

# О примѣненіи теоріи диссоціаціи растворовъ электролитовъ Арреніуса къ электрофизиологіи.

В. Чаговца.

## Теорія диссоціаціи Арреніуса.

Прошло какъ разъ 150 лѣтъ съ тѣхъ поръ, какъ впервые была высказана мысль, что источникъ нервной силы есть электричество (Гаузенъ, 1743). Столь много шуму надѣлавшія въ прошломъ столѣтіи заявленія Месмера, которыя тоже объясняли, какъ особое проявленіе электрическихъ и магнитныхъ силъ, еще болѣе укрѣпили вѣру, если не въ тождественность, то, по крайней мѣрѣ, въ близкое родство дѣйствующаго въ нервѣ начала съ электричествомъ. Но, кромѣ отвлеченныхъ соображеній, никакихъ прямыхъ доказательствъ въ подкрѣпленіе этихъ взглядовъ въ наукѣ не было. Только черезъ полстолѣтія послѣ Гаузена Гальвани сдѣлалъ свое знаменитое открытіе, что мышцы отпрепарованной лягушечьей лапки сокращаются, если сдѣланный нервъ и нижнюю часть ея соединить металлической проводящей дугой. Гальвани, какъ извѣстно, приписалъ это явленіе присутствію электрическихъ силъ, вырабатываемыхъ въ себѣ самой живой тканью. Но вскорѣ противъ такого возрѣнія возсталъ Вольтъ, который полагалъ въ этомъ случаѣ источникъ электричества не въ самыхъ тканяхъ лягушки, а на мѣстѣ соприкосновенія металла проводящей дуги съ жидкостью живой ткани. Здѣсь - то было

положено начало тому нескончаемому спору, который тянется уже цѣлое столѣтіе и до нашихъ дней не получилъ еще окончательнаго рѣшенія, и который можно формулировать такъ: обладаетъ ли живая протоплазма самостоятельными источниками электродвигательной силы, или электрическія явленія, наблюдаемыя въ живыхъ тканяхъ, представляютъ только вторичные результаты тѣхъ химическихъ или физическихъ условий, которыя представляетъ въ данную минуту эта ткань, и никакой прямой связи съ функціональной дѣятельностью ея не имѣютъ? Этотъ вопросъ громаднаго теоретическаго и практическаго интереса, несмотря на массу трудовъ многихъ выдающихся ученыхъ, не получилъ еще удовлетворительнаго отвѣта. Профессоръ Бидерманъ въ появившемся въ прошломъ году своемъ обширномъ трудѣ по электрофизиологии выражается по этому поводу такъ: „Къ сожалѣнію, нужно сознаться, что, несмотря на многочисленныя работы и открытія въ этой такъ много и тщательно разработанной области, существуетъ поразительное противорѣчіе между всей суммой знаній и результатами отдѣльныхъ опытовъ и почти полное невѣдѣніе объ ихъ значеніи для функціи подлежащихъ тканей“ (W. Biedermann. *Elektrophysiologie*. I. Abtheil. S. 273. Jena 1895).

Такое положеніе дѣла объясняется въ значительной степени тѣмъ обстоятельствомъ, что до послѣдняго времени химическая сторона теоріи гальваническаго тока совсѣмъ не была разработана. Физическая сторона ученія о гальваническомъ токъ, а именно—разнообразная, часто весьма сложная зависимость между различными компонентами, входящими въ понятіе электрическаго тока, какъ-то: электро-возбудительной силой, сопротивленіемъ, силою или густотою тока, работой и т. п., была установлена уже давно, но химическая, молекулярная сторона совершающагося здѣсь процесса оставалась совершенно темной.

Только въ самое послѣднее время былъ найденъ ключъ къ разгадкѣ детальной стороны всего процесса. Этимъ открытіемъ мы обязаны С. Аррениусу, который въ 1887 году пред-

ложилъ свою т. наз. теорію диссоціаціи растворовъ электролитовъ. И въ теченіе сравнительно короткаго промежутка времени, которое прошло съ тѣхъ поръ, на почвѣ этой теоріи создавалась цѣлая наука—электрохимія, которая не только вполне уясняетъ качественную сторону явленій этого рода, но и количественную, т. е. даетъ возможность вычислить чисто теоретически любую изъ величинъ, входящихъ въ понятіе гальваническаго тока.

