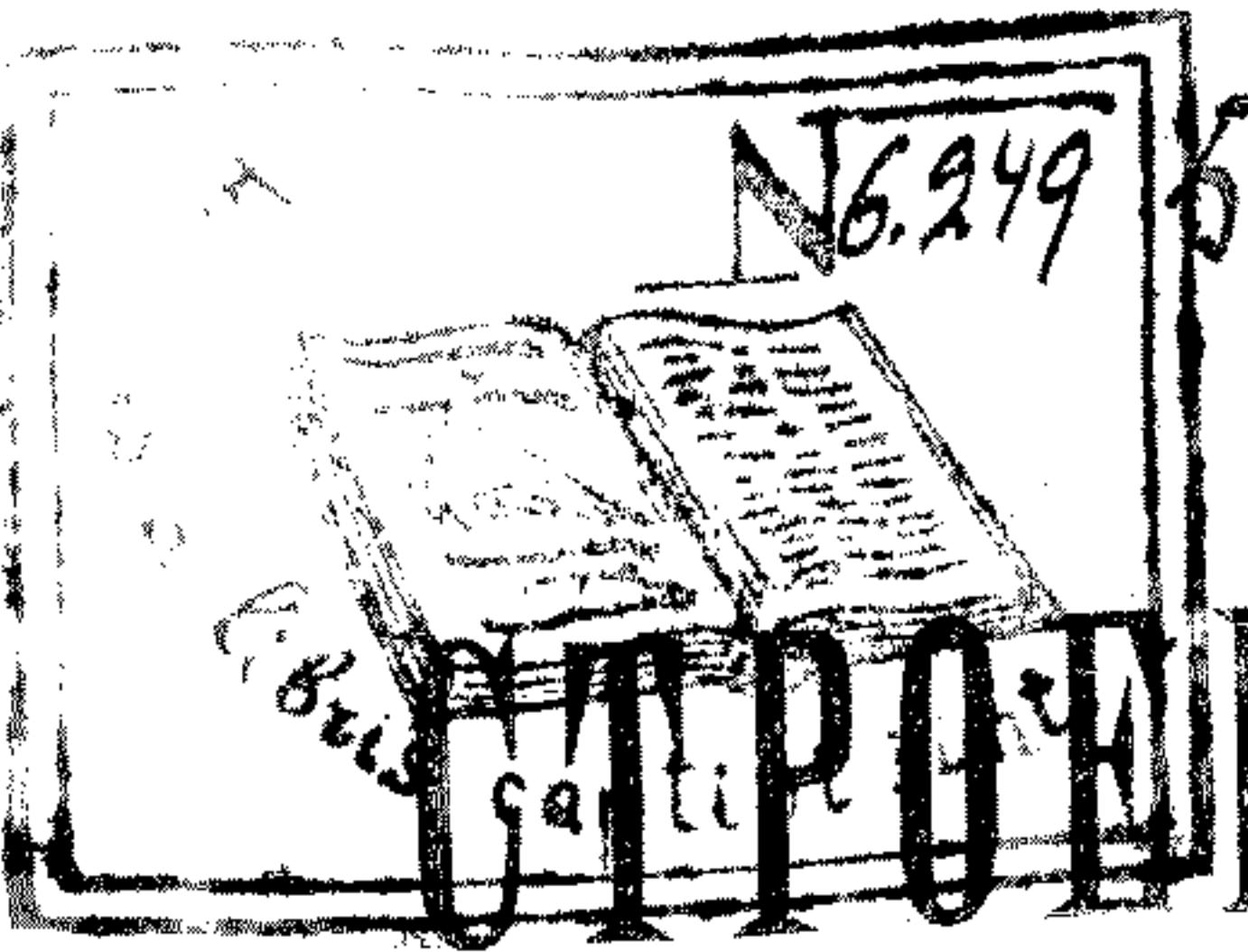


856



ПОПУЛЯРНЫЯ ЛЕКЦИИ

и

РЪЧИ

Сэра Вилльяма Томсона
(лорда Кельвина)

доктора права, члена Королевского Общества, члена Эдинбургского Королевского Общества и др., профессора натуральной философии Глазго- ского университета и члена Коллегии Св. Петра въ Кэмбридже.

ПЕРЕВОДЪ СЪ АНГЛІЙСКАГО

Б. Н. Вейнберга.

ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ

профессора Императорскаго С.-Петербургскаго университета

И. И. Боргмана.

Съ 67-ю рисунками въ текстѣ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Издание Л. Ф. Пантелеева.

1895.

ПРЕДИСЛОВИЕ КЪ ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ.

Вскорѣ послѣ того, какъ я въ январѣ 1886 года прочелъ въ Королевскомъ Институтѣ лекцію «О капиллярности», г. Локкерь далъ мнѣ мысль, что слѣдовало бы сдѣлать эту лекцію болѣе общедоступной и удобопонятной, чѣмъ она могла бы быть въ «Сообщеніяхъ Королевскаго Института» [Transactions of the Royal Institution] или на страницахъ журнала «Nature». Вслѣдствіе этого было рѣшено издать, въ видѣ одной изъ книгъ библіотеки «Nature Series», небольшой томъ, который заключалъ бы въ себѣ эту лекцію «О капиллярности» вмѣстѣ съ нѣкоторыми другими статьями, относящимися къ тому же предмету.

Но то время, какъ первые листы этой книжки были уже въ печати, мнѣ пришло въ голову что было бы хорошо переиздать въ собранномъ видѣ нѣкоторая другія лекціи и рѣчи *популярнаго характера, которыя мнѣ приходилось читать отъ времени до времени и которыя не находили себѣ надлежащаго мѣста въ моемъ «Собраніи Математическихъ и Физическихъ Работъ» [Reprint of Mathematical and Physical Papers], издававшемся въ то время типографіей кэмбриджскаго университета. Обдумавъ, я рѣшилъ измѣнить характеръ предположенной книжки «О капиллярности», увеличить ея объемъ и сдѣлать ее первымъ изъ трехъ томовъ серіи, которая составить перепечатку всѣхъ моихъ популярныхъ лекцій и рѣчей.

Порядокъ, въ которомъ расположены различныя статьи,

какъ въ этомъ томъ, такъ и въ тѣхъ, которые должны послѣдовать за нимъ основанъ, вообще говоря, на содерганиі.— Такъ въ настоящій томъ входятъ лекціи, относящіяся ко внутреннему строенію матеріи. Предметомъ второго тома будутъ вопросы, имѣющіе связь съ геологіей, а третій томъ будетъ посвященъ, главнымъ образомъ, океаническимъ явленіямъ и морскому дѣлу.

Эти лекціи перепечатываются въ томъ самомъ видѣ, въ которомъ онъ появлялись первоначально; единственный перемѣны заключаются въ томъ, что въ нѣсколькихъ случаяхъ сдѣланы легкія измѣненія въ словахъ,—исключительно для ясности.

Вилльямъ Томсонъ.

Университетъ, Глазго.
21 дек. 1888.

ПРЕДИСЛОВІЕ КО ВТОРОМЪ ИЗДАНІЮ.

Съ любезнаго разрѣшенія лорда Рэля, недавно появившіяся мемуаръ его, заключающій въ себѣ описание измѣренія количествъ масла, достаточныхъ для прекращенія движений камфоры на водѣ, помѣщенъ въ этомъ второмъ изданіи, какъ прибавленіе къ статьѣ «Капиллярное притяженіе». Онъ имѣть также большое значеніе при сопоставленіи со статьей «О величинѣ атомовъ», находящейся въ другой части книги.

Я присоединилъ къ статьѣ, озаглавленной: «Шаги къ кинетической теоріи матеріи», прибавленіе, которое можетъ быть прочтено съ интересомъ и, можетъ быть, даже съ нѣкоторой степенью удовлетворенія всѣми тѣми, кто могъ бы признать, что на кинетическую теорію газовъ наброшена тѣнь тѣмъ предполагаемымъ затрудненіемъ, которое выставлено въ этой статьѣ.

Третій томъ, обѣщанный въ предисловии къ первому изданію первого тома, будетъ по типографскимъ причинамъ выпущенъ въ свѣтъ послѣ первого тома. Онъ теперь весь въ печати и появится почти немедленно. Второй томъ будетъ, я надѣюсь, опубликованъ черезъ годъ, или два.

Вилльямъ Томсонъ.

Университетъ, Глазго.
16 Февр. 1891.

ПРЕДИСЛОВІЕ ПЕРЕВОДЧИКА.

Настоящій переводъ сдѣланъ со второго англійскаго изданія (London, 1891), причемъ, ввидѣ прибавленій, по образцу французскаго перевода («Conferences scientifiques et allocutions, traduites et annotées sur la deuxième edition par P. Lugol, aggregé des sciences physiques, professeur au Lycée de Pau, avec des extraits des mémoires récents de sir W. Thomson et quelques notes par M. Brillouin, maître de conferences à l'école normale. Constitution de la matière. Paris, 1893»), переведено нѣсколько научныхъ работъ сэра В. Томсона, относящихся, главнымъ образомъ, къ его оригиналной теоріи строенія матеріи (см. прим. 1 на стр. 169) — переведено, большою частью, съ тѣми же сокращеніями, какъ и во французскомъ изданіи.

Изъ французскаго изданія заимствованы также многія примѣчанія (изъ числа помѣченыхъ словами «*прим. перев.*» = «*примѣчанія переводчиковъ*»), а именно, М. Бриллуэну принадлежать: примѣчаніе 1 на стр. 122; 1, 123; 1, 160; 1, 169; 1, 193; 1, 196; 1 (часть), 203; 1, 206; 1, 225; 1, 291; 3, 303; 1, 322; 2, 325; 1, 331; 1, 339; 1, 364; 1, 370, а П. Люголю — примѣчанія 2 и 3 на стр. 70; 2, 71; 1, 89; 1, 90; 1, 108; 4, 156; 2, 188; 1, 191; 2, 214; 1, 253; 1, 266; 1 и 271, 1, 278; 2 и 3, 313; 1, 315 (курсивомъ обозначены передѣланыя примѣчанія, — остальные переведены).

Считаю долгомъ извиниться передъ читателями за шероховатости текста.

затость и мѣстами неясность перевода, проишедшия отчасти отъ стремленія быть возможно ближе къ подлиннику, отличающемся, при удивительномъ изобиліи глубокихъ мыслей, шероховатостью и иногда болыю сжатостью изложения.

Б. В.

С.-Петербургъ.
Іюль 1894.

ПОПУЛЯРНЫЯ ЛЕКЦІИ И РѢЧИ.

Капиллярное притяженіе.

(Пятничное вечернее чтеніе въ Королевскомъ Институтѣ, 29 января 1886)
[Proc. Roy. Inst., т. XI, ч. III¹⁾].

Свойство тяжести матеріи извѣстно столько тысячъ лѣтъ, сколько живутъ на землѣ люди и философы, но до открытия Ньютона всемирного тяготѣнія никто не подозрѣвалъ и не воображалъ, что тяжесть зависитъ отъ дѣйствія на разстояніи между двумя частями матеріи. Электрическія притяженія и отталкиванія и магнитныя притяженія и отталкиванія уже втеченіе двухъ или трехъ тысячъ лѣтъ знакомы натуралистамъ и философамъ. Джильберть, показавъ, что земля, дѣйствуя, какъ большой магнитъ, является причиной того что стрѣлка компаса указываетъ на сѣверъ, расширилъ тѣмъ самимъ общее мнѣніе относительно разстояній, на которыхъ магниты могутъ оказывать замѣтное дѣйствіе. Но ни онъ, ни кто другой не высказалъ мысли, что вѣсь есть результація взаимныхъ притяженій между всѣми частями тяжелаго тѣла и всѣми частями земли, и никому не приходило въ голову предположить, что различные части матеріи на поверхности земли, или даже болѣе почтенные массы, называемыя небесными тѣлами, взаимно притягиваются другъ друга. Самъ Ньютонъ не далъ ни одного доказательства, основанного на опыте или на наблюденіи, для взаимнаго притяженія между какими нибудь

¹⁾ 483—507; Nature, 34, 270—2, 290—4, 366—9, 1886.
(Прим. перев.).

такими двумя тѣлами, которые оба были бы меньше луны. Самое незначительное изъ дѣйствій тяготѣнія, включенное имъ въ выводимыя изъ наблюдений основанія его теоріи, было дѣйствие луны на воды океана,—дѣйствие, которымъ производятся приливы; но индуктивное заключеніе Ньютона, что тяжесть куска вещества на поверхности земли есть результатъ притяженій этого куска всѣми частями земли,—притяженій, дѣйствующихъ обратно пропорціонально квадратамъ разстояній,—дѣлало въ высшей степени вѣроятнымъ и то, что куски вещества, находящіеся на разстояніи нѣсколькихъ футовъ или нѣсколько дюймовъ, притягиваются другъ друга по тому же закону зависимости отъ разстояній, и великолѣпные опыты Кэвендиша оправдали это послѣднее заключеніе. Но перейдемъ теперь къ предмету нашихъ занятій на сегодняшній вечеръ. Продолжаеть ли это притяженіе между любой частицей матеріи въ одномъ тѣлѣ и любой частицей матеріи въ другомъ—измѣняется обратно пропорціонально квадрату разстоянія, когда разстояніе между ближайшими точками двухъ тѣлъ уменьшается до одного дюйма [опыты Кэвендиша не доказываютъ этого, но дѣлаютъ это чрезвычайно вѣроятнымъ¹⁾], или до одного сантиметра, или до стотысячной сантиметра, или до стомиллонной сантиметра? Я погружаю теперь свой палецъ въ этотъ сосудъ съ водой, и вы непосредственно убѣждаетесь въ существованіи силы притяженія между пальцемъ и каплей, повисшей на немъ, и между частицами матеріи по обѣимъ сторонамъ любой горизонтальной плоскости, которую вы можете вообразить пересѣкающею эту висящую воду. Эти силы въ миллионы разъ больше, чѣмъ тѣ, которыхъ вы бы получили, вычисляя ихъ на основаніи закона Ньютона и въ предположеніи, что вода есть совершенно однородное тѣло. Отсюда слѣдуетъ, что или эти силы притяженія на очень малыхъ раз-

¹⁾ Замѣтимъ, что Бойсъ (Boys) при помощи кварцевыхъ нитей, отличающихся замѣчательной тониной и упругостью (Nature, 42, 604—8, 1890), произвелъ опытъ Кэвендиша въ миниатюрныхъ размѣрахъ,—стержень крутильныхъ вѣсовъ равнялся 1,5 см.

(Прим. перев.).

стояніяхъ должны рости несравненно болѣе быстро, чѣмъ по закону Ньютона, или же вещество воды неоднородно. Въ настоящее время мы знаемъ, что оно неоднородно. Ньютоновская теорія тяготѣнія въ настоящее время представляется для настолько же достовѣрною, какъ и атомическая или молекулярная теорія въ химіи и физикѣ,—по крайней мѣрѣ, постольку, поскольку она утверждаетъ неоднородность во внутреннемъ строеніи вещества, которое представляется какъ нашимъ чувствамъ, такъ и самимъ чувствительнымъ нашимъ методамъ непосредственного изслѣдованія при помощи инструментовъ—однороднымъ. Отсюда слѣдуетъ,—если только мы не придемъ къ выводу, что неоднородность и ньютоновской законъ притяженія не въ состояніи вмѣстѣ объяснить спѣленія и капиллярного притяженія,—что мы не принуждены искать объясненія въ отклоненіи силы тяготѣнія отъ Ньютоновского закона. Въ сообщеніи, сдѣланномъ въ Эдинбургскомъ Королевскомъ Обществѣ двадцать четыре года тому назадъ¹⁾, я показалъ, что неоднородность вещества можетъ служить достаточнымъ объясненіемъ для какой угодно силы спѣленія, какъ бы она велика ни была, если только мы придадимъ достаточно большую плотность самимъ молекуламъ въ этомъ неоднородномъ строеніи.

Однако кажется, что нельзя прійти ни къ какому удовлетворительному или очень интересному въ механическомъ отношеніи результату, если попробуешь какъ либо развивать эту теорію, не принимая во вниманіе частичныхъ движений, которыя, какъ мы знаемъ, присущи матеріи и составляютъ ея тепло. Но настолько, насколько дѣло касается главныхъ явленій капиллярного притяженія, достаточно знать, что полная молекулярная теорія не могла бы привести въ итогъ къ иному окончательному результату, какъ и предположеніе, что вода и твердые тѣла, прикасающіяся къ ней, представляютъ собою вполнѣ, до безконечно малыхъ частей, однородные тѣла и

¹⁾ «Замѣтка о тяготѣніи и спѣленіи» (Note on Gravity and Cohesion) Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 21 Апрѣля 1862, (т. IV). Эта замѣтка перепечатана полностью въ прибавлениі **B** къ этой статьѣ.
(Прим. автора).

что на нихъ действуютъ силы взаимнаго притяженія, достаточно большія между тѣми частями матеріи, которая чрезвычайно близки другъ къ другу, но совершенно неуловимыя между частями матеріи, находящимися на замѣтныхъ разстояніяхъ. Въ самомъ дѣлѣ,—какой молекулярной теоріи ни придерживались бы мы или могли бы придерживаться послѣдующія по колѣнія для объясненія внутренней природы этихъ взаимодѣйствій,—эта идея о незамѣтномъ притяженіи на замѣтныхъ разстояніяхъ есть ключъ къ теоріи капиллярнаго притяженія, и этой идеей мы обязаны Гоксби¹⁾. Лапласъ²⁾ взялся снова за эту идею и вполнѣ съ удивительнымъ искусствомъ разработалъ ее съ математической стороны. Единственная часть теоріи, которую онъ оставилъ недостаточно разработанной,—дѣйствие твердаго тѣла на жидкость и взаимодѣйствие между двумя жидкостями,—была доведена до совершенства съ механической точки зрењія Гауссомъ³⁾, а послѣдніе штрихи математической теоріи были сдѣланы Нейманомъ⁴⁾, установившимъ для жидкостей правило, соотвѣтствующее правилу Гаусса относительно угловъ соприкосновенія жидкостей и твердыхъ тѣлъ.

