для самой эмпирической кривой.

Если вдоль траектории движущейся точки работающего органа распределить некоторую массу так, чтобы отрезкам, проходимым в равные промежутки времени, соответствовали равные массы (в первом приближении так происходит, например, с солями серебра на самой фотографической пластинке, заснимающей циклограмму, т.-к. отрезки, проходимые лампочкой в равные промежутки времени, получают равные количества фотохимической энергии, т.-е. выделяют равные массы металлического серебра), то

$$\begin{aligned} & A_{x,1} \int_0^{k\delta} m \cdot \cos 2\pi \frac{t}{k\delta} dt + B_{x,1} \int_0^{k\delta} m \cdot \sin 2\pi \frac{t}{k\delta} dt + \dots = \\ & = m \left[ A_{x,1} \int_0^{k\delta} \cos 2\pi \frac{t}{k\delta} dt + B_{x,1} \int_0^{k\delta} \sin 2\pi \frac{t}{k\delta} dt + \dots \right] = 0 \end{aligned}$$

так как масса, по условию, не зависит от  $t$ . А это значит, что для

распределенной таким образом по траектории массы идеальный центр равновесия будет и центром тяжести.

Все эти соображения я привожу здесь для того, чтобы яснее показать крайне изящную и постоянную внутреннюю закономерность кажущегося случайным движения; в дальнейшем мы постараемся иллюстрировать и глубже разъяснить суть и природу этой закономерности на частном примере движения — ритмической работе молотком, где мы будем иметь больше данных проникнуть в био-динамические основания и следствия только намеченных здесь соразмерности и единства.

### 13. Уравнения скоростей и ускорений.

Слагающие скорости движения могут теперь быть получены путем дифференцирования по времени наших периодических функций. Сходимость получающихся сумм при этом уменьшается, но все еще достаточно для того, чтобы ограничиться первыми тремя-четырьмя членами суммы.

Скорость, с которой идеальная точка движется по эллипсу,

$$\begin{aligned} \frac{ds_n}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{dx_n}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_n}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_n}{dt}\right)^2} = \\ &= n \sqrt{A^2 \sin^2 nt + B^2 \cos^2 nt - C \sin 2nt} = \\ &= n \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 \sin^2 n(t-t_0) + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \cos^2 n(t-t_0)} = \\ &= n \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \frac{1}{4}(L^2 - l^2) \cos^2 n(t-t_0)} = \\ &= \frac{Ln}{2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 n(t-t_0)}, \end{aligned} \quad (38)$$

откуда, вводя снова коэффициент  $\frac{2\pi}{k\delta}$ , получаем, что скорость движения

на концах большой оси равна  $\frac{2\pi}{k\delta} \cdot \frac{nl}{2}$ , на концах малой —  $\frac{2\pi}{k\delta} \cdot \frac{pL}{2}$ .

Первое из этих значений соответствует минимуму, второе — максимуму скорости. Графические изображения получающихся скоростей, иначе говоря, уравнения (38) помещены на рис. 18, где отдельные кривые изображают изменения линейных скоростей движения по эллипсу в течение одного полупериода. Различные формы кривых зависят только от эксцентриситета эллипса, как то следует из уравнения (38).

Суммарная скорость движения точки по траектории живого движения,  $\frac{ds}{dt}$ , определяется по обычному способу, описанному в § 4.

При определении ускорений и сил, конвергенция рядов обычно становится уже недостаточной. Поэтому лучше прибегнуть к определению отдельных последовательных значений вторых производных другим путем,

например, по методу конечных разностей (см. *Крылов, Л. С.*, стр. 245), и полученные таким способом значения разложить в гармонический ряд обычным путем. Как правило, и при этом образе действий необходимо будет принять в расчет большее число членов разложения.

Полезно прибавить, что разложение в тригонометрические ряды выгодно и для изучения аperiodической составляющей движения,  $f_a(t)$ . Различия последовательных циклов сводятся, очевидно, к колебаниям положения идеальных точек равновесия, и к колебанию около последних слагающих движение эллипсов. Каждый из элементов этого аperiodического движения может быть, таким образом, получен в изолированном виде, из сравнения разложений последовательных циклов движения, и изучен, как в отношении его течения во времени, так и в отношении взаимной зависимости его с другими составляющими аperiodического компонента.

#### 14. Методика световой записи удара.

Вышеизложенная методика аналитической обработки световых документов движения была применена нами впервые для изучения движений правой руки при работе молотком, в частности—при рубке зубилом.

При всем весьма частном характере предмета наших исследований задача самого исследования остается не менее общей. Помимо того,

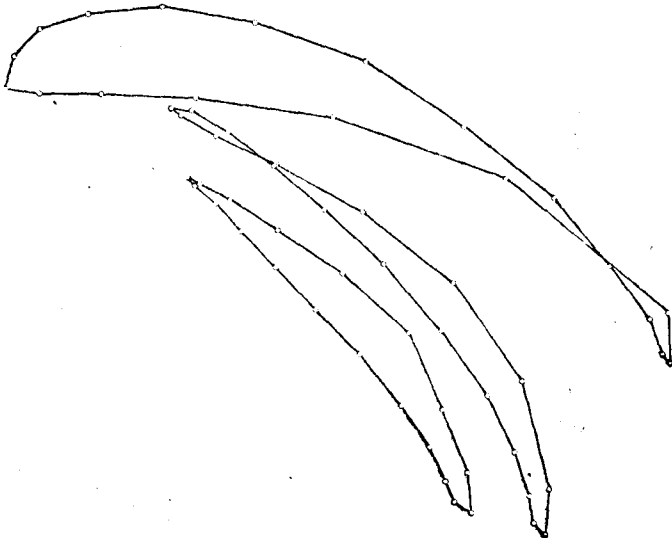


Рис. 7. Циклограмма типичного движения правой руки при рубке зубилом)  
Справа налево: 1) траектория центра тяжести молотка, 2) траектория пястно-фалангового сустава, 3) траектория лучезапястного сустава. (Негатив № 20819).

что рубка зубилом, по отзывам специалистов—инженеров и слесарей—является типовым представителем всевозможных ручных ударных операций и в качестве такового употребляется в первую очередь при обучении трудовым процессам педагогической лабораторией и учебной частью Центрального Института Труда, это движение оказывается очень удоб-

ным и для изучения на нем движений — закономерностей движения вообще, со свойственными всякому живому движению, больше почти не вскрытыми, законами и особенностями.

К преимуществам этого движения принадлежит, во-первых, то, что это движение ритмическое и привычное. Все случайные отклонения

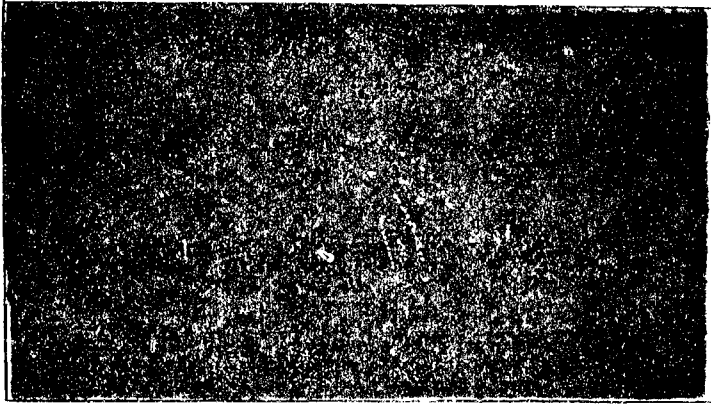


Рис. 8. Циклограмма рубки зубилом. Более точная работа с меньшим размахом. Другой испытуемый. (Статья № 217).

и необоснованные варианты, все капризы непроизвольного движения с переменной психической установкой, то и даже меняющейся в связи с неудовольствием богатством психических ингредиентов, почти целиком исключаются в этой, привычной до автоматизма и элементарной до монотонности, разовидности движения. Это движение принадлежит к числу тех, из совокупности причин которых включены почти все моменты, кроме чисто биомеханических.

Во-вторых, это движение принадлежит к числу размашистых и почти вольных, так как внешние препятствия, осложняющие закономерность движения, врываются в его течение лишь на ничтожно малый промежуток времени в самый момент удара. Вся остальную часть рабочего времени ничто извне не посягает на деятельность биомеханических факторов. В этом отношении рубка имеет некоторые преимущества для биомеханического исследования не только перед нажимными операциями типа опиловки, но даже перед ходьбой.

В дальнейшем мы попытаемся попытаться охарактеризовать все то, что удалось экспериментально обнаружить по отношению к процессу рубки, как таковой, по преимущественно наше внимание будет обращено на отыскание общих биомеханических закономерностей, необходимо присутствующих всякому живому ритмическому движению. Такой обобщающий подход будет, по моему убеждению, выгоднее не только для обще-физиологических целей, но и непосредственно для интересов прикладной биомеханики.

Как было изложено в § 2, мы пользовались для регистрации движения исключительно световой, и преимущественно стереоскопической записью. Стереобаза, применявшаяся нами, колебалась между 300—420 мм., расстояние камер от масштаба-стойки — между

2800—3500 мм. Обтюратор, снабженный 4-мя равноотстоящими, двадцатипяти-градусными секторами-прорезами, вращался со скоростью от 6 до 10 оборотов в секунду.

Лампочки укреплялись в 4-х пунктах: на уровне центра тяжести молотка, над головкой 3-ей пястной кости, на уровне лучезапястного и локтевого сочленений. Первая лампочка отстояла от оси своего звена (молотка) на 10—15 мм., вторая на 30—35 мм., третья на то же расстояние, четвертая на 50—60 м.м. В виду невозможности, при многообразных вращательных движениях звеньев, учесть действительные положения точек пересечения осей звеньев, мы сделали первоначальное допущение о близком сходстве наблюдаемого и действительного движений, не рискуя, впрочем, в худшем случае, ошибкой более, чем на 10—20 мм. Для каждого подвергнувшегося эксперименту субъекта производилось предварительное антропометрическое обследование, особенно детальное в отношении правой руки; съемка производилась всегда по средние работы, когда субъект успевал вработаться и войти в русло ритмического процесса. Субъекту не было известно о том, какой именно из циклов его работы запечатлевается на фотографической пластинке.

До настоящего времени эксперименту с последующим анализом подвергалась только работа опытных, квалифицированных мастеров.

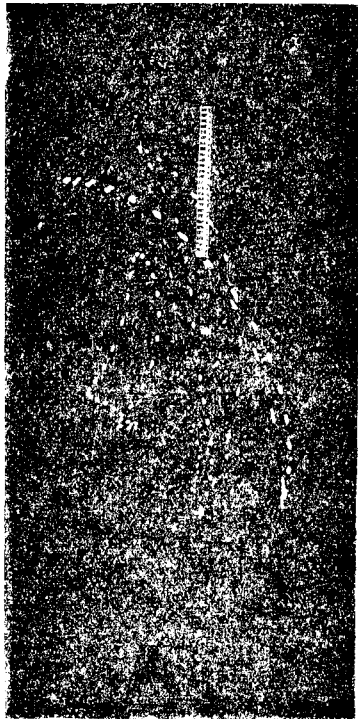


Рис. 9. Циклограмма удара молотком при котельной клевке. Наиболее растянутая форма одного из ударных движений. Справа палево: 1) траектория центра тяжести молотка, 2) траектория пястно-фалангового сустава, 3) траектория лучезапястного сустава, 4) траектория локтевого сустава правой руки (Сергиев № 282).

## 15. Описание удара. а) Типы. б) Течение движения.

В ударных операциях можно отличать ряд профессиональных типов, постепенно переходящих один в другой, и отличающихся главным образом количественно, амплитудой размаха и кинетической энергией удара, т.е. различными массами и конечными скоростями молотка. С био-механической стороны эти профессиональные типы, от слабейшего к сильнейшему, отличаются постепенным вовлечением все большего числа элементов костного и мышечного скелета. Начиная с ударов, в которых почти не участвует даже правое предплечье, мы переходим к таким, где постепенно втягивается в работу предплечье, плечо и лопаточно-ключичный аппарат правой руки. От этих отпоручных ударов мы

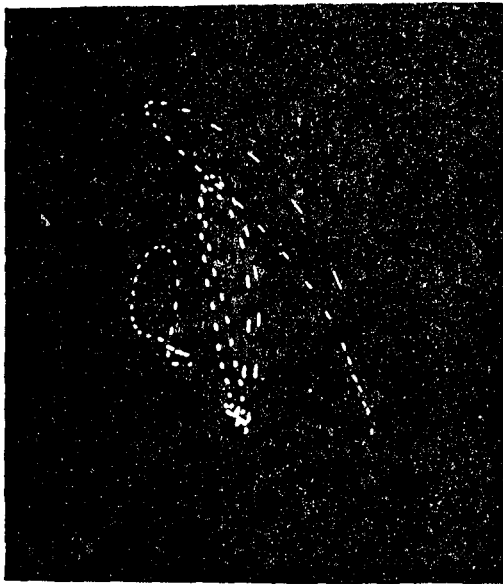


Рис. 10. Циклограмма двухручного ударного движения при котельной кленке. Оба рисунка, 9 и 10, представляют переходные формы между одно-ручными и двухручными ударными операциями. Точки относятся к тем же четырем точкам правой руки. Траектория движения молотка при ударе лежит выше, чем при замахе. (Негатив № 185).

доходим, без постепенных переходов, до двухручных, при чем последовательно вовлекаются в движение левая рука, верхний отдел позвоночника с головой и грудной клеткой, нижний отдел позвоночника со всей системой спинной и брюшной мускулатуры, таз с системой тазобедренных мышц и, наконец, бедра. Между одноручным и двухручным ударом, как сказано, нет постепенного биомеханического перехода: постановка ног сразу меняется; опорной колонной вместо правой ноги становится левая, ранее игравшая роль контр-форса, обращенного вперед; правая нога, в свою очередь, становится контр-форсом, обращенным почти назад. Траектория одноручного удара, узко петлеобразная, с замахом неизменно выше удара, заменяется при двухручном широким, почти кругообразным движением с замахом латерально и значительно ниже ударного полета молотка. (См. рис. 7, 8, 9, 10 и 11).

В задачу настоящей статьи не входит описание и изучение всего многообразия ударных типов. Из всех вышеохарактеризованных вариантов детальному исследованию была подвергнута только рубка зубилом—одноручная ударная операция, охватывающая почти исключительно правые плечевой пояс и руку. Молоток, употребившийся для рубки, имел деревянную ручку весом в 0,155 кгг. и стальной боек весом в 0,927 кгг., общего веса в 1,082 кгг. и длиной в 345 мм. Циклограммы рубки зубилом см. в начале книги и на рис. 7.

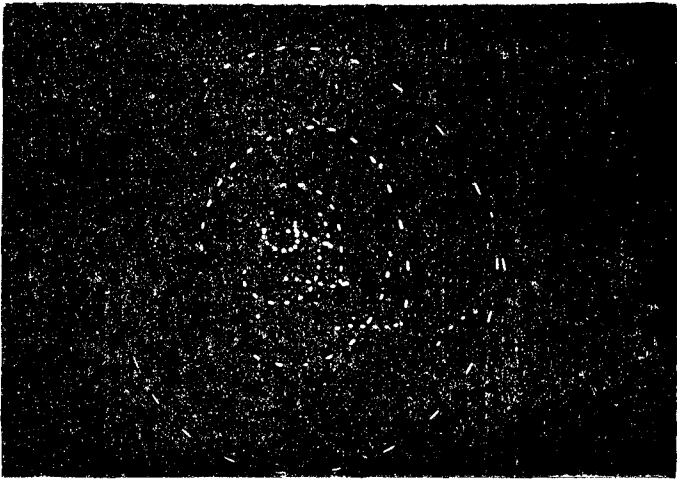


Рис. 11.\*Циклограмма удара молотобойна. Тяжелый двухручный удар кувалдой. Правая рука. От периферии к центру: 1) головка кувалды, 2) лучезапястный, 3) локтевой, 4) плечевой суставы. Направление движения во всех четырех суставах по часовой стрелке. Отростки влево от всех пунктов—результат отдачи после удара. (Негатив № 186).

Все движение совершается правой рукой и отчасти верхней частью корпуса в течение 0,67—0,80 sec. Амплитуда всего движения составляет для центра тяжести молотка (приходящегося на ручке в 2—2,5 см. от центра головки) 75—90 см., для кистьно-фалангового сустава—55—70 см., для лучезапястного—40—50 см. и для локтевого—12—20 см. Таким образом амплитуда в среднем пропорциональна длине машущей части, т.е., иначе говоря, поступательная составляющая движения весьма мала по сравнению с вращательной составляющей.

Сtereo-таблица № 1 представляет собой одну из типичных циклограмм рубки зубилом опытного рабочего. Эта таблица—образчик того сырого материала, из которого черпаются все данные для аналитической обработки процесса движения. На заднем плане находится стойка—масштаб, употребляемый для определения натуральной величины; на самой циклограмме, помимо пунктира движения, слабо заснята фигура рабочего для ориентировки в расположении частей тела, в позе, предшествующей началу замаха.



Сtereo-таблица № 2 представляет сводку результатов промеров, непосредственно полученных по способам § 3 из той же стерео-циклограммы. Большие шарики соответствуют последовательным положениям центров тяжести молотка через каждые  $\frac{1}{30}$  сек.; прямые представляют собою соответственно, справа налево, оси молотка, кисти и правого предплечья в профиль.

Типичное ударное движение, как то ясно видно из обеих таблиц, протекает далеко не в одной плоскости: оно, скорее, кольцеобразно изогнуто для каждой, участвующей в движении, точки. Для всех траекторий руки, кроме менее характерной локтевой, ударная часть движения лежит более медиально (на стерео-таблицах—на заднем плане), нежели замах; при этом, неизменно для всех участвующих в движении сочленений, ударная часть лежит впереди от замаха; для центра тяжести молотка она расположена ниже траектории замаха, так что все движение представляется зрителю, стоящему справа, направленным против часовой стрелки для центра тяжести молотка, и по часовой стрелке для сочленений руки. Сверх того, каждая из этих траекторий во всех случаях имеет вид длинной петли, отдаленно напоминающей эллипс, двояко искривленный и как-бы измятый. Такую, приблизительно, форму имел бы эллипс, накрученный на круглый цилиндр и несколько винтообразно завернутый около большой оси. В первом приближении траектория замаха молотка напоминает дугу круга, лежащего почти в вертикальной плоскости, траектория удара—дугу, наклоненную к горизонту под углом в 60—70°.

Для большей ясности этой неизменно типичной формы, траектории центра тяжести молотка, пястно-фалангового и лучезапястного суставов изображены на стерео-таблицах 4 и 5; на первой из них сзади, на второй—сверху; последовательные кружки соответствуют на обеих таблицах положениям, отделенным промежутком времени в  $\frac{1}{24}$  сек. Непосредственное рассмотрение этих таблиц дает для представления о траектории удара больше, чем самое детальное описание.

Траектории вышеперечисленных заснимавшихся точек своеобразно упрощаются от периферии к центру; и прихотливость кривизны, и контрасты скоростей убывают от молотка к локтю. Это может зависеть как от меньшего количества определяющих движение шарниров, так и от меньшего влияния резко вторгающегося в вольное движение сотрясения от удара о неподвижную цель.

На стерео-таблице № 2 очень резко бросается в глаза еще одна особенность движения. Прямые, соответствующие осям работающих звеньев, перекрепчиваются между собою в областях, соответствующих максимуму замаха, и, в меньшей степени, в соответствующих максимуму опускания, т.-е. удару. Максимумы замаха периферических звеньев как-бы запаздывают на некоторую фазу сравнительно с максимумами центральных. Для локтя максимум подъема приходится на одиннадцатой, для лучезапястного сустава—между 12-й и 13-й, для пястной кости—на 13-й, а для центра тяжести молотка максимум отведения совпадает с 14-й точкой. Явление это вполне естественно возникает во всех случаях, когда усилие прилагается к телу не в центре его тяжести, а вне его, и объясняется возникновением при этом пары сил с известным вращающим моментом. Центр тяжести молотка действительно не поспевает за начавшей уже ударное движение кистью, и продолжает еще

по инерции лететь назад, пока не повернется при этом настолько, что доминирующая часть усилия, действующего на него со стороны кисти, не будет направлена вдоль его продольной оси. В этот момент пара сил исчезнет, и молоток двинется вперед. Вследствие этого постоянно в

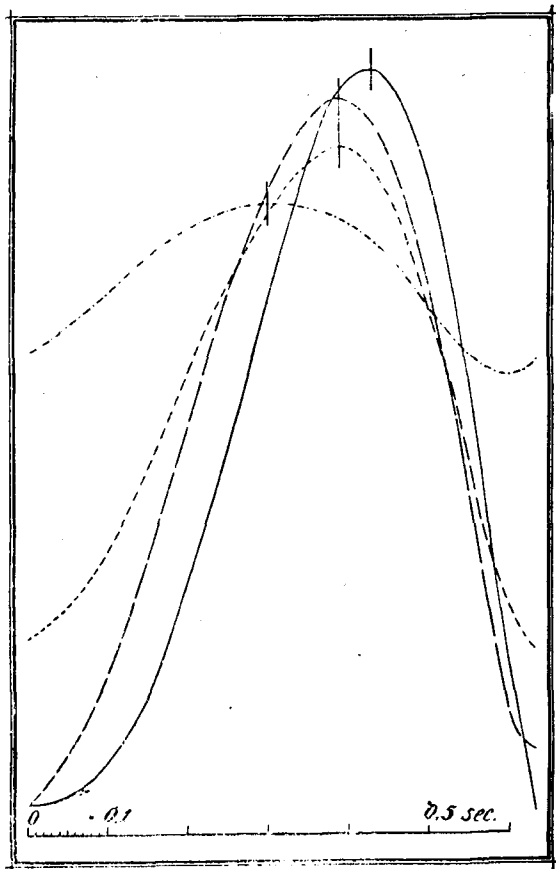


Рис. 12. Запоздывание максимумов:  
 — движение центра тяжести молотка  
 - - - « пястно-фалангового сустава  
 - · - · « лучезапястного «  
 - - - « локтевого «

(Негатив № 245).

начале ударной части движения ось молотка лежит на касательной к соответствующей части траектории пястно-фалангового сочленения в момент, весьма близкий к максимуму замаха молотка. Совершенно сходное с этим явление имеет место при нормальной ходьбе здорового, человека, когда голень в начале шага отклоняется назад, в то время, как бедро движется уже вперед, так что все явление напоминает пару маятников, отстающих, нижний от верхнего, на постоянную фазу. В патологических случаях, при спастической походке, как показал д-р *К.Кежесев*,\*) большая ригидность коленного сустава приводит к уменьшению

\*) Применение хронофотографического метода к изучению патологических походок. Журнал Психологии, Неврологии и Психиатрии. Москва, Госиздат, 1923, Т. II.

этой разности фаз. Тоже явление имеет место, при ударе, и для системы плечо-предплечье, хотя и в менее сильной степени, в силу меньшей массы и меньшего значения момента инерции предплечья, сравнительно с молотком.

На рис. 12 это запаздывание максимумов представлено особенно наглядно. Максимум замаха локтя приходится через 0,30 сек., максимумы лучезапястного и пальцевого суставов—через 0,39 сек., и максимум молотка—через 0,43 сек. после начала удара.