Такъ какъ, благодаря работамъ Аррениуса, наука обогатилась цѣлымъ рядомъ совершенно новыхъ данныхъ о причинахъ, обуславливающихъ появленіе гальваническаго тока, то слѣдуетъ ожидать, что примѣненіе новой электрохимической теоріи къ электрофизиологіи позволитъ уяснить весьма много вопросовъ, которые до сихъ поръ разрабатывались только на чисто эмпирической почвѣ, часто даже безъ всякой попытки привести въ систему полученные результаты.

Въ настоящей работѣ я пытался примѣнить теорію диссоціаціи Аррениуса къ объясненію главнѣйшихъ явленій мышечнаго и нервнаго тока. Полученныя совпаденія предвычисленныхъ результатовъ съ данными непосредственныхъ измѣреній, повидимому, можно считать вполне удовлетворительными, тѣмъ болѣе, что до сихъ поръ никто изъ физиологовъ даже не пытался примѣнить математическія формулы къ изученію электрическихъ явленій на живыхъ тканяхъ.

Такъ какъ нѣкоторыя изъ относящихся сюда формулъ, напр., для вычисленія электродвигательной силы, которыя собственно и важны для насъ, окончательно установлены не болѣе двухъ лѣтъ тому назадъ, то онѣ не получили еще примѣненія не только въ физиологію, но даже въ физикѣ. Поэтому намъ придется разсмотрѣть вкратцѣ важнѣйшіе выводы этой теоріи, прежде чѣмъ трактовать о ея значеніи для электрофизиологіи. При своемъ изложеніи я руководствовался главнымъ образомъ недавно появившейся книгой Ле-Блана (M. Le-Blanc. *Lehrbuch der Electrochemie*. Leipzig. 1896).

Цѣлымъ рядомъ остроумныхъ соображеній и опытовъ Арреніусу удалось доказать, что всѣ вещества, растворяющіяся въ водѣ, вообще можно раздѣлить на двѣ группы: 1) вещества (сахаръ, мочеви́на и др.), которыя, будучи растворены въ водѣ, сохраняютъ цѣлость своего молекулярнаго состава,—эти вещества совсѣмъ не проводятъ электрическаго тока и изъ нихъ никогда нельзя составить даже слабого гальваническаго элемента; 2) вещества (всѣ соли, кислоты и проч.), малекулы которыхъ въ водномъ растворѣ отчасти распадаются на свои составныя части, напр., сѣрная кислота ( $SO_4H_2$ ) распадается на водородъ и группу  $SO_4$ , хлористый натръ ( $NaCl$ ) распадается на  $Na$  и  $Cl$  и т. д. Вещества послѣдней категоріи всѣ суть электролиты и хорошо проводятъ гальваническій токъ. Распаденіе совершается всегда такимъ образомъ, что соль распадается на металлъ и кислотный радикаль, т. е. на такъ наз. іоны.

При этомъ, какъ извѣстно, металлы и водороды всегда заряжаются положительнымъ электричествомъ, а кислотный радикаль отрицательнымъ. Не всѣ молекулы растворенной соли распадаются на іоны; вообще, чѣмъ болѣе концентрированъ растворъ, тѣмъ меньшій процентъ находящейся въ немъ соли распался на іоны. И только въ болѣе разведенныхъ растворахъ, напр.,  $\frac{1}{2}\%$  и ниже, можно считать всѣ или почти всѣ молекулы распавшимися; другими словами: только въ такихъ растворахъ количество іоновъ будетъ пропорціоально количеству всего раствореннаго вещества. Это важно имѣть въ виду, такъ какъ соли, растворенныя въ протоплазмѣ живыхъ тканей, находятся именно въ такихъ условіяхъ. Такимъ образомъ, слѣдуя за Арреніусомъ, мы должны предположить, что въ растворѣ всякаго электролита уже предсуществуютъ и положительные и отрицательные іоны, но, будучи распределены въ жидкости равномерно, они не могутъ проявить наружу свою электрическую дѣятельность, такъ какъ положительный и отрицательный заряды взаимно нейтрализуютъ другъ друга. Если же, вслѣдствіе какихъ-нибудь причинъ, въ данномъ мѣстѣ раствора накопится избытокъ положительныхъ или отрицательныхъ іоновъ,

то сейчас же появится электрический токъ. Съ точки зрѣнія теоріи Аррениуса очень легко и просто объясняются всѣ явленія, наблюдаемыя на обыкновенныхъ гальваническихъ элементахъ при ихъ дѣятельности.

