

Краткий отчет
о состоянии И.М. П.У
за 1893-94 академ. год.

КРАТКІЙ ОТЧЕТЪ

О СОСТОЯНІИ

ИМПЕРАТОРСКАГО МОСКОВСКАГО ТЕХНИЧЕСКАГО УЧИЛИЩА

ЗА 1893—94 АКАДЕМИЧЕСКІЙ ГОДЪ.



I. Высочайшія повелѣнія.

ВЫСОЧАЙШЕ УТВЕРЖДЕННОЕ МНѢНІЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СОВѢТА

о преобразованіи Императорскаго Московскаго Техническаго Училища и объ утвержденіи положенія и штата сего училища.

Его Императорское Величество воспослѣдовавшее мнѣніе въ Общемъ Собраніи Государственного Совѣта, о преобразованіи Императорскаго Московскаго Техническаго училища, Высочайше утвердить соизволилъ и повелѣлъ исполнить.

Подписалъ: Предсѣдатель Государственного Совѣта

МИХАИЛЬ.

Мнѣніе Государственного Совѣта.

6 іюня 1894 года.

Выписано изъ журналовъ Соединенныхъ Департаментовъ Государственной Экономіи и Законовъ 7 мая и Общаго Собранія 30 мая 1894 г.

Государственный Совѣтъ, въ Соединенныхъ Департаментахъ Государственной Экономіи и Законовъ и въ Общемъ Собраніи, рассмотрѣвъ представленіе Министра Народнаго Просвѣщенія о преобразованіи Императорскаго Московскаго Техническаго училища, *мнѣніемъ положилъ:*

I. Проекты: положенія объ Императорскомъ Московскомъ Техническомъ училищѣ и штатъ этого учебнаго заведенія поднести къ Высочайшему Его Императорскаго Величества утверждению.

II. Исчисленную по означенному штату (отд. I) сумму, въ размѣрѣ *двухсотъ семи тысячъ пятисотъ восьми* рублей, вносить, начиная съ 1895 г., въ подлежащія подраздѣленія расходной смѣты Министерства Народнаго Просвѣщенія.

III. Впредь до разрѣшенія общаго вопроса о служебныхъ правахъ, приобретаемыхъ окончаніемъ курса въ учебныхъ заведеніяхъ, предоставить лицамъ, удостоеннымъ Императорскимъ Московскимъ Техническимъ училищемъ званія инженеръ-механика и инженеръ-технолога или механика и технолога, право на утверждене, при поступленіи въ государственную службу на штатныя должности техниковъ, въ слѣдующихъ чинахъ: инженеръ-механику и инженеръ-технологу—въ чинѣ X класса, а механику и технологу—въ чинѣ XII класса.

IV. Предоставить Министру Народнаго Просвѣщенія испрашивать въ установленномъ порядкѣ разрѣшеніе о предоставленіи правъ, коими пользуются окончившіе курсъ въ Императорскомъ Московскомъ Техническомъ училищѣ по новому о немъ положенію (отд. I), тѣмъ изъ прошедшихъ полный курсъ наукъ въ училищѣ до утвержденія сего положенія лицамъ, которыя своею дѣятельностью оказали пользу развитію отечественной промышленности.

V. За лицами, поступившими на службу въ Императорское Московское Техническое училище до 5 іюля 1887 г., сохранить права, указанные въ прим. 4 къ ст. 318 Уст. Пенс. (Св. Зак. т. III, по прод. 1890 г.).

Подлинное мнѣніе подписано въ журналахъ Предсѣдателями и Членами.

На подлинномъ Собственною Его Императорскаго Величества рукою написано:

„Быть по сему“.

Въ Петергофѣ,
6 іюня 1894 года.

ПОЛОЖЕНІЕ

ОБЪ ИМПЕРАТОРСКОМЪ МОСКОВСКОМЪ ТЕХНИЧЕСКОМЪ УЧИЛИЩѢ.

Цѣль и средства училища.

1. Императорское Московское Техническое училище, состоящее подъ непосредственнымъ Ихъ Императорскихъ Величествъ покровительствомъ, имѣетъ цѣлью доставлять учащимся въ немъ высшее образованіе, по спеціальностямъ механической и химической. Сообразно съ симъ, училище подраздѣляется на два отдѣленія.

2. Средства училища составляютъ: а) штатныя суммы, отпускаемыя на его содержаніе изъ казны; б) плата за обученіе, и в) суммы, выручаемыя за приготовленныя въ мастерскихъ училища издѣлія.

Примѣчаніе. Суммы, поступающія на основаніи п. п. б и в сей статьи, составляютъ спеціальныя средства училища. Плата за обученіе расходуетъ на развитіе ученой дѣятельности училища, на усиленіе суммъ, отпускаемыхъ на содержаніе училища и на пособія служащимъ и лицамъ, оставляемымъ при училищѣ для занятій, а равно учащимся. Суммы, выручаемыя за приготовленныя въ мастерскихъ училища издѣлія, употребляются на удовлетвореніе расходовъ по приготовленію издѣлій и на улучшеніе мастерскихъ.

Учебная часть.

3. Учебный курсъ училища продолжается пять лѣтъ и раздѣляется на пять годичныхъ курсовъ.

4. Въ училищѣ преподаются: 1) законъ Божій, 2) высшая математика, 3) начертательная геометрія, 4) теоретическая механика, 5) физика, 6) химія, 7) анатомія и физиологія растений, 8) минералогія съ геогнозіей, 9) геодезія, 10) строительное искусство съ архитектурой, 11) прикладная механика и теорія построения машинъ, 12) механическая технология, 13) химическая технология, 14) металлургія, 15) политическая экономія и статистика, 16) бухгалтерія, 17) иностранные языки (французскій, нѣмецкій и англійскій), 18) черченіе, 19) рисованіе.

5. Независимо отъ исчисленныхъ въ ст. 4 предметовъ, въ составъ учебнаго курса входятъ также практическія занятія по физикѣ, химіи, механикѣ, естественной исторіи и другимъ предметамъ. Занятія эти происходятъ какъ въ мастерскихъ и лабораторіяхъ училища, такъ и внѣ оного на заводахъ, фабрикахъ и при строительныхъ работахъ.

6. При училищѣ имѣются: церковь, бібліотека, коллекціи, къ предметамъ преподаванія относящіяся, физическій кабинетъ, механическая и химическая лабораторіи и мастерскія по механической и химической технологіи.

Учащіеся въ училищѣ.

7. Въ студенты училища принимаются: а) имѣющіе аттестаты или свидѣтельства объ окончаніи курса въ высшихъ учебныхъ заведеніяхъ; б) получившіе аттестаты зрѣлости отъ гимназій Министерства Народнаго Просвѣщенія, а равно свидѣтельства объ успѣшномъ окончаніи курса въ реальныхъ училищахъ съ дополнительнымъ при нихъ классомъ, и в) имѣющіе аттестаты или свидѣтельства отъ другихъ среднихъ учебныхъ заведеній, курсъ которыхъ будетъ признанъ Министромъ Народнаго Просвѣщенія достаточнымъ для поступленія въ училище, причемъ преимущество отдается русскимъ подданнымъ предъ иностранцами.

Примѣчаніе. Если число желающихъ поступить въ училище будетъ превышать число свободныхъ вакансій, то прежде другихъ принимаются окончившіе курсъ въ высшихъ учебныхъ заведеніяхъ; между остальными кандидатами открывается состязательный экзаменъ изъ математики, физики и русскаго языка, въ предѣлахъ гимназическаго курса, и замѣтъ право на занятіе вакансій предоставляется получившимъ на семь экзаменѣ большее число балловъ.