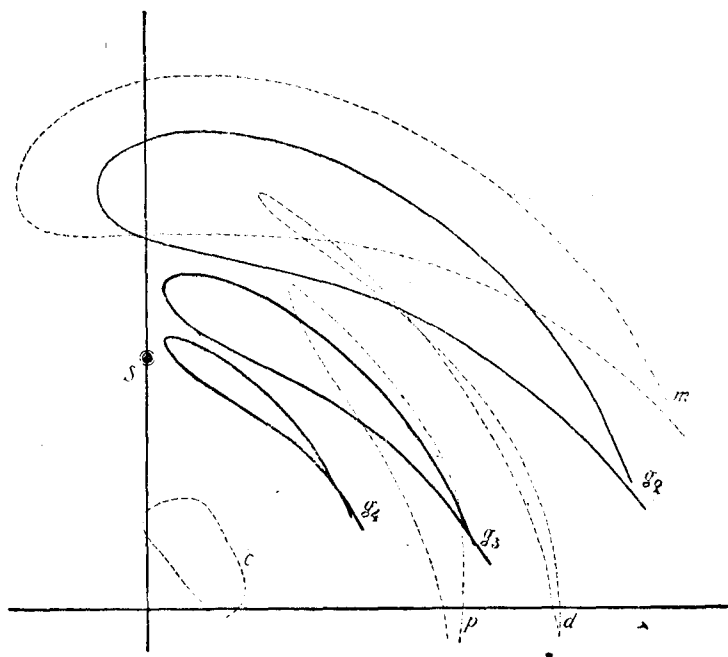


Рис. 13. Траектории центров тяжести:  
 $g_2$ —центр тяжести молотка и кисти  
 $g_3$ — « « « молотка, кисти и предплечья  
 $g_4$ — « « « всей руки с молотком,  
 Пунктирные траектории обозначены соответственными буквами.  
 (Негатив № 245).

На рис. 13 приведены траектории центров тяжести последовательных частей био-кинематической цепи. Правая верхняя сплошная кривая соответствует движению общего центра тяжести молотка и кисти руки, следующая—движению центра тяжести молотка, кисти и предплечья, и нижняя кривая—траектории общего центра тяжести всей руки с молотком. Пунктиром нанесены траектории, заснятые на обычной циклограмме. Очень характерно, наряду с значительной пестротой форм траекторий трех сочленений, чрезвычайное единство форм четырех траекторий центров тяжести (3 вышеперечисленные и верхний пунктир—центр тяжести одного молотка), и все большее, от периферии к центру, приближение их к перспективному изображению изогнутого вышеописанным образом эллипса.

## 16. Распределение скоростей и ускорений. Отдача. Изменения углов. Действующие усилия.

Даже при беглом взгляде на циклограмму удара прежде всего бросается в глаза резкое несоответствие между густо расположенными точками по всей траектории замаха и редкими точками по пути ударного движения. Скорость движения при ударе значительно—в 2—3 раза больше максимальной скорости замаха; это отношение быстро убывает от периферии к центру и почти нечувствительно отличается от единицы в локтевом сочленении.

Рис. 14 изображает суммарные линейные скорости 4-х опознавательных точек руки с молотком на всем протяжении удара (см. уравнение 12 а). Скорость центра тяжести молотка и близкая к ней скорость бойка возрастают в течение первых 0,2 сек. от одного до трех метров в секунду, затем снова убывают до начальной скорости в момент максимума замаха, и затем непрерывно ускоренно возрастают до 7—8 метров в секунду—скорости в момент удара. Суммарные скорости пястнофалангового и лучезапястного сочленений очень близко копируют ту же картину в уменьшенном масштабе, давая весьма правильные и

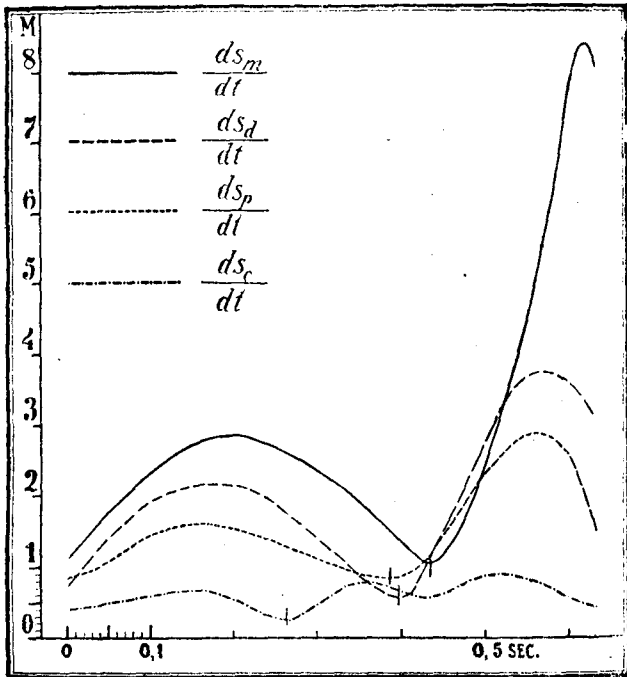


Рис. 14. Скорости движения по траекториям (Негатив № 245).

плавные кривые. Очень интересно, что кривые эти, с отлогими максимумами и заостряющимися минимумами очень напоминают, если отвлечься от различия высот обеих частей, уже цитировавшуюся нами кривую скоростей гармонического движения по эллипсам (§ 13), половина которой изображена на рис. 18. Приблизительное равенство площадей обеих половин кривой, очевидно, имеет место и здесь. Форма кривой суммарной скорости локтя гораздо более неправильна, что может зави-

сеть в значительной степени и от неточности наблюдений и от собственных сотрясений неплотно укрепленной лампочки.

Смещение соответствующих максимуму замаха минимумов скоростей видно на этой таблице еще более ясно, чем на рис. 12. Максимальная скорость при ударе достигает, как сказано, 840 см/сек. что соответствует кинетической энергии в  $38.10^7$  ерг., или 3,894 килограмметра.

Если отметить, что скорость немедленно после удара, т.-е. скорость, обусловленная отдачей, не превышает одного метра в секунду, что соответствует кинетической энергии около  $54.10^3$  ерг, или 0,055 килограмметра, то окажется, что около 98% кинетической энергии удара молотка расходуется на совершение требуемой работы, и лишь 2% этой энергии используется для отдачи.

Таким образом, представление, обычное среди практиков, о большой роли отдачи в процессе рубки, основано на совершенно ошибочных предположениях. Все изученные нами до сего момента циклограммы обнаруживают то же явление, хотя и не всегда в такой резкой форме. На циклограмме, скорости которой приведены на рис. 14, была заснята рубка по железу; для стали отдача несколько больше, так что при некотором опыте можно более или менее точно по одному только виду циклограммы рубки сказать, на каком металле велась заснятая работа.

Для дальнейшего детального описания удара удобнее всего будет сослаться теперь же на сводный рис. 19, на котором в 20 кадрах изображены последовательные, отделенные друг от друга  $\frac{1}{30}$  секунды моменты одного полного цикла удара. На этом рисунке всего легче проследить игру ускорений, угловых скоростей, усилий, изменений углов и т. д., а также самые последовательные положения изучаемой конечности.

Черная ломаная линия есть схема руки, держащей молоток. Считая справа налево, последовательные звенья ее суть молоток, кисть, предплечье и плечо. В нижнем правом углу кадра расположены тиски и поставленное на металл зубило. Масштаб изображения приблизительно  $\frac{1}{20}$  натуральной величины.

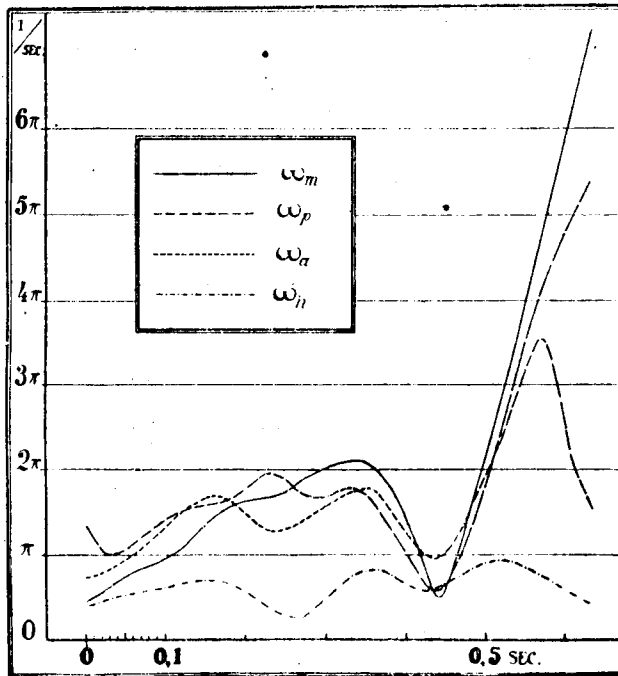
Красные стрелки, приложенные к центру тяжести молотка, имеют направление и пропорциональны по величине действующим на этот центр тяжести усилиям; расположенная вне ломаной линии пара стрелок изображает, в том же масштабе, правая—результатирующее усилие, действующее на центр тяжести отрезка руки от локтя к периферии, т.-е. общий центр тяжести молотка, кисти и предплечья, левая стрелка—усилие, приложенное к общему центру тяжести всей руки с молотком; кружки, к которым приложены эти две последние стрелки, соответствуют последовательным положениям этих общих центров тяжести.

С самого мгновения удара усилия во всех трех центрах тяжести, хоть и не велики, но направлены уже кверху; иначе говоря, несмотря на малую величину результирующей скорости спустя одну—две тридцатых секунды после удара,—и в этой малой величине некоторая часть приходится на долю мышечной работы, что, конечно, еще более ограничивает эффект, причитающейся в этой скорости на долю отдачи. На рис. 18 очень ясно виден резкий контраст между скоростью движения до и после удара.

Линейные ускорения движения достигают при рубке зубилом подчас огромных значений—до 114 метров в секунду—величина, сравнительно с которой ускорение силы тяжести представляется почти *quan-*

lité négligeable, так что менее всего приходится говорить о том, что для правильного удара достаточно сообщить молотку только первый толчек в момент замаха, и далее предоставить ему падать самому: какую бы начальную скорость мы ни придали ему, он никогда не достиг бы под влиянием одной тяжести даже впятеро меньшего ускорения, чем то, которое мы наблюдаем в действительности.

Усилия, в общем, имеют меньшую величину при замахе, чем при ударе. Надо оговориться, однако, что на рис. 19 участие усилия тяготения не исключено, так что в действительности разница между силами замаха и силами удара несколько меньше. Интересно, что уже начиная



[Рис. 15. Угловые скорости последовательных звеньев (Негатив № 245).

с 7-го кадра усилия во всех цептрах тяжести направлены книзу, начиная с 9-го вниз и вперед, тогда как движение молотка вперед, т.-е. ударное движение, начинается только с 13-го кадра. На этом кадре усилие, действующее на центр тяжести молотка, направлено как раз вдоль его оси; в этот момент на молоток не действует пара сил—и наступает максимум замаха, как уже отмечалось выше.

С этого момента абсолютная величина всех трех силовых векторов начинает возрастать почти монотонно; она достигает максимума для всей руки на 18-м, для предплечья с молотком—на 19-м, для молотка—на 20-м кадре (опять опережение максимумов!), и затем весьма резко меняет знак.

Это одновременное наступление максимумов усилий интересно еще и в другом отношении. В тот момент, когда вектор, действующий на центр тяжести молотка, достигает максимума (20 кадр), вектор, при-

ложенный к центру тяжести предплечья etc., направлен почти параллельно оси молотка. Точно также в момент максимума усилия, действующего на предплечье etc., (кадр 19), вектор, приложенный к центру тяжести всей руки, почти параллелен прямой, соединяющей центры тяжести молотка, предплечья с кистью и их общий центр тяжести. В момент 20 усилия, действующее на центр тяжести молотка, вместе с усилием, действующим на предплечье, создают пару сил, приложенных к обоим концам молотка, и «припечатывающим» движением  $\rho$  последний момент увеличивают его угловую скорость.

На рис. 15 эти угловые скорости последовательных звеньев руки— молотка, кисти, предплечья и плеча (последняя весьма приблизительно) представлены в виде кривых. Мы видим, что угловое ускорение молотка возрастает до самого момента удара, доходя к этому моменту до  $44 \times \pi$  /сек.; угловое ускорение кисти проходит через максимум приблизительно за 0,07 сек. до удара, ускорение предплечья достигает уже к этому моменту нуля; угловое ускорение плеча проходит через нуль почти за 0,13 сек. до момента удара. Здесь по отношению к моменту удара угловые ускорения дают ту же картину запаздывания максимумов, которую в момент наибольшего замаха давали нам линейные скорости. Минимумы угловых скоростей, в противоположность минимумам линейных, почти синхронны для всех 4-х кривых.

В чем же причина того, что в момент замаха запаздывание проявляется в поведении линейных скоростей, в момент удара — в запаздывании угловых ускорений? Очевидно, все дело обуславливается построением самой био-кинематической цепи. Вопрос представляется нам в следующем виде.

Под устойчивым равновесием связанной системы обычно понимается такое положение ее, при котором потенциальная энергия системы будет наименьшей. Для маятника такое положение, очевидно, будет иметь место тогда, когда равные и противоположные силы действия и противодействия, приложенные в центре тяжести маятника и в точке привеса, будут направлены одна от другой, т.-е. будут стремиться растянуть маятник.

Как раз такое положение имеется на лицо в максимуме замаха, на кадрах 13, 14 и 15. Здесь сила, приложенная к молотку в том месте, где он охватывается кистью, будет направлена как раз вдоль его оси; в первые моменты (кадр 12—13) эта сила направлена несколько наклонно к оси молотка, но она больше силы, определяющей ускорение головки молотка, и результирующая сила в центре тяжести молотка стремится повернуть молоток в положение устойчивого равновесия по отношению к приложенной к его рукоятке силе. Мы видим на рис. 19, что это устойчивое равновесие молотка, иначе говоря, параллельность его оси с силовым вектором предплечья, соблюдается с порядочной точностью от 13-го до 17-го кадра; и вектор, изображаемый на этих 5-ти кадрах стрелкой, приложенной к центру тяжести молотка, именно в этих кадрах парадоксально направлен кверху. Здесь он есть не что иное, как та результирующая в центре тяжести маятника, которая стремится вернуть его в состояние устойчивого равновесия. Поэтому в максимуме замаха поступательное ускорение молотка есть доминирующая часть. Угловые ускорения в этот период времени стремятся почти исключительно к сохранению угла между молотком и кистью, т.-е. к сохранению устойчивого равновесия молотка, рассматриваемого как маятник, подвешенный к кисти руки; на всем этом протяжении (от 0,45 до 0,55 сек.) они

почти равны между собой для молотка и кисти; относительные угловые ускорения проходят через нуль; угол между молотком и кистью в течение того же времени почти не меняется (см. рис. 16).

Совершенно иное положение при переходе от удара к следующему замаху. Опережение фаз колебательных движений последовательных суставов, вызванное инерцией обладающих большим моментом инерции

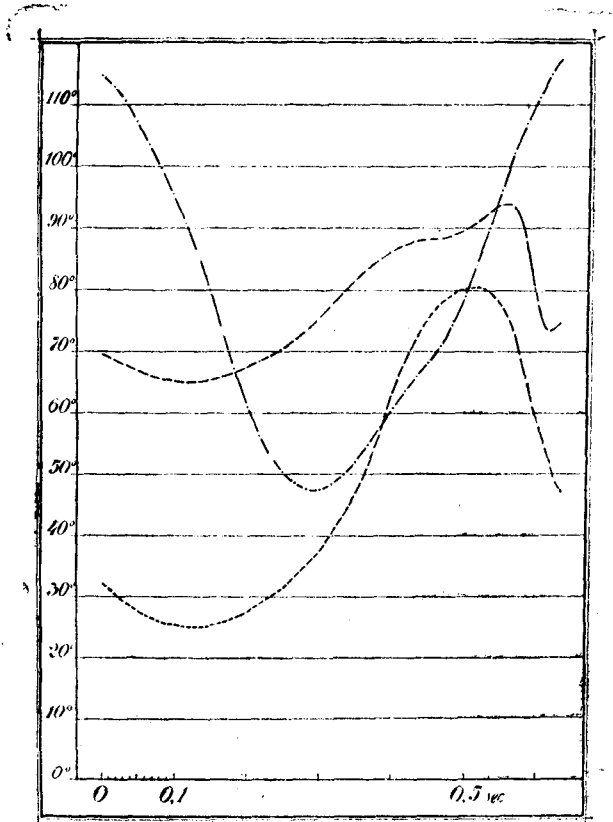


Рис. 16. Углы между последовательными звеньями руки:

- — — Угол между осями молотка и кисти
- - - - - « « « кисти и предплечья
- ..... « « « предплечья и плеча.

(Негатив № 245),

периферических частей, приводят и здесь к тому, что проксимальные сочленения раньше дистальных устремляются в обратный путь. Начиная с кадра 18, и кончая моментом удара, сила, приложенная к центру тяжести предплечья, тянет проксимальный конец молотка влево, сила, приложенная к центру тяжести самого молотка, тянет его дистальный конец вправо. Такие результаты могут быть обязаны своим существованием только паре сил, стремящейся повернуть молоток в направлении часовой стрелки; на этот раз слагающая в центре тяжести молотка больше слагающей предплечья; аксиальные слагающие пары сил направлены на сжатие молотка—и вытекающее отсюда положение столь же сходно с неустойчивым равновесием, сколь положение в максимуме замаха сходно с равновесием устойчивым.



Коротко резюмируя все изложенное выше, мы должны сказать, что в момент перехода на удар ось молотка направлена вдоль траектории, и кисть руки тянет его вдоль его же оси, создавая тип устойчивого равновесия с минимумом углового ускорения; в момент перехода на замах ось молотка почти нормальна к его траектории, и кисть руки толкает его сначала вдоль его оси, а затем почти перпендикулярно к ней (кадры 2—6), создавая тип равновесия неустойчивого.

Но если так, то вся сложная игра сил, угловых скоростей и ускорений может быть выведена качественно из чисто конструктивного элемента, имеющегося на лицо в каждом случае рубки или вообще работы молотком. После всего изложенного, из рис. 19 совершенно ясно, о каком конструктивном элементе идет речь: им является то обстоятельство, что все сочленения работающей системы во все моменты работы **вынужденно изогнуты вверх**.

В самом деле, этого факта совершенно достаточно и для объяснения того, что в начале замаха молоток стремится установиться нормально в начале удара—касательно к траектории; что в конце замаха он стремится к минимуму, в конце удара—к максимуму угловых ускорений—вывод из устойчивого в первом и неустойчивого во втором случае равновесия; наконец, для объяснения того, что вначале замаха длина сложного рычага стремится возрасти, вначале удара—уменьшиться, (что, в силу параллельных изменений момента инерции системы, ведет к сообщению ей одинаковыми усилиями больших ускорений во втором и меньших в первом случае), т.-е. для объяснения того, что результирующая скорость удара будет больше результирующей скорости замаха. Скорость, зависящая от падения молотка в поле земного тяготения, не превышает, как мы видели,  $v_8 - v_{10}$  общей ударной скорости. Всякая система, изогнутая в своих сочленениях в одном направлении так, что звенья ее с помощью некоторых внутренних пар сил удерживаются вблизи от средних положений, неизбежно будет вести себя так же, как описанная только что система руки, т.-е. будет давать наибольшие скорости и наибольшие угловые ускорения в конце движения, обращенного выпуклостью вперед, и минимальные значения тех же функций—в конце движений, направленных в противоположную сторону. Если бы рабочий мог рубить вполне непринужденно, будучи подвешен за ноги к потолку его движение осталось бы, (пренебрегая тяготением, как малым ингредиентом) по существу тем же самым, несмотря на то, что при замахе молоток его двигался бы книзу, а при ударе—кверху.

Интересно с чисто прикладной точки зрения, что строящееся таким образом ударное движение представляется практически выгодным и в смысле возникновения в молотке к моменту удара значительного углового ускорения. Общее уравнение момента количества движения неизменяемого тела будет иметь вид

$$M = \omega \int m r^2 \varphi(r) dr \quad , \quad (39)$$

где  $\omega$  есть угловая скорость тела,  $r$ —радиус вращения каждой точки тела,  $R$ —радиус вращения дистального конца тела,  $\varphi(r)$ —площадь сечения тела сферой с радиусом  $r$  и центром в мгновенном центре вращения и  $m$ —количество массы на единицу площади на радиусе  $r$ . В самом простом случае, если тело имеет форму материальной прямой без тол-

щины и с равномерным распределением массы, интеграл (39) принимает вид

$$M = \omega \frac{m R^3}{3} \quad (39a)$$

Значение радиуса, определяющего точку, по обе стороны которой моменты количества движения частей будут равны, будет в этом случае, очевидно

$$R_1 = \frac{R}{\sqrt[3]{2}}$$

Точка, определяемая этим значением радиуса, будет, очевидно, вести себя так, как если бы в ней была сосредоточена вся масса вращающегося тела, т.е. будет играть роль, совершенно аналогичную роли центра тяжести поступательно движущегося тела: сопротивление, приложенное к этой точке, которую мы для нашей цели назовем центром удара, не вызовет в теле добавочных вращающих усилий, и все количество движения тела израсходуется на преодоление встреченного сопротивления.

В случае такой простой однородной линейки, центр тяжести лежит в точке, определяемой радиусом  $R_2 = R \left( \frac{1}{2} \right)$ , центр удара в точке

$$R_1 = R \left( \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \right) = R \left( \frac{\sqrt[3]{4}}{2} \right); \text{ очевидно } R_1 > R_2, \text{ т.е. центр удара ле-}$$

жит дальше от мгновенного центра вращения, нежели центр тяжести.

Опуская доказательство сложнейших случаев, укажем, как на весьма очевидное явление, что при любом распределении массы и любой форме тела центр удара всегда расположен дальше от мгновенного центра вращения, чем центр тяжести этого тела.

Центр тяжести молотка лежит, как мы упоминали выше, не в его бойке, а вне его, в деревянной ручке, в  $1\frac{1}{2}$  — 2 см. от нижнего конца бойка. Ударять этим местом молотка было бы технически нелепо; ударить же бойком молотка при поступательном его движении значило бы создать вращающую пару между точкой, произведшей удар и центром тяжести — силу, которая, дернув рукояткой молотка руку работающего кнззу, привела бы к затрате некоторой части кинетической энергии молотка на непроеводительную работу. Придавая молотку угловое ускорение перед моментом удара, мы замещаем центр его тяжести центром удара, лежащим к периферии от предыдущего и приходящимся где то на уровне пункта, которым в действительности наносится удар.

Итак, центральный вывод, к которому приводит нас эта часть изложения, сводится к тому, что все детали движения, производимого живую машиной, обуславливаются целиком конструктивными элементами системы, совершающей это движение; даже не физиологическими, а чисто анатомическими факторами. Все детали, кроме одной, и при том весьма существенной: кроме протекания всего процесса движения во времени.

Для этого у нас не хватает еще одной, уже чисто физиологической предпосылки; ее мы будем искать в гармоническом анализе движения, методика которого уже подготовлена и намечена в первой части настоящей статьи.

## 17. Разложение в ряды FOURIER. Сходимость.

### Эллипсы, их элементы и значение.

Из рассмотрения деталей движения мы убедились, что из одной только предпосылки, уподобляющей живой орган связанной системе неизменяемых, подвижно сочлененных звеньев, некоторыми внутренними силами вынужденно удерживаемой в изогнутом состоянии вблизи некоторого среднего положения—предпосылки, вполне оправданной данными эксперимента—уже вытекают весьма многие подробности и свойства, действительно наблюдающиеся экспериментально. Эта предпосылка определяет, очевидно, все наблюдаемые детали процесса работы, как функцию положения, дает как бы общую форму интеграла движения. Нам необходимо теперь подойти к решению вопроса о форме самой этой функции положения, другими словами, определить, каковы могут быть те силы, которые стремятся сохранить вынужденно искривленное положение нашей связанной системы. Для подхода к этому вернемся к рассмотрению чисто кинематического протекания всего процесса движения в целом.