Возьмемъ для примѣра элементъ Грене (безъ двухромкаліевой соли), то есть: цинкъ — сѣрная кислота — коксъ. Цинкъ растворяется, вслѣдствіе чего около цинковаго электрода въ жидкости накаплиются іоны  $Zn$ , заряженные положительнымъ электричествомъ, которые уносятъ съ цинковаго электрода часть находящагося на немъ положительнаго электрическаго напряженія и дѣлаютъ его такимъ образомъ отрицательнымъ. Накопившіеся положительные іоны  $Zn$  будутъ притягивать отрицательные іоны  $SO_4$  и отталкивать положительные  $H$ , которые направятся къ коксу и сдѣлаютъ его такимъ образомъ положительнымъ. Въ этомъ случаѣ коксъ играетъ роль только собирателя положительной энергіи. Но если мы замѣнимъ коксъ мѣдью (элементъ Вольта), то здѣсь условія нѣсколько измѣняются, такъ какъ мѣдь тоже переходитъ въ растворъ и будетъ дѣйствовать слѣдовательно противоположно цинку. Но такъ какъ стремленіе мѣди переходить въ растворенное состояніе (Lösungsdruck) меньше, чѣмъ цинка, то токъ пойдетъ, какъ и прежде, направляясь въ жидкости отъ цинка къ мѣди, а въ цѣпи отъ мѣди къ цинку; цинкъ, какъ и въ элементѣ Грене, будетъ отрицательнымъ электродомъ, а мѣдь — положительнымъ, но разность потенциаловъ на нихъ, т. е. электромоторная сила тока во второмъ (эл. Вольта) случаѣ будетъ почти вдвое меньше.

Для насъ собственно важно приложеніе теоріи Аррениуса къ диффузионнымъ токамъ. Если взять два неодинаковые раствора, напр.,  $HCl$ , отдѣлить ихъ посредствомъ пористой перегородки, допускающей свободную диффузію, и затѣмъ, погруживши въ тотъ и другой растворъ по платиновому электроду, соединить ихъ съ гальванометромъ, то обнаруживается токъ, который въ самомъ элементѣ идетъ по направленію диффузии, т. е. отъ болѣе концентрированнаго раствора къ менѣе концентрированному (во внѣшней цѣпи — наоборотъ). Процессъ,

происходящій при этомъ, состоитъ въ слѣдующемъ: іоны водорода, заряженные положительнымъ электричествомъ, и іоны хлора, заряженные отрицательнымъ, переходятъ изъ болѣе концентрированнаго раствора въ менѣе концентрированный. Но скорость диффузіи водорода гораздо больше, чѣмъ хлора <sup>1)</sup>; поэтому число перешедшихъ іоновъ  $H$  будетъ больше, и этотъ избытокъ положительно заряженнаго  $H$  обусловитъ поднятіе потенциала въ менѣе концентрированномъ растворѣ, и мы получимъ такимъ образомъ токъ, идущій *въ цѣпи* въ направленіи отъ этого раствора къ болѣе концентрированному.

Если бы положительные и отрицательные іоны двигались съ одинаковой скоростью, то въ единицу времени изъ болѣе концентрированнаго раствора въ менѣе концентрированный переходило бы одинаковое число положительныхъ и отрицательныхъ іоновъ, поэтому электрическій потенциалъ обоихъ растворовъ оставался бы одинаковымъ, и мы не получили бы никакого тока. Дѣйствительно, если вмѣсто соляной кислоты взять растворъ  $KCl$ , то не получится почти никакого тока, такъ какъ скорость  $K$  и  $Cl$  почти одинакова. Если же взять растворъ  $NaCl$ , то появится токъ уже въ противоположную сторону, чѣмъ при  $HCl$ , потому что скорость положительнаго  $Na$  меньше, чѣмъ отрицательнаго  $Cl$ . Въ настоящее время мы имѣемъ возможность весьма точно вычислять электровозбудительную силу такихъ диффузионныхъ токовъ.