Гауссъ, выражая восторженную оцѣнку труду Лапласа, принимаетъ то же основное положеніе о притяженіи, замѣтномъ только на незамѣтныхъ разстояніяхъ, и, хотя главною своею цѣлью онъ считалъ завершеніе той части теоріи, которую недостаточно разработалъ его предшественникъ, рѣшаеть заново эту механическую задачу замѣчательно усовершенствованіемъ способомъ, цѣликомъ основывая это рѣшеніе на прин-

ципѣ того, что мы называемъ теперь потенциальной энергией. Такимъ образомъ, хотя формулы, при помощи которыхъ Гауссъ выражаетъ въ математической формѣ свои идеи, почти такъ же страшны на видъ, какъ и формулы Лапласа, ихъ очень легко передать словами, причемъ вся эта теорія сдѣляется совершенно понятной для лицъ, считающихъ себя неспособными понимать шестерные интегралы. Для большаго удобства вообразимъ себя расположенными въ центрѣ земли, чтобы избѣжать влиянія силы тяжести. Возьмемъ теперь двѣ порціи воды; пусть эти порціи на известной части своей поверхности,—назовемъ эту часть *A* для одной порціи и *B* для другой,—имѣютъ такую форму, что, будучи сложены вмѣстѣ, онъ какъ разъ придется другъ къ другу по всей этой площади. Чтобы избѣжать всякихъ хлопотъ при обращеніи съ предполагаемыми частями воды, пусть онъ на время станутъ совершенно крѣпкими и пусть при этомъ не произойдетъ никакихъ измѣненій въ ихъ взаимномъ притяженіи. Поднесемъ ихъ теперь другъ къ другу такъ, чтобы поверхности *A* и *B* подошли одна къ другой на разстояніе стотысячной дюйма, т. е. сорокатысячной сантиметра или двухсотъ пятидесяти микромиллиметровъ (около половины длины волны зеленаго свѣта). На такомъ большомъ разстояніи притяженіе имѣть совершенно незамѣтную величину: мы можемъ быть вполнѣ увѣрены въ томъ что оно отличается всего на нѣсколько процентовъ отъ той ничтожно малой силы притяженія, которую мы получили бы, вычисляя ее на основаніи Ньютона законъ и въ предположеніи полной равномѣрности распределенія плотности въ каждомъ изъ притягивающихъ тѣлъ. Извѣстныя всѣмъ явленія пузирей и водныхъ пленокъ, смачивающихъ твердя тѣла, дѣлаютъ вполнѣ достовѣрнымъ то, что частичное притяженіе становится замѣтнымъ только тогда, когда разстояніе станетъ гораздо меныше, чѣмъ 250 микро-миллиметровъ. Изъ разсмотрѣнія такихъ явленій Квинке¹⁾

¹⁾ Pogg. Ann. der Phys. und der Chem. Bd. CXXXVII, 1869 *.
(Прим. автора).

¹⁾ Transactions Royal Society, XXVI, XXVII, 1709—1713; или же сокращенное издание д-ра Гуттона и другихъ, т. V, стр. 464 и слѣд.
(Прим. автора).

²⁾ Mécanique C  leste, прибавленіе къ десятой книгѣ, вышедшее въ 1806 году; также, Supplément   la Théorie de l'Action capillaire, образующее второе прибавленіе къ десятой книгѣ. (Прим. автора).

³⁾ Principia generalia Theori  Figur  Fluidorum in Stato Equilibrii (Göttingen, 1830); или Werke, т. V, стр. 29. (Göttingen, 1887).
(Прим. автора).

⁴⁾ Herr F. E. Neumann.
(Прим. автора).

^{*)} Ueber die Entlarmung, in welcher die Molekularkräfte der Capillarität noch wirksam sind. стр. 402—14. (Прим. перев.).

пришелъ къ заключенію, что частичное притяженіе становится замѣтнымъ на разстояніи около пятидесяти микромиллиметровъ. Его заключеніе поразительно подтверждается очень важнымъ открытиемъ Рейнольда и Рюккера ¹⁾, что черная пленка, всегда образующаяся передъ тѣмъ, какъ лопнетъ предоставленный самому себѣ мыльный пузырь, имѣеть равномѣрную или почти равномѣрную толщину, микромиллиметровъ въ одиннадцать или двѣнадцать. Внезапное возникновеніе и продолжительная устойчивость черной пленки доказываютъ предложеніе первой важности въ молекулярной теоріи: — натяженіе пленки, остающееся замѣтно постояннымъ, пока толщина ея превышаетъ пятьдесятъ микромиллиметровъ, уменьшается до минимума и начинаетъ затѣмъ снова увеличиваться, когда толщина уменьшилась до десяти микромиллиметровъ. Кажется невозможнымъ объяснить этотъ фактъ какимъ бы то ни было вообразимымъ закономъ силы между различными частями пленки, если предполагать ее однородной, — и мы принуждены заключить, что это зависитъ отъ молекулярной неоднородности. Когда, такимъ образомъ, теорія коренной однородности матеріи опровергнута наблюденіями и когда доказано, что принятіе ею закона притяженія, увеличивающагося, когда разстояніе становится меньше пятидесяти микромиллиметровъ, быстрѣе, чѣмъ слѣдуетъ по закону Ньютона, оказывается неудовлетворительнымъ, то развѣ мы не можемъ пойти далѣе и сказать, что вовсе не нужно предполагать какое нибудь отклоненіе отъ ньютоновскаго закона измѣненія силы обратно пропорціонально квадрату разстоянія, — сплошнымъ образомъ, отъ миллионной микромиллиметра до разстояній самой отдаленной звѣзды или самой отдаленной части вещества во вселенной, — и развѣ мы не можемъ, до той поры, когда увидимъ, что самое тяготѣніе можетъ быть объяснено — такъ, какъ Ньютонъ и Фарадей считали, что

¹⁾ Proc. Roy. Soc., 21 июня 1877 и Trans. Roy. Soc., 19 апреля 1883 *).
(Прим. автора).

*) О предѣльной толщинѣ жидкихъ пленокъ. (On the Limiting Thickness of Liquid Films (Proc. Roy. Soc. 26, 334, Trans. Roy. Soc. 174, 645—662.
(Прим. перев.).

нужно объяснить его, — какимъ нибудь непрерывнымъ дѣйствіемъ промежуточной или окружающей матеріи, временно удовлетвориться объясненіемъ капиллярного притяженія, какъ просто ньютоновскаго притяженія, усиливающагося вслѣдствіе присутствія чрезвычайно плотныхъ молекулъ, подвижныхъ одна относительно другой, — молекулъ, собраніе которыхъ представляеть массу жидкаго или твердаго тѣла.

Но отбросимъ въ настоящую минуту и на весь остаточный вечеръ всякую мысль о молекулярной теоріи и будемъ имѣть въ виду теорію коренной однородности матеріи ¹⁾ въ чистомъ и простомъ видѣ, — теорію Лапласа и Гаусса; вернемся къ нашимъ двумъ ставшимъ крѣпкими частямъ воды, оставленнымъ на разстояніи 250 микромиллиметровъ другъ отъ друга. Держа эти части въ двухъ своихъ рукахъ, я даю имъ приближаться все ближе и ближе другъ къ другу, пока они не соприкоснутся по всей поверхности частей *A* и *B*. Они начинаютъ притягивать другъ друга съ силою, которая можетъ быть едва замѣтна для моихъ рукъ, когда разстояніе ихъ другъ отъ друга равно пятидесяти микромиллиметрамъ и даже десяти микромиллиметрамъ, но которая навѣрно дѣлается замѣтною, когда разстояніе дѣлается однимъ микромиллиметромъ или дробью микромиллиметра, и громадною, равною сотнямъ или тысячамъ килограммовъ (вѣсъ), передъ тѣмъ, какъ они придутъ въ абсолютное соприкосненіе. Я полагаю при этомъ, что площадь каждой изъ этихъ поверхностей равна нѣсколькимъ квадратнымъ сантиметрамъ. Для опредѣленности, я буду предполагать, что она равна ровно тридцати квадратнымъ сантиметрамъ. Если бы мое чувство силы было достаточно точнымъ измѣрителемъ, то я нашелъ бы, что работа, совершенная притяженіемъ окрѣпшихъ частей воды при стягиваніи моихъ рукъ, была какъ разъ около четырехъ съ половиною грамм-сантиметровъ. Если бы сила оставалась постоянной на протяженіи всего этого пространства въ пятьдесятъ микромиллиметровъ (пять миллионныхъ сантиметра), то для того,

¹⁾ Томсонъ называетъ ее просто коренной теоріей (the molar theory), — для ясности мы позволили себѣ нѣсколько распространить это название.
(Прим. перев.).

чтобъ произвести такую работу, она должна была бы равняться девяностамъ тысячъ граммовъ вѣса, т. е. девяти десятымъ тонны¹⁾). Но въ дѣйствительности, эта работа совершаются силой, возрастающей отъ чего-то, очень небольшого, когда разстояніе равно пятидесяти микромиллиметровъ, до нѣкоторой неизвѣстной весьма большой величины. Быть можетъ, эта сила достигаетъ максимума еще до абсолютного контакта и затѣмъ начинаетъ уменьшаться,—или, можетъ быть, она увеличивается и увеличивается до самаго соприкосновенія—мы не можемъ решить, что имѣеть мѣсто. Но, каковъ бы ни былъ законъ измѣненія силы, достовѣрно, что на протяженіи небольшой части нашего разстоянія она значительно больше одной тонны. Возможно, что она несравненно больше одной тонны, чтобы совершить выше опредѣленное количество работы въ четыре с половиною грамм-сантиметра на протяженіи пятидесяти микромиллиметровъ.

Теперь измѣнимъ немного обстоятельства опыта. Я беру двѣ части окрѣпшей воды и подношу ихъ другъ къ другу такъ, чтобы они прикоснулись парой соотвѣтствующихъ точекъ, лежащихъ на краяхъ двухъ поверхностей *A* и *B*,—держа при этомъ остальные части этихъ поверхностей далеко порознь (см. рис. 1). Работа, совершенная надъ моими руками при этомъ процессѣ, безконечно мала. Теперь, не измѣня нисколько закона притягательной силы, положимъ, что на всемъ протяженіи каждой изъ поверхностей делается снова подвижной очень тонкая пленка окрѣпшей воды, вы видите теперь именно то, что получается въ этомъ случаѣ. Куски вещества, которые я держу въ рукахъ, не наши воображаемые куски окрѣпшей воды,—это два куска стекла, поверхности которыхъ *A* и *B* сдѣланы вполнѣ чистыми и смочены на всемъ протяженіи тонкимъ слоемъ воды. То же самое, что происходитъ у васъ на глазахъ, имѣло бы мѣсто, если бы все происходило какъ разъ согласно съ нашими идеальными представлѣніями. Поэтому, представьте себѣ, что это дѣйствительно два куска воды, оба неизмѣняемые за исключеніемъ тонкой жидкой пленки на каждой изъ поверх-

ностей *A* и *B*, которыя должны быть приложены другъ къ другу. Помните также, что Королевскій Институтъ, въ которомъ мы сошлись, перенесенъ для этого случая въ центръ земли, такъ что сила тяжести ни въ какомъ отношеніи не оказываетъ на насъ вліянія. Вы видите, намъ не мѣшаетъ никакое стеканіе внизъ этихъ жидкихъ пленокъ,—впрочемъ я не долженъ говорить *внизъ*, у насъ здѣсь нѣть ни низа, ни верха,—онъ не стекаютъ вдоль этихъ поверхностей по направленію къ столу,—по крайней мѣрѣ, вы должны вообразить, что этого не происходитъ. Теперь я поворачиваю одинъ или оба этихъ куска вещества до тѣхъ поръ, пока они не будуть такъ близко соприкасаться другъ съ другомъ на всемъ протяженіи поверх-

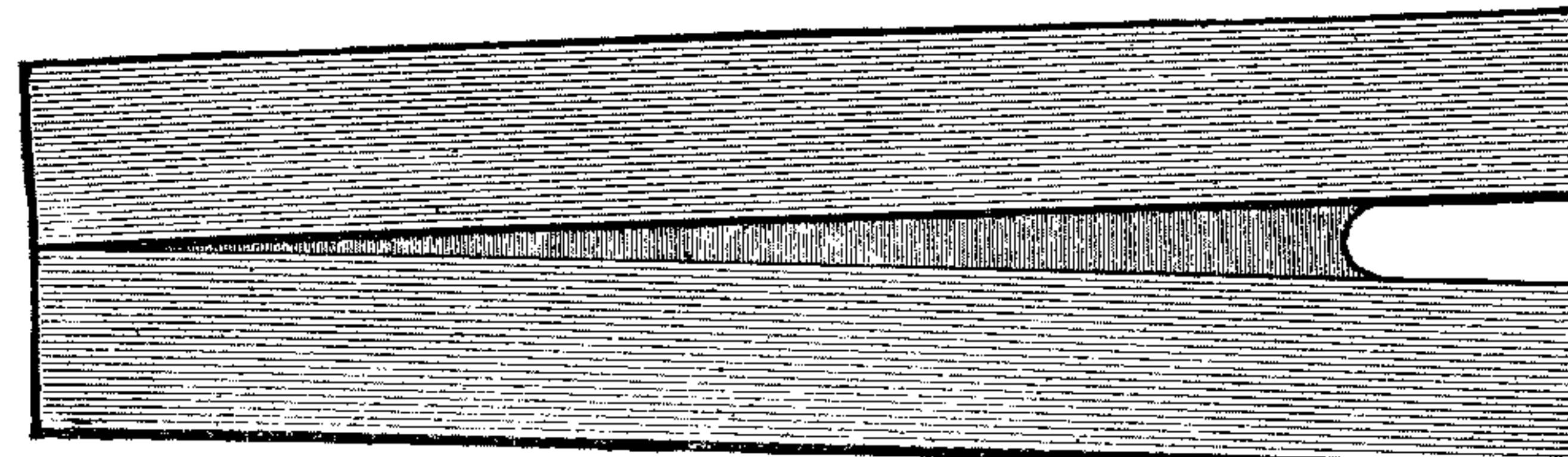


Рис. 1.

ностей *A* и *B*, что весь промежутокъ между ними станетъ заполненъ водою. Моя способность мѣрить чувствомъ осязанія говорить мнѣ, что опять было произведено ровно четыре с половиною грамм-сантиметра работы,—но на этотъ разъ не чрезвычайно большой силой на протяженіи пространства, менѣшаго пятидесяти микромиллиметровъ, но очень слабой силой, дѣйствовавшей на большомъ протяженіи того поворачивающаго или складыватальнаго движенія, которое вы видѣли—и теперь снова видите. Дѣйствительно, изъ элементарнаго принципа работы, совершающей въ консервативной системѣ¹⁾, мы знаемъ, что работа, совершенная въ первомъ случаѣ, при непосредственномъ сближеніи двухъ тѣлъ, и во второмъ случаѣ, при прикосновеніи сначала только двумя точками и затѣмъ складыва-

¹⁾ Тонна=1000 килограммовъ.

(Прим. перев.).

¹⁾ Т. е. системы, въ которой силы имѣютъ потенціалъ.

(Прим. перев.).

ни тѣль вмѣстѣ, должна быть одной и той же, и мое измѣрительное чувство осязанія сказали мнѣ въ этомъ частномъ случаѣ только то, что, мы всѣ знаемъ теоретически, должно быть вѣрно во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда мы къ одному и тому же концу приходимъ различными путями, исходя изъ одного и того же начала.

Но, слѣдя по этому второму пути, мы, совершая складывательное движеніе, уменьшили поверхность воды на шестьдесятъ квадратныхъ сантиметровъ. Легко видѣть, что, если только радіусъ кривизны въ каждомъ мѣстѣ поверхности превышаетъ въ сто или двѣsti разъ то разстояніе, до котораго молекулярное притяженіе еще имѣеть замѣтную величину или, какъ мы можемъ сказать на практикѣ, если только радіусъ кривизны вездѣ больше 5000 микромиллиметровъ (т. е. двухсотой миллиметра), то мы получили бы такое же количество работы при томъ же уменьшеніи поверхности воды, какъ бы ни было произведено этоу менышеніе. Отсюда въ результатаѣ, мы находимъ, что уменьшенію поверхности на каждый квадратный сантиметръ соотвѣтствуетъ $\frac{4 \cdot 5}{60}$ (или $\frac{3}{40}$) грамм-сантиметра работы. А это совершенно тотъ же результатъ, какой мы получили бы, еслибы предположили, что вода абсолютно лишена притягательной силы между водой и водой и что вся ея поверхность покрыта безконечно тонкой стягивающейся пленкой, обладающей равномѣрной стягивательной силой въ $\frac{3}{40}$ вѣса грамма или въ 75 миллиграммовъ на линейный сантиметръ.

Теперь удобно держаться нашей идеальной пленки, оставивъ идею о томъ, что согласно нашимъ современнымъ представлениямъ о междучастичныхъ дѣйствіяхъ есть вещь, болѣе реальная, а именно, взаимное притяженіе между различными частями жидкости. Но я настоятельно прошу васъ, не впадите въ парадоксальное обыкновеніе представлять себѣ эту поверхностную пленку чѣмъ либо инымъ, какъ только способомъ мысленного представления окончательного результата взаимныхъ притяженій между различными частями жидкости. Посмотримъ теперь на одинъ изъ нашихъ мысленно окрѣпшихъ кусковъ воды или, если вамъ угодно, на эти два куска, сложенныхъ

вмѣстѣ и составляющихъ одинъ. Помните, что мы находимся въ центрѣ земли. Что произойдетъ, если внезапно этотъ кусокъ вещества, покоющійся передъ вами въ воздухѣ, перестанетъ быть крѣпкимъ? Вообразите себѣ, что онъ, какъ я уже говорилъ, заключенъ въ пленку, стремящуюся вездѣ стянутыся съ силою, равной $\frac{3}{40}$ грамма или семидесяти пяти миллиграммамъ вѣса на линейный сантиметръ. Эта стягивающаяся пленка будетъ, очевидно, производить наибольшее давленіе въ тѣхъ мѣстахъ, где выпуклость наибольшая. Весьма элементарная теорема математики говоритъ намъ, что на окрѣпшей выпуклой поверхности, которую вы видите, величина давленія на квадратный сантиметръ получится, если помножимъ сумму¹⁾ кривизнъ двухъ взаимно-перпендикулярныхъ нормальныхъ сѣченій на величину силы, разсчитанной на линейный сантиметръ. Въ тѣхъ мѣстахъ, где поверхность вогнутая, дѣйствие поверхностнаго натяженія стремится втянуть ее наружу, т. е., на математическомъ языкѣ, производить отрицательное давленіе внутрь. Теперь предположимъ, что крѣпость моментально уничтожается, и кусокъ стекла, который вы видите, становится водою, оставаясь все еще изъятымъ изъ-подъ влиянія силы тяжести. Мгновенное дѣйствіе этихъ неравныхъ давленій на поверхность воды приведетъ ее въ движение. Если бы вода была «совершенной» жидкостью, то она продолжала бы безконечно долго колебаться дико-неправильнымъ образомъ, разъ ея первоначальная форма была такой угловатой, какъ то, что я держу въ рукѣ. Но, въ дѣйствительности, вода, какъ и всякая другая жидкость, обладаетъ вязкостью и потому колебанія ея будутъ постепенно успокаиваться, и нашъ кусокъ вещества приметъ въ концѣ концовъ форму шара, слегка нагрѣвшись, благодаря работѣ, совершенной силами взаимнаго притяженія, которыми онъ былъ приведенъ въ движение изъ своего первоначального вида. Работа, совершаемая этими силами въ то время, какъ тѣло переходитъ изъ одной своей формы въ другую, прямо пропорциональна уменьшенію

¹⁾ Эту сумму для краткости я буду съ этихъ поръ называть просто «кривизною поверхности» въ какой-нибудь ея точкѣ.

(Прим. автора).