Целый ряд движений рубки зубилом был для этой цели разложен по циклографической записи в тригонометрические ряды. Выше, в методологической части, было описано быстрое убывание коэффициентов всех без исключения рядов с повышением порядка членов; для полноты представления о быстроте сходимости этих рядов я привожу здесь рис. 17, характеризующий величину остаточного члена. На этом рисунке белые кружки, соединенные сплошной кривой, представляют собою значения, соответствующие сумме трех первых членов ряда типа (28) (вычисленные точки); черные изолированные кружки соответствуют последовательным световым точкам циклограммы (эмпирические точки). Совпадение тех и других, довольно удачное в области максимума замаха траектории молотка, еще более повышается для траектории пястно-фалангового сустава, и ведет к почти полному слиянию тех и других для лучезапястного сочленения. Сходимость значительно хуже для точек траектории молотка, лежащих вблизи момента удара, что, несомненно, вызвано нарушением свободной плавности движения возникающим извне толчком. Иначе говоря, за исключением случаев, осложненных этими экзогенными возмущениями, рабочее движение рубки во всех случаях оказалась весьма близко изобразимым в виде тригонометрического трехчлена, т.-е. как бы весьма простой формой сочетанного гармонического колебания. Чем дальше от пункта сотрясения, чем больше рессор смягчают по пути остроту толчка, тем проще общая форма колебания принадлежит к работающему органу точки.

Какова скорость убывания коэффициентов первых 3-х членов разложения,—нагляднее всего показывают стерео-таблицы 6 и 7. На этих таблицах изопериодические слагающие колебания по осям координат сопоставлены воедино в виде эллипсов, подобных охарактеризованным в § 12. Четки, нанизанные на эти эллипсы, отстоят друг от друга на 0,022 сек. На таблице 6 толстой линией изображена траектория

центра тяжести молотка, на табл. 7—траектории лучезапястного (слева) и пястно-фалангового (справа) суставов, построенные, как суммы трех первых членов разложения эмпирического движения в ряд Fourier. Тонкими линиями изображены слагающие эллипсы.

Прежде всего на обеих таблицах бросается в глаза резкое уменьшение размеров эллипсов каждой кривой с повышением их порядка. Второй, соответствующий вдвое меньшему периоду, эллипс имеет сколько нибудь значительную величину только для кривой движения центра тяжести молотка; третий и здесь целиком уменьшается внутри его. Второй и третий эллипсы двух остальных кривых очень малы по сравнению с первыми.

Во-вторых, несмотря на более крупный масштаб таблицы 7 сравнительно с таблицей 6 (сравнительные величины траекторий той же циклограммы можно видеть на рис. 17),—очень ясно видно повышение сходимости, т.-е. более быстрое убывание меньших эллипсов для центральных, дальше отстоящих от точки сотрясения, траекторий. То, что рис. 17 обнаруживает нам по отношению к остаточному члену, стереотаблицы 6 и 7 иллюстрируют относительно первых 3-х членов разложения. Третий эллипс траектории лучезапястного сочленения выглядит, как маленькое колечко, едва достигающее 22-х мм. вдоль большой оси.

В таблице IV весьма ясно бросается в глаза уже описанный выше феномен опережения фаз. Это опережение составляет здесь, между двумя смежными изучаемыми траекториями, несколько более 0,01 периода для первого и третьего, и несколько более 0,02 периода для второго эллипса. Здесь, когда это опережение фигурирует не в неправильных, своеобразных траекториях живого движения, но в самых элементах их гармонического разложения—особенно наглядным становится отсутствие нарочитости и придуманности в вышеописанном правиле; опережения максимумов, описанные в §§ 15—16, обязаны своим существованием даже не наложению друг на друга составляющих сложного колебания; каждое составляющее колебание само по себе обнаруживает ту же общую закономерность.

Приведу для сравнения величины полуосей эллипсов, изображенных на 2-х упомянутых стерео-таблицах. (Негатив № 208/9).

Таблица III.

ТРАЕКТОРИЯ.	1-й эллипс.	2-й эллипс.	3-й эллипс.
	Большая полуось. Малая полуось.	Большая полуось. Малая полуось.	Большая полуось. Малая полуось.
Ц. тяж. молотка. . .	454мм/56мм.	91,6/44,3	33,7/30,7
Пястнофаланг. суст. .	358,0/7,9	56,3/29,8	14,6/11,6
Лучезапястн. сустав .	274,5/21,3	40,3/20,7	10,7/5,0 . . . .

Времена прохождения движущихся по эллипсам точек через концы большой оси, считая от начала замаха (принимая период движения за 100):

Таблица IV.

1-й эллипс.			2-й эллипс.			3-й эллипс.		
Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.	Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.	Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.
7,19	6,04	4,98	5,87	3,67	1,04	4,53	3,30	2,43
			21,20	19,97	19,10			
57,19	56,04	54,98	30,87	28,67	26,04	37,86	36,63	35,76
			55,87	53,67	51,04	54,53	53,30	52,43
			80,87	78,67	76,04	71,20	69,97	68,10
						87,86	86,63	85,76

Углы наклона больших осей к осям координат:

Таблица V.

	1-й эллипс.			2-й эллипс.			3-й эллипс.		
	Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.	Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.	Ц. тяж. молотка.	Пястнофал. сустав.	Лучезап. сустав.
$\alpha$	30°30'	56°30'	58°30'	80°30'	71°	83°	81°30'	25°30'	28°
$\beta$	60°30'	39°30'	44°	34°30'	46°	38°30'	58°30'	67°30'	62°
$\gamma$	84°	71°30'	69°	62°30'	50°	52°	87°30'	77°30'	84°30'

Во-вторых, обращает на себя внимание, при сравнительном изучении разложений различных ударов, чрезвычайное постоянство формы и расположения первых 2-х эллипсов. Третий эллипс значительно более капризен; как направления, так и величины его осей очень разнообразны в различных случаях.

Отчасти такое непостоянство может быть кажущимся. Третий эллипс, как мы видели, всегда очень невелик. Ошибки наблюдения, не меньшие по отношению к нему, чем к двум большим эллипсам, сильнее искажают его действительную форму и размеры. Но возможно, что и в действительности отклонения и индивидуальные варианты ударов силь-

нес отражаются на этом, третичном наложении, нежели на 2-х основных слагающих колебаниях.

В 2-х первых эллипсах резко бросается в глаза почти перпендикулярное расположение их осей друг относительно друга. При этом во всех случаях ось второго эллипса более или менее близка к совпадению,

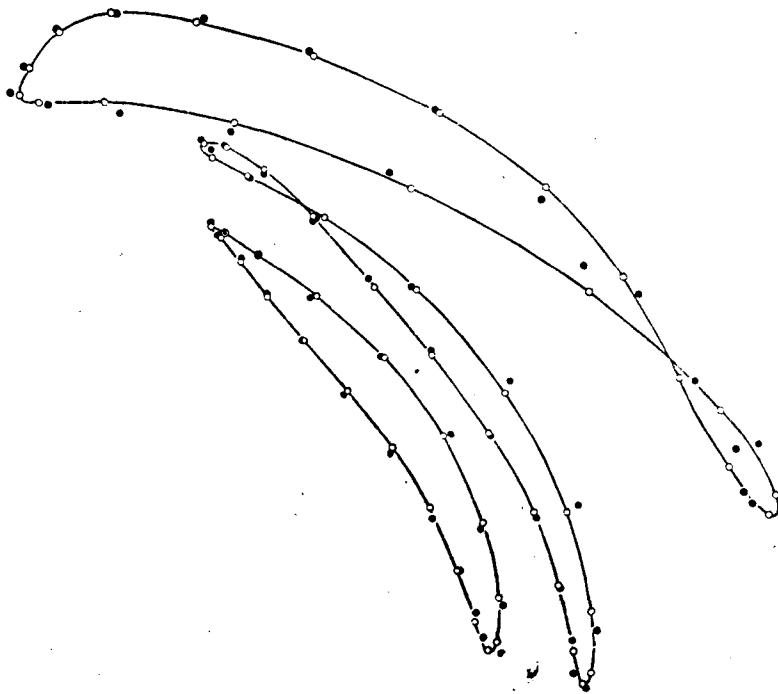


Рис. 17. Остаточный член ряда Fourrier. Справа налево: 1) траектория центра тяжести молотка, 2) траектория пястно-фалангового и 3) траектория лучезапястного суставов.

● — эмпирические точки  
○ — вычисленные точки.

(Негатив № 208|9).

ось первого—к перпендикулярности с прямой, соединяющей центр колебания данного сочленения с таковым ближайшего проксимального. Если временно игнорировать третий эллипс, и обратить внимание на ту общую форму движения, которая обуславливается колебаниями 2-х первых слагающих, то неизменно оказывается, что 1) первое после удара прохождение через конец большой оси наступает для двух больших эллипсов каждой траектории почти одновременно, и очень быстро после начала движения замаха, и 2) что, после начала замаха, первое прохождение через конец большой оси совершается для второго эллипса у конца оси, направленного к проксимальному суставу.

## 18. Биомеханическое значение эллипсов. Упругие маятники.

Если припомнить, что изучаемое нами живое движение совершается связанной системой подвижно сочлененных жестких звеньев, то станет ясным, что колебания каждого из этих звеньев могут совершаться только при условии сохранения длины этих звеньев. В том частном случае, когда размеры траекторий отдельных точек работающего органа возрастают от центра к периферии, как правило, будет обычно иметь место изгиб траектории с вогнутостью, обращенной к проксимальному сочленению. И действительно, эта вогнутость характерна для всех изученных нами траекторий.

Из этого соображения следует, что два больших, неизменно типичных эллипса представляют собою как раз первое приближение к изображению (в виде суммы плоских гармонических колебаний, характерных для движения изолированной материальной точки)—имеющего место в действительности гармонического, или близкого к таковому, колебания по неплюской траектории, свойственного всякому элементу связанной системы. Ближайшим примером такого quasi-гармонического колебания связанной системы является маятник, и, таким образом, недостающее звено намеченного выше истолкования начинает вырисовываться, видимо, с большей определенностью. Недостававший нам элемент протекания движения во времени, или, что в данном случае ведет к тому же результату, элемент количественной зависимости между свойствами движения и последовательными положениями органа, иначе говоря свойства тех сил, которые, как сказано выше, должны удерживать конечность вблизи от некоторого положения равновесия, раскрывается нам результатами разложения движения в гармонические ряды. Рассмотрение деталей и элементов движения привело нас к утверждению тождественности работающего органа со связанной системой неизменяемых звеньев, находящихся под действием сил, направленных к сохранению некоторого положения равновесия системы; гармонический анализ движения в целом приводит к выводу, что движение это аналитически весьма сходно с гармоническим колебанием неизменяемого, подвешенного за один конец стержня, т. е. с маятнико-подобным движением. А из этого, в свою очередь, следует, что изучаемые нами силы весьма близки к **простым упругим силам**.

Представим себе математический маятник, освобожденный от действия тяготения и находящийся под действием упругих сил, пропорциональных по величине угловому отклонению маятника от некоторого среднего положения и направленных нормально к оси маятника в плоскости его качания в сторону положения равновесия (плоский упругий маятник). Тогда зависимость углового ускорения маятника от угла его отклонения выразится в виде

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = - \frac{k}{m} \varphi$$

где  $k$  есть коэффициент упругости и  $m$ —масса маятника. Интегрируя это выражение, получим зависимость движения упругого маятника от времени в виде

$$\varphi = as \sin(ct + \theta), \text{ где } c = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (40).$$

Построим в плоскости качания маятника систему координат так, чтобы ось ординат совпадала с осью маятника в положении покоя, а ось абсцисс касалась бы траектории конца маятника в точке пересечения с осью ординат. Разложим теперь совершающееся по дуге колебание маятника в сумму плоских (в случае плоского маятника—прямолинейных) гармонических колебаний, совершенно также, как мы делали это по отношению к живому движению. Отвлечемся при этом, для простоты, от начальной фазы.

Колебание нашего маятника может быть, очевидно, представлено в избранной нами плоской системе координат парю уравнений:

$$\begin{aligned} x &= R \sin \varphi \\ y &= R(1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (41)$$

Подставляя в эти уравнения значение  $\varphi$  из уравнения (40) и разлагая в тригонометрические ряды, получим приближенно (для первых 2-х членов):

$$\begin{aligned} x &= R \left[ \left( a - \frac{a^3}{8} + \dots \right) \sin ct + \left( \frac{a^3}{24} - \dots \right) \sin 3ct + \dots \right] \\ y &= R \left[ \left( \frac{a^2}{4} - \frac{a^4}{64} + \dots \right) - \left( \frac{a^2}{4} - \frac{a^4}{48} + \dots \right) \cos 2ct - \left( \frac{a^4}{192} - \dots \right) \cos 4ct + \dots \right] \end{aligned} \quad (42)$$

Таким образом колебание распадается на сумму быстро уменьшающихся по амплитуде прямолинейных гармонических колебаний, причем четные направлены по оси маятника, нечетные—нормально к последней. Сравним теперь коэффициенты, получающиеся для плоского упругого маятника из (42) с размерами эллипсов относительного перемещения одного из звеньев работающей руки.

Для относительного перемещения центра тяжести молотка по отношению к пястно-фаланговому суставу имеем (негатив № 208/9):

Большая полуось 1-го эллипса—217 мм.  
 « « 2-го « — 76 мм.

Для плоского упругого маятника той же длины и с той же амплитудой качания:

Амплитуда 1-го слагающего—227 мм.  
 « 2-го « — 62 мм.

Таким образом, несмотря на то, что колебания молотка осложнены действием тяжести, что мы пренебрегаем вынужденными возмущениями, происходящими от перемещений точки подвеса молотка—пястнофалангового сустава; несмотря на то, что движение молотка грубо нарушается в момент удара внешним толчком; несмотря на то, наконец, что движение молотка, происходящее заведомо не в одной плоскости, мы уподобили колебанию плоского маятника—на долю всех этих осложняющих различий приходится не более 10—15 мм.—количество малое, если принять в расчет протяжение всего движения и небольшую точность измерительных приемов.

Перейдем к более общему случаю конического маятника, определив его вполне аналогичным образом. Под коническим упругим маятником мы будем разуметь материальную точку на невесомом и неизменяемом подвесе, находящуюся постоянно под действием сил, нормальных



к оси подвеса, постоянно проходящих через некоторую неподвижную прямую («ось покоя»), и пропорциональных угловому отклонению от этой оси. Траектория конца такого маятника будет, очевидно, лежать на сфере.

Если такой маятник выведен из положения покоя и предоставлен самому себе с известной начальной скоростью, то общее уравнение траектории его движения будет иметь вид

$$R^2 \varphi_1^2 \left( \frac{\cos^2 \theta_1}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta_1}{b^2} \right) = 1, \quad (43)$$

где  $R$  есть радиус шара, т. е. длина маятника,  $\theta_1$ —долгота точки на шаре и  $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi$ —дополнительный угол к широте  $\varphi$ . Уравнение это перейдет в уравнение эллипса, если  $\theta_1$  и  $R\varphi_1$  заметить соответственно полярными плоскими координатами  $\theta$  и  $g$ . Если в этом уравнении одна из констант,  $a$  или  $b$ , обращается в нуль, то траектория переходит в отрезок дуги большого круга—случай плоского упругого маятника; если  $a=b$ , траектория переходит в один из кругов широты:

$$R\varphi_1 = a = \text{const.} \quad (43a)$$

Соотношения коэффициентов  $a$  и  $b$  определяются при этом той начальной скоростью, которую конец маятника имел при максимальном отклонении от положения равновесия; эта скорость равна нулю в первом и максимальна во втором из рассмотренных частных случаев.

В виду того, что закон, определяющий зависимость тангенциальных усилий от положения конца маятника, согласно данному выше определению, выражается в избранных нами географических сферических координатах таким же уравнением, каким в полярных плоских координатах выражается закон распределения сил, определяющих плоское гармоническое колебание по эллипсу,—общее уравнение изменения широты конца конического упругого маятника будет иметь вид

$$R\varphi_1 = \sqrt{a^2 \cos^2 ct + b^2 \sin^2 ct} \quad (44)$$

Подставляя отсюда значение  $\varphi_1$  в уравнение (46) получим, после тригонометрических преобразований:

$$\sin \theta_1 = \frac{b \sin ct}{R\varphi_1} = \frac{b \sin ct}{\sqrt{a^2 \cos^2 ct + b^2 \sin^2 ct}} \quad (45)$$

Обозначая входящий в уравнения (44) и (45) радикал через  $\rho$  и переходя к прямоугольным координатам с началом в «точке покоя», осью  $y$ , совпадающей с «осью покоя» и двумя другими, касательными в начале к поверхности сферы, получаем для слагающих движения

по осям:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \frac{\rho}{R} \cdot \left( \frac{a \cos ct}{\rho} \right) \\ y &= R \left( 1 - \cos \frac{\rho}{R} \right) \\ z &= R \sin \frac{\rho}{R} \cdot \left( \frac{b \sin ct}{\rho} \right) \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

В частном случае, если  $a=b$ , уравнения (44) и (45) переходят в:

$$\left. \begin{aligned} R\varphi_1 &= a = \text{const.} \\ \theta_1 &= ct + 2\pi N, \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

движение будет круговое, с постоянной линейной скоростью. Если  $b=0$ , те же уравнения получают форму

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \left| \frac{a}{R} \cos ct \right| \\ \sin \theta_1 &= 0, \text{ т.е. } \theta_1 = \pi N, \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

случай плоского маятника. Для достаточно малых значений  $a$  и  $b$  уравнения (46) перейдут в

$$\left. \begin{aligned} x &= a \cos ct \\ y &= 0 \\ z &= b \sin ct \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

—это будет движение, приближающееся к колебанию по плоскому эллипсу, так же, как это происходит при малых отклонениях и в случае более сложного, гравитационного маятника.

Этот то наиболее общий тип движения упругого маятника и представляет весьма близкое сходство с живым движением. Стереотаблица № 8 воспроизводит образец уже цитированного выше относительного перемещения центра тяжести молотка по отношению к пястно-фаланговому суставу, (принятому за неподвижный), на протяжении одного цикла удара, и заимствована непосредственно из промеренной циклограммы. На этой таблице очень ясно видна траектория относительного движения молотка, напоминающая вытянутый, как бы накрученный на сферу эллипс. На следующей, 9-й стереотаблице, изображен для сравнения отвечающий уравнениям (44), (45) и (46) сферический эллипс траектории упругого конического маятника того же радиуса и с теми же амплитудами  $a$  и  $b$ , что и в эмпирическом случае предшествующей стереотаблицы. Этот эллипс расположен на сфере сходно с эмпирической кривой. Близкое сходство обеих кривых выступает очень наглядно при этом сопоставлении.

Все эти соображения заставляют предполагать, что обнаружившаяся, как правило, для всех исследованных кривых движения, быстрая сходимость рядов Fourier обусловлена механически именно сходством биомеханических процессов, определяющих живое движение, с процессами, имеющими место в упругих конических маятниках. Приближение живого движения, достигавшееся при разложении в плоские эллиптические колебания только с помощью 3-х членов разложения, почти до-

стигается при интерпретации траектории движения через конические маятники уже при одном члене. Поправка, приходящаяся на действие тяжести, на возмущающее действие удара и на раскачивание точки привеса (в случае, изображенном на стерео-таблицах 8 и 9—пястнофалангового сустава) достигает значительно меньших размеров, чем можно было бы ждать *a priori*.

Учет поправок на действие тяжести и на раскачивание точки привеса ведет к очень значительным математическим затруднениям, и исследование этих поправок выходит за пределы настоящей работы. Мы ограничиваемся здесь указанием пути, по которому можно проследить влияние этих осложняющих условий, и изложением тех фактических данных, которые заставляют уже теперь предположительно считать не случайными отмеченные в этой, первой части исследования, закономерности.

## 19. Общие выводы.

Нам представляется уместным рассмотреть здесь же важнейшие из возражений, могущих представиться против намечающихся выводов

Первое и основное возражение неминуемо сводится к тому, что общее количество опытов и анализов недостаточно для того, чтобы с уверенностью высказываться обобщенно. Это возражение, вернее, поправка, заставляют нас формулировать основные выводы в чисто предположительной форме. Выводы эти при дальнейших наблюдениях могут подтвердиться или быть опровергнутыми, испытать значительные изменения или утвердиться в незыблемом виде; но и их неизбежное постоянство во всех произведенных до настоящего времени экспериментах, и их механическая логичность, и, наконец, наличие вполне тождественных явлений в экспериментальном, проанализированном нами, материале Marey, позволяет уже и теперь мотивированно высказываться в их пользу.

Второе возражение может быть сделано против экспериментальной техники. При всех неоспоримых преимуществах световой записи, эксперимент в настоящем его виде отличается незначительной точностью. И конечные, довольно значительные (4—6 мм), размеры светящейся нити лампочек, и расположение их в стороне от точек пересечения осей последовательных звеньев приводят к искажению действительных кривых движения и к постоянной возможности ошибки на 5—10 мм. Необходимость же определять координату глубин стерео-микрометрически даже при широкой стерео-базе повышает эту возможную ошибку до 20—25 мм.

Один только веский аргумент может быть приведен против этого возражения—это то, что, при всех своих недостатках, световой метод регистрации крупных движений далеко превышает в смысле точности все другие предложенные для той же цели приемы. Метод световой записи, даже и в довольно грубых формах, до настоящего времени признается авторитетами наиболее достоверным способом регистрации движения; те же его модификации, которыми автор пользовался для экспериментов, подлежащих анализу, весьма значительно повышали доступную методу точность с помощью тщательных предварительных измерений и точной экспериментальной установки.

Сюда присоединяется еще одно крупное преимущество световой записи. Если мы и не можем быть гарантированы от ошибки в 5—10 мм

на протяжении целой кривой, то для смежных точек эта ошибка во всяком случае значительно менее. Иначе говоря, если ошибки масштаба или неточность поправок могут обусловить некоторую неправильность в чтении целой кривой, то все же общая форма кривой будет воспроизведена верно. Световой рычаг гарантирует от искажения формы кривой, почти неизбежного при других методах регистрации. Если же вспомнить, что в целях чистого, экспериментально-физиологического изучения движения нам не может представляться важной исчерпывающая точность изучения одного, индивидуального движения и что даже у одного и того же испытуемого последовательные циклы движения разнятся между собой на несравненно большие величины, нежели величины возможной ошибки,

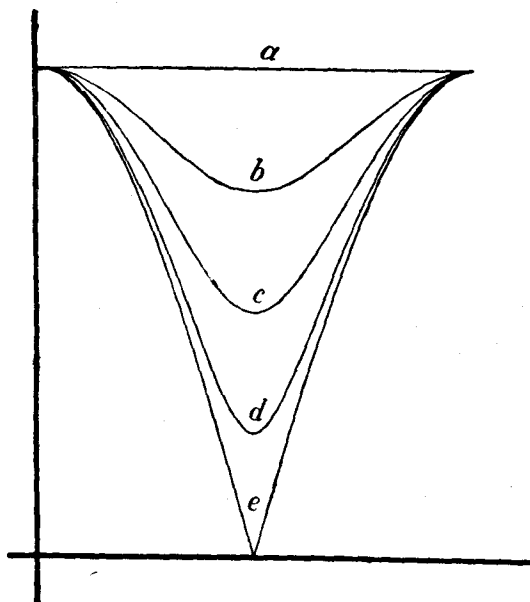


Рис. 18. Скорости гармонических колебаний по эллипсам. Различные формы кривых.

оставаясь, в то же время, верными неизбежно обнаруживавшимся закономерностям, то возражение против неточности метода окажется гораздо менее значительным, чем можно было бы предположить. Для первых приближений и первоначальных подходов точность эта, во всяком случае, вполне достаточна, и лишь большее углубление в структуру движения должно будет вызвать к жизни более деликатную методику.