Для того, чтобы вычислить электровозбудительную силу элемента, необходимо знать, какое количество электрической энергіи выдѣляется при дѣйствіи этого тока. Въ данномъ случаѣ *энергія освобождается вслѣдствіе измѣненія концентрации раствореннаго вещества*. Физикамъ уже давно извѣстенъ фактъ, что при расширеніи газовъ выдѣляется тепло. Это и понятно: когда мы сжимаемъ извѣстное количество газа и заставляемъ его занять меньшей объемъ, то при этомъ необхо-

<sup>1)</sup> Если скорость диффузіи водорода обозначимъ черезъ 290, то скорость калия  $K=60$ ,  $Na=40$ ,  $Cl=62$ ,  $NO_3=58$ ,  $CO_3=40$ ,  $SO_4=60$ ,  $C_2H_3O_2$  (уксус. кис.)= $31$ ,  $OH$  (гидроксилъ)= $165$ .



найти электровозбудительную силу получающагося при этомъ диффузионнаго тока. Не вдаваясь въ подробности, скажемъ, что, послѣ подстановки для  $R$  и  $T$  ихъ значеній и перехода отъ натуральныхъ логарифмовъ къ обыкновеннымъ, электромоторная сила диффузионнаго тока найдется по формулѣ:

$$\pi = \frac{u/n - v/n_1}{u + v} \cdot 0,057 \log P/P_1.$$

Здѣсь  $u$  и  $v$  обозначаютъ скорость диффузіи положительнаго и отрицательнаго іоновъ;  $n$  и  $n_1$ —ихъ атомность;  $p$  и  $p_1$ —концентрацію или осмотическія давленія диффундирующихъ растворовъ.

Если, напр., имѣемъ два раствора  $SO_4H_2$ , одинъ  $1/10$ ‰, а другой  $1/100$ ‰, то здѣсь:

$$P/P_1 = 1/10 : 1/100 = 10; u = 290, v = 60; n = 1, n_1 = 2.$$

$$\text{Слѣд. } \pi = \frac{290/1 - 60/2}{290 + 60} \cdot 0,0575 \log 10 = 0,044 \text{ вольта.}$$

### Электромоторныя явленія на мышцахъ съ точки зрѣнія теоріи диссоціаціи.

Когда Германъ доказалъ, что всякая покоящаяся ткань вовсе лишена электрическихъ токовъ, которые являются такимъ образомъ только тогда, когда вслѣдствіе дѣятельности или умирания наступаютъ извѣстныя химическія измѣненія въ живой протоплазмѣ, то это, разумѣется, должно было показаться сразу въ высшей степени парадоксальнымъ. Въ самомъ дѣлѣ, со времени открытій Дю-Буа Реймонда окончательно установилось мнѣніе, что производство электрической энергіи такъ же присуще всякой живой ткани, какъ, напр., теплопродукція. Такъ какъ и покойная мышца продолжаетъ производить тепло, то можно было ожидать, что она будетъ производить и электрическую энергію; съ другой стороны, количество тепло-