8. Учащіеся въ училищѣ уплачиваютъ за обученіе по семидесяти пяти рублей за каждый учебный годъ, причемъ эта сумма вносится въ два срока, впередъ за каждое учебное полугодіе. Въ случаѣ выхода учащагося изъ училища до окончанія года, деньги эти не возвращаются. Министру Народнаго Просвѣщенія предоставляется понизить плату за ученіе до пятидесяти рублей.

9. Отличнѣйшіе по успѣхамъ и поведенію изъ недостаточныхъ студентовъ училища, русскихъ подданныхъ, могутъ получать стипендіи или могутъ быть освобождаемы отъ взноса платы за ученіе. Съ этою цѣлью въ училищѣ полагается пятьдесятъ стипендій, по триста рублей въ годъ каждая, и пятьдесятъ учащихся могутъ пользоваться бесплатнымъ обученіемъ. Остатки, которые могутъ образоваться отъ суммы, назначенной на содержаніе стипендіатовъ, обращаются на выдачу единовременныхъ пособій бѣднѣйшимъ слушателямъ.

Студенты училища, получившіе упомянутыя стипендіи, обязываются государственною службою, по одному году за каждый годъ полученія стипендіи, въ томъ случаѣ, если при самомъ окончаніи этими стипендіатами курса въ училищѣ имъ будетъ заявлено, что Правительство встрѣчаетъ надобность воспользоваться ихъ техническими познаніями.

10. При училищѣ могутъ быть учреждаемы стипендіи какъ частными лицами, такъ равно обществами и вѣдомствами, на условіяхъ, которыя будутъ опредѣлены учредителями, съ тѣмъ, однако, чтобы эти условія не противорѣчили положенію объ училищѣ и общимъ законамъ и были одобрены Министромъ Народнаго Просвѣщенія.

11. О всякомъ преступленіи или проступкѣ, совершенномъ студентомъ внѣ училища, полиція немедленно увѣдомляетъ

директора. Въ случаѣ полученія директоромъ свѣдѣній о студентахъ, подвергшихся взысканіямъ по приговору суда, директоръ доносить попечителю округа, который или предлагаетъ на обсужденіе учебнаго комитета, или рѣшаетъ самъ вопросъ о томъ, не подлежитъ ли виновный увольненію или исключенію изъ училища. Такой же порядокъ соблюдается и относительно совершенныхъ студентами внѣ училища проступковъ, которые имѣютъ вообще предосудительный характеръ.

12. Студенты, прошедшіе успѣшно полный курсъ наукъ въ училищѣ, подвергаются испытанію въ особыхъ экзаменаціонныхъ комиссіяхъ, члены коихъ ежегодно назначаются Министромъ Народнаго Просвѣщенія, по программамъ и правиламъ Министромъ же утвержденнымъ, и, буде успѣшно выдержать таковое испытаніе, удостоиваются означенными комиссіями: отличнѣйшіе—званія *инженеръ-механика* или *инженеръ-технолога*, а всѣ остальные—званія *механика* или *технолога*. Тѣ и другіе получаютъ право носить установленный знакъ.

13. Постороннія лица допускаются къ испытанію въ означенныхъ въ ст. 12 сего положенія комиссіяхъ лишь на званія инженеръ-механика и инженеръ-технолога. Желаящіе подвергнуться сему испытанію предварительно представляютъ свидѣтельство о своемъ образованіи, дающее право на поступленіе въ училище (ст. 7).

14. Удостоенные званія инженеръ-механика и инженеръ-технолога или механика и технолога имѣютъ право возводить фабричныя и заводскія зданія, съ ихъ принадлежностями, и жилия помѣщенія, въ непосредственной связи съ ними находящіяся, а также производить строительныя работы, состоящія въ вѣдѣніи и подъ надзоромъ Министерства Путей Сообщенія. Равнымъ образомъ, означеннымъ лицамъ предоставляется занимать по сему Министерству должности, съ коими соединено производство строительныхъ работъ.

Поступая на штатныя должности преподавателей въ специальныхъ или реальныхъ учебныхъ заведеніяхъ, инженеръ-механики, инженеръ-технологи, механики и технологи пользуются служебными преимуществами на основаніяхъ, опредѣленныхъ уставами сихъ заведеній для преподавателей оныхъ.

15. Инженеръ-механики, инженеръ-технологи, механики и технологи, не имѣющие, по происхожденію, правъ высшаго состоянія, причисляются къ сословію личныхъ почетныхъ гражданъ, безъ взиманія установленной за грамоты пошлины. Министру Народнаго Просвѣщенія предоставляется ходатайствовать о причисленіи къ потомственному почетному гражданству тѣхъ изъ удостоенныхъ званія инженеръ-механика, инженеръ-технолога, механика и технолога, которые представляютъ достовѣрныя доказательства того, что они успѣшно занимались не менѣе десяти лѣтъ управленіемъ фабрикъ или заводовъ или же исполняли обязанности техническихъ инженеровъ.

16. Инженеръ-механики, инженеръ-технологи, механики и технологи, относительно отбыванія воинской повинности, пользуются правами, опредѣленными въ уставѣ о сей повинности для лицъ, окончившихъ курсъ въ высшихъ учебныхъ заведеніяхъ.

Управленіе училищемъ.

17. Училище состоитъ въ вѣдѣніи Министерства Народнаго Просвѣщенія и подчиняется попечителю Московскаго учебнаго округа.

18. Управленіе училищемъ ввѣряется директору при участіи, въ подлежащихъ случаяхъ, учебнаго и хозяйственнаго комитетовъ.

19. Директоръ училища избирается Министромъ Народнаго Просвѣщенія изъ лицъ, извѣстныхъ своею ученою и преподавательскою дѣятельностью, и опредѣляется Высочайшею властью.

Примѣчаніе. Должность директора, съ разрѣшенія Министра Народнаго Просвѣщенія, можетъ быть соединена съ должностью профессора. Въ семъ случаѣ директору производится, сверхъ штатнаго его оклада, добавочное жалованье, въ размѣрѣ 1500 р. въ годъ.

20. Директору, какъ ближайшему начальнику училища, подчиняются всѣ служащіе и учащіеся въ ономъ лица.

21. Въ помощь директору училища по учебной части назначается помощникъ директора, а по завѣдыванію дѣлами учебнаго комитета—секретарь, опредѣляемые Министромъ

Народнаго Просвѣщенія изъ профессоровъ училища, по представленію директора, чрезъ попечителя учебнаго округа.

22. Учебный комитетъ училища состоитъ, подъ предѣтельствомъ директора, изъ преподавателя закона Божія, профессоровъ, адъюнктъ-профессоровъ и инспектора учебныхъ мастерскихъ.

23. Въ кругъ дѣятельности учебнаго комитета входятъ:

I. Дѣла, представляемыя на разрѣшеніе Министра Народнаго Просвѣщенія: а) составленіе плановъ и программъ теоретическаго и практическаго преподаванія въ училищѣ; б) распредѣленіе, на основаніи утвержденныхъ плановъ и программъ, преподаванія и практическихъ занятій по курсамъ, кабинетамъ, лабораторіямъ и мастерскимъ, съ назначеніемъ для каждаго предмета необходимаго учебнаго времени; в) составленіе предположеній о порядкѣ контроля за занятіями учащихся и о производствѣ испытаній какъ по теоретическому преподаванію, такъ и по практическимъ занятіямъ; г) обсужденіе достоинствъ кандидатовъ на открывающіяся въ училищѣ вакансіи профессоровъ и адъюнктъ-профессоровъ; д) разсмотрѣніе и обсужденіе годичнаго отчета по учебной части училища; е) составленіе предположеній о распредѣленіи суммъ, назначенныхъ на учебную часть училища; ж) избраніе почетныхъ членовъ училища и удостоеніе почетнаго званія инженеръ-механика или инженеръ-технолога; з) обсужденіе мѣръ къ временному замѣщенію учебныхъ должностей.