Третье возражение может быть сделано против самой методики анализа циклографических записей. При определении скоростей с помощью интерполяции всегда совершается некоторая ошибка; для ускорений эта ошибка возрастает еще более значительно. Определение положений центров тяжести отдельных звеньев аналитически, по средним данным О. Fischer'a, опять таки вносит новую неизвестную неточность.

Знать слабости метода—нередко почти то же, что освободить его от этих слабостей. Поэтому ни в одном расчете, который мог бы иметь влияние на выводы, я не пользовался никаким вторичным материалом, но только данными непосредственных промеров циклограммы. Все таблицы скоростей, углов и т. д., приведенные в статье, имеют для выво-

дов только иллюстративное, но не вспомогательное значение. Таблица силовых векторов в последовательные моменты удара намеренно привлечена к описанию ударного движения только качественно. Для качественного описания она вполне пригодна; для количественных же целей применены исключительно суммы Fouquier, употребление которых для количественного изучения эмпирических кривых освящено примером не только инженеров, но даже метеорологов, капризные кривые которых во всяком случае дают больше поводов к сомнениям и осторожности, нежели весьма простые формы наблюдавшихся нами живых движений.

После этих предварительных замечаний мы можем формулировать те общие выводы, которые вытекают из изложенного материала.

Прежде всего должна быть отмечена везде без исключения проявляющаяся крайняя простота тригонометрической структуры живого движения, выражающаяся в быстрой сходимости получающихся при гармоническом анализе рядов. Это постоянно наблюдающееся явление может уже теперь быть формулировано, как 1-й принцип био-кинматики: **Всякое живое ритмическое движение может быть представлено в виде весьма быстро сходящейся суммы плоских гармонических колебаний, общей формой траекторий которых является эллипс, и периоды которых относятся, как периоды последовательных членов разложения по Fouquier.**

При этом, как мы видели, коэффициенты при третьем члене разложения обычно не превышают 6—7% коэффициента при первом члене; а для сочленений, более удаленных от извне привходящих сотрясений, отношение обычно еще меньше.

Второй основной вывод вытекает из выясняющейся количественной аналогии живого движения с движением упругого конического маятника. Но прежде, чем формулировать его, необходимо предпослать несколько предварительных замечаний.

Мы указали выше, что исследование движения составного упругого маятника, т. е. маятника, состоящего из ряда неизменяемых, подвижно-сочлененных звеньев, при чем, при изменении угла между двумя смежными звеньями, между ними возникают усилия, стремящиеся вернуть угол между звеньями к его первоначальному значению и пропорциональные величине углового отклонения,—что исследование такого маятника ведет к значительным математическим трудностям. Между тем следует ожидать, что если вообще живой орган движется сходно с упругим маятником, то он аналогичен именно с таким составным механизмом. Мы уже имели случай бегло указать в § 16 на то значение, которое это суставчатое устройство может иметь для распределения скоростей и ускорений. С другой стороны, незначительные, сравнительно, величины поправки к движению простого упругого маятника по сравнению с живым движением, позволяют на основании экспериментального материала допустить, что живое движение происходит так, как если бы каждое звено работающего органа находилось под действием упругих сил, аналогичных силам, охарактеризованным в § 18 для случая упругого конического маятника.

Такие силы могут возникать, очевидно, почти исключительно за счет мускулатуры, окружающей каждое из сочленений, и то новое осложняющее обстоятельство, что эти силы уже не будут точно пропорциональны угловым отклонениям (как то видно из рис. 5), в настоящее время не может еще быть учтено нами, т.-к. оно тонет в гораздо более глубоких осложнениях, вызываемых взаимной подвижностью звеньев. Однако, в силу того, что и вообще этот второй вывод может быть сде-

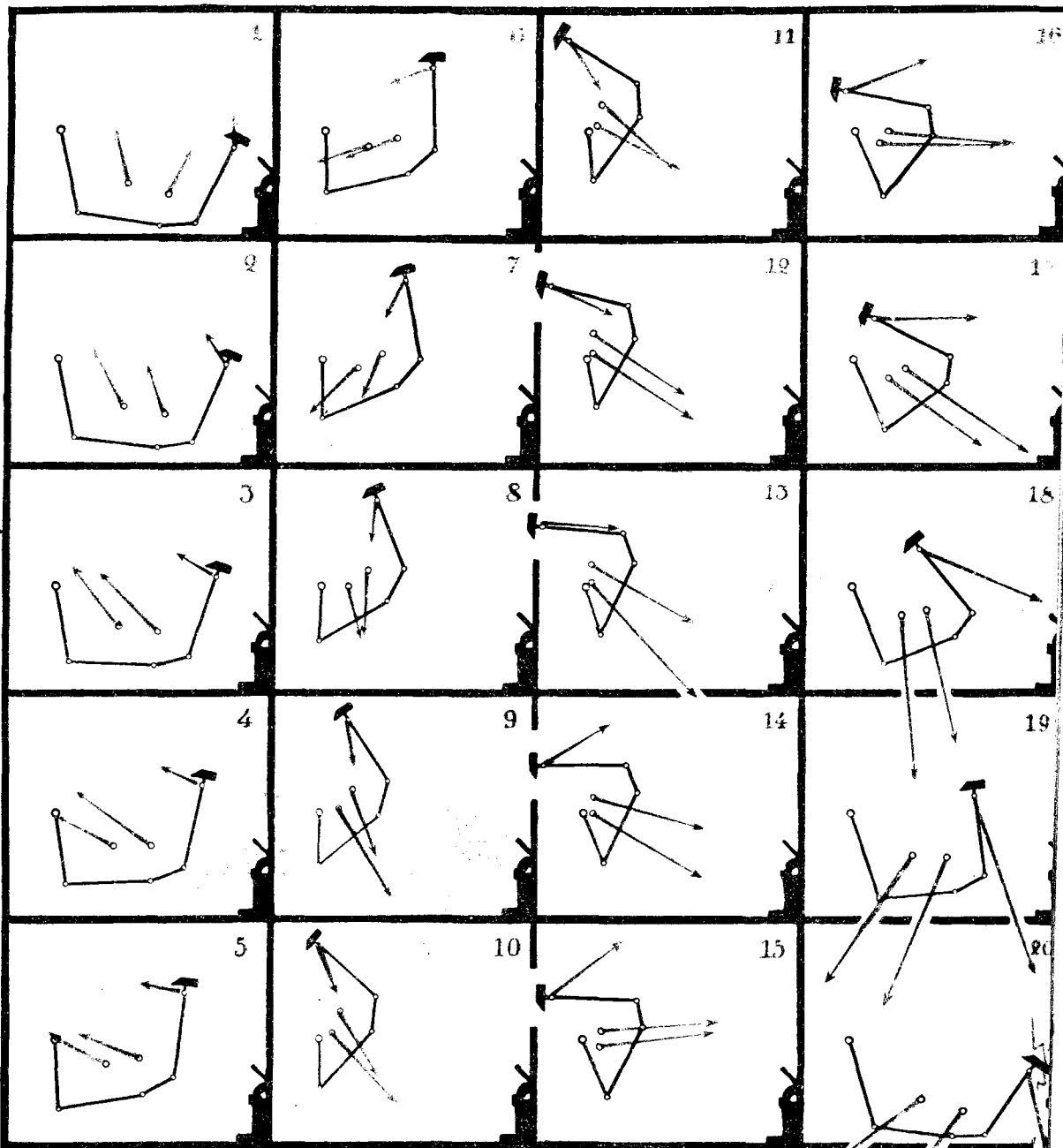


Рис. 19. Кино-схема одного цикла удара молотком. Последовательные положения руки и молотка, и действующие в центрах тяжести усилия. Подробное описание см. в тексте. (Негатив № 245).

лан пока только предположительно, и нельзя быть уверенным, что в действительном живом движении точная пропорциональность будет иметь место именно между угловыми отклонениями и силами, и не между приблизительно сходными с первыми линейными растяжениями агонистов и антагонистов и возникающими в результате усилиями, то можно представлять себе, что движение, (пренебрегая трением и расходом полезной работы) происходит так, как если бы окружающие каждое сочленение мышцы меняли свою упругость прямо пропорционально изменению их (пассивного) растяжения; иначе говоря, как если бы в течение всего цикла каждая мышца работающего органа пребывала в состоянии постоянного тонуса.

Теперь мы можем предположительно формулировать второй вывод, который можно определить, как 1-й принцип биодинамики: ритмическое живое движение происходит так, как если бы каждая мышца работающего органа пребывала в течение всего цикла движения в состоянии постоянного тонуса. В виду необходимости пополнять расход энергии на полезную работу и на затраты на трение, радиацию и т. д., результирующее движение должно количественно совпадать с вынужденным колебанием составного упругого конического маятника, т.-е. добавочные сокращения работающих мышц должны иметь характер синусоид, период которых находится в резонансе с периодом ритмического рабочего движения.

Из такой формулировки необходимо следует, что движение работающего органа для каждого момента есть однозначная функция его положения, т.-к. положением органа, при постоянном тонусе расположенных на нем мышц, вполне определяется потенциальная энергия как всего органа, так и отдельных его звеньев. Это обстоятельство может дать возможность после дальнейшего изучения значительно упростить приемы экспериментирования, т.-к. например, весь цикл ударного движения может при этом оказаться однозначно определенной функцией положения руки и состояния ее мышц в исходном положении замаха.

Из обоих, выше высказанных, положений вытекает также то мало привычное для нашего мышления следствие, что, при ритмическом процессе движения, степень произвольности его весьма ограничена. В ритмическом движении мы можем вести себя далеко не как угодно; самое биомеханическое строение работающего органа неизбежно сведет наше движение к регулярной функции, распадающейся на сумму простых и строго мотивированных гармонических составляющих.

В связи с этим и упражняемость органа может свестись только к изменению соотношений амплитуд, эксцентриситетов и начальных фаз составляющих эллиптических колебаний; как общая структура сложной фигуры *Lissajous*, так, в значительной степени, и индивидуальный темп, обусловленный механическим резонансом работающего органа, останутся весьма мало податливыми по отношению к выучке.

Вся роль произвольной иннервации сведется при этом исключительно к скачкообразному или непрерывному изменению первоначальной установки, иначе говоря, к возмущающему вмешательству в регулярно текущий процесс автоматизированного движения. Можно думать, что, исследуя сложные произвольные движения, подобные описанным в статье, мы сможем со временем выделить явления и компоненты движения, обусловленные кортикальными импульсами, от слагающих, происходящих в силу стро-церебеллярной иннервации, и таким путем проникнуть глубже в невро-физиологическую область био-механики.

## 20. Очередные задачи.

Дальнейшие перспективы изучения живого движения вырисовываются довольно ясно из того материала, которым мы располагаем в настоящее время. Очередные задачи исследования располагаются при этом по 3-м основным линиям.

**Во-первых**, необходимо в дальнейшем расширить рамки исследования. С одной стороны должны быть охвачены экспериментально и аналитически всевозможные виды ритмических рабочих операций, включая сюда и инструментальные процессы, каковы все ударные и нажимные операции, вращательные движения и т. д.—и чисто органические движения, к которым относятся в первую очередь ходьба, бег, плавание, спортивные движения, пластические движения, а может быть и работа произвольной мускулатуры. С другой стороны, как подсобный материал, должны быть параллельно изучены случаи движений, отклоняющихся от нормы: рабочие операции при необычных условиях, расстройств движений при нервных заболеваниях (треморы, атетоидные, хорейатические движения, и т. д.). Такого рода исследование ведется в настоящее время д-ром **К. Кенчевым** по отношению к патологическим походкам (Л. С., см. стр. 57).

Эта группа опытов даст возможность судить о том, в какой мере обнаруженные нами закономерности являются обязательными для всякого движения и какие изменения вносятся в принципы живого движения изменениями условий его протекания. Весь полученный по этой первой линии материал можно, таким образом, рассматривать, как совокупность фактических данных, как **коллекцию результатов опыта**, дающую возможность наиболее широких обобщений.

**Во-вторых**, необходимо исследовать теоретически всю совокупность явлений, имеющих место при составном коническом упругом маятнике и его вариантах. В этом направлении открыты две возможности. С одной стороны, в виду того, что согласно предположению, сформулированному выше, как первый принцип био-динамики, потенциальная энергия звеньев работающего органа при данной установке, есть функция положения, можно попытаться выразить эту функциональную зависимость путем построения упругого силового поля и проследить характер потенциала этого поля. Здесь же необходимо попытаться экспериментально и аналитически установить зависимость упомянутой функции положения от установки, т. е. от тонуса групп агонистов, расположения начальных фаз и т. п.

С другой стороны, исследование должно идти, попутно с увеличением экспериментальной точности, в направлении дальнейшего эмпирического приближения к истинной аналитической и механической форме движения. Возможно, что в этом направлении придется, в виду сложности задач, идти путем опытного сравнения живых движений с построенными на основании теоретических предпосылок моделями; возможно, что такое углубление нашего представления о построении живого движения может быть достигнуто и путем варьирования условий эксперимента над самим движением.

Вся эта группа изысканий может быть уподоблена **моделированию живого движения**. Под ритмическое рабочее движение должна быть подведена механическая база; должны быть найдены модели движения, воспроизводящие возможно более точно те явления, которые наблюдаются, эмпирически в живом механизме. Количественное сходство между такими моделями и живым движением необходимо будет свидетельствовать и в пользу каузального сходства.



Эти первые две линии изучения дают указание и на прикладные возможности. Во-первых, зная, чем обуславливаются и как необходимо протекают те или иные явления движения, мы с большей легкостью можем построить рациональные приемы обучения и тренировки. Вместо бессистемного нацупывания и кустарного применения традиционных педагогических приемов, мы будем в состоянии предоставить самую широкую самостоятельность био-механическому автоматизму там, где ему надлежит проявляться, и уверенно регулировать область вмешательства произвольных изменений установки. Во-вторых, по мере того, как будет уясняться зависимость формы и возможностей движения от антропометрических и биомеханических коэффициентов, мы будем в силах следовать по пути создания биомеханической консультации по профессиональной пригодности, подобной ныне существующим психотехническим консультациям.

Третья группа экспериментов направляется по линии изучения зависимости движения от деятельности нервной системы. Здесь возможно ожидать механического разграничения движений в зависимости от характера и происхождения определяющей их иннервации; а установление такой зависимости может представить как клинико-диагностический, так и обще-физиологический интерес. Эти исследования должны, помимо того, идти главным образом на невропатологическом материале, и потому характеристика их выходит за пределы интересов учреждения, из которого исходит настоящая статья. Следует сказать, однако, что именно здесь приходится ожидать биомеханического объяснения сложных координированных движений с одной, и аритмических движений с другой стороны, ибо здесь более, чем где либо, должно сказаться влияние деятельности управляющих произвольными изменениями движения кортикальных центров\*).

---

\*) Настоящая статья имеет целью обоснованное изложение введенной нами впервые методики циклограмметрии, и иллюстрацию возможностей этой методики на частном примере рубки зубилом. Применение циклограмметрического метода как к проблемам нормализации, так и к исследованию чисто физиологических вопросов, будет предметом особых работ, имеющих появиться в одном из ближайших выпусков «Исследований Цит».

# Метод экспериментального исследования мышечных напряжений при трудовых движениях. (Метод миограмм).

Д-р А. П. Бружес,

Заведующий био-механической лабораторией ЦИТ'а.

1. Введение.

2. Методика.

Основная регистрация.  
Вспомогательные регистрации.  
Неизменные условия опытов.

3. Эксперименты.

Серия первая. Миограммы опытных. Схема миограммы.  
" вторая. Миограммы неопытных. Уклонения от схемы.  
" третья. Вариации построения движения. Экспериментальный анализ миограмм.  
" четвертая. Вариации внешних факторов. Их отношение к схеме.  
" пятая. Миограммы различных видов удара. Отношение к схеме.

4. Оценка метода.

## Введение.

В последние десятилетия, преимущественно под влиянием работ Taylor'a, человеческому элементу в промышленности отводится доминирующее место. Потребность в близком ознакомлении с этим элементом, естественно, вызвала обращение за компетентными разъяснениями к наукам о человеке и проявлениях его деятельности. Обнаружилось, однако, что тех общих положений, которыми, конечно, определяются и общие линии деятельности человека, крайне недостаточно для освещения проблемы о человеке, как субъекте трудового процесса, что для этой цели требуется какая-то особая, «местная» интерпретация этих положений; далее обнаружилось, что условия деятельности человека в этой области исключают возможность применения целого ряда испытанных методов исследования и, наоборот, требуют создания каких-то новых методов.

Исследования Gilbreth'a вскрыли громадное влияние того или иного построения трудовых движений человека на производительность его труда. Соответственное же обращение к физиологии органов движения дает в этом отношении чрезвычайно мало материала—и не только в отношении практических указаний, но даже в отношении общих положений. Классические исследования Muirbridge'a, Magey'я, произведенные над ходьбой, бегом, прыжком, плаванием человека, аллюрами лошади,

полетом птицы, представляют собой лишь документацию отдельных моментов этих движений, а не собственно эксперимент, как планомерное изучение влияния переменных факторов. Разработка метода графической регистрации была их главной целью. В их работах мы не найдем обобщающих положений, освещающих проблему живого движения.

Разработка общих положений физиологии органов движения производилась, начиная с 90-х годов Браун и Fischer'ом, при чем совершенно своеобразным путем (намеченным, собственно, еще в 30-х годах бр. Weber и основательно проложенным в 70-х годах Fick'ом). Вводя в формулы механики коэффициенты, вычисляемые из данных анатомии (размеров и весов отдельных частей тела, формы суставных поверхностей, сократительной силы мышц определенного объема), они дедуктивно заключали о некоторых механических закономерностях движения живого механизма (преимущественно о положениях частных и общих центров тяжести в различные моменты его движения). Они, правда, прибегали и к непосредственной регистрации движений, но делали это в изысканно-лабораторной обстановке. Центр тяжести их работ лежал не в исследовании самой деятельности органов движения, а в математическом анализе необходимых и достаточных механических условий ее, безотносительно к конкретным случаям этой деятельности.

Здесь уместно упомянуть, что тем же самым путем, но пользуясь лишь элементами алгебры и тригонометрии, Сеченов дал анализ трудовых движений человека, при чем в популярной форме выразил почти все, что было сделано в этом направлении до него и даже предвосхитил многое из того, что в деталях было разработано после него Fischer'ом.

Исходя из положения, что изучение трудовых процессов есть самостоятельная физиологическая проблема, требующая особого подхода, Агап впервые попытался изложить физиологию человека таким образом, чтобы выявить все, что может она дать для освещения этой прикладной проблемы. Однако, и в его трудах бедней всех оказались главы, относящиеся к биомеханике трудовых движений, в особенности же к ее экспериментальной методике.

Прикладное изучение трудовых движений должно постоянно иметь в виду и прикладную цель изучения: рационализацию трудовых движений. Ею должны определяться, как частные проблемы, так и методика их исследования. С этой точки зрения в каждом трудовом движении можно различать три элемента: 1) форма движения рабочего инструмента и отдельных звеньев непосредственно работающего органа; 2) поведение мышечных тяг, как ближайшей и важнейшей производящей, определяющей исследуемое движение и являющейся местом **прямых** затрат организма на производство данного движения; 3) поведение общего центра тяжести всей живой машины, как наиболее существенной с практической точки зрения производной, являющейся главным местом **косвенных** затрат организма при производстве исследуемого движения.

С той же точки зрения методика исследования трудовых движений должна удовлетворять целому ряду «местных» условий. Прежде всего она должна быть приурочена к движениям, а не наоборот; исследованию подлежат не имитации, а подлинные трудовые движения в естественных условиях. Аппаратура ни в какой степени не должна стеснять свободы, решительности и привычности исследуемых движений. Результат (численный или непосредственно графический) должен быть типичен для данного движения. Самый метод должен быть экспериментальным в вышеприведенном смысле, т. е. отчетливо выявлять как индивидуальные раз-

личия (например, различные манеры работы, отличия работы опытного и неопытного и т. п.), так и влияние изменения внешних факторов (например, позиции, рабочего места, инструмента и т. п.) Наконец, последнее условие, если не обязательное, то весьма желательное: результаты регистрации должны быть непосредственно-наглядны.

Все эти условия, несомненно, весьма ограничивают методологические возможности, и прежде всего в отношении применения лабораторно-точных методов. Однако, пропасть между этими точными методами, применимыми только на простейших движениях, и грубыми наблюдениями сложных трудовых движений (хотя бы даже с хронометром и фотографическим аппаратом) настолько велика, что вполне оправдывает попытки приспособления (пусть даже пока в ущерб точности) лабораторных методов к изучению подлинных сложных трудовых движений.

Элемент формы движения более или менее подвергся уже исследованию. Им занимались и «чистые» исследователи (Muybridge, Marey, Fischer и др.), изучая перечисленные выше «классические» движения, им занимаются и «практики» (Gilbreth, Schlesinger, Lassally, Tramm, Thun и мн. др.), изучая движения трудовые. Элемент перемещений центра тяжести документирован (Marey'ем и Demeny) или *дедуктивно* определен (Fischer'ом) (хотя только для статических положений и части тех же «классических» движений). Элемент же мышечной деятельности работающего органа не подвергался еще не только эксперименту, но даже хотя бы непосредственной документации, и методики для этой цели не существует<sup>1)</sup>. Важность изучения этого элемента, в особенности в трудовых движениях, не может подлежать сомнению. Дальнейшее изложение посвящено попытке заполнить этот пробел предлагаемым мною методом непосредственной авто-регистрации мышечных напряжений, причем я ограничиваюсь пока сообщением методики и ряда экспериментов, иллюстрирующих ее возможности, подробное же изложение всей предпринятой мною работы по этому методу и выводов из нее надеюсь представить в одном из следующих выпусков «Исследований ЦИТ'а».

## Методика.

Постоянным объектом излагаемых ниже экспериментов является деятельность мышц плеча при выполнении различных ударных движений, преимущественно, рубки зубилом (т. наз. инструментальной рубки), сущность которой состоит в том, что с обрабатываемого предмета, обычно зажимаемого в тиски, снимается слой при помощи клинообразно заточенного орудия, зубила, приставленного к этому предмету своим острием, и под действием ударов молотка, наносимых на противоположный конец зубила. Работа выполняется одним лицом, держащим зубило в левой руке, а молоток в правой.

<sup>1)</sup> O. Fischer (Beitrage zu einer Muskeldynamik. Leipzig 1897. D. statische u. d. kinetische Mass d. Wirkung eines Muskels u. s. f. Leipzig, 1902. Methodik d. spez. Bewegungslehre—Tigerstedt's Handb. d. Physiol. Methodik, Bd, II, 1-е Haelfte. Leipzig, 1911) дал ряд формул, по которым можно вычислить необходимые и достаточные силы для приведения шарнирной системы при помощи эластических тяг в определенное простое движение. Абстрактный анализ идеальных условий, без подтверждения экспериментом.

Mergier предложил аппарат для регистрации мышечных сокращений (рис. см. каталог фирмы Bouillite 1911 г.). Достаточно внимательного рассмотрения рисунка, чтобы убедиться, что этот аппарат обречен на бездействие. Действительно, в литературе нет никаких указаний на произведенные при его помощи исследования.

### Основная регистрация. (Рис. 2—А).

Область исследуемых мышц работающей конечности (в излагаемых здесь опытах—средняя треть правого плеча) охватывается **кругом** полой резиновой муфтой в 10 см. ширины; ее полость сообщается при помощи пневматической передачи с капсулой Магеу'я, снабженной обычным приспособлением, пишущим на закопченной бумаге кимографа; получаемая кривая регистрирует изменение площади сечения середины правого плеча вследствие напряжения или расслабления **каждой** из мышц, представленных в этом сечении; эта, в принципе, обычная пневматическая система Магеу'я имеет некоторые особенности: 1) в нее включены баллон, нагнетающий в систему воздух до определенного давления **одинакового во всех опытах**, и манометр, показывающий это давление в миллиметрах ртутного столба; 2) между местом включения баллона (и манометра) и регистрирующей капсулой система перегородена резиновой перепонкой, а между этой последней и капсулой имеется спусковой клапан. При накачивании воздуха спусковой клапан открывается; выпячивание разграничивающей перепонки благодаря этому не передается на мембрану регистрирующей капсулы; по окончании накачивания клапан, конечно, закрывается; в результате, мембрана регистрирующей капсулы сохраняет исходное ненапряженное состояние, пишущей рычажок—горизонтальное положение, а запись—неискаженность.