величины всей поверхности тѣла; и фигура равновѣсія,—въ томъ случаѣ, когда исключено вліяніе силы тяжести или какихъ либо постороннихъ твердыхъ или жидкихъ тѣлъ,—есть та фигура,—сфера,—которая, при условіи заключать въ себѣ данный объемъ вещества, представляетъ возможно наименьшую поверхность.

Я вычислилъ періодъ колебанія сферы воды ¹⁾ (росинки!) и нашелъ, что онъ равенъ $\frac{1}{4} a^{3/2}$, гдѣ a радиусъ въ сантиметрахъ,—такъ:

для радиуса въ	$\frac{1}{4}$	санти м.—періодъ	$\frac{1}{32}$	секунды.
» » »	1	» »	$\frac{1}{4}$	»
» » »	2·54	» »	1	»
» » »	4	» »	2	»
» » »	16	» »	16	»
» » »	36	» »	54 ²⁾	»
» » »	1407	» »	13,200	»

Вся механика этого предмета, поскольку касается одной только жидкости, вполнѣ заключается въ той математикѣ безъ формулъ, которую я вамъ изложилъ. Двадцать страницъ, покрытыхъ шестерными интегралами, не могли бы сообщить намъ больше этого.

До сихъ поръ мы рассматривали только взаимное притяженіе между частями двухъ порцій одной и той же жидкости,—напр., воды. Разсмотримъ теперь двѣ различныхъ жидкости; напр., воду и двухсѣрнистый углеродъ (который я, для краткости, буду называть сѣроуглеродомъ). Поступимъ съ ними точно такъ же, какъ мы поступали съ двумя порціями воды.

¹⁾ См. мемуаръ лорда Рэлля въ Proc. Roy. Soc., № 196, 5 мая 1879 *)
(Прим. автора).

²⁾ У Томсона по ошибкѣ и здѣсь стоитъ 36.

(Прим. перев.).

*) „О капиллярныхъ явленіяхъ струй“ (On the Capillary phenomena of Jets). Proc. Roy. Soc., 29, 71—97.

(Прим. перев.).

Миѣ нѣть надобности снова повторять весь ходъ разсужденій: результатъ вполнѣ очевиденъ. Помноженная на тридцать разность между суммой поверхностныхъ натяженій каждой жидкости въ отдельности и натяженіемъ раздѣла между ними равна работѣ, совершенной при сближеніи этихъ двухъ тѣль до полнаго соприкосновенія на протяженіи тридцати квадратныхъ сантиметровъ. Отсюда, *поверхностное натяженіе, существующее на поверхности раздѣла двухъ жидкостей и рассчитанное на единицу площади* ¹⁾, равно разности между суммой поверхностныхъ натяженій каждой жидкости въ отдельности и работой, совершенной при непосредственномъ сближеніи этихъ двухъ тѣль до соприкосновенія на протяженіи единицы поверхности каждого изъ нихъ. Въ частномъ случаѣ двухъ одинаковыхъ тѣль, приходящихъ въ совершенное соприкосновеніе, натяженіе раздѣла между ними должно быть равно нулю и потому работа, совершаемая при сближеніи ихъ до соприкосновенія на протяженіи единицы поверхности, должна быть какъ разъ равна удвоенному поверхностному натяженію; этотъ именно случай мы сперва и рассматривали.

Если работа, совершаемая, въ случаѣ двухъ различныхъ жидкостей, при сближеніи ихъ до соприкосновенія на небольшой площади, превышаетъ сумму поверхностныхъ натяженій, то натяженіе раздѣла отрицательное. Слѣдствіемъ этого является, мгновенное сморщивание поверхности раздѣла,—какъ начало диффузіи,—и затѣмъ слѣдуетъ общеизвѣстный процессъ непрерывной внутренней диффузіи.

Разсмотримъ далѣе взаимное притяженіе между твердымъ тѣломъ и жидкостью. Выберемъ какой нибудь площадку на поверхности твердаго тѣла и придадимъ заблаговременно нѣко-

¹⁾ Подъ поверхностнымъ натяженіемъ на единицу площади понижается работа, совершенная этимъ поверхностнымъ натяженіемъ, дѣйствующимъ на единицу длины, на протяженіи единицы,—т. е. совершенная при образованіи единицы поверхности.

(Прим. перев.).

²⁾ The result is an instantaneous puckering of the surface,—этотъ свою мысль Томсонъ развиваетъ въ замѣчаніи (30 янв. 1886 г.), помѣщенному далѣе.

(Прим. перев.)

торой части жидкости такую форму, чтобы она какъ разъ приходилась по этой площадкѣ.

Приведемъ теперь жидкость, которую мы на это время примемъ окрѣпшою, въ соприкосновеніе съ этой площадкой твердаго тѣла. Величина, на которую работа, совершаемая единицею площади соприкосновенія, меньше поверхностнаго напряженія жидкости, равна напряженію на поверхности раздѣла между жидкостью и твердымъ тѣломъ. Если работа, совершаемая единицею поверхности, какъ разъ равна напряженію свободной поверхности жидкости, напряженіе раздѣла равно нулю. Въ этомъ случаѣ, поверхность жидкости, когда послѣдняя находится въ равновѣсіи въ мѣстѣ встречи жидкости и твердаго тѣла, составляетъ прямой уголъ съ поверхностью твердаго тѣла. Уголь между свободными поверхностями жидкости и твердаго тѣла будетъ острымъ или тупымъ, смотря по тому, каково напряженіе раздѣла — положительное или отрицательное; косинусъ этого угла равенъ напряженію раздѣла, раздѣленному на напряженіе свободной поверхности. Наибольшее возможное значение, которое напряженіе раздѣла можетъ имѣть, когда оно положительно, есть, очевидно, напряженіе свободной поверхности, и оно достигаетъ этого предѣльного значения только въ томъ, не чисто статистическомъ, случаѣ, когда жидкость покоятся на твердомъ тѣлѣ, обладающемъ большою теплопроводностью и поддерживаемомъ при температурѣ, значительно превышающей температуру кипѣнія жидкости,—какъ это будетъ въ томъ общезавѣстномъ явленіи, на которое было обращено вниманіе Лейденфростомъ и Бутини. Подобнаго предѣла не существуетъ для абсолютной величины напряженія раздѣла въ томъ случаѣ, когда оно отрицательное, но эта абсолютная величина должна быть меньше напряженія свободной поверхности, чтобы возможно было равновѣсіе вдоль линіи, раздѣляющей жидкость и твердое тѣло. Если отрицательно взятое напряженіе раздѣла какъ разъ равно напряженію свободной поверхности, — уголъ между свободными поверхностями на линіи раздѣла равенъ ровно 180° . Если отрицательно взятое напряженіе раздѣла превышаетъ напряженіе свободной поверхности, — жидкость разбѣгается по по-

верхности твердаго тѣла, какъ, напр., разбѣгается вода по стеклянной, очень хорошо вычищенной пластинкѣ. Если мы на минуту покинемъ центр земли и предположимъ, что находимся гдѣ

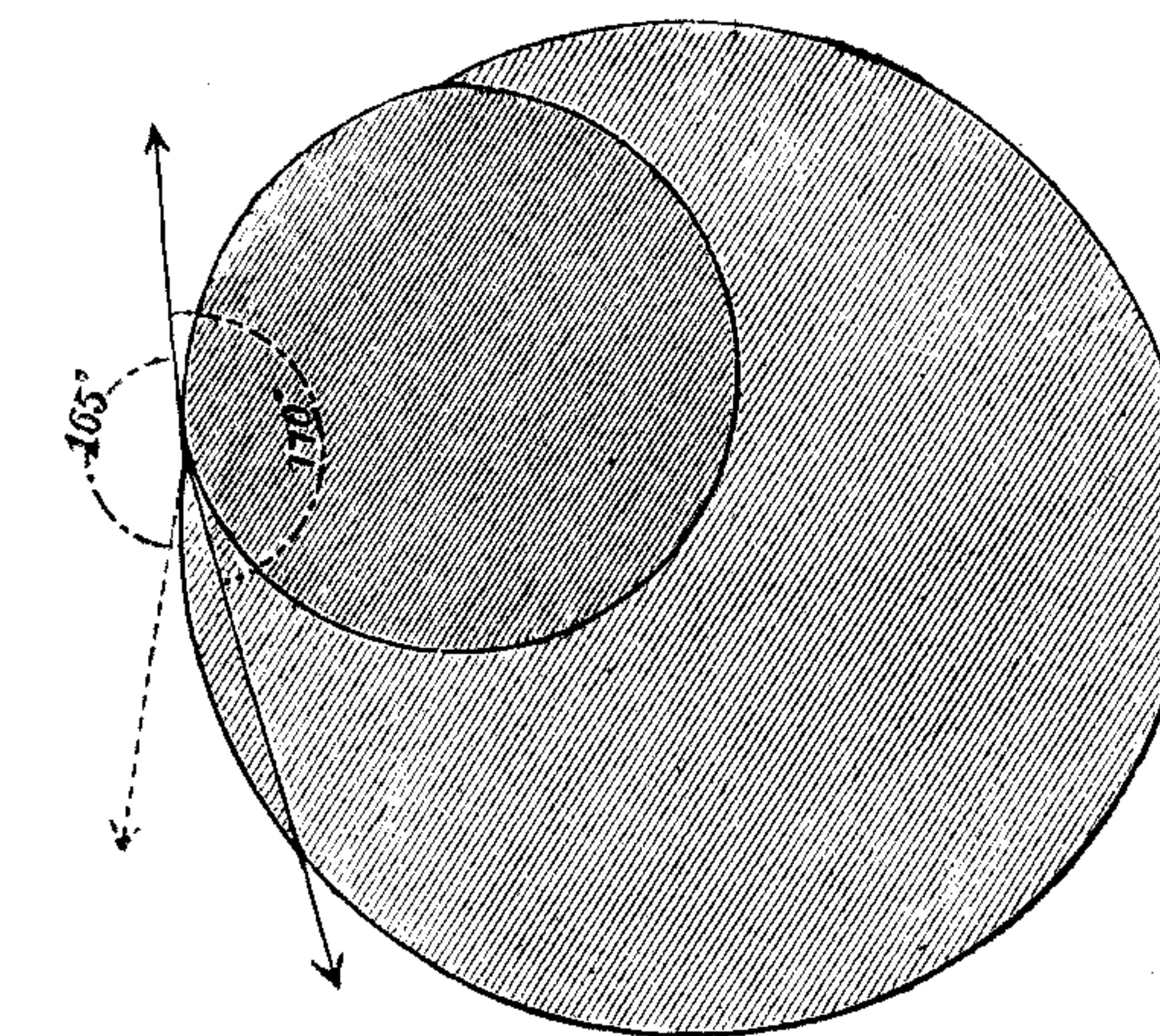


Рис. 2.

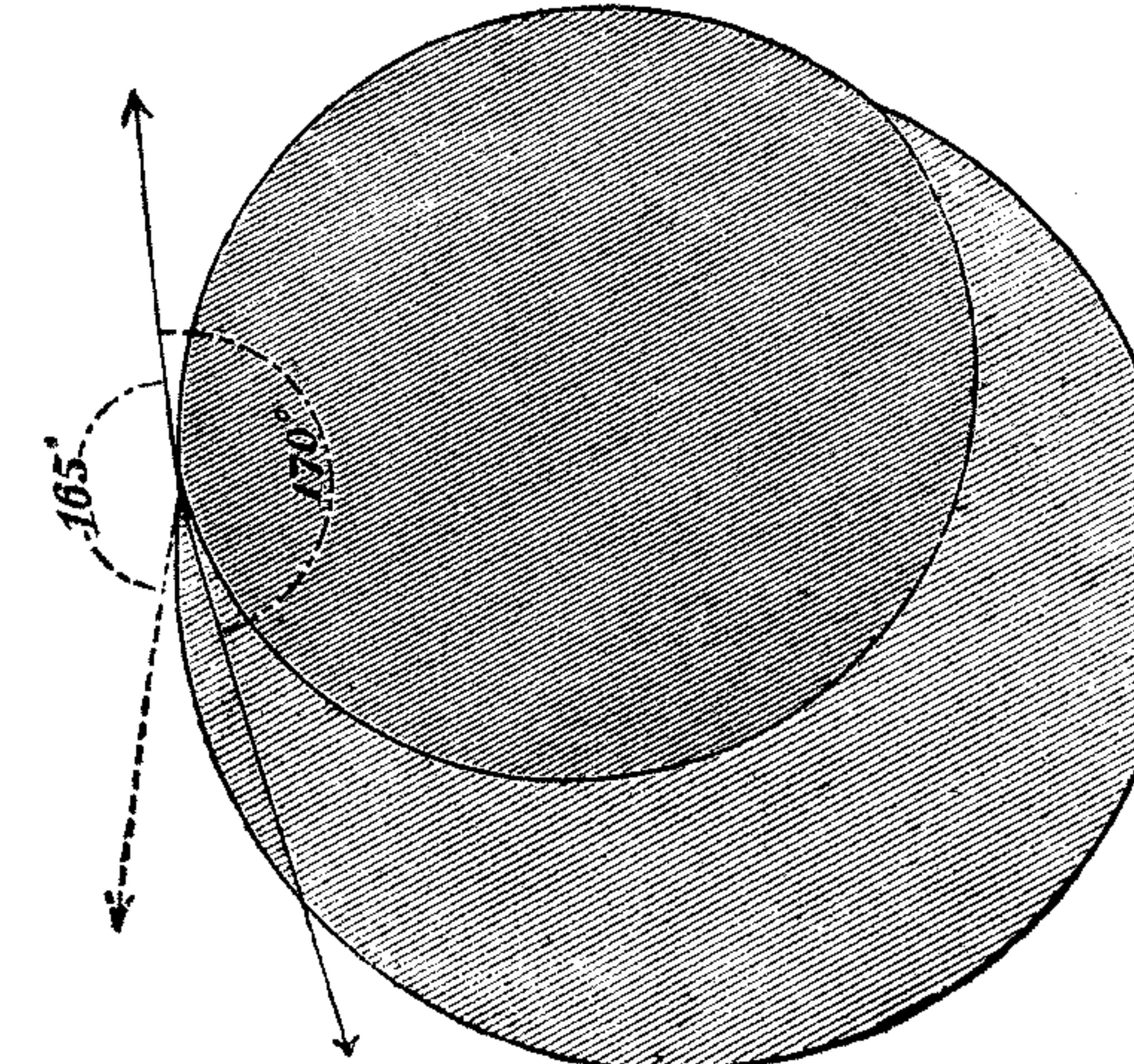
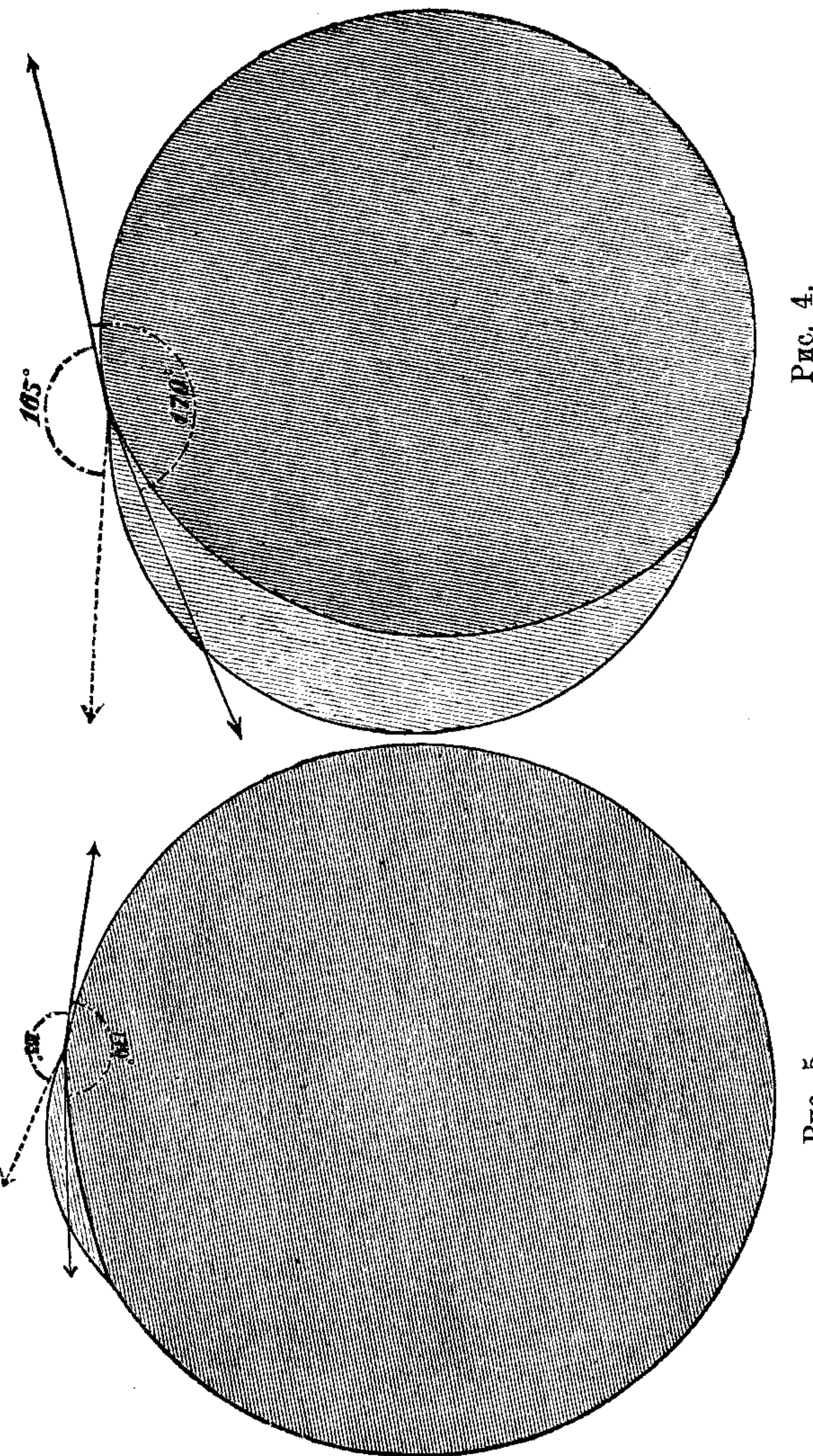


Рис. 3.

нибудь въ другомъ мѣстѣ, внутри или въ земли, мы найдемъ, что жидкость въ видѣ тонкой пленки побѣжитъ вверхъ наперекоръ силѣ тяжести, по верхней части сосуда, ее заключающаго, при чемъ въ раздѣлѣ получается уголъ въ 180° между свобод-

ной поверхностью жидкости и поверхностью пленки, прилипшей къ твердому тѣлу надъ линіей, представляющей границу



свободной поверхности жидкости. Это, именно, и будетъ съ водою, заключающейся въ стеклянномъ сосудѣ или находящейся въ

соприкосновеніи съ кускомъ стекла какой угодно формы, если только поверхность стекла совершенно чиста.