II. Дѣла, представляемыя на разрѣшеніе попечителя учебнаго округа: и) составленіе предположеній о предоставленіи, на основаніи утвержденныхъ Министромъ правилъ, учащимся стипендій и бесплатныхъ вакансій, а равно о лишеніи учащихся этихъ преимуществъ; і) составленіе правилъ для пользованія библіотекою, учебными коллекціями и прочими учебными пособіями, а равно правилъ для пополненія библіотеки, учебныхъ коллекцій и учебныхъ пособій; к) обсужденіе достоинствъ кандидатовъ на должности преподавателей, главнаго инженеръ-механика, инспектора учебныхъ мастерскихъ, завѣдывающихъ мастерскими и лаборанта; л) обсужденіе вообще всѣхъ вопросовъ, предлагаемыхъ попечителемъ округа.

III. Дѣла, рѣшаемыя собственною властью комитета: м) касающіяся пріема, переводныхъ экзаменовъ,

разсмотрѣніе полугодичныхъ отчетовъ по учебной части и разсмотрѣнія сочиненій, предполагаемыхъ къ печатанію отъ имени или на счетъ училища.

24. Преподаваніе физики, химіи, механики, строительнаго искусства, механической технологіи, химической технологіи и руководство практическими занятіями, относящимися къ этимъ предметамъ, возлагается на профессоровъ и адъюнктъ-профессоровъ. Преподаваніе всѣхъ прочихъ предметовъ поручается преподавателямъ. Число профессоровъ и адъюнктъ-профессоровъ опредѣляется штатомъ; число же преподавателей хотя штатомъ не опредѣляется, но такіе преподаватели могутъ быть зачисляемы въ дѣйствительную службу при училищѣ.

Профессоры и адъюнктъ-профессоры училища назначаются изъ лицъ, извѣстныхъ трудами по своей спеціальности и обладающихъ даромъ преподаванія. При этомъ профессоры и адъюнктъ-профессоры теоретической механики, физики и химіи должны имѣть ученую степень: первые — доктора, а вторые — магистра по разряду наукъ, соотвѣтствующему каѳедрѣ каждаго изъ нихъ. Профессоры и адъюнктъ-профессоры прочихъ предметовъ могутъ и не имѣть ученыхъ степеней, но въ такомъ случаѣ они должны имѣть высшее образованіе, соотвѣтствующее предметамъ ихъ преподаванія. Преподаватели училища назначаются изъ лицъ, съ полнымъ успѣхомъ окончившихъ курсъ въ высшихъ учебныхъ заведеніяхъ; преподавателями же иностранныхъ языковъ и рисованія могутъ быть и лица, не удовлетворяющія симъ условіямъ, но во всякомъ случаѣ получившія право на преподаваніе въ высшихъ и среднихъ учебныхъ заведеніяхъ Министерства Народнаго Просвѣщенія.

25. Ближайшее руководство практическими занятіями въ мастерскихъ возлагается на инспектора учебныхъ мастерскихъ, а завѣдываніе состоящимъ при училищѣ заводомъ — на главнаго инженеръ-механика.

Инспекторомъ учебныхъ мастерскихъ, главнымъ инженеръ-механикомъ и лаборантомъ могутъ быть только лица, получившія высшее образованіе по тѣмъ предметамъ, которые составляютъ спеціальность ихъ занятій въ училищѣ, и удостоенныя соотвѣтствующаго такому образованію диплома или свидѣтельства.

Завѣдывающіе мастерскими состоятъ на правахъ преподавателей и назначаются изъ лицъ съ высшимъ техническимъ образованіемъ. Число завѣдывающихъ мастерскими опредѣляется штатомъ.

26. Надзоръ за поведеніемъ учащихся и за сохраненіемъ надлежащаго порядка въ зданіяхъ училища поручается инспектору, въ помощь которому назначаются помощники.

27. Хозяйственный комитетъ состоитъ, подъ предсѣдательствомъ директора, изъ трехъ членовъ, опредѣляемыхъ попечителемъ учебнаго округа на три года изъ лицъ, преподающихъ въ училищѣ, а также завѣдывающихъ отдѣльными учебными учрежденіями училища.

28. Хозяйственный комитетъ имѣетъ въ своемъ завѣдываніи все имущество училища, составляетъ годовыя смѣты расходовъ, разрѣшаетъ всѣ денежныя выдачи изъ смѣтныхъ суммъ, а изъ специальныхъ средствъ — всѣ расходы по изготовленію издѣлій въ мастерскихъ и остальные расходы — въ размѣрѣ не свыше трехсотъ рублей въ годъ на одинъ предметъ, и утверждаетъ контракты по подрядамъ до пяти тысячъ рублей собственною властью. На производство расходовъ изъ специальныхъ средствъ, въ размѣрѣ не свыше тысячи рублей въ годъ на одинъ предметъ и на заключеніе контрактовъ по подрядамъ на сумму не свыше семи тысячъ рублей, комитетъ, въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ, испрашиваетъ разрѣшенія попечителя округа; о производствѣ же расходовъ, превышающихъ эти суммы, представляетъ, чрезъ попечителя, Министру Народнаго Просвѣщенія.

29. При училищѣ состоятъ: дѣлопроизводитель, помощникъ его (онъ же архиваріусъ), бухгалтеръ, помощникъ его (завѣдывающій матеріальною частью), смотритель зданій (онъ же эскуиторъ), библіотекарь, архитекторъ и врачъ.

30. Профессоры, адъюнкты-профессоры и инспекторы опредѣляются Министромъ Народнаго Просвѣщенія. Прочіе чины училища, занимающіе штатныя должности, опредѣляются попечителемъ учебнаго округа. Преподаватель закона Божія назначается Министромъ Народнаго Просвѣщенія, по соглашенію съ епархіальнымъ начальствомъ. Писцы по найму, мастера, подмастерья, фельдшеръ и служители при училищѣ

опредѣляются директоромъ, которому предоставляется устанавливать число ихъ и размѣръ получаемого ими содержанія, не выходя изъ назначенныхъ для того по штату суммъ.

Права и преимущества служащихъ въ училищѣ.

31. Служащіе при училищѣ, считаясь, доколѣ состоятъ въ своихъ должностяхъ, въ присвоенныхъ имъ по штату классахъ, пользуются вообще преимуществами, означенными въ Уставѣ о службѣ по опредѣленію отъ Правительства (Св. Зак. т. III, изд. 1876 г.). Профессоры, адъюнкты-профессоры, преподаватели, главный инженеръ-механикъ, лаборантъ, инспекторъ учебныхъ мастерскихъ и завѣдывающіе мастерскими утверждаются въ чинахъ, соотвѣтствующихъ классамъ сихъ должностей.

32. Преподаватели, лаборантъ, завѣдывающіе мастерскими, помощники инспектора и бібліотекаръ могутъ быть производимы двумя чинами выше класса, присвоеннаго ихъ должностямъ.

33. Профессоры и адъюнкты-профессоры относительно пенсій и единовременныхъ пособій пользуются слѣдующими правами: а) пенсіи по выслугѣ 25 лѣтъ и половинныя пенсіи по выслугѣ 20 лѣтъ назначаются по размѣру жалованья, опредѣленнаго штатомъ училища; б) если профессоръ или адъюнкты-профессоръ по выслугѣ 25 лѣтъ остается на службѣ при училищѣ, то пенсіи, сверхъ жалованья, не получаетъ; в) находясь на службѣ внѣ училища, въ случаяхъ, когда дѣйствующими постановленіями допускается совмѣщеніе пенсіи и жалованья, выслужившій 25 лѣтъ профессоръ или адъюнкты-профессоръ получаетъ пенсію, сверхъ жалованья въ размѣрѣ половины выслуженнаго имъ оклада оной; г) послѣ 30 лѣтъ учебной службы профессоръ или адъюнкты-профессоръ получаетъ въ пенсію полный окладъ присвоеннаго ему содержанія (полагая въ составѣ содержанія жалованье, столовыя и квартирныя деньги); д) званіе заслуженнаго профессора даетъ преподавателю право сохранить свою пенсію въ полномъ размѣрѣ, сверхъ жалованья, при службѣ внѣ училища; е) единовременныя пособія назначаются на основаніи дѣй-

ствующих постановлений по размѣру полного оклада содержанія профессора или адъюнктъ-профессора.