### Вспомогательные регистрации.

1) **Отметка момента удара.** (Рис. 2—В) На задней стороне рукояти молотка, непосредственно под бойком, прикреплена металлическая капсула, затянутая резиновой перепонкой, на которой лежит свинцовый грузик, подвешенный на резиновых тросах к краям капсулы. Ее полость посредством резиновой трубки сообщается с полостью другой такой же капсулы (находящейся на столе экспериментатора), на перепонке которой наклеена металлическая пластинка, служащая одним из контактов электрической цепи. Другой контакт, регулируемый винтик, расположен над нею. В цепь включен электромагнитный отметчик Дерез. Ток, а следовательно и отметка, возникает в момент удара молотком, так как грузик, продолжая по инерции поступательное движение, вдавливая на короткое время перепонку под собой, что вызывает выпячивание перепонки на другой капсуле и —соприкосновение контактов.

2) **Отметка времени** производится электрическим прерывателем в 40 периодов в 1" при помощи отметчика Дерез, (Рис. 2—С).

3) **Отметка световых точек циклограммы** (см стр. 95) получается таким же образом, как предыдущая, с той лишь разницей, что прерывателем служит обтюратор. (Рис. 2—D). Для этой цели на последний, соответственно его прорезам, наклеены полосы станиола; контакты, подведенные к обтюратору, представляют собой кисти из фольги; таким образом ток замыкается и размыкается в точном соответствии открываниям и закрываниям об'ектива обтюратором; вся же система включается абсолютно синхронно с зажиганием циклолампочек и выключается с их выключением.

Итак, при полной записи регистрируются: изменения площадей избранных сечений работающего органа, моменты ударов, время в 40-х долях секунды и световые точки циклограммы (следовательно тоже, время, но в тех долях, которые определяются количеством прорезов, и ско-

ростью вращения обтюратора). Последняя регистрация функционирует только в течение циклоемки.

### Неизменные условия опытов.

Обрабатываемая поверхность материала на 3—4 см. ниже уровня локтей испытуемого.

Материал: железная пластина толщиной в 0,5 см., выпущенная над тисками на 1 см.

Рабочее задание: приблизительно горизонтальное срубание стружки толщиной около 0,3 см., без риска.

Зубило: вес 0,34 кг., длина 18,5 см., поперечники  $25 \times 32$  мм., угол заточки  $35^\circ$ .

Молоток: вес 1 кг., длина рукоятки 35 см.

Исходное положение:

а) расположение ступней явствует из схемы (рис 1.);

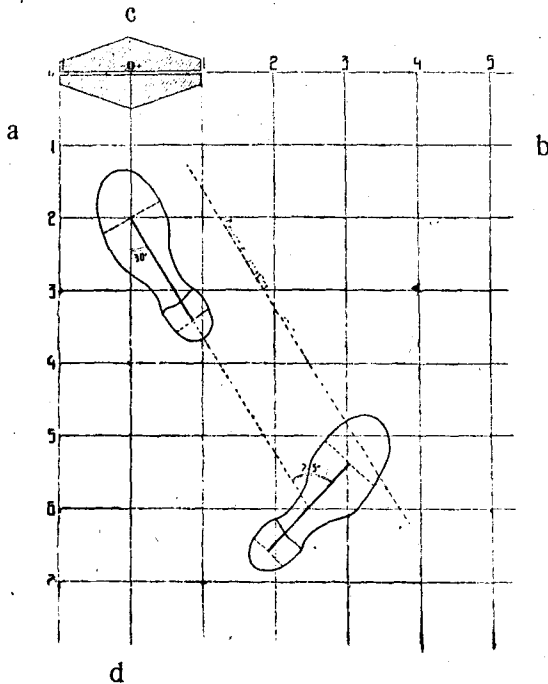


Рис. 1. Схема установки ступней при рубке зубилом. Сеть координат—в дециметрах.

- б) корпус параллелен линии а—b;
- в) тяжесть корпуса ложится на правую ногу несколько больше, чем на левую;
- г) левая кисть охватывает зубило по его середине и держит его под углом в  $45^\circ$  к горизонтали и в  $60^\circ$  к линии с—d; положение остальных звеньев задано положением корпуса и кисти;
- д) рукоять молотка охватывается замкнутым кольцом из указательного и наложенного на него большого пальца правой руки на расстоянии 20 см. от центра тяжести его; остальные

пальцы свободно, без напряжения охватывают рукоять; положение остальных звеньев задано положением корпуса и кисти при обязательном условии ненапряженности;

г) положение корпуса ни в ударе, ни в вамахе не меняется.

Положение воспринимающей муфты: средняя треть правого плеча. Давление в пневматической системе: 30—35 мм. ртутного столба при положении конечности в состоянии физиологического разгибания.

Скорость вращения цилиндра 3 см/сек.<sup>1)</sup>

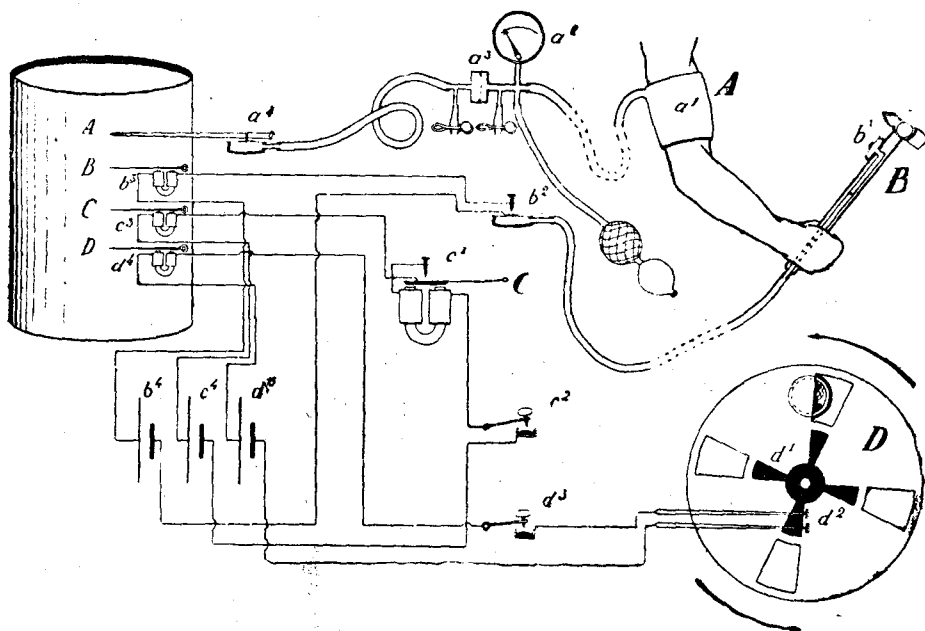


Рис. 2. Схема миографической установки. А—А—основная регистрация (а<sub>1</sub>—муфта, а<sub>2</sub>—манометр и баллон, а<sub>3</sub>—разделительная капсула, и спускные клапаны, а<sub>4</sub>—регистрающая капсула). В—В—отметка моментов удара (в<sub>1</sub>—капсула на молотке, в<sub>2</sub>—капсула с контактами, в<sub>3</sub>—отметчик, в<sub>4</sub>—элемент). С—С—отметка времени (с<sub>1</sub>—прорыватель, с<sub>2</sub>—ключ, с<sub>3</sub>—отметчик, с<sub>4</sub>—элемент). D—D—отметка световых точек (d<sub>1</sub>—станиолевый крест на обтураторе, d<sub>2</sub>—фольговые контакты, d<sub>3</sub>—ключ, d<sub>4</sub>—отметчик, d<sub>5</sub>—элемент).

Регистрирующий аппарат приводится в действие без ведома испытуемого и лишь после того, как последний вполне приладится, на что достаточно десятка ударов.

На каждого испытуемого заполняется его антропометрическая карточка.

Схема всей установки дана на рис. 2, общий вид регистрирующей части—на рис 3.

<sup>1)</sup> В опытах второй серии—0.5 см/сек.

## Эксперименты.

Излагаемые здесь эксперименты удобнее всего разбить на пять серий:

**Серия первая:** рубка зубилом; регистрация работы ряда опытных рабочих при равных условиях; общая схема миограммы и индивидуальные модификации ее.

**Серия вторая:** рубка зубилом; регистрация работы неопытных при прочих равных условиях, общие и индивидуальные отличия от схемы.

**Серия третья:** рубка зубилом, регистрация работы, измененной некоторыми предварительными условиями с опытным испытуемым, влияющими на работу определенной мышцы; дифференцирование схемы в отношении выделения деятельности той или иной мышцы.

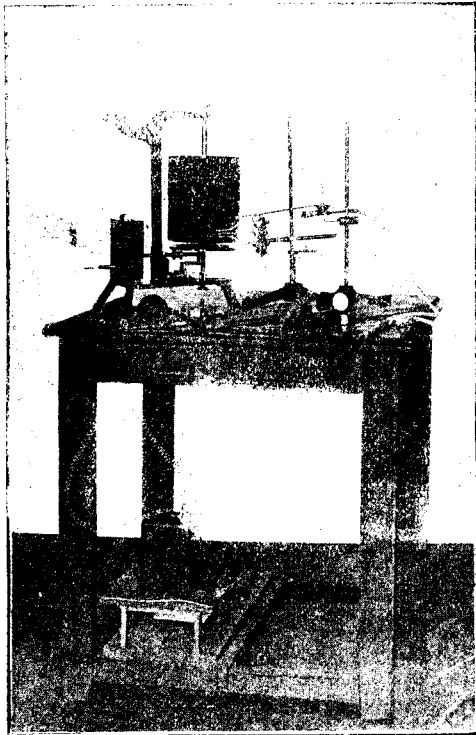


Рис. 3. Регистрирующая часть установки: кимограф, регистрирующая капсула, отметчики, разделительная капсула, манометр, баллон.

**Серия четвертая:** рубка зубилом; систематическое изменение условий материала, инструмента и рабочего места; связь изменения условий с отклонениями от схемы.

**Серия пятая:** различные виды удара, произведенные одним и тем испытуемым; миографические характеристики модификаций удара; материал для биомеханической классификации ударных движений.

Эти эксперименты представляют собой, как сказано, лишь часть моих исследований с помощью миографического метода и подобраны таким образом, чтобы выявить, что метод



- 1) единообразно регистрирует основные черты сходных объектов (серия 1-я),
- 2) выявляет характерные различия объектов несходных—индивидуальные (серия 1-я и 2-я) и групповые (серия 2-я и 5-я),
- 3) реагирует характерными и закономерными изменениями регистрации на изменение одной переменной при прочих равных (серия 3-я и 4-я).

Метод, удовлетворяющий этим трем условиям, является, полагаю, заслуживающим внимания экспериментальным методом, если он, к тому же, удовлетворяет и всем указанным выше «местным» условиям.

### Первая серия,

полученная регистрацией мышечных сокращений при работе целого ряда опытных рабочих (на рисунке 4 и 5 даны миограммы, наиболее

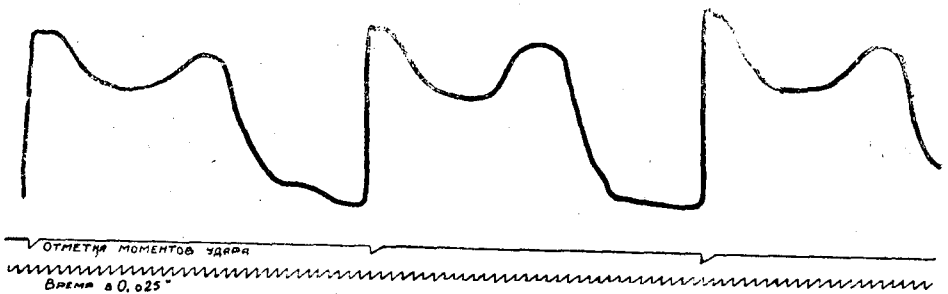


Рис. 4. Миограмма обычной работы опытного слесаря. (Серия I, №1, миогр. 26).

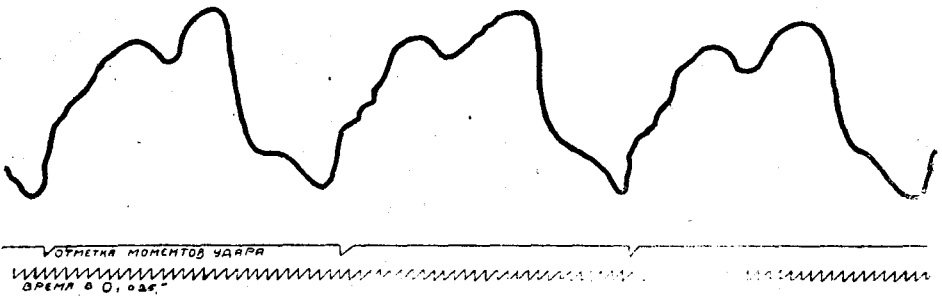


Рис. 5. Миограмма обычной работы опытного слесаря. Другой испытуемый (Серия I, №6, миогр. 38).

отличающиеся одна от другой), обнаруживает, что, несмотря на кажущееся на первый взгляд значительное различие миограмм, они обладают некоторыми особенностями, повторяющимися регулярно во всей серии. Это обстоятельство позволяет построить некоторую **общую схему миограммы**, изображенную на рис. 6 сплошной линией. Она, в общем, представляет собой сочетание **трех волн**: **первой (I)** (ведя счет после момента удара), высокой и об'емистой, соответствующей большей части замашного движения и длящейся около 0,6, **второй (II)**, обычно небольшой, в самом начале ударного движения, продолжительностью приблизительно в 0,1, и **третьей (III)**, очень крутой на под'еме, заостренной и с постепенно замедляю-

щимся падением, соответствующей концу ударного и началу замашного движения, таким образом, что момент удара приходится на восходящий склон волны, вблизи ее вершины; продолжительность этой волны всего около 0,1". Весь трехволновый цикл протекает, следовательно, в среднем в 0,8". (III) (I) (II)

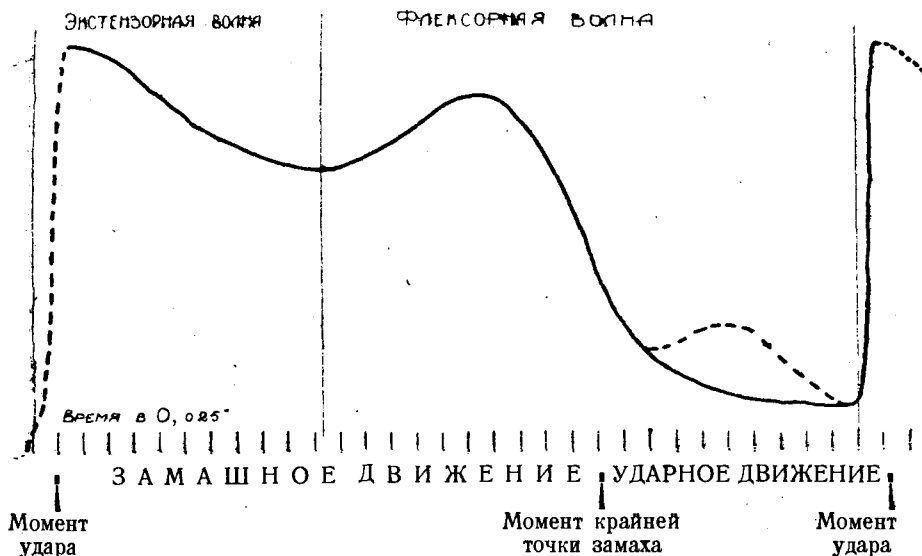


Рис. 6. Схема напряжений мышц плеча при рубке зубилом.  
Пунктир в конце флексорной волны—добавочная волна.

Индивидуальные отклонения от схемы касаются коэффициентов волн и отношения их фаз. Наличие первой и третьей волны постоянно. Назову их флексорной и экстензорной (мотивировка этих названий будет дана ниже при описании опытов третьей серии). Весьма значительно постоянство временных отношений между тремя точками: вершиной флексорной волны, началом восходящего склона экстензорной волны и ее вершиной (моментом удара). Что же касается построения склонов, то здесь наблюдаются значительные индивидуальные отклонения, которые касаются, главным образом, пространства, занимаемого нисходящим склоном экстензорной и восходящим склоном следующей за ней флексорной волны и выражаются в более или менее значительном слиянии их у некоторых испытуемых (т.-е. в непостоянной глубине провала между вершинами этих волн). Значительным также колебаниям подвержена форма нисходящего склона флексорной волны. Эти колебания вызываются большой неустойчивостью следующей за ней второй волны (которую назову добавочной). Последняя очень изменчива во времени и весьма нередко вместо обычного своего места (в каком-то случае имеет постоянную длину и высоту) вливается в нисходящий склон первой волны (очень редко в восходящий третьей). В некоторых случаях слияние настолько полное, что присутствие этой «добавочной» волны обнаруживается лишь небольшим изменением соответственного силона поглотившей ее волны. Однако, присутствие ее может быть доказано во всех миограммах этой серии.

Характерным признаком серии является **стереотипность** определенной индивидуальной миограммы у всех испытуемых, представляющих собой весьма опытных слесарей с многолетним стажем и технически владеющих инструментами в совершенстве<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Она особенно отчетливо видна в миограмме инструктора (рис. 3), где в более медленное вращение кимографа.

## При рассмотрении миограмм

### второй серии

прежде всего бросается в глаза отсутствие стереотипности в большей части из них. Рис. 8 представляет довольно обычную в этой серии миограмму, весьма характерную в этом отношении: ни один удар не похож на другой; рядом с миограммой инструктора (рис. 7) она поражает своей беспорядочностью как в отношении ритма, так и в отношении конфигурации кривой.

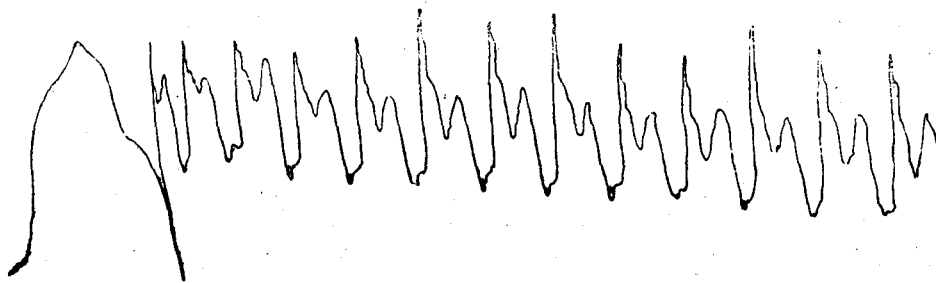


Рис. 7. Миограмма опытного слесаря (инструктора) при медленном вращении кимографа. Слева — запись мышечных напряжений от полного разгибания плеча до полного сгибания его и обратно («мышечный диапазон»). (Сер. II № 1. Миогр. 27).

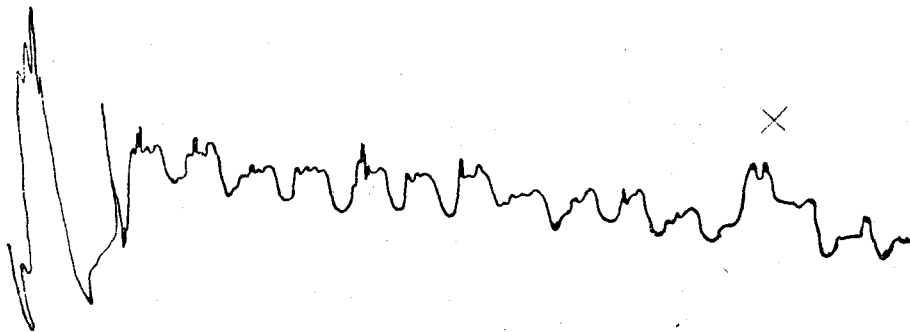


Рис. 8. Миограмма неопытного (при медленном вращении кимографа). Слева — «мышечный диапазон». (Серия II. № 12. Миогр. 18).

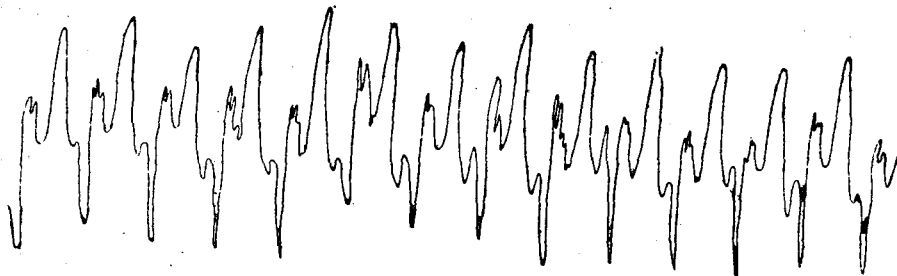


Рис. 9. Миограмма другого неопытного. (Серия II. № 14. Миогр. 20).

Наиболее ритмичные и стереотипные миограммы все же отличаются от трехволновой схемы количеством волн, их амплитудой, их фазами. Для значительной части испытуемых характерно весьма осторожное пользование именно мышцами плеча. Для учета амплитуды испытуемому предлагается перед тем, как приступить к работе, произвести свободное, ненапряженное движение в локтевом суставе от полного разгибания до полного сгибания (при горизонтальном положении плеча). Сравнивая с этим «мышечным диапазоном» (левый край рис. 7 и 8) амплитуды флексорных волн, мы убеждаемся, что инструктор (рис. 7) свободно пользуется половиной диапазона, а неопытный (рис. 8) — едва пятой долей, урезывая замах<sup>1)</sup>. Не полагаясь на точность непринужденных движений многошарнирной системы своей руки, неопытный невольно превращает ее в почти несгибающийся стержень, вращающийся вокруг оси — плечевого сустава, которую можно считать неподвижной, стало быть тоже надежной; работая при таких условиях главным образом за счет мышц плечевого пояса, он пытается этим гарантировать себя от промахов (с переменным успехом: крестиком отмечен промах).

Итак, характерные отличия этой серии, обнаруживаемые миографическим методом: **отсутствие стереотипности, аритмичность, малое использование „мышечного диапазона“, принужденность движений, уклонения миограммы от схемы.**

Необходимо, однако, отметить, что эти отличия могут комбинироваться всевозможным образом. Так, некоторые испытуемые дают ритмичные и стереотипные миограммы при совершенно своеобразной форме (рис. 9); другие, пользуясь значительной частью «мышечного диапазона», дают все же стереотипную кривую, приближающуюся к схеме; третьи, работая хотя и беспорядочно, смело пользуются значительной частью «мышечного диапазона».

### Третья серия

имеет целью выяснение происхождения тех или иных деталей типичной миограммы. При описании методики уже отмечено, что, так как муфта охватывает середину плеча кругом, то «получаемая кривая регистрирует изменение площади сечения середины правого плеча вследствие сокращения или расслабления **каждой** из мышц, представленных в этом сечении». Валовая регистрация дает основу лишь для самых общих заключений сравнительного характера. Для суждения о мышечной конструкции движения необходимы дифференцированные данные о деятельности если не каждой отдельной заинтересованной мышцы, то хотя бы о деятельности синергических групп. На первый взгляд это кажется невозможным при применении недифференцирующего воспринимающего прибора: мы видим, что вся установка такова, что увеличение площади сечения, (а следовательно, и под'ем кривой) происходит независимо от того, сокращается ли группа сгибающая локоть или разгибающая его. Однако, дифференциация участия групп противоположного действия и, тем самым, выяснение происхождения той или иной волны оказываются в значительной степени возможными при помощи следующего приема. По зарегистрировании работы опытного испытуемого ему предлагается ввести в свою обычную манеру одно какое-нибудь изме-

<sup>1)</sup> Числа весьма приблизительны. Метод ни в коем случае не претендует пока на количественные измерения, а только лишь на качественные сравнения.