Когда двѣ не смѣшивающіяся жидкости, т. е. двѣ жидкости, натяженіе раздѣла которыхъ—положительное, приведены въ соприкосновеніе и предоставлены самимъ себѣ, причемъ исключено влияніе силы тяжести (положимъ, въ нашей любимой лабораторіи въ центрѣ земли), то, совершивъ нѣсколько, затихающихъ вслѣдствіе вязкости, колебаній, эта сложная масса придетъ въ состояніе покоя, принявъ форму фигуры, состоящей изъ двухъ взаимно пересѣкающихся сегментовъ шаровыхъ поверхностей, образующихъ виѣшнія границы двухъ жидкихъ массъ, и изъ третьего сегмента шаровой поверхности, проходящаго черезъ пересѣченіе первыхъ двухъ и представляющаго собой раздѣль между двумя жидкостями. Эти три шаровые поверхности встрѣчаются подъ такими же тремя углами, какъ три взаимно уравновѣщающіяся въ одной плоскости силы, величины которыхъ соответственно равны поверхностнымъ натяженіямъ виѣшніхъ поверхностей обѣихъ жидкостей и натяженію ихъ раздѣла. Рисунки 2—5 иллюстрируютъ тѣ формы, которые получаются въ случаѣ сѣроуглерода и воды при нѣсколькихъ различныхъ отношеніяхъ объемовъ обѣихъ жидкостей [во всѣхъ этихъ рисункахъ болѣе темныя части представляютъ воду (или цинковый купоросъ)]. Когда даны объемы каждой жидкости и известны углы встрѣчи этихъ трехъ поверхностей, то задача вычертить эти три шаровые поверхности есть задача вполнѣ опредѣленная. Это довольно интересная геометрическая задача.

Если мы оставимъ теперь на время нашу освобожденную отъ силы тяжести лабораторію и, вернувшись въ амфитеатръ Королевскаго Института, приведемъ въ соприкосновеніе двѣ наши массы жидкости, какъ я дѣлаю это теперь въ этомъ стеклянномъ сосудѣ, то у насъ одна жидкость будетъ плавать на другой, и форму, принимаемую этой плавающей жидкостью, можно будетъ изучить, для нѣсколькихъ различныхъ случаевъ, по явленіямъ, демонстрируемымъ въ этихъ бутылкахъ и стеклянныхъ стаканчикахъ и изображенными въ увличеніи

номъ размѣръ на этихъ двухъ рисункахъ (рис. 6 и 7), которые представляютъ сѣроуглеродъ, плавающій на поверхности цинковаго купороса; а въ этомъ случаѣ (рис. 8) капля сѣроуглерода почти достигаетъ наибольшей величины, при которой она можетъ еще плавать. Вотъ стеклянка, содержимое которой



Рис. 6.



Рис. 7.

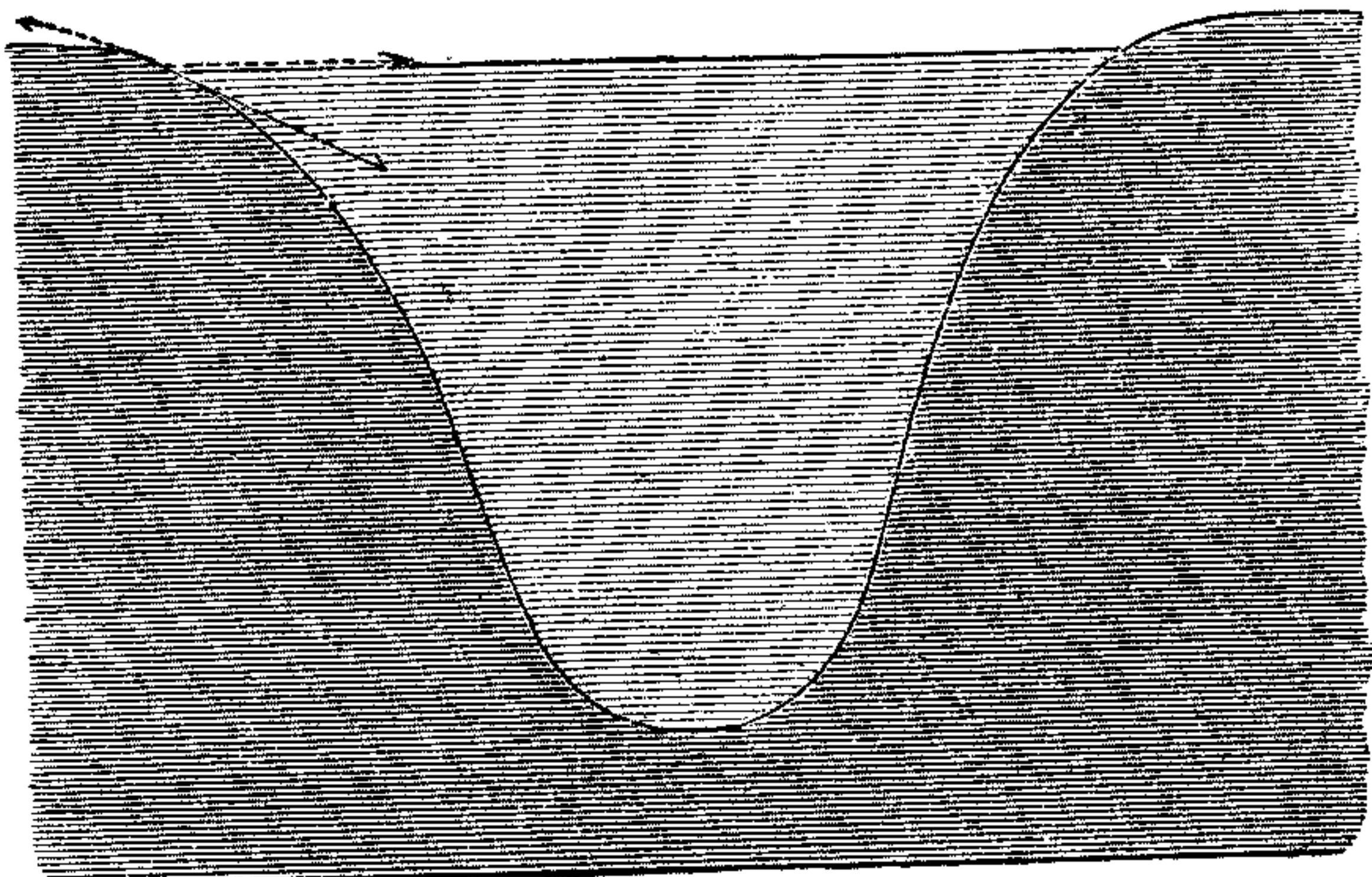


Рис. 8.

изображено на рисункѣ 8; мы увидимъ, что очень легкій толчекъ въ вертикальномъ направленіи заставляетъ погрузиться всю массу сѣроуглерода. Теперь она погрузилась и, когда колебанія прекратятся, мы увидимъ, что сѣроуглеродъ принялъ форму большого шара, который держится внутри цинковаго

купороса. Теперь, припоминая, что мы снова въ центрѣ земли и что сила тяжести намъ не мѣшаетъ, предположимъ, что венце стеклянки внезапно превратилось въ жидкой цинковый купоросъ,—въ такомъ случаѣ, эта масса превратилась бы въ составную сферу, подобную той, которая была показана на этомъ чертежѣ (рис. 3), и имѣла бы радиусъ около 8 сантиметровъ.

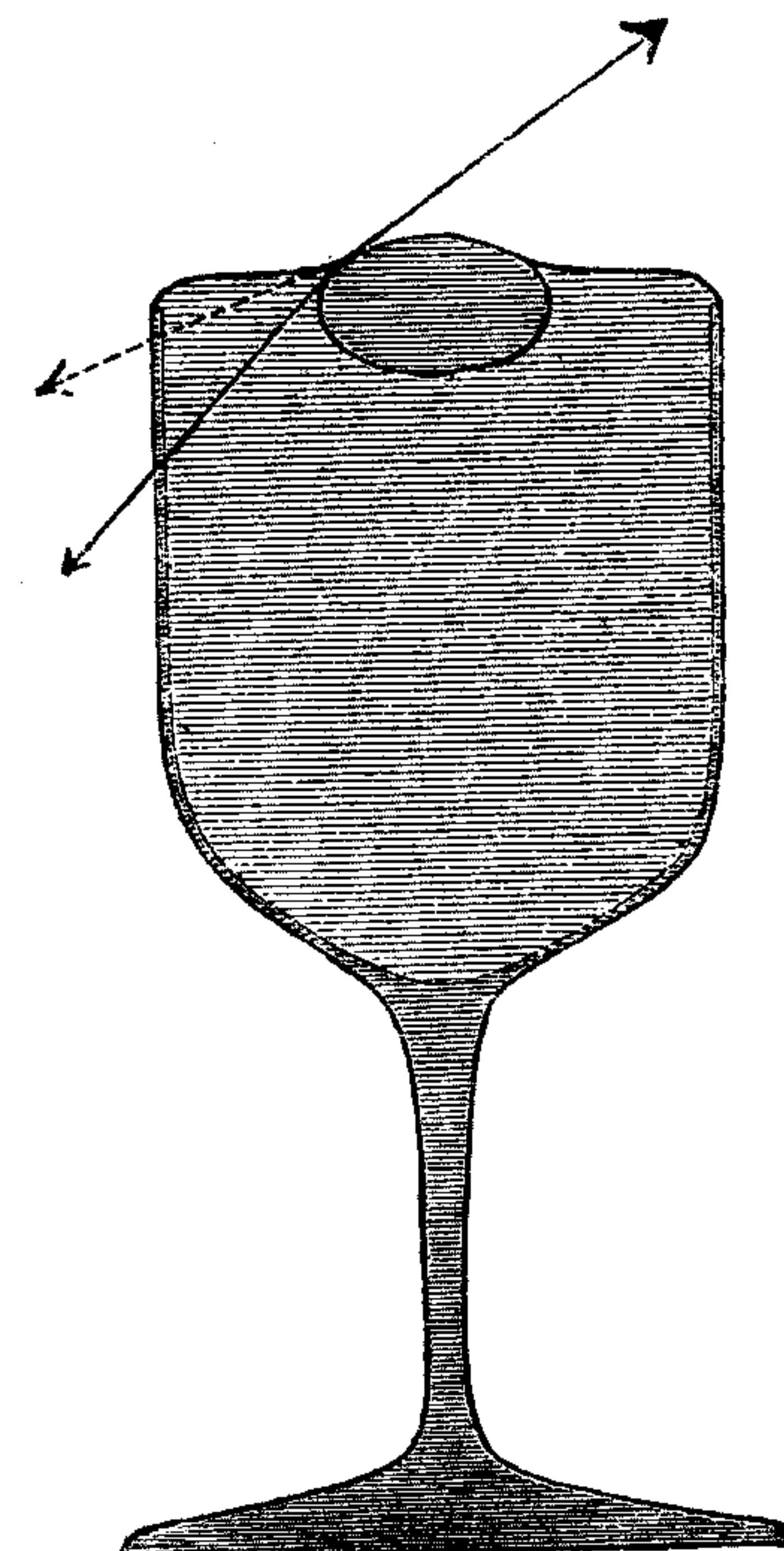


Рис. 9.

Если бы это былъ одинъ цинковый купоросъ, то при той же величинѣ periodъ его колебанія быль бы около $5\frac{1}{2}$ секундъ.

Рис. 9 представляетъ каплю цинковаго купороса, плавающаго на поверхности полной рюмки сѣроуглерода.

Наблюдая явленія при соприкосновеніи двухъ жидкостей, я нашелъ, что очень удобно употреблять цинковый купоросъ (который, какъ я нашелъ изъ опыта, имѣть одинаковое по-

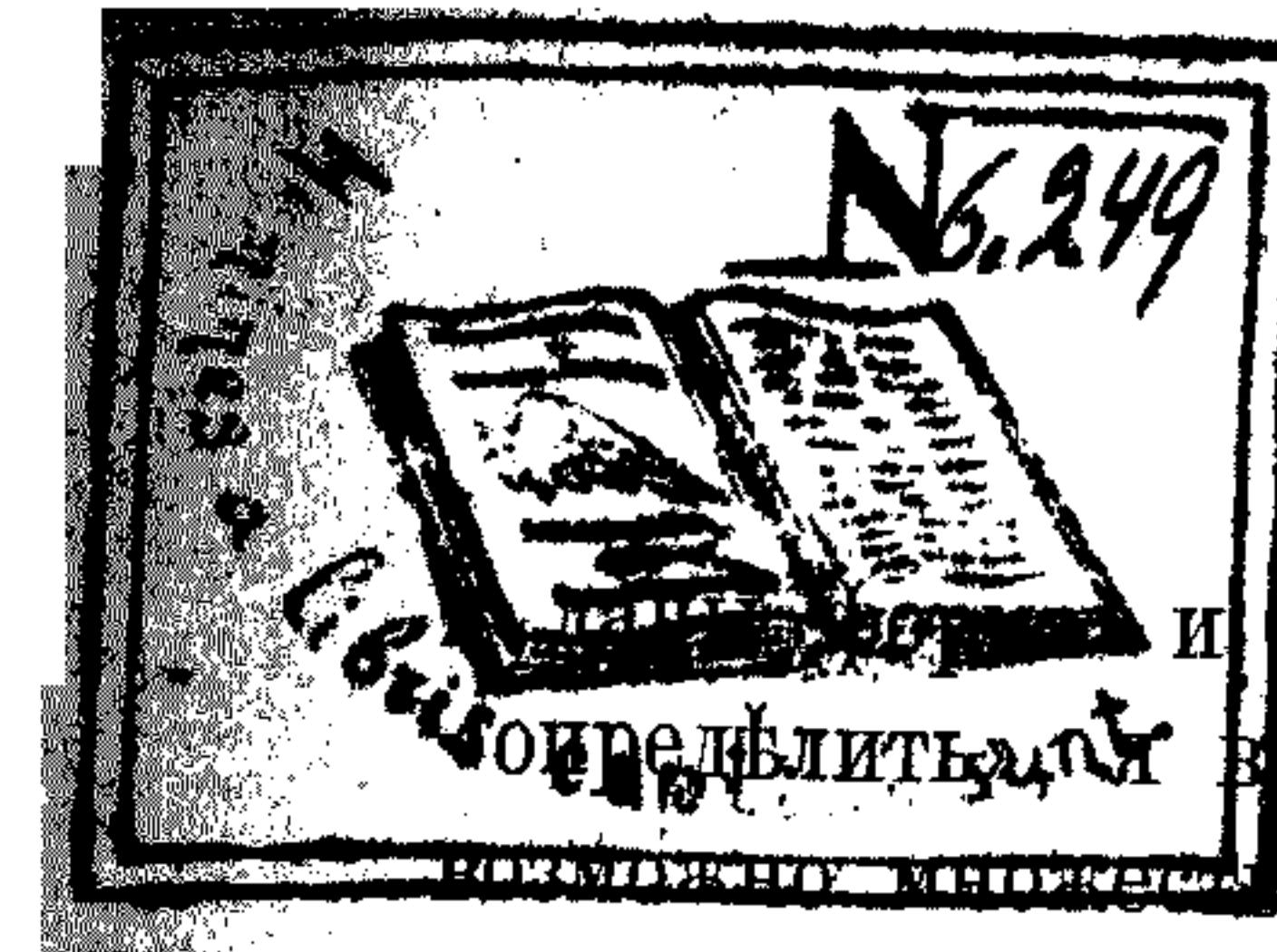
верхностное натяжение съ водою) и съроуглеродъ, такъ какъ эти жидкости, будучи приведены въ соприкосновеніе, не смываются другъ съ другомъ и между ними не происходит,— по крайней мѣрѣ, втечение короткаго времени,—химического взаимодѣйствія. Затѣмъ, цинковый купоросъ ¹⁾ можно сдѣлать большей, равной или меньшей плотности, чѣмъ съроуглеродъ, а съроуглеродъ можно окрасить въ болѣе или менѣе густой пурпуровый цветъ, что даетъ намъ возможность легко наблюдать капли которой либо изъ этихъ жидкостей на поверхности другой. Въ трехъ стаканахъ, которые находятся теперь передъ вами, прозрачная жидкость есть цинковый купоросъ,—въ одной стаканѣ ея плотность меныше, въ другой—равна, а въ третьей—больше, чѣмъ плотность съроуглерода,—и вы видите, какимъ образомъ при посредствѣ окрашенного съроуглерода можно всѣ эти явленія капель, покоящихся на поверхности жидкости или плавающихъ внутри жидкости, въ которой онѣ не диффундируютъ, наблюдать и, при соответственныхъ приспособленіяхъ, количественно опредѣлять.

Когда жидкость, находящаяся подъ вліяніемъ силы тяжесть, покоятся на твердомъ тѣлѣ, то она образуетъ такую фигуру, для которой разность кривизнъ свободной поверхности на различныхъ уровняхъ равна разности уровней, дѣленной на поверхностное натяжение, выраженное въ единицахъ силы, равныхъ вѣсу единицы объема жидкости; свободная же поверхность жидкости составляетъ со свободной поверхностью твердаго тѣла уголъ, косинусъ котораго, какъ выше указано, равенъ натяженію раздѣла, дѣленному на натяженіе свободной поверхности, или же уголъ въ 180° ,—послѣднее во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда отрицательно взятое натяженіе раздѣла больше натяженія свободной поверхности.

Уравненіе поверхности равновѣсія и условія на границахъ, выраженные вышеупомянутымъ образомъ словами, вполнѣ достаточны, чтобы опредѣлить фигуру, когда данъ объемъ жидкости

¹⁾ Замѣтимъ, что здѣсь все время говорится о растворѣ цинковаго купороса въ водѣ.

(Прим. перев.).



и размѣры твердаго тѣла. Когда я говорю опредѣлить, выражаясь нѣсколько двусмысленно. Понятно, возможны многое разшеній этой задачи, какъ, напр. въ случаѣ, когда твердое тѣло имѣть нѣсколько углубленій, въ которыхъ можетъ помѣститься часть жидкости или даже вся жидкость, или же нѣсколько выступовъ, на которыхъ могутъ висѣть нѣкоторыя части жидкости, или вся она.

Когда твердое тѣло симметрично вокругъ вертикальной оси то фигура, принимаемая жидкостью, есть фигура тѣла вращенія, и ея форма опредѣляется уравненіемъ, переданнымъ выше словами. Общее разшеніе этой задачи, по способамъ дифференциального и интегрального исчислѣнія, превосходитъ силы математического анализа, но мнѣ пришелъ въ голову много лѣтъ тому назадъ слѣдующій простой графической способъ полученія того, что въ математическомъ смыслѣ представляетъ полное разшеніе.

Начертимъ линію, представляющую ось этой поверхности вращенія. Эта линія будетъ вертикальна въ томъ приложеніи, которое мы сейчасъ сдѣляемъ, а потому мы и на рисункѣ будемъ называть ее и всякую линію, ей параллельную, вертикальной, а всякую линію, ей перпендикулярную,—горизонтальной. Разстояніе между двумя какими нибудь горизонтальными линіями на рисункѣ мы будемъ называть разностью уровней.