Директоръ училища относительно пенсій и единовременныхъ пособій пользуется тѣми же правами, какъ и профессора, получая, въ сравненіи съ сими послѣдними, пенсію по выслугѣ 25 лѣтъ и половинную пенсію по выслугѣ 20 лѣтъ изъ оклада въ 2400 рублей. Послѣ 30 лѣтъ учебной службы директору назначается въ пенсію 3000 рублей.

Примѣчаніе 1. Пенсіи семействамъ умершихъ пенсіонеровъ назначаются на основаніи дѣйствующихъ постановлений, по размѣру пенсіоннаго оклада умершаго. Пенсіонные оклады профессора и адъюнктъ-профессора, выслужившихъ 30 лѣтъ, не увеличиваются чрезъ пятилѣтія.

Примѣчаніе 2. Преподаватель закона Божія, по выслугѣ при училищѣ 25 лѣтъ, получаетъ пенсію въ размѣрѣ 1000 руб. въ годъ, а по выслугѣ 20 лѣтъ—половину этой суммы. Пенсія сія самому преподавателю, равно какъ и причитающаяся по закону часть пенсіи его семейству, производится независимо отъ того призрѣнія, коимъ лица сіи могутъ пользоваться по духовному вѣдомству.

34. Профессоры и адъюнктъ-профессоры, выходящіе въ отставку по совершенно разстроенному на службѣ здоровью или по приключившейся неизлѣчимой болѣзни, получаютъ въ пенсію: прослужившіе отъ 10 до 20 лѣтъ—одну треть оклада, прослужившіе отъ 20 до 25 лѣтъ—двѣ трети оклада, прослужившіе же 25 лѣтъ и болѣе—полный окладъ причитающейся пенсіи (ст. 33, п. 1).

Профессоры и адъюнктъ-профессоры, одержимые тяжкими и неизлѣчимыми болѣзнями, которыя лишаютъ ихъ не только возможности продолжать службу, но и обходиться безъ постоянного посторонняго ухода, получаютъ при отставкѣ въ пенсію: прослужившіе отъ 5 до 10 лѣтъ—одну треть оклада, прослужившіе отъ 10 до 20 лѣтъ—двѣ трети оклада, прослужившіе 20 лѣтъ и болѣе—полный окладъ причитающейся пенсіи (ст. 33, п. 2).

35. Профессоръ, прослужившій 25 лѣтъ въ должности преподавателя въ училищѣ, удостоивается званія заслуженнаго профессора училища.

36. Для продолженія службы при училищѣ профессору или адъюнкту-профессору, получившему послѣ 25 лѣтъ учебной службы право на пенсію, требуется разрѣшеніе Министра Народнаго Просвѣщенія. Для другихъ лицъ по учебной части требуется, въ подобныхъ случаяхъ, разрѣшеніе попечителя учебнаго округа.

37. По истеченіи 30 лѣтъ учебной службы, за профессоромъ или адъюнкту-профессоромъ, съ разрѣшенія Министра Народнаго Просвѣщенія, можетъ быть сохранена его должность срокомъ на пять лѣтъ, съ назначеніемъ ему вознагражденія по 1200 рублей въ годъ. Вознагражденіе сіе производится независимо отъ выслуженной профессоромъ или адъюнкту-профессоромъ пенсіи и, по истеченіи указанного срока, можетъ быть продолжено Министромъ на слѣдующее пятилѣтіе.

38. Преподаватели, завѣдывающіе мастерскими, лаборанты при химической лабораторіи, библіотекаръ и помощники инспектора относительно пенсій и единовременныхъ пособій пользуются правами лицъ, состоящихъ по учебной части Министерства Народнаго Просвѣщенія, причемъ пенсіи имъ назначаются: преподавателямъ и помощникамъ инспектора—изъ оклада въ 750 рублей, а завѣдывающимъ мастерскими, библіотекарю и лаборанту—изъ оклада въ 650 рублей.

Примѣчаніе. Полный пенсіонный окладъ назначается только тѣмъ изъ преподавателей училища, которые, состоя на дѣйствительной службѣ при училищѣ, въ теченіе послѣднихъ 10 лѣтъ предъ выслугою пенсіи получали отъ училища вознагражденіе за занятія не менѣе 750 руб. въ годъ; въ противномъ же случаѣ преподавателямъ назначается въ пенсію половина полного оклада.

39. Инспектору студентовъ пенсія назначается изъ оклада въ 1500 руб. Инспекторъ, въ случаѣ оставленія его по выслугѣ 25 лѣтъ на дальнѣйшей службѣ при училищѣ, получаетъ пенсію сверхъ содержанія въ размѣрѣ, равномъ половинѣ выслуженнаго имъ пенсіоннаго оклада, и засимъ опредѣленными ст. 363 Устава о пенсіяхъ и единовременныхъ пособияхъ прибавками къ пенсіонному окладу не пользуется.

Инспекторъ учебныхъ мастерскихъ и главный инженеръ-

механикъ относительно пенсій и единовременныхъ пособій пользуются всѣми правами, предоставленными симъ положеніемъ адъюнкты-профессорамъ.

Права училища.

40. Училище имѣетъ большую и малую печать, съ изображеніемъ государственнаго герба и надписью: «Императорское Московское техническое училище».

41. Училищу предоставляется, съ утвержденія Министра Народнаго Просвѣщенія, избирать почетныхъ членовъ изъ числа лицъ, оказавшихъ существенныя услуги отечественной промышленности или техническому образованію, и возводить въ почетное званіе инженеръ-механика или инженеръ-технолога лицъ, пріобрѣвшихъ извѣстность своею полезною дѣятельностью на техническомъ поприщѣ. Лица, удостоенныя этимъ путемъ званія инженеръ-механика или инженеръ-технолога, не пользуются правами, присвоенными тѣмъ лицамъ, кои получаютъ сіи званія на основаніи установленнаго настоящимъ положеніемъ испытанія.

42. Выморочныя имущества, остающіяся послѣ служащихъ въ училищѣ лицъ, обращаются въ собственность училища на основаніяхъ, указанныхъ въ ст. 1168 Законовъ Гражданскихъ (Св. Зак. т. X. ч. I, изд. 1887 г.).

43. Изданія, выходящія отъ имени училища или съ его одобренія, и вообще все, отъ имени училища печатаемое, не подлежитъ, при какомъ бы ни было объемѣ, предварительной цензурѣ.

44. Пріобрѣтаемая для училища за границу книги, рукописи и повременныя изданія ученаго содержанія не подлежатъ разсмотрѣнію комитета иностранной цензуры.

45. Училище имѣетъ право безплатно выписывать изъ-за границы для своихъ надобностей всякія учебныя пособія, не исключая машинъ. Ящики съ сими вещами, адресованные въ училище, не вскрываются въ таможенѣ, а только пломбируются; въ училищѣ же они вскрываются и свидѣльствуются въ присутствіи таможеннаго чиновника.

Подписалъ: Предсѣдатель Государственнаго Совѣта

МИХАИЛЬ.