нение, относительно которого заранее известно, что оно может быть произведено лишь за счет сокращения определенной группы мышц. Например: дать резко-отрывистый удар, или: затормозить движение в известный момент, или: дать резко-бросковое движение локтю в самом начале ударного движения, и т. п. Подробное описание всех опытов этой серии не входит в задачу статьи. Достаточно привести примеры, выясняющие лишь происхождение волн, а не конфигурации их.

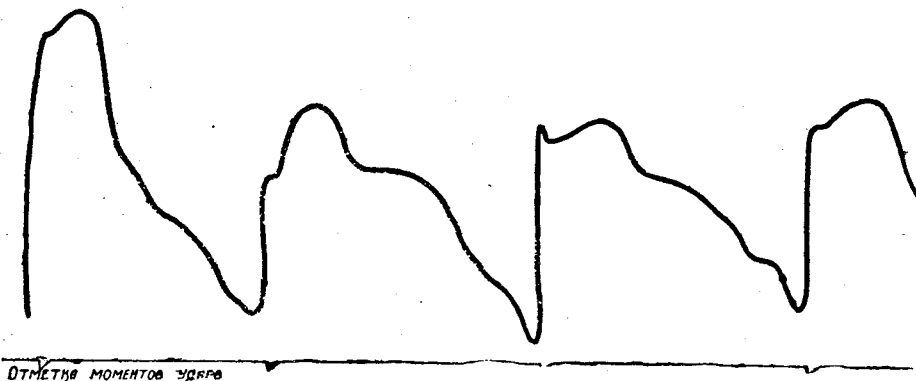


Рис. 10. «Удар с оттяжкой» — включение сгибателей непосредственно после удара. (Серия III, вар. 1. № 1. Миогр. 83).

При утрированно-отрывистом ударе группа сгибателей включается почти непосредственно за моментом удара и сокращается весьма интенсивно. На соответственной миограмме (рис. 10) мы видим резкое увеличение первой волны, сдвиг ее вершины ближе к моменту удара и уменьшение глубины провала между ней и предыдущей третьей волной. Это дает право заключить, что первая волна обязана своим происхождением сокращению группы сгибателей, отчего она и названа флексорной.

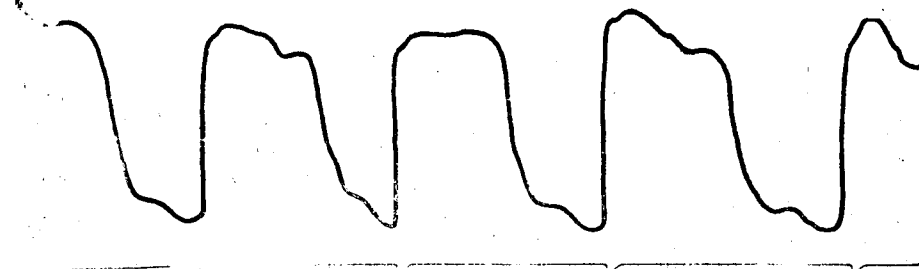


Рис. 11. «Удар с задержкой» — продолженное сокращение разгибателя. (Серия III, вар. 2. № 1. Миогр. 77).

Обратное условие — «тяжелый», «припечатывающий» удар, т.-е. затормаживание движения молотка непосредственно вслед за ударом, рассчитано на усиленное и более медлительное сокращение разгибателя. Соответственная миограмма (рис. 11) обнаруживает увеличение высоты и удлинение третьей волны, что указывает на ее происхождение от сокращения разгибателя и дает право назвать ее экстензорной.

В замахе локоть отведен от туловища. Если в самом начале замаха энергичным сокращением мышц, приводящих плечевую кость к туловищу, вызвать резко «бросковое» движение локтя, то, в силу инерции массы молотка, локтевой угол, прежде чем развернуться, несколько уменьшится, что вызовет пассивное сокращение сгибателей. Выражением этого и является добавочная вторая волна, так резко увеличивающаяся при условии, рассчитанном на пассивное сокращение сгибателей (рис. 12).



Рис. 12. «Бросок плечом», вызывающий увеличение добавочной сгибательной волны. (Серия III, вар. 3. № 1. Миогр. 86).

Эта серия опытов позволяет прочесть «интегральную» схему (рис. 6) следующим образом: через короткое время по совершении удара разгибатель расслабляется, но полное расслабление замаскировывается начинающимся сокращением сгибателей, которое продолжается до поворотного момента; начало ударного движения характеризуется расслаблением обеих групп мышц плеча: движение идет за счет работы мышц плечевого пояса, вызывающей в начальный момент пассивное сокращение сгибателей; вслед за этим наступает резкое сокращение разгибателя, вызывающее удар и продолжающееся некоторое время и после удара; весь цикл совершается в среднем в 0,8 сек.

Практически важным является вопрос о влиянии переменных внешних факторов на мышечную конструкцию движения, а потому необходимо было испытать, насколько миографический метод улавливает это влияние. Эти исследования составляют

#### четвертую серию.

Примером их могут служить рис. 13-14. Позарегистрировании работы опытного испытуемого в условиях, изложенных на стр. 84-85, был подвергнут изменению один внешний фактор: высота тисков, и записана работа при тисках на 5 с/м. выше (рис. 13) и ниже (рис. 14) обычного. Миограммы обнаруживают искажение схемы как в том, так и в другом случае, при чем эти искажения в значительной степени приближаются к двум миограммам взаимнопротивоположного характера из третьей серии, а именно: «отрывистому» (рис. 10) и «тяжелому» (рис. 11) удару. При первом, в силу обусловленного характера удара, происходит включение сгибателей локтя почти непосредственно вслед за ударом; при высоких тисках отдача направлена под более острым углом к горизонту, чем обычно, вследствие чего и отражается на сгибании локтя раньше и в большей степени, чем обычно. При втором разгибатель локтя дольше пребывает в сокращенном состоянии; при низких тисках отдача направлена под более тупым углом и вызывает сначала поднятие всей конечности в плечевом суставе кверху, и лишь затем происходит обычное сокращение сгибателей.

Таким же образом исследовано влияние того или иного материала, веса молотка, изменения позиции и т. п. При каждой из вариаций четвертой серии получается характерное и биомеханически обоснованное изменение миограммы. Не лишне отметить, что меньше всего изменений вносят вариации материала в отношении его упругости (от свинца до инструментальной стали), что дает основание двум предположениям: первое, конечно, что метод недостаточно чувствителен к этим вариациям, а второе — что отдача, являющаяся следствием упругости, весьма мало влияет на мышечную конструкцию движения. На этом явлении я остановлюсь подробнее в главе об оценке метода.

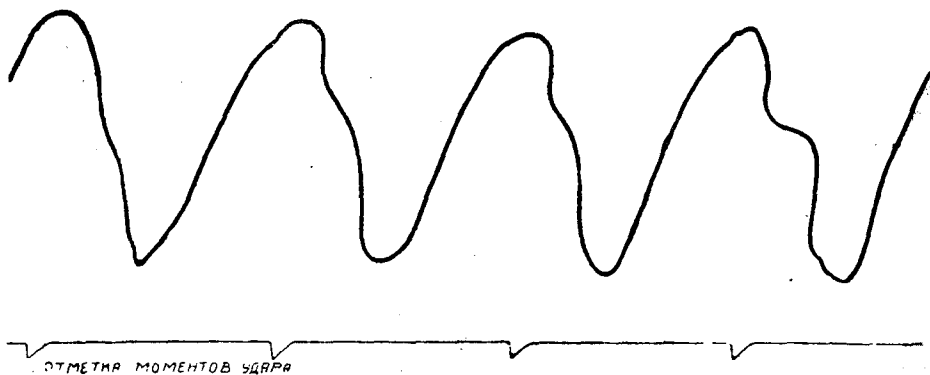


Рис. 13. Тиски на  $\frac{5}{2}$  см. выше обычного. (Серия IV. вар 2а. № 1. Миогр. 134).

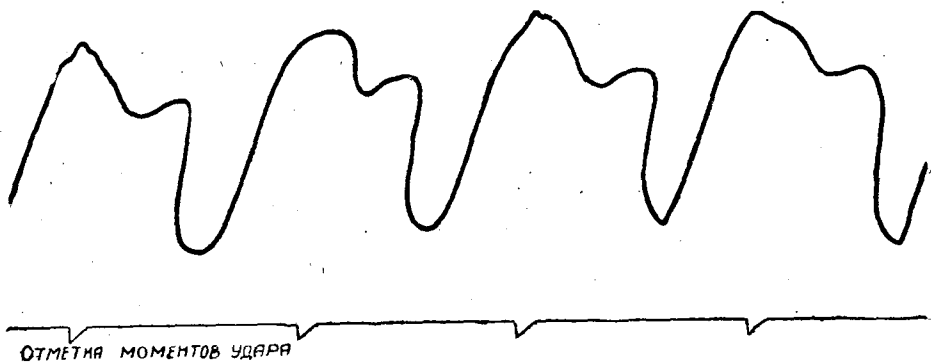


Рис. 14. Тиски на 5 см. ниже обычного. (Серия IV. вар. 2в. №1. Миогр. 138).

Как в третьей, так и в некоторой части четвертой серии исчезает одно из характернейших свойств работы тех же опытных испытуемых: стереотипность. «Провоцирующие» условия третьей и некоторые варианты четвертой серии, повидимому, слишком непривычны для них. Однако, отмеченные изменения миограмм появляются почти в каждом соответственном цикле, как бы он ни отступал от обычной схемы, что и дало нам право сделать изложенные выше заключения о механизме их происхождения.

### Миограммы пятой серии

разбиваются на две основных группы, коренным образом отличающиеся одна от другой. Первая характеризуется тем, что разгибатель принимает деятельное и усиливающееся участие в разгибательном движении вплоть до момента удара и даже несколько долее. Это—группа по преимуществу легких молотков, управляемых одной рукой; примером ее может служить миограмма инструментальной рубки (рис. 4). Другой пример дан на рис. 15. Это - удар, производимый молотком в 2 кг. непосредственно по металлу, находящемуся на наковальне. Здесь особенно резко выступает разгибательное сокращение после удара. Другая группа (подвергнутая также

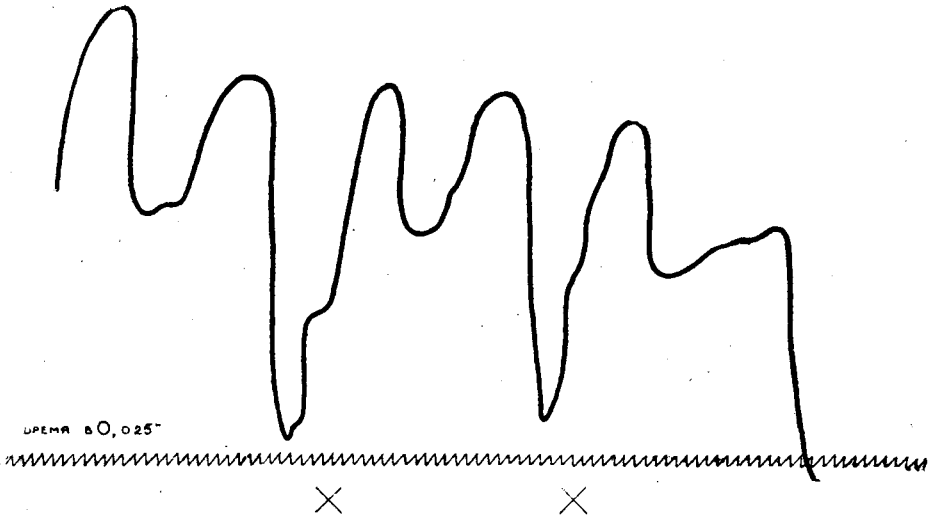


Рис. 15. Одноручный удар молотком в 2 Кг по металлу на наковальне. Моменты ударов соответствуют перегибам около середины восходящего склона волны и отмечены крестиком. (Серия V, тип A<sub>3</sub>, №2. Миогр. 151).

экспериментальному анализу, аналогичному опытам третьей серии) обнаруживает участие разгибателя лишь в начале ударного движения, до тех пор, пока инструмент не пронесется через высшую точку ударной траектории, после чего он движется дальше в силу инерции, так что

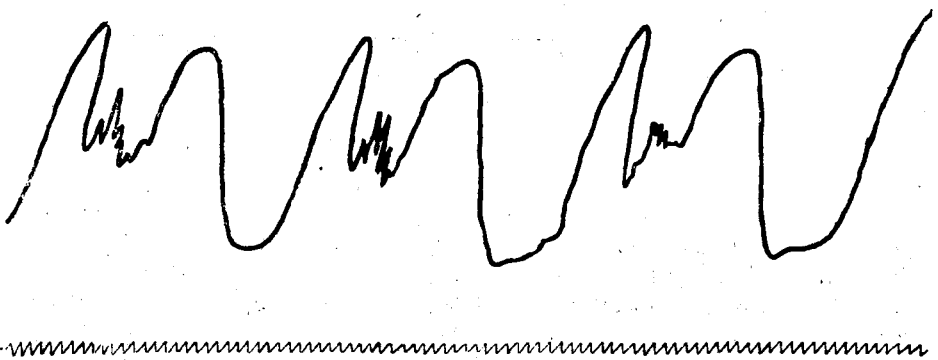


Рис. 16. Двуручный удар кувалдой в 5 Кг. Запись напряжений мышц правого плеча. Моменты удара отметили сами себя мелкими вибрациями. (Серия V, тип A<sub>4</sub>, № 1. Миогр. 143).



самый удар происходит при расслабленных мышцах плеча. Это—группа тяжелых молотков, кувалд, управляемых обычно обоими руками; пример—кузнечный „навесной“ удар (рис. 16 ).

Совершенно особняком стоит миограмма (т. наз. „размашного“ удара) молотобойца, характеризуемого круговым движением кувалды и всей конечности с осью вращения в плечевом суставе (рис. 17). Здесь вся работа мышц плеча протекает, по видимому, под знаком длительного сокращения сгибателей для умерения центробежной силы, развиваемой при этом вращении.

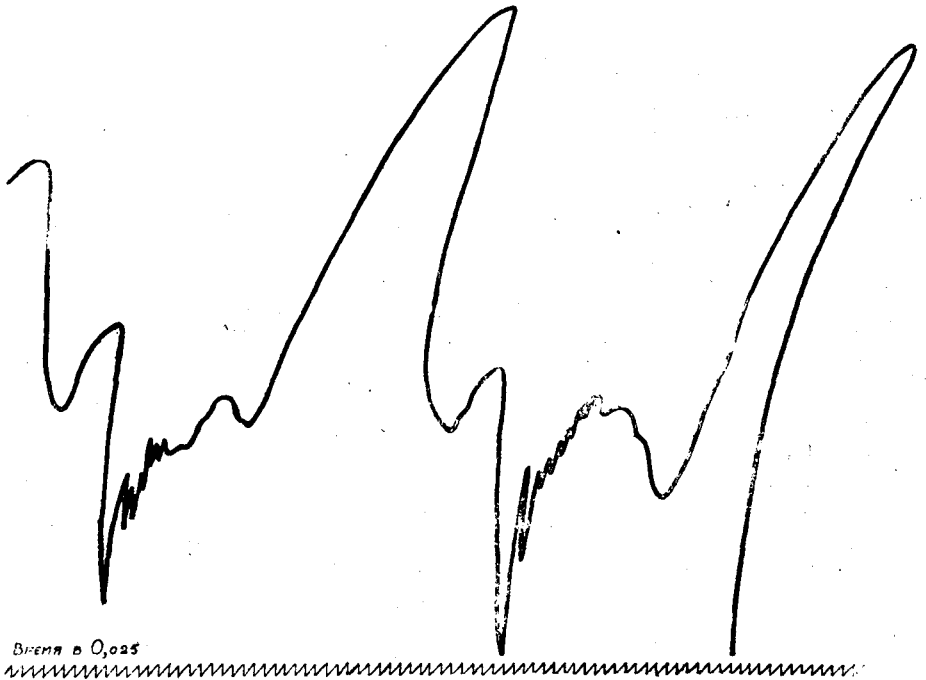


Рис.17. Круговой удар молотобойца кувалдой в 5 Кг. Запись напряжений мышц правого плеча. Моменты удара тоже видны по мелким вибрациям. (Серия V, тип А<sub>5</sub>. № 2. Многр. 146).

Эта серия показывает,—во-первых, что каждый тип удара дает специфическую миограмму, во-вторых, что миограммы могут служить материалом для биомеханически обоснованной классификации типов удара и, в третьих, что общая схема (данная в первой серии) распространяема лишь на первую группу—удары с длительным участием разгибателя.

Более точный анализ мышечной деятельности, связывающий ее с положением инструмента и отдельных частей шарнирной системы в пространстве в любой заданный момент, оказывается возможным при одновременном сочетании регистрации формы движения и мышечной деятельности, т.-е. при сочетании циклографического и миографического методов. Такого рода опыты поставлены мною совместно с д-ром Н. А. Бернштейн и проф. Н. П. Тихоновым и составляют одну из текущих работ лаборатории. Тесная смычка методов, изложенная на стр. 83, дает абсолютную синхронность регистрации, позволяющую точно выявить связь моментов миограммы с определенным изменением суставных углов, скоростями и направлениями движений и всеми другими их элементами.

Имеющиеся уже данные уточняют и подтверждают все изложенное выше. Так как в самую методику миографии они не вносят ничего нового, то сообщение их не должно входить в состав этой статьи, а составит предмет подробного изложения всей работы по исследованию мышечной деятельности при трудовых движениях.

### Оценка метода.

Миографический метод в той форме, как он сейчас применен в биомеханической лаборатории ЦИТа, несомненно уязвим, при чем мыслимые существенные возражения могли бы отнестись к нему либо как к излишнему методу, либо как к слишком грубому и неточному.

В смысле первого возражения для него весьма невыгодно соседство в той же лаборатории такого универсального метода, как циклографический, который дает ряд ценнейших указаний не только из области формы движения, но и в отношении других биомеханических элементов. Так например, он уже теперь дает возможность проекции движущих сил на определенные группы мышц, точного установления перемещений центров тяжести и целый ряд других возможностей. Несомненно, что методика с'емки циклограмм и их анализ будут доведены до такого совершенства, что циклограмма сможет дать точнейший и неоспоримый ответ на все детали указанных проблем. Однако, этот метод в приложении к проблеме мышечной деятельности имеет два неустранимых неудобства: во-первых, выводы из циклограммы, нужные как для освещения этих проблем вообще, так, в частности, для оценки определенного выполненного движения, получаютя из нее не непосредственно, а лишь в результате глубокого анализа и весьма кропотливых многодневных вычислений; во-вторых, обработка циклограммы требует не только глубоких познаний в области высшего математического анализа, но и изощренной находчивости в ней, а самая с'емка циклограммы, годной для такого анализа, требует исключительной и специальной виртуозности от оператора. Эти два обстоятельства, нисколько не умаляя ценности циклографического метода для (косвенного) освещения проблемы мышечной деятельности, дают право на существование специальных методов для их прямого исследования; методов, безусловно, более грубых, но имеющих в этой области крупные преимущества простоты установок и непосредственности результатов.

Неточность предлагаемого метода может зависеть от двух причин: от его недифференцированности или от его нечувствительности к каким-нибудь теоретически мыслимым тонким вариациям мышечной деятельности. Действительно, неудобство метода в том, что при помощи одного записывающего приспособления регистрируется работа не одной мышцы, даже не синергической группы, а всех мышц данного сечения, независимо от их функциональных различий. Вследствие этого, во-первых, антагонисты дают волну одинакового знака и, во-вторых, расслабление одной мышцы маскируется одновременным сокращением ее антагониста, т.-е. при равном развитии антагонистов мы, пожалуй, могли бы в некоторых случаях не получить никакой кривой, а если кривая получается, то она является преимущественным выражением деятельности лишь более развитого в данном сечении антагониста, да к тому же не чистым ее выражением.

«Интегральные» миограммы, получаемые при изложенной установке, разумеется, не годны для выделения количественно - чистой

работы \*избранной мышцы или синергической группы. Ценность их прежде всего в сравнении того и иного эмпирического документа, например, первой и второй серии. Однако, из третьей серии мы получаем возможность установить по миограммам участие той или другой из антагонизирующих групп мышц. При данной установке мы, действительно, не можем в некоторых случаях начисто выделить сокращение одной группы из-за постепенности замены его сокращением антагониста. Однако, эти «смазанные» места миограммы все же не совершенно обесцениваются. Миограмма, как явствует из опытов третьей серии, отражает деятельность обоих антагонистов независимо от разницы их объема в данном сечении. Мы сосредоточиваем свое главное внимание на областях вершин волн, где можем ждать чистого эффекта, и на них и строим свои заключения, по возможности избегая пока касаться провалов, где можем подозревать смешанный эффект.

Для регистрации деятельности отдельной синергической группы конструируется специальный прибор, основанный тоже на принципе «немешания», однако, значительно уступающий в этом отношении описанной установке, а потому предназначенный лишь для узко лабораторных опытов аналитического характера<sup>1)</sup>.

Далее, действительно ли метод мало чувствителен к изменениям условий мышечной деятельности. Опыты четвертой серии показывают обратное. В приведенном примере изменения высоты тисков простирались на 5 см. в ту и другую сторону. Может быть 1 — 2 см. вместо 5 не вызвали бы никаких перемен. Мы, однако, еще не знаем метода, которым улавливались бы изменения мышечной конструкции даже при более широких вариациях, чем наши. Правда, метод не улавливает различий в упругости материала, в отдаче, которая, казалось бы, является весьма важным механическим фактором и должна бы быть принята во внимание при построении рационального движения. Так, во многих руководствах по ремеслам рекомендуется ее использование (но без указаний, что надо для этого делать). Однако, насколько мне известно, никто не пытался доказать это априорное предположение по отношению к работе живой машины, где чисто-механические факторы пассивного движения масс могут оказаться ничтожными по сравнению с биомеханическим фактором—активной работой мышц. Конечно, это обстоятельство должно быть установлено и проанализировано.

Биомеханическое исследование удара, едва зародившись, уже обнаруживает некоторые явления, которые, полагаю, лишают этот совет всякой почвы. Миограмма (рис. 18), записанная при очень быстром вращении кимографа (25 см./сек.), представляет собой одну только экстензорную волну, весьма растянутую. Мы видим, что сокращение экстензора, возрастая в течение 0,05 сек., не прекращается в момент удара, чтобы уступить место полному расслаблению всех мышц, как это логически должно было бы быть для добросовестного «использования отдачи». Против ожидания, экстензор не расслабевает, даже не остается на достигнутом уровне, но продолжает усиливать свое напряжение еще в течение 0,04 сек. и лишь тогда медленно, нехотя расслабевает в течение прибл. 0,13 сек. Результатом, конечно, должно явиться добросовестное

---

<sup>1)</sup> Эту же цель, по видимому, должен был преследовать аппарат Mergier см. прим. на стр. 82).

глушение отдачи <sup>1)</sup>. Это явление лишь на первый взгляд может показаться парадоксальным, а на самом деле оно просто, понятно и рационально: легко можно представить себе, что произошло бы с рабочим органом, если-б его дистальный конец, развил скорость в 8—10 метр./сек., в момент удара мгновенно изменил бы направление на обратное со скоростью того же порядка <sup>2)</sup>.