Проведите черезъ какую нибудь точку N оси линію NP , пересѣкающую эту ось подъ произвольнымъ угломъ (см. рис. 9 A). Изъ какой нибудь точки O , на линіи NP , какъ центра, опишите весьма малую дугу круга PP' , и пусть N' будетъ точка, въ которой линія OP' пересѣкается съ осью. Измѣрьте NP , $N'P'$ и разность уровней между точками P и P' . Обозначивъ эту послѣднюю черезъ δ

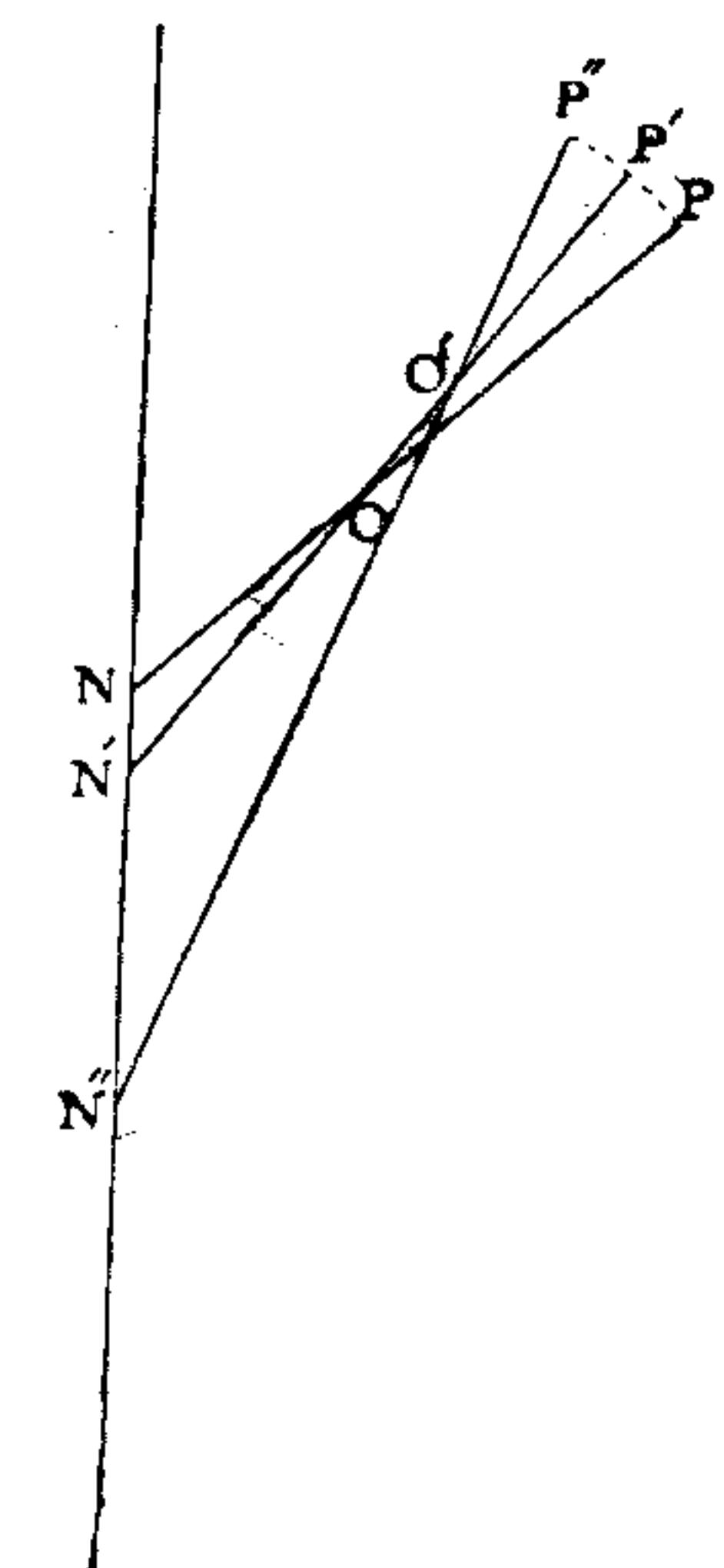


Рис. 9 A.

и взявъ линейнымъ параметромъ величину a , вычислите значение

$$\left(\frac{\delta}{a^2} + \frac{1}{OP} + \frac{1}{NP} - \frac{1}{NP'} \right)^{-1}.$$

Отложите эту длину на циркуль и, поставивъ ножку съ карандашемъ въ P' , помѣстите другую ножку въ O' на линіи $P'N'$ и изъ точки O' , какъ центра, опишите небольшую дугу, $P'P''$. Если вы будете продолжать дѣйствовать далѣе по тому же правилу, то послѣдовательныя весьма малыя дуги, вычерченныя такимъ образомъ, составятъ кривую линію, которая представляетъ собою образующую поверхности вращенія, заключающей въ себѣ жидкость и соотвѣтствующей условіямъ того частнаго случая, который разсматривался.

Этотъ способъ рѣшенія уравненія капиллярныхъ поверхностей вращенія оставилъ безъ употребленія втечение пятнадцати или двадцати лѣтъ, пока въ 1874 г. я не предоставилъ его г. Джону Пэрри (теперь профессору механики въ City and Guilds Institute), который занимался тогда въ лабораторіи натуральной философіи Глазговскаго университета. Онъ разработалъ этотъ вопросъ съ большой настойчивостью и умѣньемъ, и результатомъ его трудовъ явился рядъ искусно сдѣланныхъ рисунковъ, представляющихъ очень много разнообразныхъ случаевъ капиллярныхъ поверхностей вращенія. Я еще не успѣлъ приготовить къ печати эти, въ высшей степени поучительные и цѣнныя рисунки, но наиболѣе характеристичные изъ нихъ были воспроизведены въ увеличенномъ масштабѣ и находятся теперь на экранѣ передъ вами¹⁾). Три рисунка,—на которые я теперь указываю (рис. 10, 11 и 12)—

¹⁾ Рисунки, о которыхъ здѣсь идетъ рѣчь, были впервые опубликованы въ видѣ рис. 10—24 отчета Nature *) обѣ этой лекціи (22 и 29 июля и 19 августа 1886). Эти рисунки суть точныя копіи съ оригиналъныхъ чертежей г. Пэрри, и я считаю долгомъ указать на добросовѣстность и вниманіе, съ которыми отнесся къ своей работѣ г. Куперъ, граверъ Nature.

(Прим. автора).

*) См. прим. 1, стр. 1..

(Прим. перев.).

илюстрируютъ чисто теоретическія рѣшенія, — т. е. кривыя, здѣсь нарисованныя, не представляютъ дѣйствительныхъ ка-

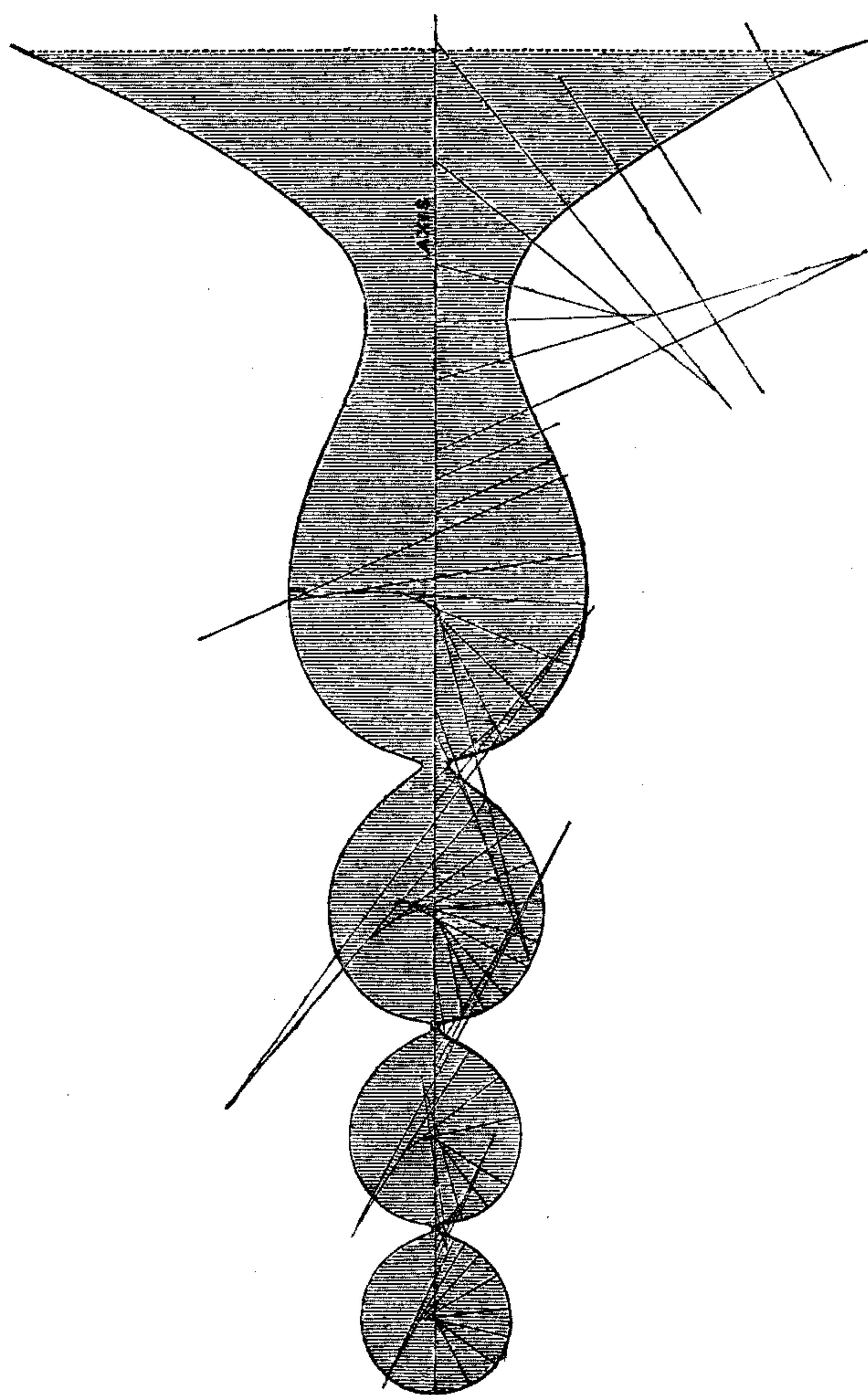


Рис. 10.

пиллярныхъ поверхностей,—впрочемъ, хотя такія математическія тонкости задачи въ высшей степени интересны и поучи-

тельны, но ихъ нельзя успѣть разобрать, какъ слѣдуетъ, въ то время, которымъ я теперь располагаю.

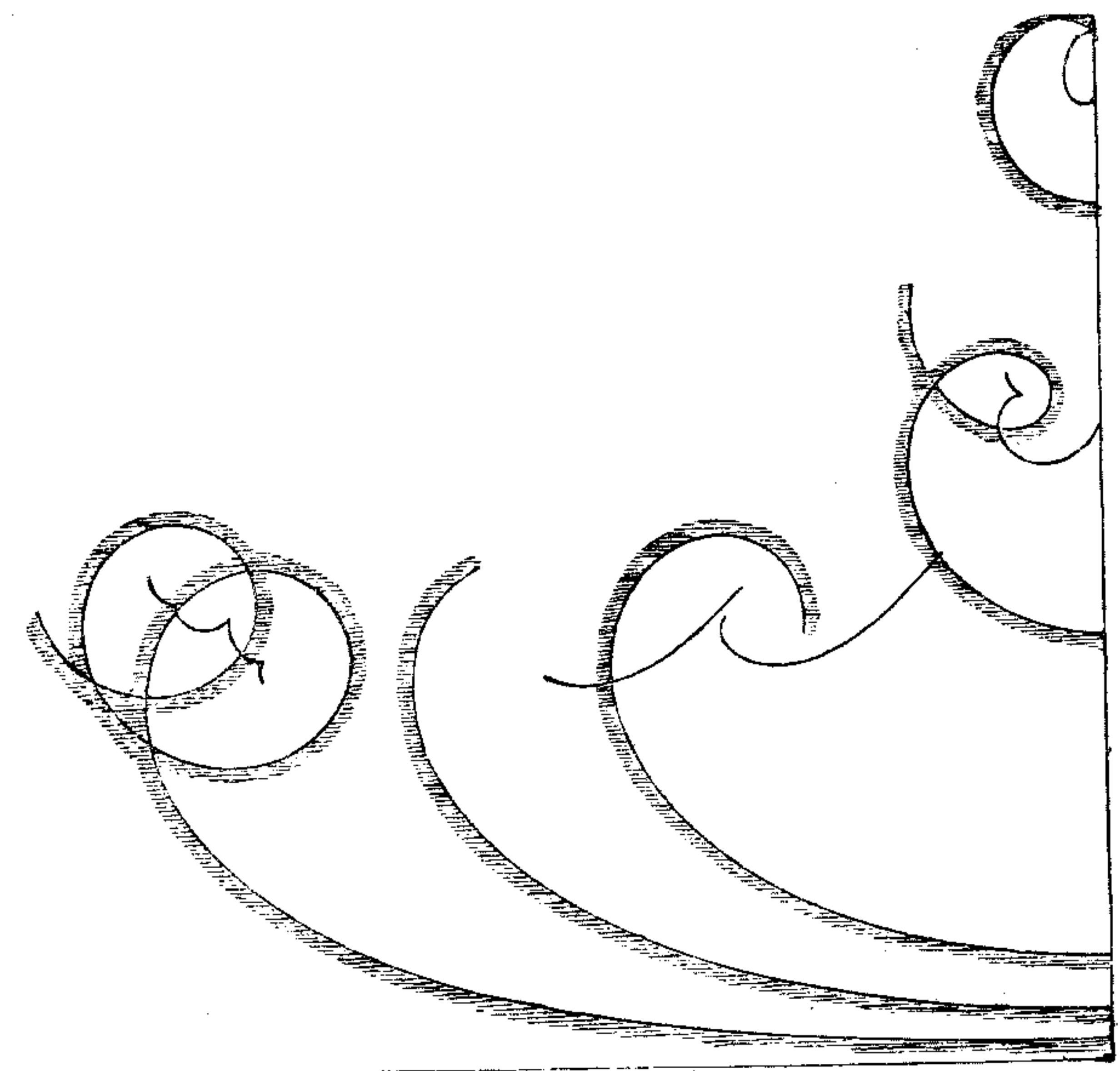


Рис. 11.

На другихъ же этихъ рисункахъ (рис. 13—28) мы видимъ нѣкоторыя части кривыхъ, существующихъ изображать дѣйствительныя капиллярныя поверхности въ сѣченіи. На рисункѣ 13 изображенъ твердый шаръ въ четырехъ различныхъ положеніяхъ въ соприкосновеніи съ поверхностью ртути, — а на рисункѣ 14 мы имѣемъ сѣченіе фигуры, форму которой принимаетъ ртуть, находящаяся въ \vee -образномъ круговомъ жолобѣ. Рисунки 15—28 (стр. 26—30) представляютъ поверхности воды въ разныхъ, относительно капиллярности, случаяхъ; масштабъ для каждой серии рисунковъ указанъ линіей, длина которой изображаетъ одинъ сантиметръ; пунктирная горизонтальная линія показываетъ положеніе свободного уровня воды. Рисунки достаточно ясны, чтобы не требовать никакихъ дальнѣйшихъ разъясненій, за исключеніемъ замѣчанія, что *вода*

изображена болѣе свѣтлой тѣнью, а *твердое тело* — болѣе темной.

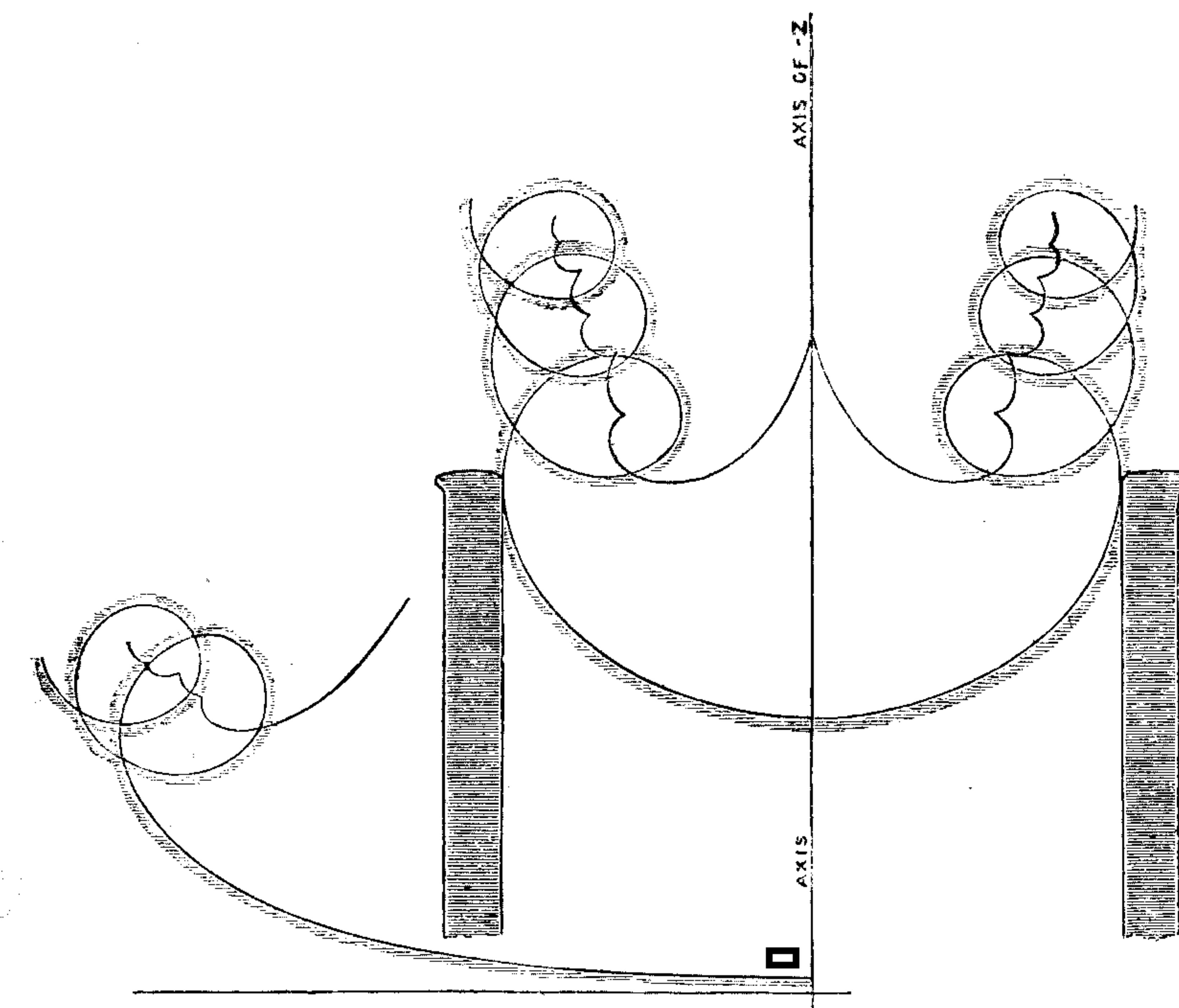


Рис. 12 1).