На подлинномъ Собственною Его Императорскаго
Величества рукою написано:

„Быть по сему“.

Въ Петергофѣ.
6 іюня 1894 года.

Ш Т А Т Ъ

Императорскаго Московскаго Техническаго Училища.

	Число лицъ.	Содержаніе въ годъ.				Классы и разряды.		
		О д н о м у .			ВСЕГО.	По должно- сти.	По питью на мундиръ.	По пенсіи.
		Жало- ванья.	Столо- выхъ.	Квартир- ныхъ.				
		Р у б л и .						
Личный составъ:								
Директоръ.....	1	3.000	1.200	каз. кв.	4.200	IV	IV	} По учебной службѣ.
Профессоры.....	11	2.400	300	300	33.000	V	V	
Адъюнкты-профессоры...	6	1.600	200	200	12.000	VI	VI	
Законоучитель.....	—	1.000	—	—	1.000	—	—	
На вознагражденіе преподавателей.....	—	—	—	—	38.040	VII	VII	
Помощнику директора прибавочныхъ.....	—	—	—	—	900	—	—	
Секретарю учебнаго комитета.....	—	—	—	—	600	—	—	
Главный инженеръ-механикъ.....	1	1.600	200	200	2.000	VI	VI	
Инспекторъ учебныхъ мастерскихъ.....	1	1.600	400	каз. кв.	2.000	VI	VI	
Завѣдывающіе мастерскими.....	7	650	350	200	8.400	VII	VII	
Лаборантъ.....	1	650	350	200	1.200	VIII	VIII	
Библіотекаръ.....	1	650	350	200	1.200	VIII	VIII	
Инспекторъ.....	1	1.500	900	каз. кв.	2.400	V	V	
Помощники инспектора...	4	750	450	200	5.600	VII	VII	
Дѣлопроизводитель.....	1	700	300	каз. кв.	1.000	VII	VII	IV
Помощникъ его (онъ же архивариусъ).....	1	420	180	каз. кв.	600	IX	IX	VII
Бухгалтеръ.....	1	700	300	каз. кв.	1.000	VII	VII	IV
Помощникъ его (онъ же казначей).....	1	420	180	каз. кв.	600	IX	IX	VII
Смотритель зданій (онъ же экзекуторъ).....	1	700	300	каз. кв.	1.000	VII	VII	IV
Священникъ.....	1	750	—	каз. кв.	750	—	—	—
Псаломщикъ.....	1	300	—	каз. кв.	300	—	—	—
Архитекторъ.....	1	450	150	200	800	VIII	VIII	V
Врачъ.....	1	450	150	200	800	VII	VII	По медицин. положенію.
Фельдшеръ.....	1	240	120	каз. кв.	360	—	—	
Итого на содержаніе личнаго состава...	—	—	—	—	119.750			

	Рубли.
Хозяйственные расходы:	
На писцовъ и канцелярскіе расходы.....	2.500
„ содержаніе церкви.....	500
„ учебныя пособія, бібліотеку, лабораторіи химическую и механическую, физическій кабинетъ и химическія мастерскія ..	14.250
На механическія мастерскія.....	9.400
„ печатаніе программъ, отчетовъ, диссертаций и проч.....	750
„ расходы по командированію учащихся на фабрики, заводы и желѣзныя дороги для практическихъ занятій въ теченіе лѣтняго вакаціоннаго времени.....	2.000
На прислугу.....	7.908
„ отопленіе.....	12.000
„ освѣщеніе.....	8.000
водоснабженіе.....	1.000
„ приемный лазаретный покой.....	450
„ ремонтъ классной мебели.....	500
„ ремонтъ зданій.....	10.000
„ чистоту по зданіямъ, дворамъ, улицамъ и на мелочныя расходы.....	3.000
На стипендіи учащимся (50 стипендіатовъ по 300 рублей каждому).....	15.000
На уплату оцѣночнаго сбора.....	500
Итого на хозяйственныя статьи...	87.758
В С Е Г О.....	207.508

П Р И М Ъ Ч А Н І Я:

1) Число лаборантовъ можетъ быть увеличиваемо по мѣрѣ надобности, съ предоставленіемъ имъ правъ государственной службы и съ назначеніемъ имъ содержанія изъ специальныхъ средствъ училища.

2) Въ случаѣ недостаточности суммъ, назначенныхъ по штату на хозяйственныя расходы, послѣдніе покрываются изъ специальныхъ средствъ училища (примѣч. къ ст. 2 полож.).

Подписалъ: Предсѣдатель Государственнаго Совѣта МИХАИЛЪ.

II. Распоряженія Министра Народнаго Просвѣщенія.

Господинъ Министръ Народнаго Просвѣщенія, вслѣдствіе представленія г. Попечителя Московскаго Учебнаго Округа, предложеніемъ отъ 11 марта 1894 года за № 5090 разрѣшилъ учредить при Императорскомъ Московскомъ Техническомъ Училищѣ стипендію имени умершаго потомственнаго почетнаго гражданина *Николая Сергѣевича Мазурина*.

О чемъ изъяснено въ предложеніи Управленія Московскаго Учебнаго Округа отъ 21 марта 1894 года за № 4604, съ приложеніемъ нижеслѣдующаго по сему дѣлу положенія, утвержденнаго его сіятельствомъ, статсъ-секретаремъ, графомъ И. Д. Деяновымъ:

1) На проценты съ капитала въ *восемь тысячъ триста рублей*, завѣщаннаго умершимъ потомственнымъ почетнымъ гражданиномъ Николаемъ Сергѣевичемъ Мазуринымъ, учреждается при Императорскомъ Московскомъ Техническомъ Училищѣ одна стипендія имени завѣщателя.

2) Означенный капиталъ, заключающійся въ Государственныхъ четырехпроцентныхъ облигаціяхъ втораго внутренняго займа: одинъ листъ въ 50 облигацій съ № 245651 по № 245700 на 5000 руб.; три листа облигацій съ № 184781 по № 184790, съ № 184791 по № 184800 и съ № 184901 по № 184910, по 1000 руб. каждый, на 3000 руб. и три облигаціи за №№ 13656, 10535 и 10536, по 100 руб. каждая, на 300 рублей, хранится въ Московскомъ Губернскомъ Казначействѣ вмѣстѣ съ специальными средствами Императорскаго Московскаго Техническаго Училища, оставаясь навсегда неприкосновеннымъ.

Примѣчаніе. Въ случаѣ выхода въ тиражъ составляющихъ капиталъ облигацій, таковыя замѣняются новыми того же займа или другими правительственными бумагами.

3) Проценты съ означеннаго капитала, за удержаніемъ изъ изъ нихъ въ казну государственнаго сбора по закону 20 мая 1885 года, употребляются на стипендію, причемъ одна часть стипендіи идетъ на покрытіе платы за ученіе, а другая выдается на учебныя пособія и содержаніе. Въ случаѣ незамѣщенія стипендіи проценты причисляются къ капиталу и впослѣдствіи могутъ быть употреблены для образованія новой стипендіи.

4) Стипендія должна быть предоставляема преимущественно дѣтямъ лицъ торговаго и промышленнаго класса, православнаго вѣроисповѣданія. Выборъ стипендіата принадлежитъ душеприказчикамъ потомственнаго почетнаго гражданина Николая Сергѣевича Мазурина: коммерціи совѣтнику Дмитрію Петровичу Боткину и потомственнымъ почетнымъ гражданамъ Константину Сергѣевичу Мазурину и Григорію Сергѣевичу Герасимову, по ихъ взаимному соглашенію, а послѣ ихъ смерти педагогическому совѣту Императорскаго Московскаго Техническаго Училища.

5) Стипендія предоставляется лицу, удовлетворяющему требованію § 4 и выдержавшему приѣмное испытаніе въ Императорскомъ Техническомъ Училищѣ на общемъ основаніи.