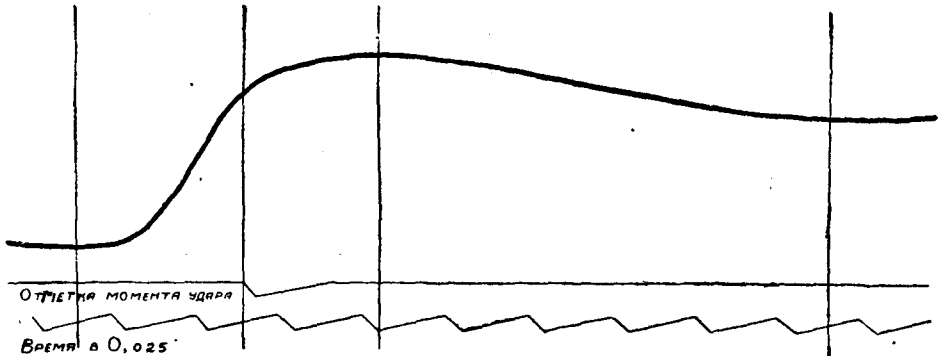


Рис. 18. Экстензорная волна при быстром вращении кимографа. Ударное напряжение разгибателя (а—в) длится 0,05", его тормозящее сокращение (в—с) — 0,04" и относительное расслабление (с—д) — 0,13".

На основании этих данных неудовление влияния отдачи следует отнести не за счет несовершенства метода, а за счет того обстоятельства, что она составляет всего 2% всей силы, затрачиваемой на поднятие молотка от зубила до высшей точки замаха <sup>3)</sup>. Можно поэтому считать показания миограмм правильными и признать, что различия в упругости материала не отражаются на мышечной конструкции удара в силу их сравнительной незначительности. Если колебания в величине отдачи и не учитываются, то самый факт остаточной отдачи, основные 2%, воспринимается с очевидной чувствительностью: изменение направления отдачи логичным образом изменяет соотношение частей миограммы (серия 4-я.)

Регистрируются ли на миограммах действительно мышечные напряжения или же муфта, не покрывающая всей длины плеча, воспринимает лишь волну пассивного перемещения наибольшего поперечника двуглавой мышцы (как наиболее развитой, выпуклой и поверхностно лежащей) при сгибании локтевого сустава—вверх, при разгибании его—вниз? В последнем случае миограмма являлась бы лишь регистрацией некоего побочного явления при изменениях локтевого угла и не давала бы никакого права заключать об активной деятельности мышц. Посмотрим, какой вид должна была бы иметь миограмма удара при этом допущении. Две возможности: 1) если максимальный поперечник лежит вне муфты, то, вклиниваясь под нее при сгибании локтевого сустава, он дал бы **один максимум кривой**, а выклиниваясь при разгибании—**один минимум**; 2) если максимальный поперечник лежит под муфтой и при сгибании

<sup>1)</sup> Насколько основательно глушение, можно видеть из рис. 19 в статье д-ра Бернштейн, где уже первый кадр (через 0,05 сек. после удара) обнаруживает активное усилие, приложенное к молотку, когда он едва успел отделиться от зубила.

<sup>2)</sup> Удар более тяжелым молотком и по более отдаленной цели, следовательно, с большей скоростью, вызывает и большее послеударное напряжение разгибателя—см. рис. 15. В мертвых механизмах, работающих падением больших масс (паровой молот) и сделанных из гораздо более прочного материала, применяется принцип глушения отдачи.

<sup>3)</sup> Д-р Вернштейн (о. с.).

выклинивается ~~к~~ сверху, то мы имели бы также по одному минимуму и максимуму, но в обратном порядке. В результате миограмма имела бы простое одноволновое строение, чего на самом деле нет. Даже простое равномерное сгибание и разгибание, производимое без всякого форсирования мышц и зарегистрированное в левой части рис. 7 и 8, не является простым выклиниванием: мы замечаем на ординарной волне перегибы как на восходящей, так и на нисходящей частях ее<sup>1</sup>). Наконец, сравнивая миограммы с графиками изменения локтевого угла и угловых скоростей предплечья<sup>2</sup>), мы убеждаемся в согласованности их не с первым, а с последним графиком, что также подтверждает наше толкование, заключающееся в том, что **миограммы регистрируют активные напряжения мышц, вызывающие угловые ускорения управляемого ими звена рабочего органа.**

Допустим даже, что метод имеет некоторые неудобства («однозначность записей антагонистов») и неточности («наложение антагонистов») и посмотрим, каковы его положительные качества. Первое и самое главное состоит в том, что он, по заявлению всех испытуемых, совершенно не стесняет их, следовательно, дает гарантию подлинности исследуемых движений. Далее, миограммы индивидуальны. С одной стороны, ни одной из полученных записей нельзя смешать с записью от другого испытуемого (даже среди опытных), с другой, — каждый испытуемый, как в пределах одного опыта, так и при его повторениях дает весьма малые (и почти исключительно количественные) вариации формы кривой, за исключением части неопытных, давших совершенно беспорядочные записи. Что касается вообще работы неопытных, то метод обнаружил характерные биомеханические отличия ее: недостаточное пользование «мышечным диапазоном», малую стереотипность и отклонения от трехволновой схемы. При помощи этого метода выявлена в виде закономерной (для опытных) схемы некоторая интегральная кривая, большую часть которой можно считать чистым выражением сокращений отдельных групп мышц плеча; индивидуальные отклонения от нее получаются как бы подстановкой соответственных коэффициентов. Участие той или иной группы мышц в движении устанавливается при помощи этого метода не дедуктивно, а непосредственно экспериментом. Вариации внешних факторов, поскольку они влияют на мышечную конструкцию движения, находят в миограмме постоянное и определенное выражение, получаемое также непосредственно из экспериментов. Каждая разновидность удара сопровождается типичной записью, логично соответствующей биомеханическим условиям выполнения этой разновидности. Все изложенные выводы и оценки могут быть сделаны непосредственно при производстве эксперимента. Наконец, пользование методом крайне несложно.

Перечисленные возможности метода, полагаю, с лихвой окупают его неудобства и неточности, которые, собственно говоря, и не столь велики и пока, до уточнения, несколько понижают ценность миограмм, лишь как материала для лабораторно-точного анализа, а не как эмпирического сравнительного документа. В этом последнем отношении метод дает весьма содержательный материал. Во всяком случае, он является пока

<sup>1</sup>) Есть основания предполагать (что и проверяется экспериментально), что эти перегибы происходят вследствие разновременного включения, resp. выключения синергистов - сгибателей ( *m. biceps* и *m. brachialis int.*).

<sup>2</sup>) Графики, полученные промером циклограмм, см. в статье д-ра Бернштейн (о. с.).

единственным методом непосредственной регистрации мышечных напряжений вообще и в частности при трудовых движениях.

В заключение несколько общих соображений в связи с изложенным методом и представленными материалами.

Действительно рациональное движение должно быть не только необходимым и достаточным, но и естественным. Первые два условия—характера преимущественно механического, третье—биологического. Этим условием не интересовался Taylor, нередко забывал о нем и Gilbreth и определенно игнорируют его в большинстве случаев «джильбретисты». В тех случаях, когда игнорирование является не предумышленным, оправданием его может служить тот факт, что, кроме твердо установленных данных об анатомических пределах движений в суставах, не вполне установленных данных о значении расположения мышечных тяг, фактического и физиологического поперечника мышц и весьма скудных сведений об изменении их деятельности в зависимости от того или иного положения соответственных суставов,—(причем все перечисленное носит характер преимущественно дедуктивно—вычисленный, а не доказанный экспериментально)—анатомио-физиология органов движения (биомеханика) не дает никаких критериев естественности исследуемого движения. Пользуясь данными синдесмологии, можно очистить движение от вредностей по отношению к суставам, но, напр., увеличение трения в них при пользовании предельными положениями—лишь одно из мест косвенных трат энергии (в данном случае едва ли больших). Сокращение же прямых затрат путем экономной мышечной конструкции движения редко оказывается возможным без непосредственного аналитического эксперимента<sup>1)</sup>. Есть косвенный физиологический метод: учет прибыли и убыли определенных веществ в организме при том или ином способе работы и вообще учет колебаний физиологических функций; эти методы не исключаются, —наоборот, они необходимы для оценки продолжительной работы при помощи синтезированного движения, но самый синтез должен производиться по определенным линиям, получаемым лишь при помощи экспериментальных биомеханических методов, в частности, — авторегистрации мышечной деятельности. (Попытка инструкции такого рода дана мною для иного типа движений, чем описанный здесь—для нажимных движений (пиление, опилка, строгание, сверление)<sup>2)</sup>. Движения же ударные обладают некоторыми особенностями, не допускающими требуемого синтезом производного вариирования деталей мышечной конструкции.

Практический бытовой навык в полуавтоматических движениях, к каковым и относятся ударные движения, вырабатывает единообразие типа их в отношении последовательности, времени включения и выключения и силы сокращения работающих мышц; индивидуальные вариации типа колеблются, как мы видели, в узких пределах<sup>3)</sup>. Краткость (0,8 сек.) и значительная доля автоматичности устраняют допущение «наука» в перечисленных элементах движения, которые по этим же

<sup>1)</sup> Надо еще оговорить, что обычные методы исследования состояния физиологических функций до и после работы не дают безусловного права делать выводы о физиологическом статусе во время работы.

<sup>2)</sup> А. Бружес. Биомеханические комментарии к нажимным операциям (Готовятся к изданию ЦИТ'ом).

<sup>3)</sup> Есть основания предполагать, что эти вариации определяются нечем иным, как антропометрическими данными.

причинам даются только навыком <sup>1)</sup>. Если один лишь навык приводит совершенно различных людей к одному типу мышечной характеристики движения, то из этого следует, что данная характеристика подчинена строгой закономерности, вытекающей из анатомо-физиологической (биомеханической) конструкции работающего органа. В таком компактном целеустремительном акте, повидимому, невозможно внутреннее варьирование, — возможно лишь устранение засорений и наслоений, органически не связанных с основным актом. Здесь анализ необходим уже не столько для последующего синтеза, сколько для установления определенной закономерности движения, с тем, чтобы, найдя ее, прививать закономерные и очищенные движения, прокладывая определенными педагогическими приемами, рассчитанными на деятельность мышечной памяти, пути к скорейшей автоматизации этих — рациональных — движений. Закономерность же мышечной деятельности может быть вскрыта только при содействии непосредственного эксперимента.

Изложенные опыты имели косвенной целью доказать, что предлагаемый метод обнаруживает эту закономерность и дает критерий для оценки степени выработанности движения. Изложение и обоснование законов, управляющих мышечной деятельностью в трудовом движении, составит предмет обстоятельного сообщения о текущих работах лаборатории.



---

<sup>1)</sup> Это относится к обычным приемам бытового обучения и школьного преподавания ремесел; весьма вероятно, что приемы, выработанные в Педагогической лаборатории ЦИТ'а, дадут возможность научать даже синтезированным кратким движениям.

# Прибор для непосредственной записи колебаний центра тяжести живой машины.

(Предварительное сообщение).

А. П. Бружес.

Заведующий биомеханической Лабораторией ЦИТ'а.

Перемещения частных центров тяжести непосредственно работающих частей живой машины, компенсационные перемещения центров тяжести других ее частей являются, несомненно, весьма существенным пунктом затрат мышечной работы, а вызываемые частным перемещениями колебания общего центра тяжести всей живой машины, очевидно, показательны в отношении этой работы.

К определению этих колебаний можно подойти двумя путями. Либо старательно улавливая все перемещения отдельных частей живой машины и строя затем график колебаний общего центра тяжести по равнодействующим этих перемещений, либо воспринимая эти колебания непосредственно в более или менее суммарном виде. Первый путь наметил Магеу и развил Fischer. Позволю себе вкратце указать на неудобства этого пути. Основа уловления частных перемещений—фото-документация, в наиболее совершенном виде, методом циклограмм. Точность результата, очевидно, зависит от того, все ли мыслимые частные перемещения уловлены, что, в результате, принудило Fischer'a прибегнуть к облегчению испытуемого в густую сеть Гейслеровых трубок—положение, совершенно недопустимое при наблюдении трудового движения. Все же и при этом условии нет гарантии того, что уловлена вся компенсационная работа. Кроме того, построение графика по отвлеченным данным тоже не дает уверенности в соответствии этого графика действительным колебаниям.

Другой путь дан тем же Магеу'ем. Это—его метод графической регистрации, примененный им, среди множества объектов, также и к колебаниям центра тяжести и некоторым производным явлениям, но, к сожалению, весьма мало разработанный в этом направлении. При помощи пневматической передачи Магеу регистрировал колебания грузиков, расположенных на уровне центра тяжести двигающегося человека таким



образом, что один мог колебаться лишь в сагиттальной плоскости, другой—во фронтальной. Другой установкой—пневматическими каблучками—Marey регистрировал чередующееся давление ног на почву. Эти методы применялись почти исключительно к ходьбе и бегу человека. При помощи аналогичных приспособлений, построенных на принципе пневматической передачи, но перенесенных с человека на почву, Amag спроектировал троттуар, расположенный на целой системе рычагов, раздельно воспринимающих и передающих на раздельные регистраторы: вертикальное давление ноги (отдельно правой и левой), толчок, направленный назад, и ряд других элементов ходьбы и бега.

Неудобство этих установок заключается в том, что они либо регистрируют неполную функцию (давление пятки вместо давления всей ноги), либо ограничиваются регистрацией избранных направлений (показания грузиков Marey'a дают значительные ошибки при колебаниях центра тяжести в плоскостях под углом к фронтальной), либо слишком дифференцированы в отношении показаний (троттуар Amag'a), вследствие чего представление о реальном перемещении центра тяжести становится ясным только после суммирующих расчетов.

Приняв во внимание все неудобства изложенных методов, я попытался сконструировать аппарат, который непосредственно регистрировал бы проекцию центра тяжести работающего человека в любом направлении (исключая вертикального, не имеющего значения при ручных операциях, преимущественно исследуемых в настоящее время ЦИТ'ом).

Аппарат состоит из двух частей—воспринимающей и регистрирующей.

## А. Воспринимающая часть.

**Принцип.** Сокращение объема воздуха в капсулах с эластичными стенками при повышении нагрузки на них.

**Конструкция.** (Рис. 1 внизу слева.) Квадратная деревянная площадка (h) со стороной=70 см. лежит на трех резиновых прямоугольных призмах (i), имеющих высоту 2,25 см. и сторону 6,0 см. и расположенных по вершинам равностороннего треугольника; призмы имеют внутри себя цилиндрическую полость с радиусом 1,0 см. и высотой 2,0 см. полость двух призм сообщается резиновыми трубками с регистрирующей частью аппарата, полость третьей—с наружным воздухом. Испытуемый, став на площадку, оказывает некоторое исходное давление на все три капсулы; перемещения его центра тяжести в горизонтальном положении в любом направлении вызывает вытеснение воздуха из той или другой или третьей полости в некотором соотношении, постоянном для данного направления и данной длины этого перемещения. Предварительные расчеты обосновали, а эксперименты подтвердили, что для правильного воспроизведения перемещений центра тяжести необходимо и достаточно регистрации изменений объема воздуха в любой паре из трех полостей: показания третьей дают алгебраическую сумму показаний двух остальных с обратным знаком.

## В. Регистрирующая часть.

**Принцип.** Перемещения пучка света при прохождении через подвижные перекрещивающиеся щели („световой пантограф“).

**Конструкция.** (Рис. 1 наверху). Свет от полуваттной лампы в 200 свечей (а), пройдя через конденсатор (b), диафрагму (с), перекрещивающиеся щели (d,d) и объектив фотокамеры (f), воспринимается светочувствительной пластинкой (f). Часть d—d, изображенная отдельно справа внизу, состоит из двух капсул Мареу'я, сообщающихся с полостями воспринимающих призм (i,i) и расположенных таким образом, чтобы угол между рычажками составлял  $60^\circ$ ; каждый рычажок заканчивается зачерненным покровным стеклом с щелью, приспособленной по продолжению рычажка. Изменения объема воздуха в полостях (i,i) производят отклонения ры-

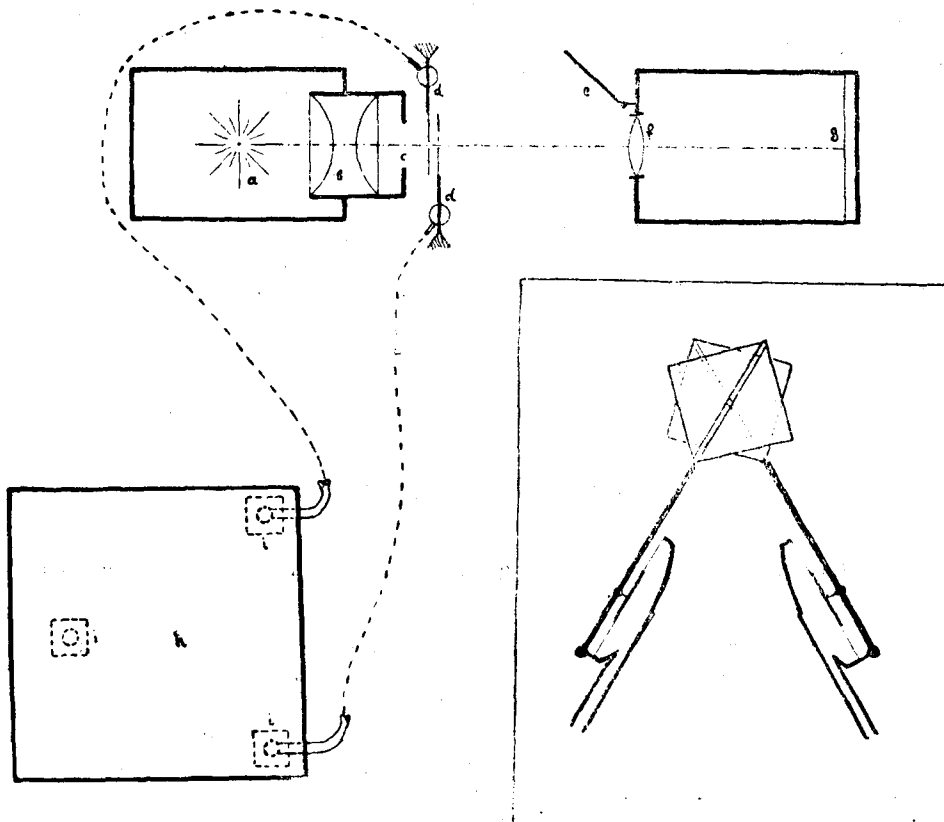


Рис. 1.

чажков, а следовательно, и перемещения перекреста щелей. При исходном угле между щелями в  $60^\circ$ , вытекающем из расположения воспринимающих призм по сторонам равностороннего треугольника, перемещения перекреста щелей будут повторять в уменьшенном масштабе перемещения нагрузки на площадке h. След движения светового пучка на светочувствительном слое является при этом проекцией перемещений центра тяжести человека, стоящего на площадке h. Затвор дает возмож-

ность выхватывать отдельный шпел движения. Рис. 2 изображает часть регистрирующей установки: капсулы Магеу'я с перекрещивающимися щелями, диафрагму (расположенную на этом снимке между щелями и

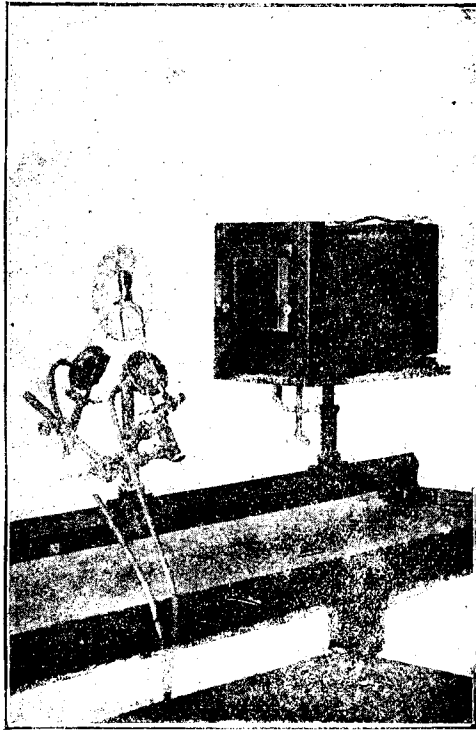


Рис. 2.

фотокамерой) и фотокамеру. Рис. 3—запись перемещений центра тяжести при плавном круговом движении наклоненным корпусом. Рис. 4—запись перемещений центра тяжести при работе молотком (рубке зубилом).

Описанный аппарат представляет собой первоначальное, пробное осуществление принципов конструкции, а записи—первые, ориентировочные документы. Дальнейшее усовершенствование (если признать принципы заслуживающими внимания) должно прежде всего устранить возможность непропорциональности записи, если таковая имеется. Мыслимы следующие источники непропорциональности: 1) все резиновые части, 2) рычажки на капсулах Магеу'я и 3) фотокамера. В описанной конструкции призмы испытывают нагрузку  $10 \text{ kg. на } 1 \text{ см}^2$ , в каковых пределах сжатие резины пропорционально давлению; передача от воспринимающей части к регистрирующей идет по металлическим трубкам с толстостенными резиновыми соединениями; колебания мембраны на капсуле Магеу'я, по целому ряду исследований, можно считать достаточно пропорциональными давлению. Существенный недостаток капсул Магеу'я, движение рычажка по дуге, во-первых, может быть легко учтено, во-вторых, в случае надобности, достаточно компенсировано шар-

вирным изломом рычажка под некоторым углом, (как это сделано в сфигмонометре Ускова) и, в третьих, является небольшим источником ошибок при той амплитуде колебаний, которая использована в описанном приборе. Наконец, непропорциональные отклонения пучка в преломля-

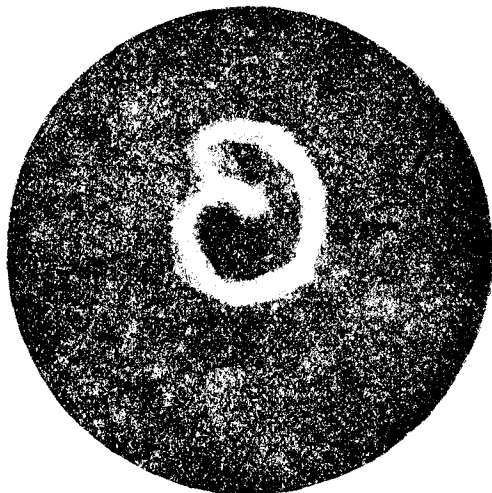


Рис. 3.

ющих средах достаточно компенсированы в современных объективах. Все эти соображения в достаточной мере гарантируют пропорциональность записи, что подтвердилось градуировкой прибора.

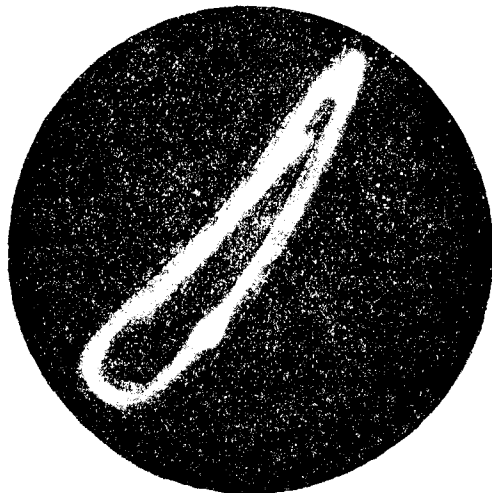


Рис. 4.

Итак, преимущество прибора перед регистрационными конструкциями Магеу'я в том, что он непосредственно дает действительные диа-

граммы перемещений центра тяжести, будучи притом весьма простым по конструкции и нисколько не стесняющим испытуемого.