Рис. 13. Ртуть въ соприкосновеніи съ твердыми шарами (скажемъ, стеклянными).

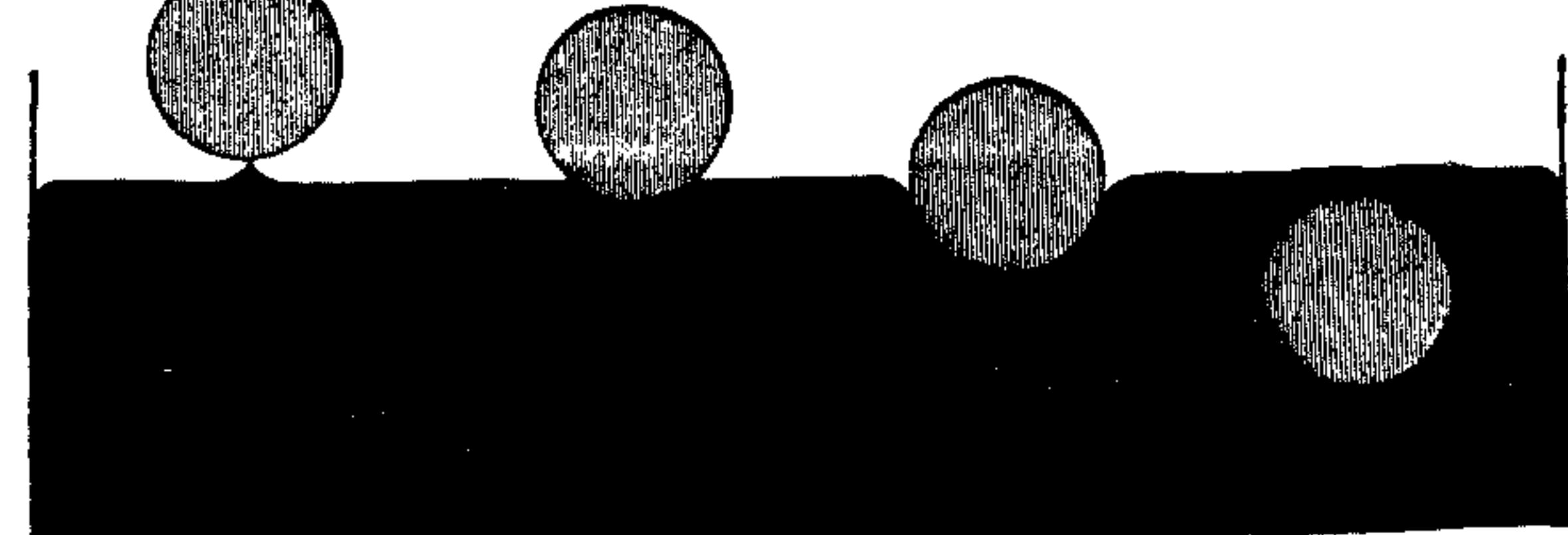
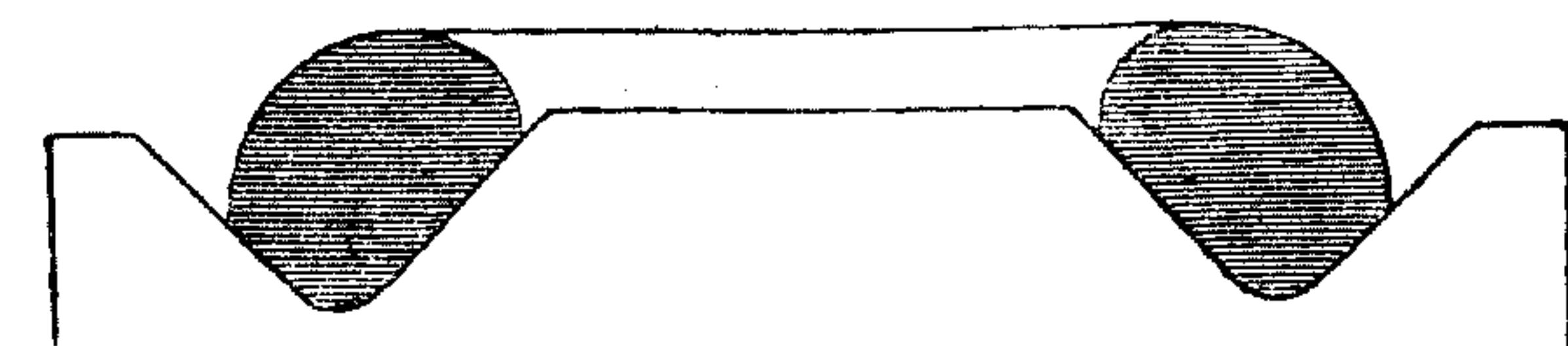


Рис. 14. Видъ \vee -образного кругового жолоба, содержащаго ртуть, въ сѣченіи.



¹⁾ Axis of Z = ось Z'овъ.

(Прим. перев.).

Мы представляли себѣ, что наши куски окрѣпшей воды внезапно дѣлались жидкими, и воображали ихъ заключенными

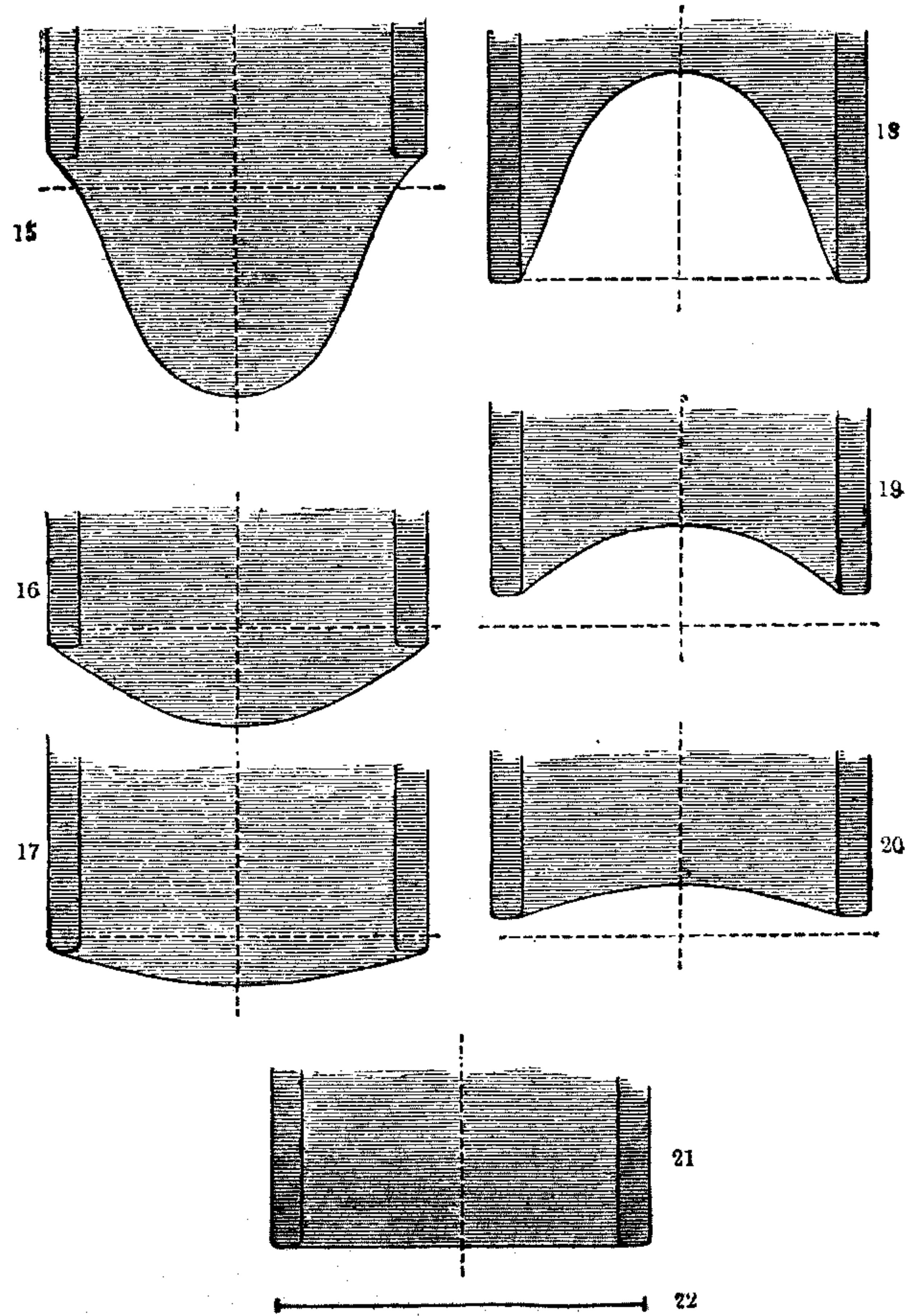


Рис. 15—22. Вода въ стеклянныхъ трубкахъ, внутренний диаметръ которыхъ можно найти при помощи рис. 22, изображающаго длину сантиметра. Пунктирная горизонтальная линія представляетъ на каждомъ рисункѣ положение уровня свободной поверхности.

внутри идеальныхъ стягивающихся пленокъ; у меня здѣсь есть приспособленіе, при помощи котораго я могу демонстрировать, въ увеличенномъ размѣрѣ, висящую каплю, заключенную не

въ идеальную, а въ действительную пленку, изъ тонкаго слоя каучука. Приборъ, который, вы видите, виситъ здѣсь съ потолка, есть толстое металлическое кольцо, отверстіе котораго затянуто тонкимъ листомъ каучука, привязаннымъ къ нему со всѣхъ сторонъ, и натянутымъ равномѣрно во всѣхъ направлѣніяхъ—настолько сильно, насколько можно было сдѣлать это безъ особыхъ приспособленій для натягиванія каучука и привязыванія его къ кольцу, когда онъ натянутъ.

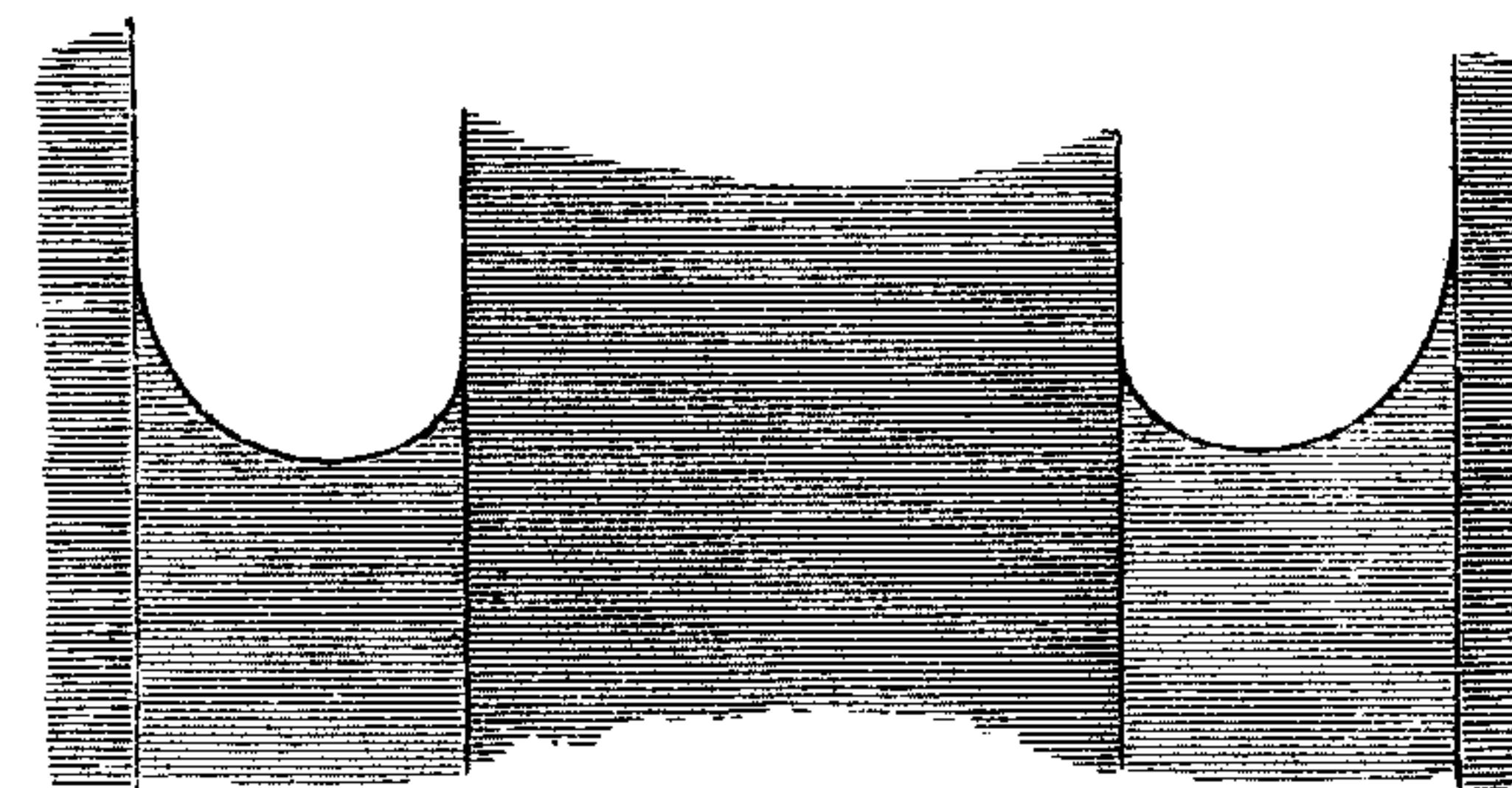


Рис. 23. Вода, находящаяся въ пространствѣ между твердымъ цилиндромъ и концентрическимъ съ нимъ полымъ цилиндромъ.

Я наливаю теперь воды,—и мы видимъ, какъ это гибкое дно принимаетъ почти совсѣмъ такую же форму, какую имѣла капля, которую вы видѣли повисшую у меня на пальцѣ, когда я погрузилъ его въ сосудъ съ водою и затѣмъ вынулъ оттуда (см. выше рис. 16). Я продолжаю влиять еще воды, и форма постепенно и медленно измѣняется, сохрания все время общій видъ капли,—такой, какая изображена на рис. 15,—пока вдругъ, когда влито известное количество воды, не происходитъ внезапной перемѣны. Эта внезапная перемѣна¹⁾ соответствуетъ отрыванію настоящей капли воды, напр., съ носика крана самовара (tea-urn), когда кранъ на столько мало

¹⁾ Приведемъ изъ очень интересной книги Бойса «Мыльные пузыри» (Soap Bubbles), имѣющейся въ французскомъ переводе съ дополненіями Гильома [Guillaume, Bulles de savon, Paris, 1892] (рис. 28 А, стр. 31), изображающій «нижнее» положеніе «капли» воды въ каучуковомъ мѣшкѣ въ этомъ опытѣ Томсона (капля—удлиненная). «Верхнему» положенію соответствуетъ капля болѣе плоская (какъ на рис. 15).

(Прим. перев.)

открыть, что капли образуются очень медленно. Но капля въ мѣшкѣ изъ каучука не отпадаетъ внизъ, такъ какъ натяженіе

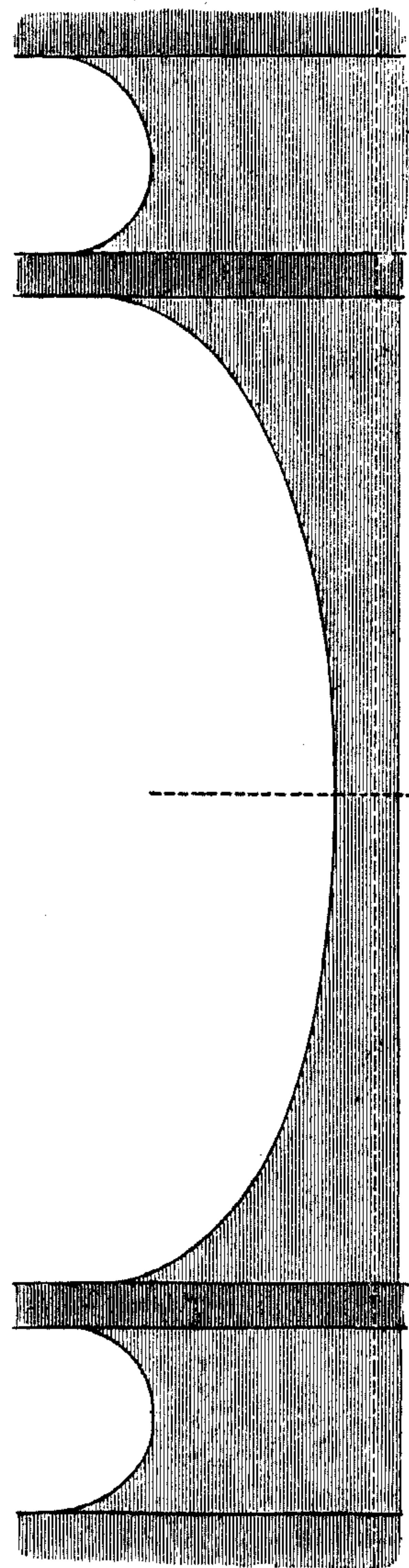


Рис. 24. Вода, заключенная въ двухъ цилиндрахъ, имѣющихъ общую ось; масштабъ изображенъ на рис. 28.