6) Стипендіатъ, уволенный изъ училища по опредѣленію педагогическаго совѣта за неодобрительное поведеніе, лишается стипендіи, о чемъ немедленно доводится до свѣдѣнія лицъ, коимъ принадлежитъ выборъ стипендіата, для избранія другого лица. Стипендіату, оставшемуся на второй годъ въ одномъ и томъ же курсѣ, стипендія можетъ быть сохранена только по особо уважительнымъ причинамъ, напримѣръ, тяжкой продолжительной болѣзни, и притомъ во время всего курса лишь одинъ разъ.

7) Начальство Императорскаго Московскаго Техническаго Училища два раза въ годъ, по истеченіи каждаго полугодія, увѣдомляетъ лицъ, поименованныхъ въ § 4 сего положенія, объ успѣхахъ и поведеніи стипендіата.

8) Въ случаѣ преобразованія Императорскаго Московскаго Техническаго Училища въ другое однородное учебное заведеніе стипендія остается при этомъ послѣднемъ.

9) Пользованіе стипендіею не налагаетъ на стипендіата никакихъ обязательствъ.

III. Дѣятельность Педагогическаго Совѣта.

Въ истекшемъ академическомъ году Педагогическій Совѣтъ имѣлъ 12 засѣданій, изъ которыхъ два были экстраординарными.

Въ засѣданіи Совѣта 13 сентября 1893 года было признано необходимымъ назначить одинъ дополнительный урокъ по рисованію въ I общемъ классѣ для студентовъ, поступившихъ въ училище изъ такихъ учебныхъ заведеній, въ которыхъ рисованіе не считается обязательнымъ предметомъ.

Въ томъ же засѣданіи Совѣта было рассмотрѣно и утверждено нижеслѣдующее расписаніе сроковъ для представленія графическихъ работъ въ теченіе 1893—94 учебнаго года.

Въ I общемъ классѣ.

По рисованію.

- | | |
|--------------|-----------------------------------|
| 27 сентября— | рисунокъ орнамента безъ тушевки. |
| 4 октября — | » орнамента съ неполной тушевкой. |
| 13 октября — | » то же. |
| 1 ноября — | » орнамента съ полной тушевкой. |
| 16 ноября — | » то же. |
| 1 декабря — | » то же. |
| 15 декабря — | » то же. |
| 26 января — | » капители. |
| 23 февраля — | » детали машинъ. |
| 2 апрѣля — | » то же. |

По черченію.

- | | | |
|---|---|---|
| 11 ноября. | { | 1) Логарифмическій масштабъ; сопряженіе линій. |
| 3 чертежа и соотвѣтствующее число эскизовъ. | | 2) Покрываніе тушью и красками. |
| | | 3) Тушеваніе штрихами, жидкой тушью и красками. |
| 1 февраля. | { | 1) Вычерчиваніе ордеровъ. |
| 3 чертежа и соотвѣтствующее число эскизовъ. | | 2) Планъ, фасадъ и разрѣзы двухъ-этажнаго каменнаго и деревяннаго зданія. |
| | | 3) Рельефный чертежъ. |

- | | | |
|-------------------|---|-----------------------------------|
| 2 апрѣля. | { | 1) Болты, гайки, ключи, вкладыши, |
| 3 чертежа и соот- | | подшипники, муфты. |
| вѣтствующее чи- | | 2) Кривыя линіи. |
| сло эскизовъ. | | 3) Шкивы, зубчатыя колеса и зацѣ- |
| | | пленія. |

Во II общемъ классѣ

МЕХАНИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

По техническому черченію.

- | | | |
|-----------------|---|--------------------------------------|
| 12 ноября. | { | |
| 1 чертежъ и 5 | | подшипникъ. |
| эскизовъ съ на- | | |
| туры. | | |
| 1 февраля. | { | |
| 1 чертежъ и 5 | | подвѣска. |
| эскизовъ съ на- | | |
| туры. | | |
| 2 апрѣля. | { | |
| 1 чертежъ и 5 | | подпятникъ, эксцентрикъ или поршень. |
| эскизовъ съ на- | | |
| туры. | | |

Во II общемъ классѣ

ХИМИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

По техническому черченію.

- | | | |
|-----------------|---|--|
| 12 ноября. | { | |
| 1 чертежъ и 5 | | опоры валовъ. |
| эскизовъ съ на- | | |
| туры. | | |
| 1 февраля. | { | |
| 1 чертежъ и 5 | | поршня, головки шатуна, эксцентрика и ползуна. |
| эскизовъ съ на- | | |
| туры: | | |

2 апрѣля.

1 чертежъ и 5 эскизовъ съ на- туры:	{	крана, клапана, вентиля, цилиндра паровой машины или насоса.
---	---	---

Въ III общемъ классѣ

МЕХАНИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

а) По техническому черченію.

25 октября.

1 чертежъ съ на- туры и не менѣе 4 эскизовъ:	{	цѣльной машины.
--	---	-----------------

24 января.

2 чертежа и 6 эс- кизовъ съ нату- ры:	{	самосмазывающіеся подшипники, бук- сы, фрикціонныя муфты, вентили, ползуны и проч.
---	---	--

2 апрѣля.

2 чертежа по от- носительнымъ раз- мѣрамъ и 12 эс- кизовъ:	{	детали паровыхъ машинъ, турбинъ, приводы и проч.
---	---	---

б) По проектированію деталей машинъ.

14 января—повѣрочный расчетъ существующей детали
машины.

2 апрѣля—проектъ валовъ водяныхъ колесъ и зубчатой
передачи.

Въ III общемъ классѣ

ХИМИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

По техническому черченію.

3 ноября.

1 чережежъ.	{	паровой машины съ указаніемъ расчета.
-------------	---	---------------------------------------

- 7 декабря. { насоса съ указаніемъ расчета.
1 чертежъ. {
9 февраля { парового котла и дымовой трубы, съ ука-
1 чертежъ. { ніемъ расчета.
2 апрѣля. { центрофуги, дезинтеграторы, бѣгуны и
1 чертежъ. { проч.

Въ I спеціальномъ классѣ

МЕХАНИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

а) По проектированію деталей машинъ.

- 2 ноября—проектъ конической передачи.
14 декабря » » ременной или канатной передачи.

б) По проектированію грузоподъемныхъ машинъ.

- 2 апрѣля—проектъ крана.

Въ I спеціальномъ классѣ

ХИМИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

По техническому черченію.

- 1 февраля. { по химической технологіи.
1 чертежъ {
2 апрѣля. { по металлургіи.
1 чертежъ {

Во II спеціальномъ классѣ обоихъ отдѣленій

По проектированію по строительному искусству.

- 2 декабря—эскизъ зданія.
2 апрѣля—проектъ зданія.

Во II специальномъ классѣ

МЕХАНИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

По проектированію насосовъ и водяныхъ двигателей:

Для 1 и 2 группъ:

14 декабря—проектъ насоса.

2 апрѣля > водяного двигателя.

Для 3 и 4 группъ:

14 декабря—проектъ водяного двигателя.

2 апрѣля > насоса.

Въ III специальномъ классѣ.

МЕХАНИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

а) По проектированію котловъ и паровыхъ машинъ.

14 декабря—проектъ парового котла.

2 апрѣля > паровой машины.

б) По проектированію по инженерному искусству.

1 ноября—проектъ дороги.

Сверхъ сего учащіеся были раздѣлены на три группы, которымъ были назначены нижеслѣдующіе проекты:

Для первой группы:

10 декабря—проектъ каменной трубы.

2 апрѣля > желѣзнаго моста.

Для второй группы:

10 января—проектъ моста или желѣзныхъ стропиль.