Эти диаграммы сами по себе представляют уже ценность, напр., для контроля выработанности, стереотипности движения или как критерий выгоды той или иной конструкции движения. Каким же образом можно использовать их для определения скрытой компенсационной работы? Эта задача могла бы быть разрешена комбинацией предлагаемого мной метода с методом теоретического построения диаграммы перемещений общего центра тяжести в зависимости от перемещения одних только работающих частей в пространстве; мы можем исключить из ее площади ту, которая была зарегистрирована непосредственно; разность, очевидно, идет на работу компенсирующих приспособлений.

Описанный прибор мог бы иметь применение при изучении не только трудовых движений, но и некоторых заболеваний нервной системы, сопровождающихся расстройством координации и в этом отношении недостаточно изученных.

**Сtereo-таблицы к статье Н. Бернштейна\*).**

Таб. 1. Stereo-циклограмма рубки зубилом (Негатив № 245). Stereo-база 420 мм,

Таб. 2. Последовательные положения предплечья, кисти и молотка в течение одного цикла удара, через промежутки времени в  $\frac{1}{30}$  сек. Вид справа, (Негатив № 245),

Таб. 3. Последовательные положения кисти и молотка через промежутки времени в  $\frac{1}{24}$  сек. Вид сзади, (Негатив № 208[9]).

Таб. 4. Траектории движения при рубке, вид сзади. Справа налево: 1) траектория пястно-фалангового сустава, 2) лучезапястного сустава, 3) центра тяжести молотка, (Негатив № 208[9]),

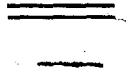
Таб. 5. Траектории того же движения, вид сверху, (Негатив № 208[9]).

Таб. 6. Траектория центра тяжести молотка, как сумма трех эллиптических колебаний по Fouquier. (Негатив № 208[9]),

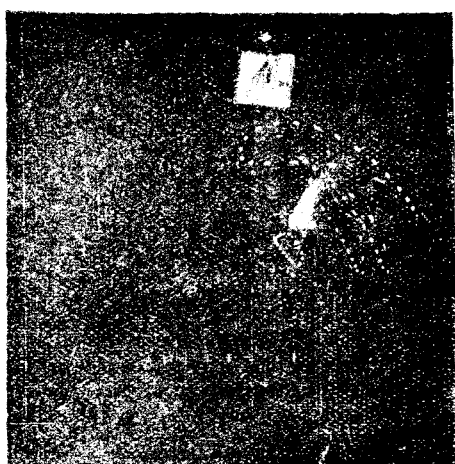
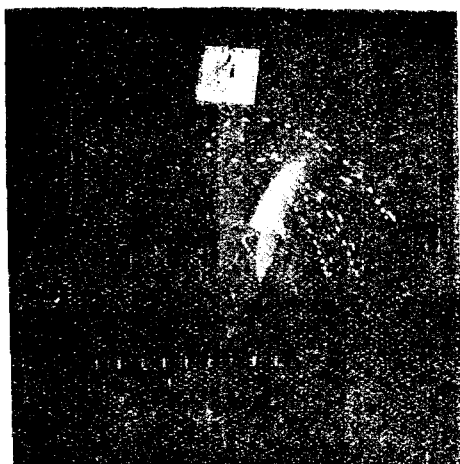
Таб. 7. Траектории суставов, ограничивающих кисть, как суммы эллиптических колебаний, (Негатив № 208[9]),

Таб. 8. Относительное движение центра тяжести молотка около пястно-фалангового сустава, вид сзади, (Негатив № 208[9]).

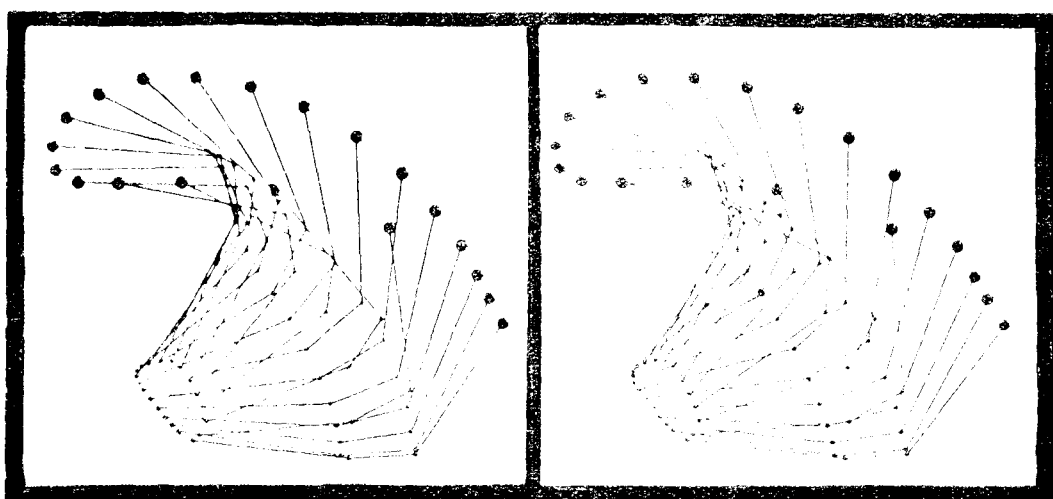
Таб. 9. Сферический эллипс движения конического маятника, расположенный подобно траектории таб. 8. ( $R=248,5\text{мм.}$ ,  $a=248,5\text{мм.}$ ,  $d=65,9\text{мм.}$ ).



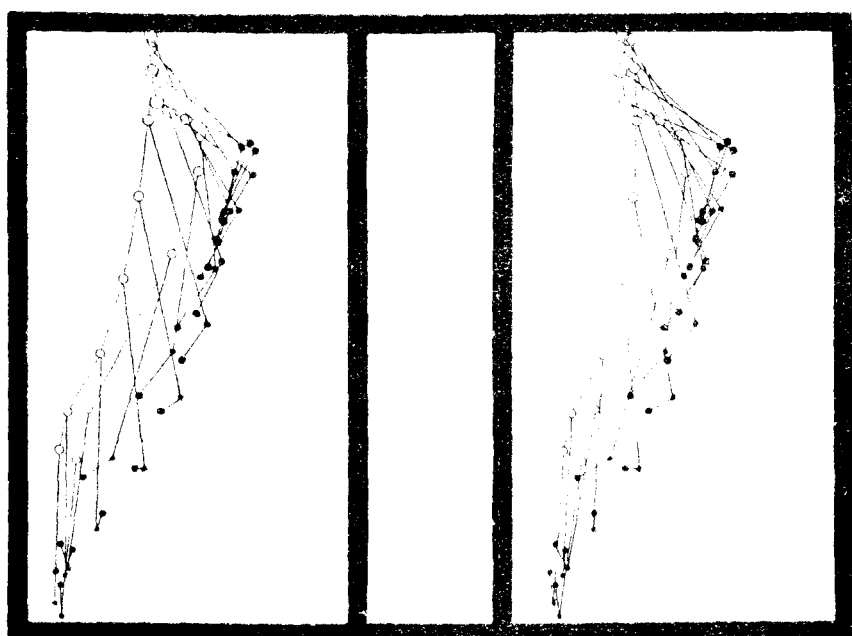
\* По недосмотру, правая половина Stereo-таблицы 9 перекошена (на 10—15° по часовой стрелке). Автор просит читателя для рассматривания в стереоскоп исправить эту оплошность, разрезав таблицу и повернув правую половинку. (Примеч. автора).



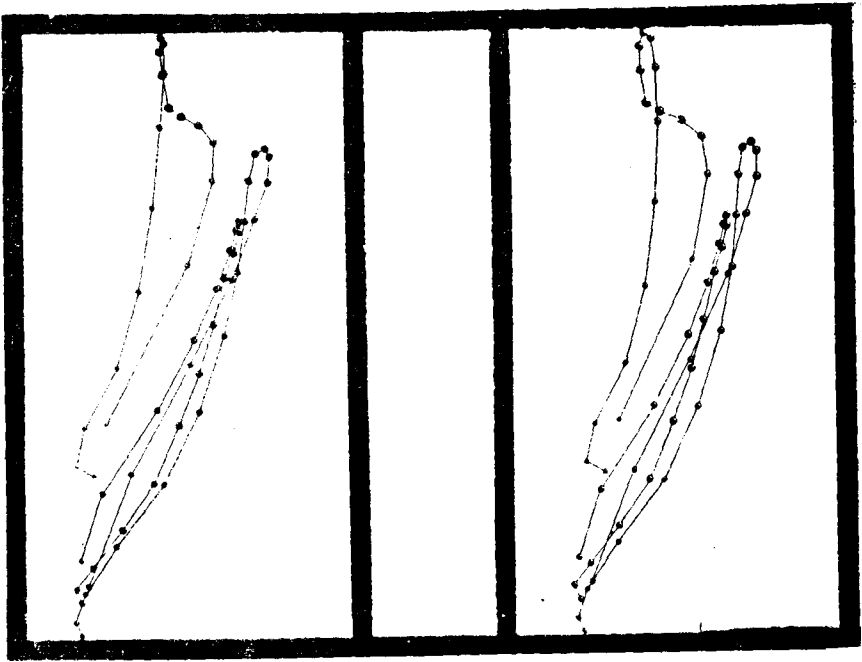
Стереотаблица 1.



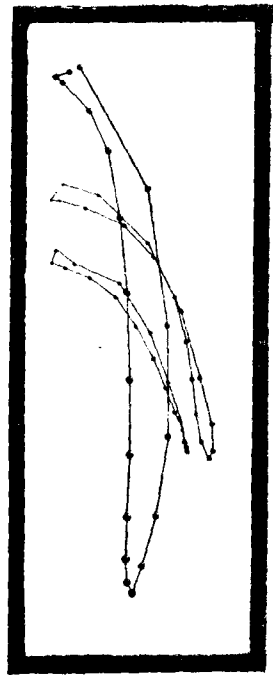
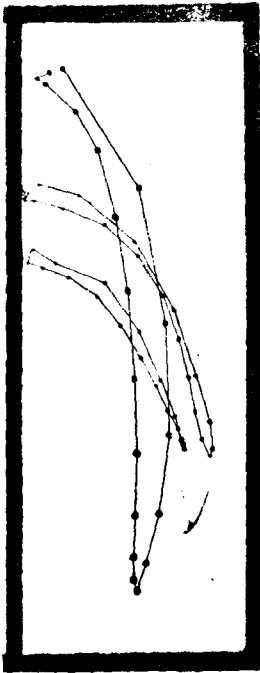
Стереотаблица 2.



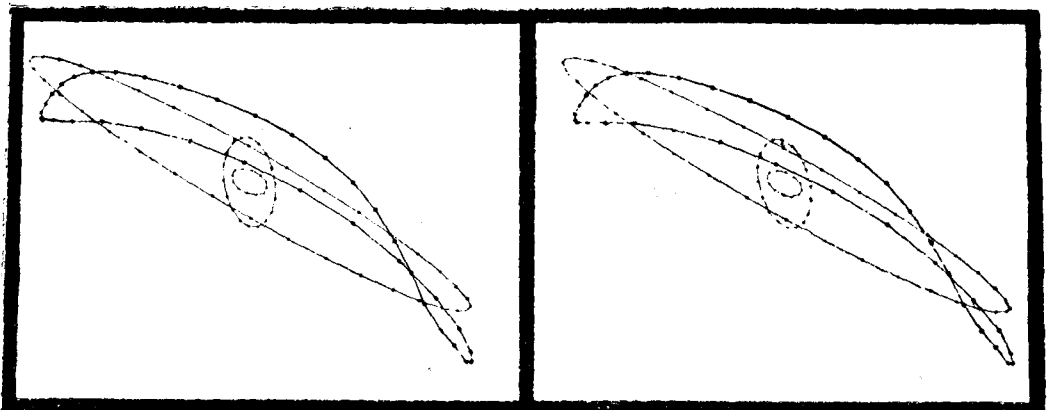
Стереотаблица 3.



Стереотаблица 4.

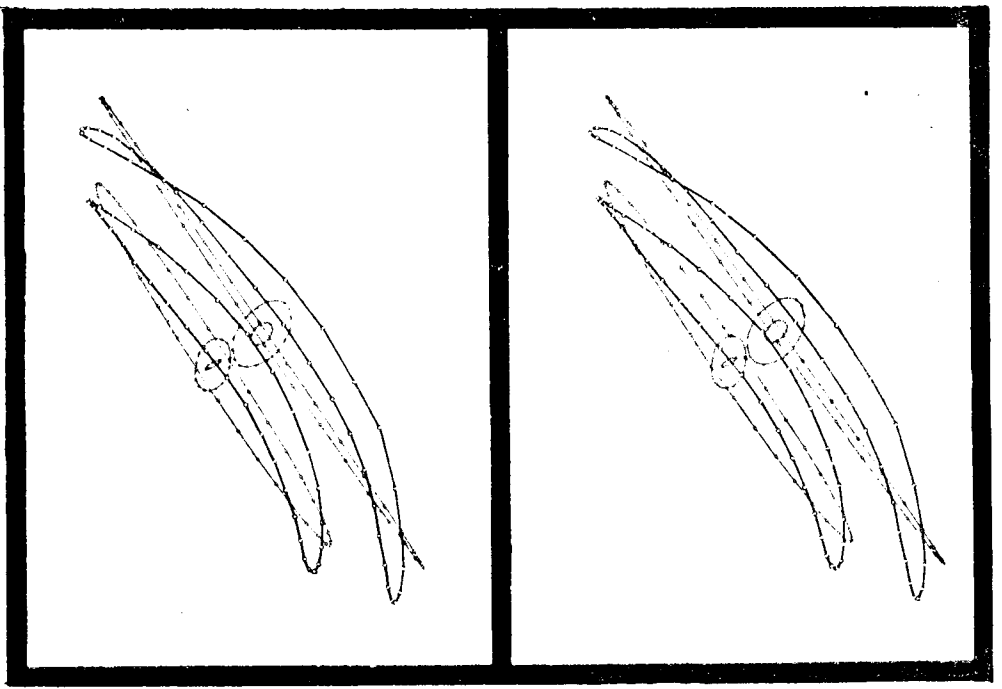


Стереотаблица 5.

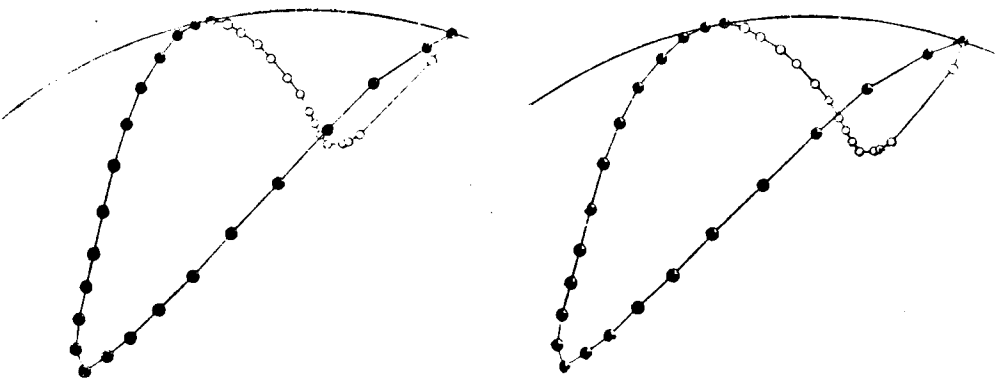


Стереотаблица 6.

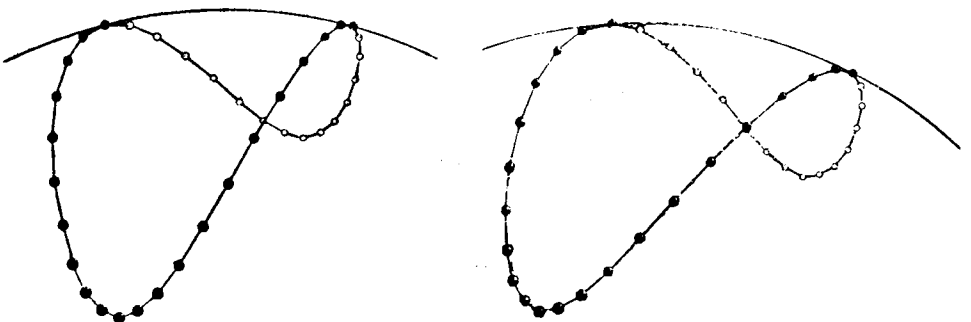




Стереотаблица 7.



Стереотаблица 8.



Стереотаблица 9.

## Оглавление.

---

От редакции . . . . .	3
<b>Н. П. Тихонов.</b> —Изучение трудовых движений при помощи циклографического метода . . . . .	6
<b>Н. А. Бернштейн.</b> —Исследования по биомеханике удара с помощью световой записи . . . . .	19
<b>А. П. Бружес.</b> —Метод экспериментального исследования мышечных напряжений при трудовых движениях. (Метод миограмм) . . . . .	80
<b>А. П. Бружес.</b> —Прибор для непосредственной записи колебаний центра тяжести живой машины . . . . .	102
<b>Вкладные приложения:</b>	
1. Кино-схема одного цикла удара молотком (в 2 краски)	
2. 9 стерео-таблиц к статье <b>Н. А. Бернштейна</b> (на 3 листах).	

---

# ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ТРУДА

МОСКВА, Петровка, 24, тел. 1-16-54.

Основан 16 IX 1920 г. По постановлению СТО от 24 VIII 1921 г. является центральным учреждением Республики, разрабатывающим, демонстрирующим и пропагандирующим принципы научной организации труда и объединяющим деятельность всех учреждений Республики, изучающих труд.

## План организации.

### ОТДЕЛ ИЗЫСКАНИЙ:

**КОМИТЕТ ИЗЫСКАНИЙ**—дает программы лабораторных работ и устанавливает операционную зависимость одной лаборатории от другой.  
**ИНСПЕКТОР ИЗЫСКАНИЙ**—непосредственно направляет и учитывает лабораторную работу.

**БИБЛИОТЕКА**—сосредоточивает всю русскую и мировую литературу о труде.

**ЛАБОРАТОРИИ** (в порядке операционной преемственности):

- № 1. **ФОТО—КИНО**—световые циклограммы трудовых движений.
- № 2. **ТЕХНИЧЕСКАЯ**—техничко-обработочные методы—машинные и инструментальные.
- № 3. **БИО-МЕХАНИЧЕСКАЯ**—механика мускульно-трудового жеста.
- № 4. **ФИЗИО-ТЕХНИЧЕСКАЯ**—энергетика работающего организма.
- № 5. **ПСИХОТЕХНИЧЕСКАЯ**—психология работающего человека.
- № 6. **ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ**—разработка трудовых тренировок.
- № 7. **СОЦИАЛЬНО-ИНЖЕНЕРНАЯ**—социальная механика, управление, организация.

### УЧЕБНЫЙ ОТДЕЛ:

1. Курсы промышленных администраторов (табельщики, контролеры, секретари, заведующие бюро, директора).
2. Курсы инструкторов производства (мастера предприятий, обладающие научным методом обучения трудовым процессам).
3. Курсы промышленных бухгалтеров.

### МУЗЕЙ—

сосредоточивает экспонаты ЦИТ'а, даваемые лабораторной работой.

### ОПЫТНЫЕ СТАНЦИИ—

организованы ЦИТ при ряде московских предприятий и учреждений.

### ПРЕСС-БЮРО ЦИТ—

снабжает систематическими еженедельными обзорами по НОТ газеты: «Правду», «Труд», «Рабочую Москву», «Рабочую Газету», «Коммунист» (Харьков), и неперiodическими обзорами провинциальную прессу.

### Книгоиздательство ЦИТ—

издает оригинальную и переводную литературу по НОТ.

### КНИЖНЫЙ СКЛАД ЦИТ—

сосредоточивает всю, издающуюся в России, литературу по НОТ, снабжает библиотеками и вновь выходящей литературой по НОТ.

Посещения ЦИТ'а для осмотра производятся организованными группами и коллективами с предварительным уведомлением администрации Ц. И. Т.

КНИГОИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЦЕНТРАЛЬНОГО ИНСТИТУТА ТРУДА

МОСКВА, Петровка, 24.

ВЫШЛИ В СВЕТ

в 1921, 1922 и 1923 годах следующие издания ЦИТ:

	ЦЕНА ЗОЛОТ.
	г. к.
«Организация Труда» (орган ЦИТ)	
Книга 1, 1921 г. (разошлась)	
Книга 2, 1921 г. . . . .	— 25
Книга 3, 1922 г. . . . .	— 25
А. К. Гастев.	Как надо работать 1922 г. — 12
К. Х. Кенчев.	Психотехника и выбор профессии (разошлась). . . — —
	Живая машина. 1922. . . — 10
Отто Липманн.	Опросный лист для характеристики профессии. Пер. с немецкого. 1921. . . . . — 05
Иоганн Ридель.	Основы организации труда в производстве, в частности, в технике путей сообщения. Пер. с немецкого 1922. . . — 25
А. Гамильтон Черч.	«Учет.» Правильное распределение издержек производства. Пер. с англ. 1923. . . . . — 55
„Исследования ЦИТ“	—1, 1. Изучение движений. С многими иллюстрациями и диаграммами 1923. . . . . 1—50

ПЕЧАТАЮТСЯ и ГОТОВЯТСЯ к ПЕЧАТИ.

Друри.	Научное управление. Его история и критика его основ.
Кент.	Почему фабрика работает в убыток?
Меде.	Психология групповой работы.
Неппель.	Методы повышения производительности предприятий.
Файоль.	Общее и промышленное управление.
Флери.	Интенсивное промышленное производство.
Фонтэнь.	Профессиональная ориентация.

Требования направлять по адресу:  
Москва, Петровка 24, Центральный Институт Труда.  
Книгоиздательству ЦИТ.

# КНИЖНЫЙ СКЛАД Центрального Института Труда.

Москва, Петровка 24.

Специальность склада—литература по научной организации труда и производства, выходящая в России. Принимаются меры к получению литературы Запада и Америки.

По заказам, склад высылает полные библиотеки литературы по Н. О. Т., имеющейся в продаже в Москве. В библиотеку входит около 80 названий, стоимость библиотеки около 30 руб. золотом.

Для рабочих библиотек и читален подбираются меньшие, доступные для читателей, библиотечки.

Заказы следует направлять, пересылая соответствующую сумму денег, в книжный склад ЦИТ, Москва, Петровка 24.

Склад принимает также авансы (в червонцах), за счет которых высылаются заказчикам вновь выходящие книги по НОТ,—до исчерпания аванса.

## Отдел Нормализации НКРКИ.

Москва, Ильинка, 21, IV подъезд, комната 59.

— Вышел в свет № 4-ый (№ 11923 г.) —

==== ЖУРНАЛА ====

### „ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ“

со статьями, посвященными разбору делопроизводственных систем и вопросам общей структуры учреждений.

Выписывать можно через ОН НКРКИ или через Книжный склад ЦИТ— Москва, Петровка 24.

==== Принимается подписка ====

НА ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ОРГАН

ОРЛОВСКОГО ПЕДОЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

### „ПЕДОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ“,

посвященный вопросам изучения ребенка.

В журнале будут помещаться научно-популярные статьи и заметки о развитии детей и методах изучения ребенка, о воспитании и обучении детей, о педологических учреждениях и съездах в России и за границей, о новостях педологическ. литературы; объявления.

==== ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: ====

на 6 мес. (март—август, 4 книжки) 2 р. 50 к. зол. по курсу Госбанка  
на 3 мес. (март—май, 2 книжки) 1 р. 50 к., цена отдельных №№ 75 к.  
Плата за страницу объявлений 50 р. Строка непарели 10 к.

Подписная плата и плата за объявления принимаются по курсу дня почтового штемпеля.

Деньги, рукописи, переписку и пр. пересылать по адресу: Орел, Отделение Госиздата (Гостинная, 2), редакции „ПЕДОЛОГИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА“.

Редактор В. Н. Басов.

Издатель Орлов. Отдел. Госиздата.