вой энергіи, выдѣляемой тканью, увеличивается пропорціонально ея дѣятельности, поэтому проще всего было бы ожидать, что всякое раздражаемое мѣсто мышцы, выдѣляя больше тепла, въ тоже время будетъ выдѣлять больше и электрической энергіи, т. е., другими словами, электрической потенціалъ его повысится, и оно такимъ образомъ будетъ относиться положительно ко всякому покойному или менѣе раздражаемому мѣсту; а между тѣмъ оказывается какъ разъ наоборотъ: раздражаемое мѣсто отрицательно по отношенію къ находящемуся въ покоѣ. Альтераціонная теорія Германа ставитъ такимъ образомъ электромоторную дѣятельность живой ткани совершенно въ сторонѣ отъ другихъ жизненныхъ функцій ея. Здѣсь-то и кроется въ сущности главная причина разногласія между теоріями Германа и Дю-Буа Реймонда. Германъ связываетъ отрицательность раздражаемаго мѣста съ наступающимъ здѣсь процессомъ умиранія (*anabiotisch alterirende Protoplasma*). Этотъ авторъ, какъ извѣстно, вообще проводитъ ту идею, что процессъ, происходящій при дѣятельности протоплазмы и связанный съ расщепленіемъ органическаго вещества, есть въ сущности фізіологическое умираніе. Легко представить, что при умираніи ткани электрической потенціалъ ея долженъ понижаться, т. е. электрической энергіи будетъ вырабатываться меньше. Но такое объясненіе удовлетворительно только при поверхностномъ взглядѣ на дѣло. Является вопрѣсъ, почему же при этомъ самомъ умираніи вслѣдствіе дѣятельности тепла выдѣляется больше, механической или химической (железы) энергіи производится больше, а электрической меньше. Электрическая дѣятельность, слѣдовательно, является исключеніемъ, прямо противоположнымъ тепловой, механической и химической функціямъ протоплазмы. Такимъ образомъ сторонники теоріи измѣненія не могли найти связи между электромоторной дѣятельностью протоплазмы и ея другими функціями, напр. теплопродукціей. Между тѣмъ, даже до появленія новой теоріи гальваническаго тока, параллель между этими двумя явленіями, обнаруживаемыми всякой живой протоплазмой, не трудно было

бы установить путемъ аналогіи съ обыкновеннымъ гальваническимъ элементомъ. Въ элементѣ, составленномъ изъ цинка—сѣрн. кис.—кокса, энергія получается на счетъ растворенія цинка въ сѣрной кислотѣ, слѣд. главная реакція происходитъ на границѣ цинка съ сѣрной кислотой, а между тѣмъ цинкъ то и будетъ служить отрицательнымъ электродомъ: теплота, получаемая при раствореніи цинка, обращается въ электрическую энергію, которая выдѣляется на противоположномъ электродѣ, гдѣ уголь служитъ только собирателемъ энергіи и является такимъ образомъ положительнымъ электродомъ. Нѣчто подобное должно происходить въ живой ткани: электрическая энергія, которая наравнѣ съ тепловой образуется на раздражаемомъ мѣстѣ, должна, подобно тому, какъ это происходитъ въ элементѣ, устремиться прочь отъ этого мѣста, слѣдствіемъ чего явится токъ, идущій въ мышцѣ отъ раздражаемаго мѣста; во внѣшней же цѣпи направленіе тока будетъ какъ разъ обратное, и электродъ, приложенный къ раздражаемому мѣсту, окажется, подобно цинку въ элементѣ, отрицательнымъ. Въ покоящейся протоплазмѣ, очевидно, напряженіе электричества вездѣ будетъ одинаково, а потому мы не должны получить никакого тока, который однако сейчасъ же появляется, какъ только, вслѣдствіе раздраженія одного мѣста, это равновѣсіе будетъ нарушено.

Таково было бы самое простое и въ то же время самое удобное объясненіе фактовъ, установленныхъ Германомъ. Это объясненіе тѣмъ болѣе заслуживаетъ вниманія, что такимъ образомъ электромоторная дѣятельность ставится на одну доску съ тепловой, химической и др. функціями живой ткани: при раздраженіи извѣстнаго участка мышцы, нерва и т. п. здѣсь тоже происходитъ усиленное развитіе электрической энергіи, но только, въ виду особыхъ условій наблюденія появляющагося при этомъ тока, это мѣсто кажется отрицательнымъ по отношенію къ недѣятельной части; точно также покойная мышца не даетъ тока не потому, что въ ней отсутствуетъ способность электрической дѣятельности, а потому, что методы наблюденія,

которыми мы располагаемъ, не даютъ возможности обнаружить ее. Цѣль настоящей работы показать, что теорія диссоціации даетъ прочную опору только—что изложенному взгляду на сущность и условія происхожденія электрическихъ токовъ, наблюдаемыхъ въ живыхъ тканяхъ. Но сверхъ того эта теорія даетъ возможность теоретически вычислять величину дѣйствующихъ здѣсь электромоторныхъ силъ и полученные такимъ образомъ числа вполне совпадаютъ съ результатами непосредственнаго измѣренія.