2 апрѣля > по технологіи волокнистыхъ веществъ.

Для третьей группы:

10 января — проектъ моста или желѣзныхъ стропиль.

2 апрѣля > по технологіи металловъ и дерева.

Въ III спеціально́мъ классѣ

ХИМИЧЕСКАГО ОТДѢЛЕНІЯ.

2 апрѣля. Проектъ по химическимъ производствамъ.

Въ томъ же засѣданіи Совѣта, послѣ обсужденія вопроса о раздѣленіи учащихся на группы для занятій по графическимъ предметамъ въ теченіе 1893—94 учебнаго года и о назначеніи руководителей этими занятіями, было утверждено нижеслѣдующее распредѣленіе:

КЛАССЫ.	ПРЕДМЕТЫ.	Число часовъ.	Число учащихся.	Число группъ.	ФАМИЛИИ РУКОВОДИТЕЛЕЙ.
I общій классъ.	Черченіе	8	156	2	Н. В. Ронжинъ, Д. В. Зубаревъ.
	Рисованіе..	4	156	1	К. Ѳ. Турчаниновъ.
II общій классъ механическаго отдѣленія.	Техническое черченіе	2	105	2	Н. В. Ронжинъ. Д. В. Зубаревъ.
II общій классъ химическаго отдѣленія.	Техническое черченіе.....	2	13		
III общій классъ механическаго отдѣленія.	Техническое черченіе.....	6	113	1	Д. В. Зубаревъ.
	Проектированіе деталей машинъ.	2	113	5	П. К. Худяковъ. А. И. Сидоровъ. Н. И. Марковъ. А. П. Гавриленко. В. В. Зворыкинъ.
III общій классъ химическаго отдѣленія.	Техническое черченіе.....	4	16	1	Н. В. Ронжинъ.
I спеціал. классъ механическаго отдѣленія.	Проектированіе деталей машинъ.	1½	56	3	П. К. Худяковъ. А. П. Гавриленко. А. И. Сидоровъ.

КЛАССЫ.	ПРЕДМЕТЫ.	Число часовъ.	Число учащихся.	Число группъ.	ФАМИЛИИ РУКОВОДИТЕЛЕЙ.
I специал. кл. механическаго отдѣленія.	Проектированіе грузоподъемныхъ машинъ.....	1½	56	3	{ П. К. Худяковъ. А. И. Сидоровъ. А. И. Пермяковъ.
I специальный классъ химическаго отдѣл.	Техническое черчение.....	1½	20	1	Н. В. Ронжинъ.
II специальный классъ обоихъ отдѣлений.	Проектированіе по строительному искусству.....	1	81	2	{ В. Г. Залѣсскій. П. С. Страховъ.
II специальный классъ механич. отдѣленія.	Проектированіе насосовъ и водяныхъ двигателей.	3	69	4	{ Д. С. Зерновъ. А. И. Пермяковъ. П. К. Худяковъ. А. П. Гавриленко.
III специал. кл. механическаго отдѣленія.	{ Проектированіе котловъ и паровыхъ машинъ ...	3	48	3	{ П. К. Худяковъ. А. И. Сидоровъ. А. П. Гавриленко.
	{ Проектированіе по инженерному искусству.....	3	48	2	{ М. М. Черепашинскій, П. С. Страховъ.
	{ Проектированіе по технологіи волокнистыхъ веществъ.....	1	8	1	С. А. Федоровъ.
	{ Проектированіе по технологіи металловъ и дерева.	1	18	1	А. П. Гавриленко.
	{ Проектированіе по техническимъ производствамъ.	2 2 2	3 2 1	1 1 1	В. М. Рудневъ. П. П. Петровъ. Я. Я. Никитинскій.
III специальный классъ химическаго отдѣленія.					Кромѣ того В. Г. Залѣсскій 2 часа во второмъ полугодіи во всѣхъ группахъ.

Въ томъ же засѣданіи Совѣта было утверждено нижеслѣдующее распредѣленіе учащихся химическаго отд. на группы для практическихъ занятій по физикѣ, ботаникѣ и минералогіи въ теченіе 18⁹³/₉₄ учебнаго года:

КЛАССЫ.	ПРЕДМЕТЫ.	Число часовъ.	Число учащихся.	Число группъ.	РУКОВОДИТЕЛИ.
II общій классъ.	Физика.....	4	18	2	{ В. С. Щегляевъ. А. П. Величковскій.
II общій классъ.	Ботаника.....	2	18	2	
III общій классъ.	Ботаника.....	2	16	2	{ В. Д. Мѣшаевъ.
III общій классъ.	Минералогія..	1	16	1	

Въ засѣданіи Совѣта 1 ноября 1893 года былъ утвержденъ нижеслѣдующій текстъ привѣтственной телеграммы Императорскому Казанскому Университету по случаю празднованія имъ столѣтняго юбилея знаменитаго русскаго геометра Н. И. Лобачевского:

«Императорское Московское Техническое Училище въ день исполнившагося столѣтія со времени рожденія знаменитаго русскаго геометра Николая Ивановича Лобачевского съ чувствомъ глубокаго уваженія вспоминаетъ объ его выдающихся научныхъ заслугахъ и сердечно привѣтствуетъ Императорскій Казанскій Университетъ, подъ сѣнію котораго развились и окрѣпли высокія идеи знаменитаго профессора. Пусть математическій гений Николая Ивановича Лобачевского ярко сіяетъ въ трудахъ ученой корпорации Университета и приноситъ обильную жатву на пользу науки».

Въ засѣданіи Совѣта 13 декабря 1893 года обсуждалось заявленіе профессора Д. С. Зернова о необходимости перенести лекціи по устройству паровыхъ машинъ изъ III спеціального класса во II спеціальныи классъ въ виду того, что студенты передъ началомъ занятій въ III спеціальномъ классѣ командируются на заводы для практическаго ознакомленія съ паровыми машинами, а въ III спеціальномъ классѣ въ началѣ года приступаютъ къ проектированію паровыхъ машинъ. Постановлено: съ будущаго учебнаго года перенести лекціи по устройству паровыхъ машинъ (2 часа) изъ III спеціального класса во II спеціальныи классъ, а лекціи по статистикѣ ($1\frac{1}{2}$ часа) изъ II спеціального класса въ III спеціальныи классъ.

Въ засѣданіи Совѣта 8 января 1894 года былъ одобренъ нижеслѣдующій составленный профессоромъ Н. А. Шапошниковымъ адресъ Московскому Математическому Обществу по случаю исполнившагося 25-ти лѣтія плодотворной дѣятельности этого Общества:

Московскому Математическому Обществу

отъ

Императорскаго Московскаго Техническаго Училища.

«Старѣйшее изъ русскихъ математическихъ Обществъ, Московское Общество объединило въ своемъ составѣ наибольшее число отечественныхъ представителей точной науки. Черезъ посредство этихъ носителей знанія оно утвердило свою связь съ высшими разсадниками чистаго и прикладнаго математическаго образованія въ Россіи. Педагогическій Совѣтъ Императорскаго Московскаго Техническаго Училища постоянно включалъ въ числѣ своихъ сочленовъ нѣсколькихъ представителей общества, съ успѣхомъ служившихъ дѣлу техническаго образованія, которое всецѣло строится на твердомъ изученіи основъ чистой и прикладной математики. Въ виду исполнившагося двадцатипятилѣтія плодотворной дѣятельности Московскаго Математическаго Общества Педагогическій Совѣтъ Императорскаго Москов-

скаго Техническаго Училища съ чувствомъ признательности вспоминаеть о своей непрерывной связи съ обществомъ и выражаетъ сердечныя пожеланія того, чтобы объединенная дѣятельность членовъ общества непрерывно развивалась въ пользу отечественной точной науки въ ея теоріи и въ практическомъ приложеніи. 9 января 1894 года».