слоя каучука очень сильно увеличивается, когда онъ растянуть:

Натяженіе дѣйствительной пленки на поверхности капли воды остается постояннымъ, какъ бы велико ни было растяженіе

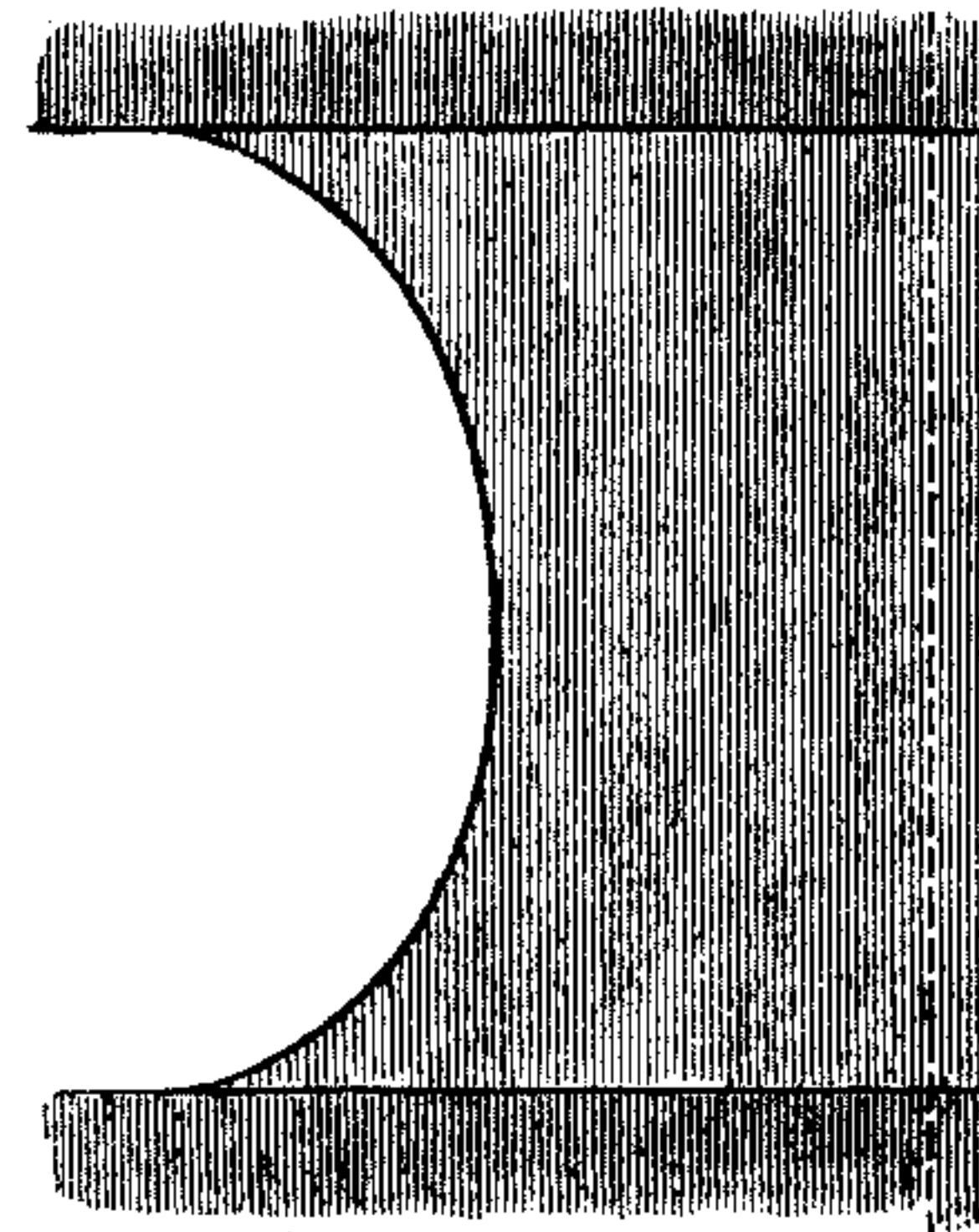


Рис. 25

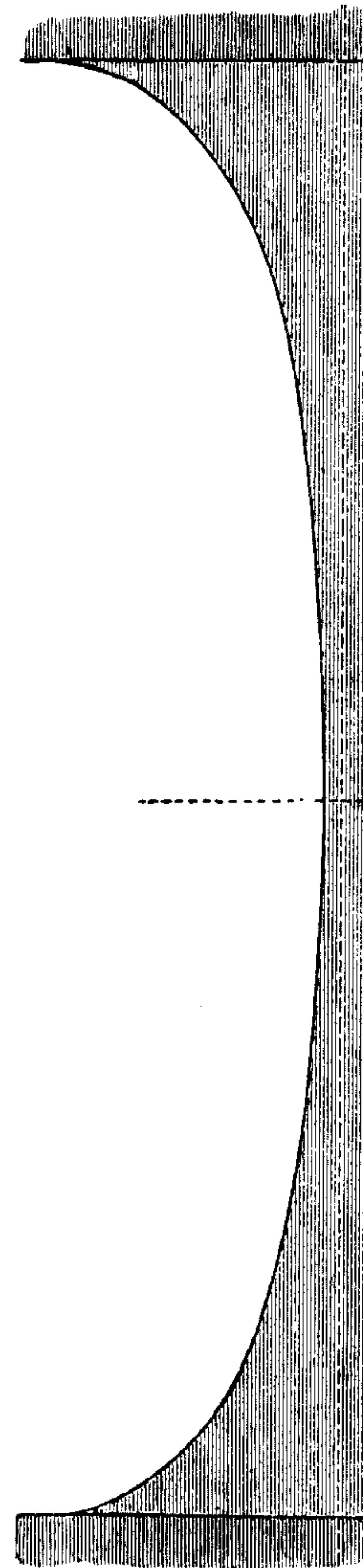


Рис. 25 и 26. Вода, находящаяся въ полыхъ цилиндрахъ (трубкахъ); масштабъ изображенъ на рис. 28.

Рис. 26.

поверхности, и потому капля отрывается, какъ только сверху добавлено достаточно воды, чтобы дать каплѣ тотъ наиболь-

шій объемъ, который можетъ висѣть на трубкѣ при тѣхъ ея размѣрахъ, какіе имѣются въ данномъ частномъ случаѣ.

Теперь я привожу въ дѣйствіе этотъ сифонъ, постепенно вытягивая часть воды, и капля, мы видимъ, постепенно уменьшается, пока снова не происходитъ внезапнаго измѣненія и она не принимаетъ формы, которую мы наблюдали (рис. 16, выше), когда я первый разъ налилъ сюда воды. Я быстро прекращаю дѣйствіе сифона, и мы теперь видимъ, что большая капля имѣеть двѣ возможныя формы устойчиваго

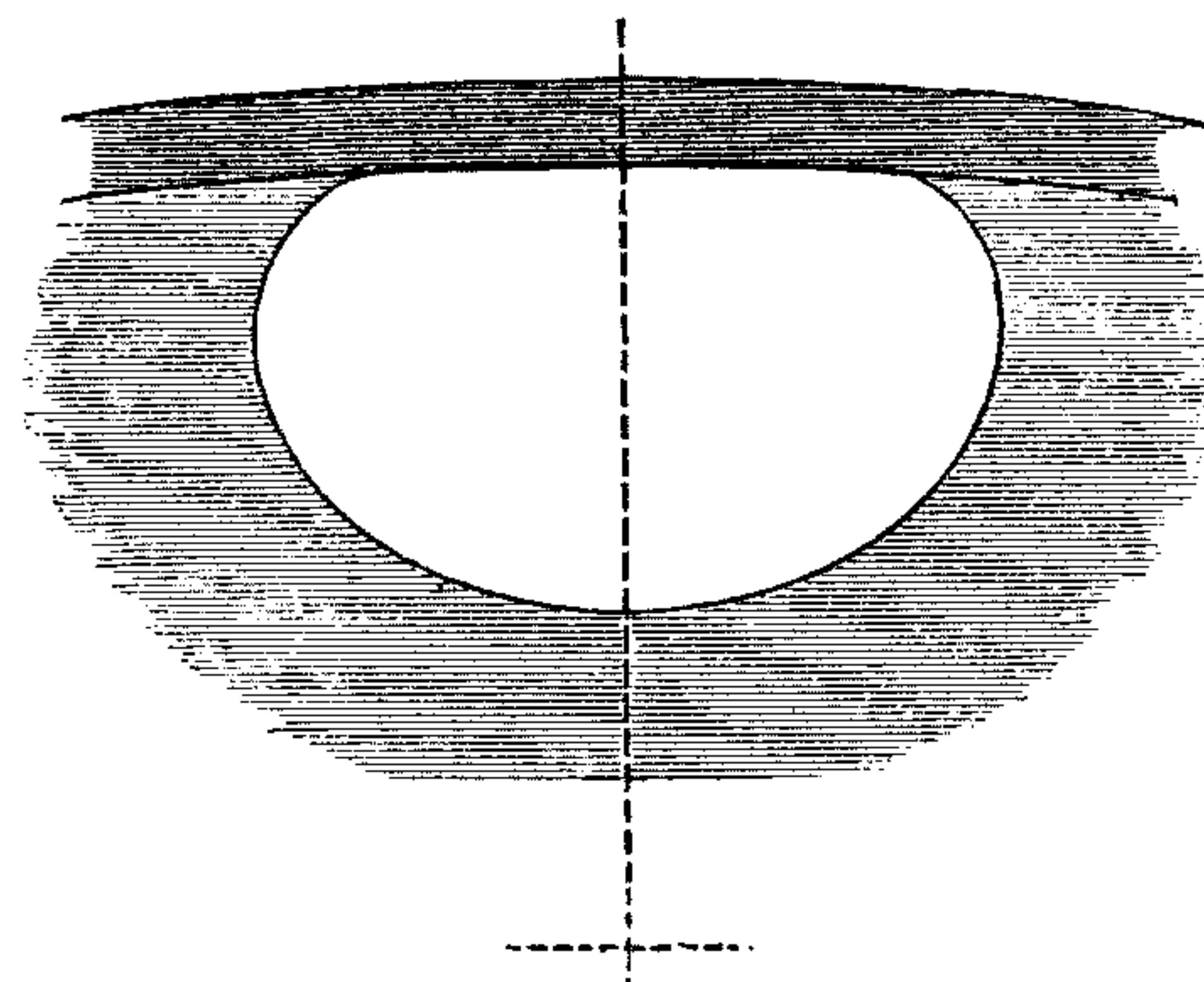


Рис. 27. Съченіе пузыря, воздуха въ трубкѣ уровня, наполненной водой и согнутой такъ, что ея ось есть часть окружности большого радиуса: масштабъ изображенъ на рис. 28.

Рис. 28. Изображаетъ длину одного сантиметра для рисунковъ 24—27.

равновѣсія съ неустойчилою промежуточною между ними формою. Вотъ доказательство на опытѣ этого предложенія. Взять каплю въ ея верхней устойчивой формѣ, я заставляю ее колебаться такъ, чтобы последовательно уменьшалась и увеличивалась ея длина по оси, и вы видите, что, когда колебанія таковы, что увеличеніе длины капли, вызываемое ими, достигаетъ известнаго предѣла, то происходитъ внезапное превращеніе въ нижнюю устойчивую форму и мы

можемъ оставить всю массу совершасть небольшія колебанія около этой низшей формы. Теперь я увеличиваю эти небольшія колебанія, и мы видимъ, что, разъ только при одномъ изъ—увеличивающихся по амплитудѣ — колебаній вверхъ, сжатіе длины оси достигаетъ предѣла, о которомъ мы уже говорили, то снова происходитъ внезапное измѣненіе, которое я вызываю,

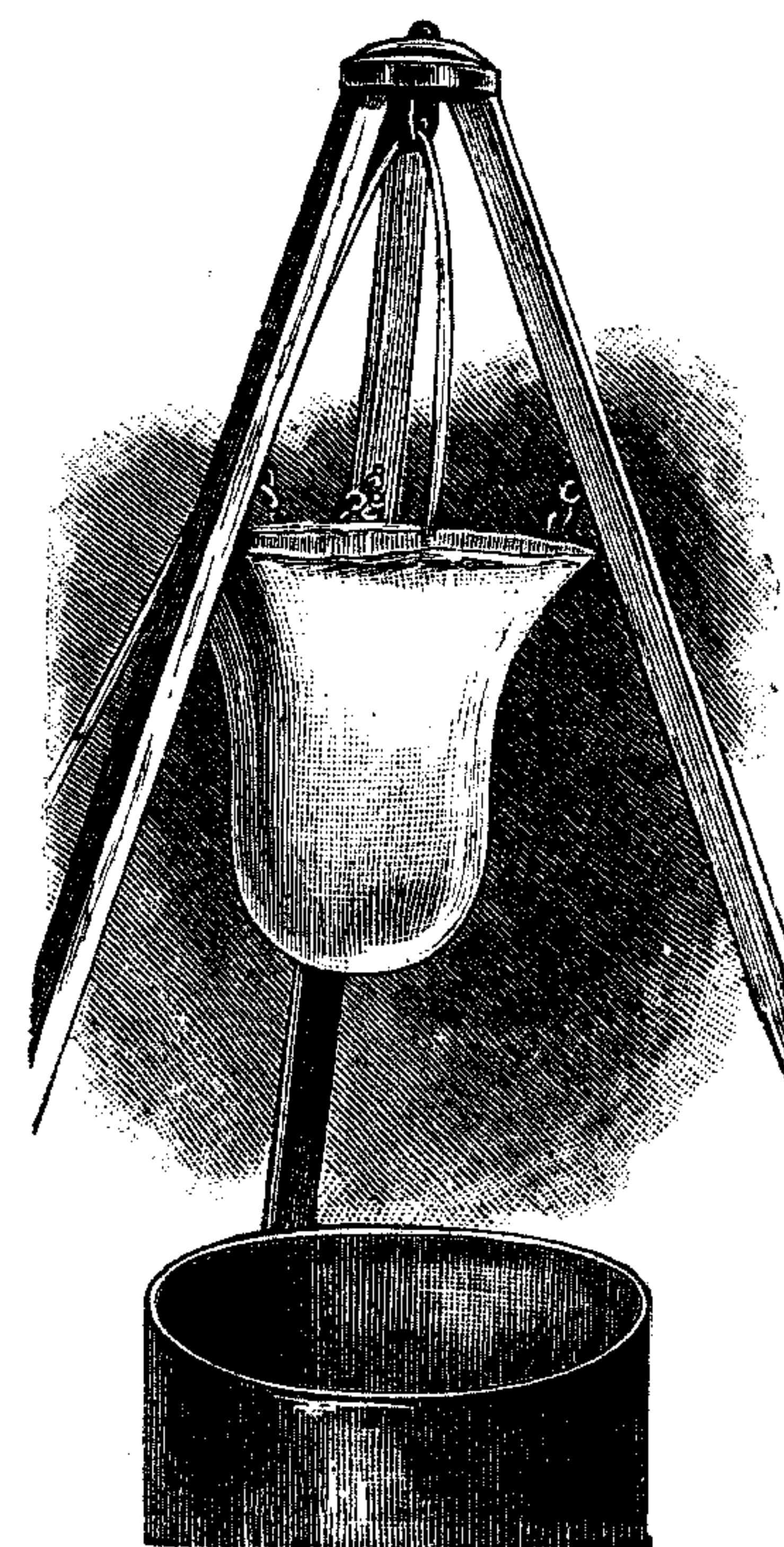


Рис. 28 А.

слегка приподымая руками каплю,— и масса принимаетъ верхнюю устойчивую форму и опять совершаетъ у насъ небольшія колебанія около этого положенія.

Два положенія устойчиваго равновѣсія и одно промежуточное неустойчивое есть любопытная особенность гидростатической задачи о формѣ воды, поддерживаемой каучукомъ такъ, какъ это имѣеть мѣсто въ этомъ опыте.

У мене здѣсь имѣется простое расположение приборовъ, при помощи котораго, съ соответствующими оптическими средствами, какъ катетометръ и микроскопъ, мы можемъ произвести надъ дѣйствительными каплями воды, или другого жидкаго тѣла, измѣренія съ цѣлью определенія величины капиллярныхъ постоянныхъ. Для устойчивости капля, висящая на концѣ открытой трубки, должна быть чуть-чуть

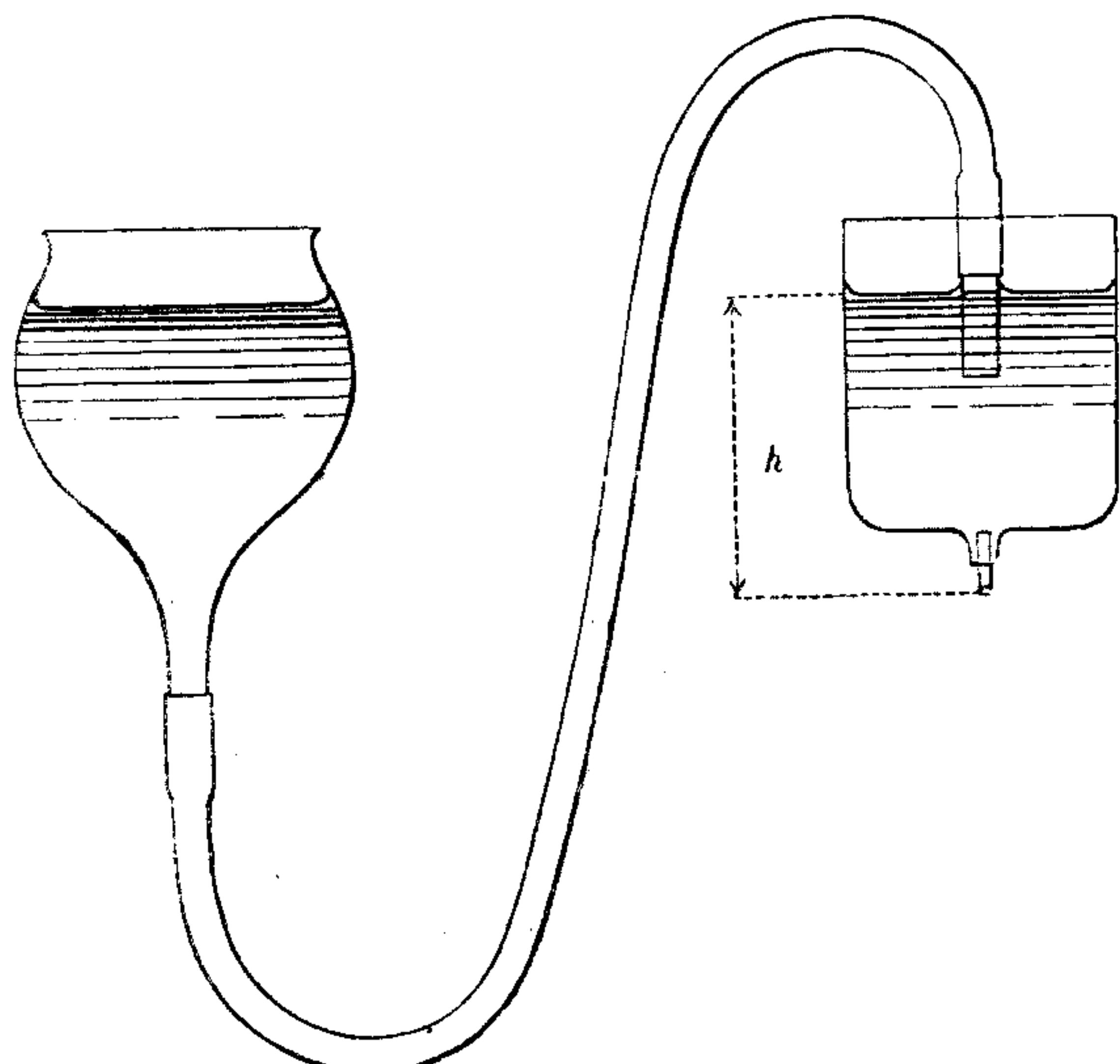


Рис. 29.