Въ самомъ дѣлѣ, при раздраженіи resp. дѣятельности какого-нибудь участка мышцы, здѣсь должно образоваться большое количество частицъ, заряженныхъ положительнымъ электричествомъ; вслѣдствіе отталкиванія между собою онѣ устремятся къ мѣсту, гдѣ всего менѣе такихъ частицъ, т. е. къ наименѣе раздражаемому мѣсту, и обусловятъ этимъ появленіе тока, который въ самой мышцѣ будетъ идти отъ раздражаемаго мѣста къ покойному, а въ цѣпи наоборотъ, вслѣдствіе чего наблюдателю будетъ казаться раздражаемое мѣсто отрицательнымъ,—появится входящій токъ (*einsteigende Strom*) Германа.

Явленіе будетъ, слѣдовательно, вполне аналогично концентраціонному току, идущему отъ болѣе концентрированной амальгамы къ менѣе концентрированной. Но въ живой ткани дѣло будетъ нѣсколько сложнее, такъ какъ наряду съ положительными іонами здѣсь будутъ образовываться и отрицательные.

При дѣятельности мышцы, какъ извѣстно, главнымъ продуктомъ расщепленія будетъ углекислота, затѣмъ молочная и фосфорная кислоты. Другія вещества (азотистыя), какъ напр. мочевины, для насъ не имѣютъ значенія, такъ какъ, подобно сахару, они не принадлежатъ къ электролитамъ.

Количество углекислоты, которая въ данномъ случаѣ будетъ находиться въ плазмѣ въ видѣ  $CO_2$ , несравненно больше молочной и фосфорной кислоты. Поэтому мы можемъ совершенно игнорировать присутствіе всѣхъ веществъ, появ-

ляющихся при дѣятельности мышцы, за исключеніемъ  $CO_3H_2$ , и разсматривать такимъ образомъ мышцу, дающую электрическій токъ, какъ случай жидкостной цѣпи (Flüssigkeitskette), составленной изъ неодинаково концентрированныхъ растворовъ  $CO_3H_2$ , при чемъ  $CO_3$  будетъ играть роль отрицательнаго іона, а  $H$ —положительнаго. Электромоторную силу такой цѣпи легко вычислить, если намъ извѣстны концентраціи, по формулѣ:

$$E = \frac{u/n - v/n_1}{u + v} \cdot 0,0575 \log. P/P_1. \quad \text{Здѣсь } u=290, v=40,$$

$n=1, n_1=2.$  Откуда:

$$E = \frac{290/1 - 40/2}{290 + 40} \cdot 0,0575 \log. P/P_1 = 0,047 \log. P/P_1 \text{ вольта.}$$

Но даже если бы электромоторная дѣятельность мышцы была обязана и не  $CO_3H_2$ , а молочной кислотѣ, фосфорной кислотѣ или какимъ-либо другимъ веществамъ, то формула для вычисленія  $E$  все-таки почти совсѣмъ не измѣнилась бы. Дѣло въ томъ, что скорость отрицательнаго іона  $v$ , каковъ бы ни былъ іонъ, какъ это видно изъ таблицы, будетъ мало отличаться отъ скорости іона  $CO_3$ , а такъ какъ роль положительнаго іона, очевидно, будетъ играть во всякомъ случаѣ водородъ, скорость котораго  $u$  весьма значительна въ сравненіи съ  $v$ , то понятно, что, при незначительномъ измѣненіи  $v$ , коэффициентъ  $\frac{u/n - v/n_1}{u + v}$  измѣнится очень мало.

Исходя изъ только-что изложеннаго предположенія, мы можемъ вычислить, какова должна быть электромоторная сила тока, получаемаго при отведеніи отъ двухъ мѣстъ живой мышцы, находящихся въ различныхъ степеняхъ дѣятельности. Для этого намъ нужно только знать, во сколько разъ раздраженіе, геср. обмѣнъ, въ одномъ мѣстѣ больше, чѣмъ въ другомъ. Совпаденіе предвычисленныхъ такимъ образомъ результатовъ

съ данными непосредственнаго измѣренія будетъ служить достаточнымъ доказательствомъ справедливости развиваемой точки зрѣнія.

Прежде чѣмъ приступать къ математическому анализу электрическихъ явленій на живыхъ тканяхъ, необходимо имѣть въ виду, что концентрація всѣхъ растворимыхъ въ мышцѣ веществъ, а слѣдовательно и  $CO_3H_2$ —весьма невелика; а потому электролиты должны быть вполне диссоціированы, что весьма важно, потому что, какъ это мы видѣли раньше, только въ этомъ случаѣ количество свободныхъ іоновъ  $CO_3$  и  $H$  будетъ пропорціонально всему количеству  $CO_3H_2$ .

Количество  $CO_3H_2$ , какъ только-что замѣчено, очевидно пропорціонально интенсивности раздраженія или, если такъ можно выразиться, „количеству раздраженія“, которое приходится на данное мѣсто. Слѣдовательно, вся наша задача сводится на то, чтобы найти связь между степенью раздраженія даннаго мѣста и напряженіемъ въ немъ  $CO_3H_2$ .

### Первый законъ Германа. Электромоторная сила неповрежденной покойной мышцы.

Если мышца не повреждена и находится въ покоѣ, то въ ней, разумѣется, все-таки совершается извѣстный, хотя и слабый, обмѣнъ веществъ, но, очевидно, что при этихъ условіяхъ всѣ части ея будутъ находиться въ одинаковой степени дѣятельности, слѣд. въ единицу времени будетъ вездѣ выдѣляться одинаковое количество  $CO_3H_2$ . Электрическій токъ, какъ мы видѣли, происходитъ здѣсь на счетъ энергіи, освобождающейся при переходѣ іоновъ изъ болѣе концентрированнаго состоянія въ менѣе концентрированное. Такъ какъ въ этомъ случаѣ іоны распределены равномерно, то никакого движенія ихъ не будетъ, а потому не должно появиться и тока. Въ самомъ дѣлѣ, такъ какъ осмотическое давленіе вездѣ одинаково, то  $p=p_1$ , а слѣд.

$$E = 0,047 \log. \frac{p}{p_1} = 0,047 \log. 1 = 0.$$

### Второй законъ Германа.

Только-что доказанное положеніе относительно отсутствія тока въ совершенно неповрежденной покоящейся мышцѣ можетъ быть названо первымъ закономъ Германа. Второй законъ, найденный имъ, гласитъ: при раздраженіи какого-нибудь мѣста живой ткани, оно становится отрицательнымъ по отношенію ко всякому другому нераздражаемому или менѣе раздражаемому мѣсту; слѣдовательно, при отведеніи получается входящій токъ (*einsteigende Strom*). Причина такого явленія вполне понятна. Очевидно, что въ болѣе раздражаемомъ мѣстѣ выдѣляется больше  $CO_3H_2$ ; осмотическое давленіе іоновъ  $CO_3$  и  $H$  будетъ, слѣдовательно, здѣсь больше, чѣмъ въ покойномъ или менѣе раздражаемомъ мѣстѣ. Такъ какъ скорость положительнаго іона  $H$  больше, чѣмъ отрицательнаго  $CO_3$ , то появляющійся вслѣдствіе этой разности осмотическихъ давленій жидкостный токъ (*Flüssigkeitsstrom*) будетъ, какъ мы видѣли, имѣть такое же направленіе, какъ и движущіеся іоны, т. е. въ самой мышцѣ отъ болѣе раздражаемаго (съ большимъ осмотическимъ давленіемъ) мѣста къ менѣе раздражаемому; въ цѣпи же—наоборотъ.

Разсмотримъ простѣйшій случай такого тока, когда одно отводимое мѣсто находится въ покой, а другое раздражено ad maximum. Для этого удобнѣе всего взять какой-нибудь мускулъ съ параллельнымъ направленіемъ волоконъ, напр. *m. sartorius* лягушки; мышцы, волокна которыхъ не удовлетворяютъ этому условію, какъ напр. *m. gastrocnemius*, представляютъ нѣкоторыя особенности, о которыхъ рѣчь впереди.

Если по возможности осторожно вырѣзать эту мышцу и отвести токъ отъ середины ея продольной поверхности (экватора) и отъ середины поперечнаго разрѣза, сдѣланнаго перпендикулярно къ оси мускула, то очевидно, что послѣднее мѣсто непосредственно послѣ нанесенія поперечнаго разрѣза будетъ находиться въ максимальной степени раздраженія, resp. дѣятельности, а продольную поверхность можно разсматривать,

какъ находящуюся въ покое. Чтобы имѣть возможность вычислить электровозбудительную силу появляющагося при этомъ тока, нужно только знать напряженіе  $CO_2H_2$  въ обѣихъ отводимыхъ точкахъ.