меньше полусферы, но для удобства она изображена, какъ на увеличенномъ рисункѣ кончика трубы (рис. 30), точно полу-сферической. При помощи сифона¹⁾ можно измѣнять разность уровней h между уровнемъ свободной поверхности воды въ сосудѣ, къ которому прикрепленъ этотъ кончикъ трубы, и низшей точкой капли, висящей съ этого кончика, и затѣмъ можно измѣрять соотвѣтственные величины h и r , радиуса кривизны капли въ низшей точкѣ ея. Это измѣреніе кривизны капли легко сдѣлать съ достаточной точностью по известнымъ микроскопическимъ способамъ. Поверхностное натяженіе T

¹⁾ Рис. 29.

(Прим. перев.).

жидкости вычисляется изъ радиуса кривизны r и наблюденной разности уровней h по слѣдующей формулѣ:

$$\frac{2T}{r} = h;$$

такъ, напр., если изслѣдуемая жидкость есть вода, обладающая поверхностнымъ натяженіемъ въ 75 миллиграммовъ на длину сантиметра, а $r=0.05$ см., то h равно тремъ сантиметрамъ.

Рис. 31, изображающій каплю чернилъ въ тотъ самый моментъ когда она отрывается съ горлышка стеклянной воронки, срисованъ съ моментальной фотографіи, любезно одолженной мнѣ

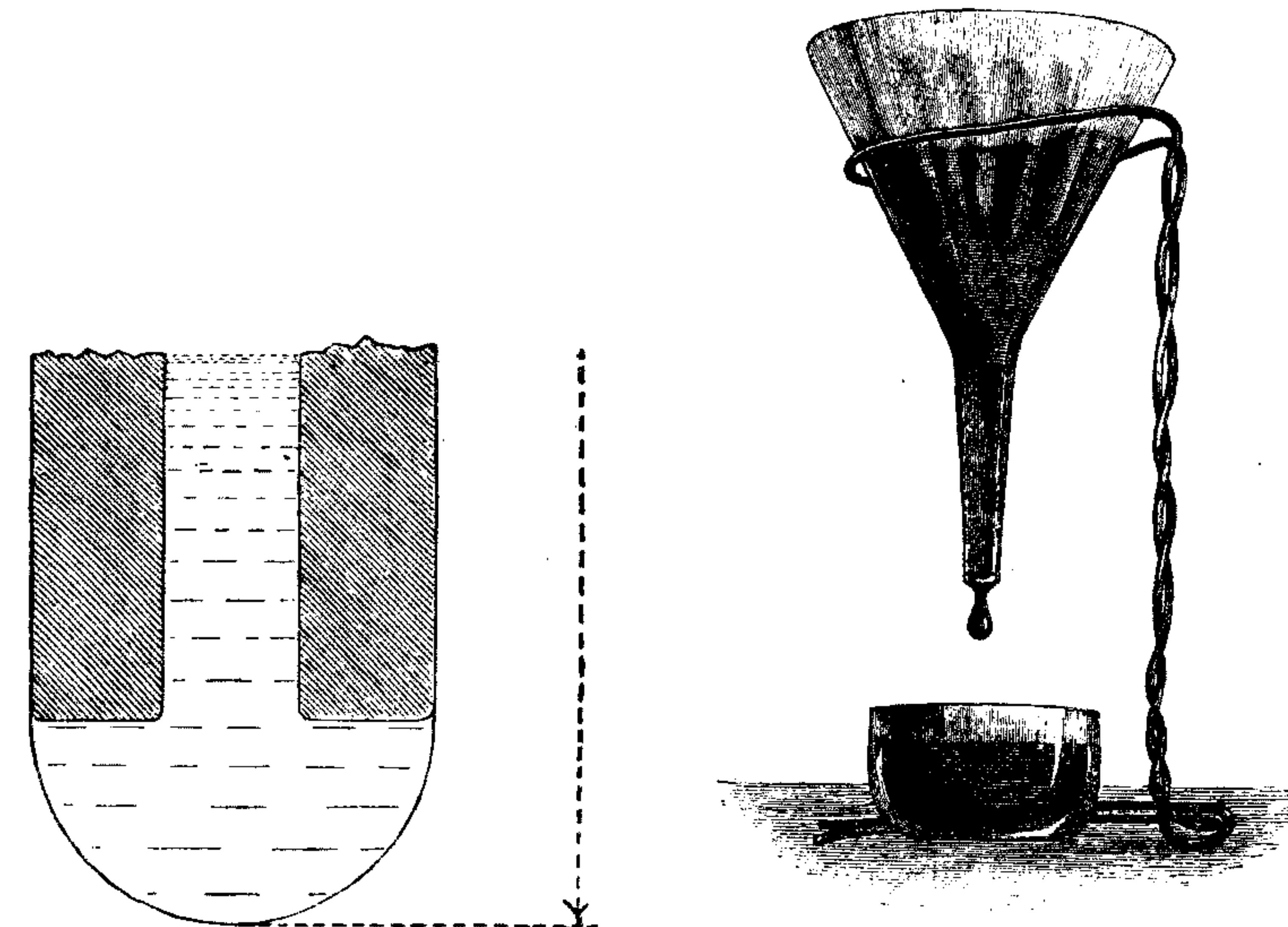


Рис. 30.

Рис. 31.

г. Грагамомъ изъ Скипнесса въ Арджилльшайрѣ (Mr. Graham, of Skipness, Argyllshire). Онъ снялъ ее самъ на «быстроработающей пластинкѣ Ильфордъ» (Ilford quick plate) съ капли чернилъ, въ моментъ самаго ея отрыва съ горлышка стеклянной воронки.

Много опытовъ можно придумать для иллюстраціи дѣйствія поверхностного натяженія въ тѣхъ случаяхъ, когда двѣ жидкости, у которыхъ поверхностная натяженія очень различны, приводятся въ соприкосновеніе другъ съ другомъ. Такъ, мы

можемъ помѣстить на поверхность тонкаго слоя воды, равномѣрно смачивающей поверхность стеклянной пластинки или подноса, каплю алкоголя или эфира и вызвать такимъ образомъ уменьшеніе поверхностнаго натяженія жидкаго слоя въ тѣхъ мѣстахъ, где онъ покрыть алкоголемъ или эфиромъ. Съ другой стороны, если у насъ есть поверхностный слой очень разведенаго водой алкоголя, то мы можемъ, вызывая его быстрое испареніе, устроить такъ, что въ одномъ какомъ нибудь мѣстѣ будетъ отниматься часть алкоголя, и такимъ образомъ будетъ увеличиваться поверхностное натяженіе жидкаго слоя въ этомъ мѣстѣ вслѣдствіе уменьшенія тамъ процентнаго содержанія алкоголя.

Въ этомъ неглубокомъ корытцѣ, полированное стеклянное дно котораго поставлено на бѣлую бумагу, чтобы легче было видѣть тѣ явленія, которыя сейчасъ будуть показаны, находится тонкій слой воды, окрашенной анилиномъ въ синій цвѣтъ. Теперь, когда я пускаю на поверхность воды небольшое количество алкоголя изъ этой маленькой пипетки, наблюдайте, какое дѣйствіе оказываетъ приведеніе въ соприкосновеніе поверхности алкоголя, имѣющаго натяженіе всего въ 25·5 динъ на линейный сантиметръ, съ поверхностью воды, имѣющей поверхностное натяженіе въ 75 динъ на линейный сантиметръ. Посмотрите, какъ вода, такъ сказать, оттягивается во всѣ стороны отъ алкоголя, образуя круглый валикъ, окружающій углубленіе или небольшой кратеръ, который постепенно расширяется и углубляется, пока въ центрѣ совсѣмъ не обнажится стеклянная пластинка и жидкость не поднимется вокругъ него въ видѣ круглого возвышенія. Точно также, когда я провожу кисточкой, смоченной въ алкоголь, линію поперекъ корытца, мы видимъ, какъ вода отступаетъ по обѣимъ сторонамъ части корытца, тронутой кисточкой. Теперь, когда я наклоню стеклянное корытце, въ высшей степени интересно наблюдать, какъ окрашенная вода, содержащая небольшую примѣсь алкоголя, стекаетъ внизъ по наклонной плоскости—сначала отдѣльными каплями, которая затѣмъ соединяются вмѣстѣ и образуютъ тонкія непрерывныя струйки.

Эти и другія весьма известныя явленія, включая сюда и интересное явленіе «слезъ крѣпкаго вина», были описаны и объяснены въ сообщеніи «о нѣкоторыхъ любопытныхъ движеніяхъ, наблюдавшихъ на поверхностяхъ вина и другихъ спиртныхъ напитковъ», сдѣланномъ моимъ братомъ, профессоромъ Джемсомъ Томсономъ, въ секціи А Британской Ассоціаціи на съездѣ въ Глазго въ 1855 г. ¹⁾.

Я нашелъ, что съ растворомъ, содержащимъ около 25 процентовъ алкоголя, «слезы» получаются легко и хорошо, но что ихъ совсѣмъ нельзя получить, когда процентное содержаніе алкоголя значительно меньше или значительно больше 25 процентовъ.

Въ двухъ изъ этихъ бутылокъ окрашенный растворъ содержитъ, въ одной, одинъ процентъ, а въ другой, 90 процентовъ алкоголя, и въ нихъ, вы видите, невозможно вызвать «слезы»; но, если я возьму эту третью бутылку, въ которой окрашенная жидкость заключаетъ въ себѣ 25 процентовъ алкоголя, и произведу съ нею опытъ, то вы видите,—вотъ,—«слезы» тотчасъ начинаютъ получаться. Я сначала наклоняю и поворачиваю бутылку такъ, чтобы смочить жидкостью ея внутреннюю поверхность, затѣмъ, оставляя ее въ полномъ покое, я вынимаю пробку и при помощи этой бумажной трубки удаляю изъ бутылки смѣсь воздуха и паровъ алкоголя и впускаю на мѣсто ея свѣжій воздухъ. Такимъ путемъ я вызываю испареніе алкоголя со всѣхъ поверхностей жидкости внутри бутылки, и тамъ, где жидкость имѣеть видъ тонкой пленки, она очень быстро теряетъ большую часть своего алкоголя. Вслѣдствіе этого поверхностное натяженіе тонкой пленки жидкости на внутренней стѣнкѣ бутылки становится все больше и больше, чѣмъ поверхностное натяженіе у массы жидкости на днѣ, и въ тѣхъ мѣстахъ, где сходятся эти двѣ поверхности жидкости съ различными поверхностными натяженіями, у насъ и получается явленіе «слезъ». Теперь,—какъ только я ускоряю испареніе,—вы видите, какъ образуется горизонтальное кольцо жидкости и какъ оно взирается по стѣнкамъ бутылки,—затѣмъ мы ви-

¹⁾ См. Прибавленіе А къ этой лекціи, стр. 39. (Прим. автора).

димъ, какъ поднявшаяся такимъ образомъ жидкость собирается въ капли, которые стекают по стѣнкамъ и придаютъ видъ бахромы пространству, по которому, поднимаясь, прошло это жидкое кольцо¹⁾.

Эти явленія можно также наблюдать, употребляя вмѣсто алкоголя — эфиръ, у которого поверхностное натяженіе равно почти тремъ четвертямъ натяженія спирта. При употребленіи эфира можно кромѣ того видѣть одно весьма любопытное его дѣйствіе²⁾. Я обмакиваю кисточку въ эфиръ и подношу ее близко, не прикасаясь, однако, къ поверхности воды. Я вижу, какъ теперь образуется углубленіе, которое становится болѣе или менѣе глубокимъ въ зависимости отъ того, будеть ли кисточка ближе или дальше отъ нормальной поверхности воды,—и это углубленіе слѣдуетъ за кисточкою, когда я ее двигаю.

А вотъ опытъ, указывающій вліяніе тепла на поверхностное натяженіе. Часть этой оловянной пластинки покрыта тонкимъ слоемъ смолы. Я кладу эту оловянную пластинку на верхъ этого горячаго мѣдного цилиндра, и мы сейчасъ же видимъ, какъ жидкая смола сбѣгаетъ съ части пластинки, находящейся непосредственно надъ концомъ нагрѣтаго мѣдного цилиндра, оставляя на поверхности пластинки кружокъ, почти

¹⁾ Слѣдующія строки изъ „Теплоты“ (Heat) Клерка Максвэлля, изд. 1871, стр. 273, содержать интересную ссылку на эту часть нашего предмета:

«Это явленіе, известное подъ названіемъ слезъ крѣпкаго вина, было впервые объяснено на основаніи этихъ принциповъ профессоромъ Джемсомъ Томсономъ. Вѣроятно, что на это явленіе ссылаются въ Притчахъ, XXIII, 31³⁾, какъ на указаніе крѣпости вина. Движеніе прекращается въ закрытой пробкой бутылкѣ, какъ только образуется столько паровъ алкоголя, сколько нужно для равновѣсія съ жидкимъ алкоголемъ, содержащимся въ винѣ».

(Прим. автора).

²⁾ См. статью Клерка Максвэлля (стр. 65) „Капиллярное Притяженіе“⁴⁾ въ 9-мъ изданіи Encyclopaedia Britannica. (Прим. автора).

³⁾ «Не смотри на вино, какъ оно краснѣетъ, какъ оно искрится въ чашѣ, какъ оно ухаживается ровно». (Прим. перев.).

⁴⁾ Томсонъ вездѣ даетъ невѣрное название статьи Максвэлля; — въ упомянутой энциклопедіи она озаглавлена «Капиллярное дѣйствіе» (Capillary Action), а не «Капиллярное притяженіе» (Capillary Attraction). (Прим. перев.).

совсѣмъ свободный отъ смолы, и показывая этимъ, насколько поверхностное натяженіе горячей смолы значительно менѣе, чѣмъ натяженіе холодной.

Замѣчаніе 30 января, 1886. — Уравненія (8) и (9) на стр. 59 въ статьѣ Клерка Максвэлля «Капиллярное притяженіе» въ девятомъ изданіи «Encyclopaedia Britannica» не содержать членовъ, зависящихъ отъ взаимодѣйствія между двумя жидкостями, и изъ-за этого пропуска окончательная формула (10) и послѣдній параграфъ на этой страницѣ, напечатанный мелкимъ шрифтомъ, совершенно невѣрны. Параграфъ, непосредственно слѣдующій за уравненіемъ (10), читается такъ.

«Если эта величина положительна, то поверхность соприкосновенія будетъ стремиться стянуться и жидкости останутся раздѣленными. Если же она будетъ отрицательной, то молекулярные силы будутъ способствовать такому перемѣщенію жидкостей, которое стремится увеличить поверхность соприкосновенія, такъ что такія жидкости, если бы ихъ не раздѣляла сила тяжести, совершенно перемѣшились бы другъ съ другомъ. Однако, еще не открыто ни одного примѣра явленій этого рода, ибо тѣ жидкости, которыхъ смѣшиваются сами собою, смѣшиваются вслѣдствіе процесса диффузіи, представляющаго молекулярное движеніе, а не вслѣдствіе того, что раздѣляющаяся ихъ поверхность внезапно сморщивается и покрывается складками, какъ было бы въ томъ случаѣ, если T было бы отрицательнымъ».

Мнѣ кажется, что этотъ взглядъ ошибочень, а что, наоборотъ, это «сморщваніе», дѣйствительно, имѣть мѣсто, какъ *самое начало диффузіи*. То, что я высказалъ въ этой лекціи, какъ это выше изложено въ текстѣ, относительно соотношенія между натяженіемъ поверхности раздѣла и диффузіей, кажется мнѣ правильнымъ взглядомъ на этотъ случай.

Можно также сдѣлать замѣчаніе, что Клеркъ Максвэлль въ напечатанномъ крупнымъ шрифтомъ и предшествующемъ уравненію (1) параграфѣ, на стр. 59, и въ примѣненіяхъ термина «потенциальная энергія» къ величинѣ E , напечатанныхъ мелкимъ

шифтомъ, называлъ *энергіей* то, что въ сущности есть потеря энергіи или отрицательная энергія; та же оплошность чрезвычайно затемняетъ смыслъ мелкаго шрифта на стр. 60.

Любопытное и интересное указаніе, на верху второго столбца стр. 63, относительно капли съроуглерода въ соприкосновеніи съ каплей воды въ капиллярной трубкѣ приводило бы къ непрерывному движению, будь оно вѣрно для трубы, не смоченной раньше водой на протяженіи части ея канала, — «...если капля воды и капля сърнистаго углерода помыщены, соприкасаясь другъ съ другомъ, въ горизонтальной капиллярной трубкѣ, то съроуглеродъ будетъ гнать воду вдоль трубы».

Дополнительное замѣчаніе 5 іюня 1886.—Я старательно пробовалъ сдѣлать опытъ, указанный въ предыдущей фразѣ, и не получилъ указанного движенія.

ПРИБАВЛЕНИЕ А.

О нѣкоторыхъ любопытныхъ движеніяхъ, наблюдавшихъ на поверхностяхъ вина и другихъ спиртныхъ напитковъ.

(Сообщеніе, сдѣланное профессоромъ Джемсономъ Томсономъ въ секціи А Британской Ассоціаціи на съездѣ въ Глазго въ 1855 г.; Brit. Assoc. Report for 1855, ч. II, стр. 16—17).

Явленія капиллярного притяженія въ жидкостяхъ объясняются, согласно общепринятой теоріи д-ра Юнга, существованіемъ силъ, эквивалентныхъ натяженію поверхности жидкости, одинаковому по всемъ направленіямъ и не зависящему отъ формы поверхности. Эта сила натяженія неодинакова у различныхъ жидкостей. Такъ, она оказывается гораздо меньше у алкоголя, чѣмъ у воды. Этотъ фактъ даетъ объясненіе нѣкоторымъ весьма любопытнымъ движеніямъ, которыя можно, при различныхъ обстоятельствахъ, наблюдать на поверхностяхъ спиртныхъ напитковъ. Одна категорія этихъ явленій заключается въ томъ, что, если на середину поверхности воды въ стаканѣ осторожно помѣстить небольшое количество спирта или крѣпкаго спиртнаго напитка, то наблюдается быстрое движение на поверхности воды во вѣнчнюю сторону отъ того мѣста, куда былъ введенъ спиртъ. Его можно сдѣлать болѣе замѣтнымъ, если посыпать немногимъ мелкаго порошка на поверхность воды. Другая категорія явленій состоить въ томъ, что, если стѣнки сосуда смочить водою выше общаго уровня жидкости и если въ достаточномъ количествѣ ввести спиртъ по серединѣ сосуда или близъ краевъ, то можно замѣтить, какъ жидкость поднимается по стѣнкамъ стакана, пока она не соберется въ нѣкоторыхъ мѣстахъ въ такомъ количествѣ, что ея вѣсъ окажется преобладающимъ, и она не упадетъ внизъ. Авторъ объясняетъ эти двѣ категоріи явленій слѣдующимъ образомъ: болѣе богатыя водою части всей поверхности, имѣя большее натяженіе, чѣмъ части, болѣе богатыя алкоголемъ, энергично оттягиваютъ эти послѣднія, — иногда даже настолько сильно, что образуютъ горизонтальное кольцо, которое поднимается вверхъ по внутренной поверхности сосуда и является болѣе толстымъ, чѣмъ