Если принять, основываясь на опытѣ Германа (L. Hermann. Untersuch. über d. Stoffwechsel d. Muskeln u. s. w. 1867. SS. 125 и 126. Опытъ 27-ой), что количество выдѣляемой  $CO_2$ , а, слѣдовательно, и образованіе  $CO_2H_2$ , при тетанусѣ мышцы въ 6,5 разъ больше, чѣмъ при покойномъ состояніи, то можно положить въ формулѣ:  $P/p_1 = 6,5$ , а потому электровозбудительная сила:  $E = 0,047 \cdot \log 6,5 = 0,047 \cdot 0,81 = 0,038 v$ .

Измѣренія (болѣе 30), произведенныя надъ sartorius'омъ дали въ среднемъ 0,043 вольта; maximum 0,050 (одинъ разъ), minimum 0,035 (два раза). Такимъ образомъ разница между теоретически вычисленной величиной и дѣйствительно найденной не превосходитъ 0,005 v., т. е. 11% всей величины. Во всякомъ случаѣ отсюда слѣдуетъ заключить, что отношеніе  $P/p_1$  въ дѣйствительности больше, чѣмъ слѣдуетъ изъ опыта Германа. Весьма вѣроятно, что раздраженіе при нанесеніи поперечнаго разрѣза дѣйствуетъ гораздо сильнѣе, чѣмъ простое тетанизированіе. О другой причинѣ, которая вліяетъ несомнѣнно на увеличеніе противъ теоріи электромоторной силы тока при отведеніи отъ экватора и центра поперечнаго разрѣза, будетъ упомянуто ниже.

Что касается до слабыхъ токовъ при отведеніи отъ точекъ естественной продольной поверхности мускула, находящихся на различныхъ разстояніяхъ отъ поперечнаго разрѣза, то они, какъ это уже показалъ Германъ, объясняются постепеннымъ ослабленіемъ раздражающаго дѣйствія поперечнаго разрѣза по направленію къ экватору. Вообще же длина остающагося отрѣзка мышцы между поперечнымъ разрѣзомъ и экваторомъ почти не вліяетъ на электровозбудительную силу тока, получающагося при отведеніи съ этихъ двухъ мѣстъ: можно сдѣлать мышцѣ одинъ за другимъ нѣсколько послѣдовательныхъ

поперечныхъ разрѣзовъ, и всякій новый будетъ давать приблизительно такую же электромоторную силу, какъ и предыдущій.

Этотъ фактъ, равно какъ и тотъ, что электромоторная сила сразу сильно падаетъ при перенесеніи электрода съ поверхности искусственнаго поперечнаго разрѣза на какую-нибудь точку естественной продольной поверхности, даже если эта точка находится у самаго края поперечнаго разрѣза, показываютъ, что максимальное раздражающее дѣйствіе поперечнаго разрѣза, resp. тетаническое состояніе мышечнаго вещества, не распространяется глубоко, и что остальная часть мышцы находится въ относительномъ покоѣ. Если же кусокъ мышцы уже слишкомъ малъ, то въ такомъ случаѣ электромоторная сила можетъ уменьшиться вѣдствие того, что раздраженіе распространится по всей мышцѣ и вызоветъ такъ наз. отрицательное колебаніе тока покоя.

Понятно, что это внезапное уменьшеніе электромоторной силы тока при общемъ раздраженіи мышцы, непосредственномъ или съ нерва, которое Дю-Буа Реймондъ назвалъ *отрицательнымъ колебаніемъ*, послѣ всего сказаннаго не представляетъ ничего труднаго для объясненія: очевидно, что при такомъ раздраженіи всѣ части мышцы приходятъ въ болѣе или менѣе равномерное раздраженіе, а слѣдовательно количество вырабатываемой  $CO_2H_2$  въ обоихъ отводимыхъ мѣстахъ сравнивается, и отношеніе  $P/P_1$  становится меньше.

(Окончаніе слѣдуетъ).