Адресъ былъ прочитанъ профессоромъ Н. А. Шапошниковымъ въ засѣданіи означеннаго Общества 9 января 1894 г.

Въ засѣданіи Совѣта 7 февраля 1894 г. были утверждены нижеслѣдующія темы для сочиненій на 1894—95 учебный годъ:

А) На золотую медаль:

- 1) О торфяномъ отопленіи паровыхъ котловъ.
- 2) Производство сульфитной древесной целюлозы.

Б) На премію Политехнической выставки:

- 1) О многофазныхъ динамо-машинахъ и электро-двигателяхъ.

Въ засѣданіи Совѣта 12 апрѣля 1894 года обсуждался вопросъ объ измѣненіи программы черченія въ I общемъ классѣ. Постановлено: 1) программу черченія для I общаго класса уменьшить на отдѣлъ архитектурнаго черченія, который полностью присоединить къ программѣ черченія II общаго класса; 2) время, назначенное для практическихъ занятій въ мастерскихъ во II общемъ классѣ уменьшить на три годовыхъ часа, присоединивъ ихъ къ часамъ, назначеннымъ для черченія.

IV. Личный составъ служащихъ.

а) Почетные члены Педагогическаго Совѣта.

Дѣйствительный тайный совѣтникъ Иванъ Алексѣевичъ Вышнеградскій.

Академикъ, дѣйствительный тайный совѣтникъ Пафнуцій Львовичъ Чебышевъ.

Тайный совѣтникъ Петръ Іоновичъ Губонинъ.

Военный инженеръ, генераль-майоръ Амандъ Егоровичъ Струве.

Президентъ технологическаго института въ Бостонѣ, профессоръ Джонъ Рункль.

Дѣйствительный статскій совѣтникъ Дмитрій Ивановичъ Менделѣевъ.

б) Корреспондентъ Педагогическаго Совѣта.

Инженеръ-механикъ Александръ Веніаминовичъ Бари.

в) Управление Училищемъ и служащіе по административной и учебно-воспитательной части.

Попечитель Московскаго Учебнаго Округа, графъ Павелъ Алексѣевичъ Капнистъ.

Директоръ, дѣйствительный статскій совѣтникъ Иванъ Васильевичъ Аристовъ.

Инспекторъ:	{	Давыдовскій, Василій Федоровичъ, статскій совѣтникъ (по 1 іюля 1894 года).
		Циркуновъ, Николай Петровичъ, статскій совѣтникъ (съ 1 августа 1894 года).

Помощникъ инспектора, статскій совѣтникъ Николай Петровичъ Циркуновъ (по 1 августа 1894 г.).

Профессоры:

Прикладной механики:	{	Зерновъ, Дмитрій Степановичъ, кандидатъ Московскаго университета, инженеръ-технологъ, сост. въ V кл.
		Нибитинскій, Яковъ Яковлевичъ, ученый инженеръ-технологъ, статскій совѣтникъ.

Химической технологии:	{	Рудневъ, Владиміръ Матвѣевичъ, магистръ химіи С.-Петербургскаго университета, инженеръ-технологъ, статскій совѣтникъ.
------------------------	---	---

Строительнаго искусства: Черепашинскій, Михайль Михайловичъ, сост. въ V кл.

Химической технологии по отдѣлу крашенія. Петровъ, Петръ Петровичъ, ученый инженеръ-технологъ, дѣйствительный статскій совѣтникъ.

Общей и прикладной физики: Щегляевъ, Владиміръ Сергѣевичъ, магистръ физики Московскаго университета, сост. въ V кл.

Органической и неорганической химіи. Колли, Александръ Андреевичъ, магистръ химіи Московскаго университета, статскій совѣтникъ.

Аналитической механики: Жуковскій, Николай Егоровичъ, докторъ прикладной математики Московскаго университета, дѣйствительный статскій совѣтникъ.

Построенія машинъ. Худяковъ, Петръ Кондратьевичъ, ученый инженеръ-механикъ, губернский секретарь.

Сверхштатный профессоръ:

Математики: Шапошниковъ, Николай Александровичъ, магистръ чистой математики Московскаго университета, статскій совѣтникъ.

Доценты:

По кафедрѣ строительнаго искусства: Залѣсскій, Василій Герасимовичъ, инженеръ-архитекторъ, статскій совѣтникъ.

По кафедрѣ аналитической химіи: Павловъ, Владиміръ Евграфовичъ, кандидатъ С.-Петербургскаго университета, коллежскій секретарь.

По кафедрѣ технологии волокнистых веществъ: Федоровъ, Семень Андреевичъ, ученый инженеръ-механикъ, сост. въ VII кл.

Преподаватели:

Богословія: Виноградовъ, Николай Сергѣевичъ, священникъ, кандидатъ богословія.

По технологіи металловъ и дерева:

Гавриленко, Александръ Павловичъ, губернской секретарь.

Француз. языка:

Газанъ, Морисъ Альфонсовичъ, французскій гражданинъ.

Нѣмецкаго языка:

Бикъ, Евгенийъ Николаевичъ, статскій совѣтникъ.

Естественной исторіи:

Мѣшаевъ, Викторъ Дмитриевичъ, статскій совѣтникъ.

Статистики:

Фуксъ, Владиміръ Александровичъ, статскій совѣтникъ (съ 1 апрѣля 1894 г. изъ платы по найму).

Бухгалтеріи:

Владиміровъ, Моисей Евстафійевичъ, статскій совѣтникъ.

Проектированія:

Зубаревъ, Дмитрій Васильевичъ, коллежскій секретарь (съ 1 ноября 1893 года).

Страховъ, Петръ Сергѣевичъ, губернской секретарь (съ 13 сентября 1893 года).

Марковъ, Николай Ивановичъ, губернской секретарь (съ 13 сентября 1893 года).

Зворыкинъ, Владиміръ Васильевичъ, губернской секретарь (съ 13 сентября 1893 года).

Черченія:

Ронжинъ, Николай Васильевичъ, надворный совѣтникъ.

Рисованія:

Турчаниновъ, Капитонъ Федоровичъ, статскій совѣтникъ.

Лаборанты:

Главный лаборантъ:

Ланговой, Сергѣй Петровичъ, коллежскій секретарь.

Помощники глав-

Поляковъ, Александръ Андреевичъ, коллежскій ассессоръ.

наго лаборанта:

Солонина, Василий Андреевичъ, коллежскій ассессоръ.

Репетиторы:

Михалевскій, Иванъ Елеазаровичъ, статскій совѣтникъ.
Карельскихъ, Константинъ Павловичъ, губернский секретарь.

Тумскій, Константинъ Ивановичъ, статскій совѣтникъ.

Сидоровъ, Анатолій Ивановичъ, коллежскій секретарь.

Ассистенты:

По каѳедрѣ меха- Румянцевъ, Василій Алексѣе-
ники: вичъ, титулярный совѣтникъ.

По каѳедрѣ физики: Величковскій, Анатолій Пор-
фирьевичъ, коллежскій секретарь.

Воспитатели:

Пѣвницкій, Викторъ Ивановичъ, статскій совѣтникъ.

Дмитревскій, Иванъ Петровичъ, коллежскій ассессоръ.

Смирновъ, Владиміръ Александровичъ, коллежскій сек-
ретарь.

Орловъ, Владиміръ Владиміровичъ, коллежскій секретарь
(испр. должн.); онъ же библіотекаръ.

Богаевскій, Петръ Михайловичъ, коллежскій секретарь.

Письмоводитель при инспекторѣ:

Кречетовъ, Петръ Семеновичъ.

Служащіе по хозяйственной и административной части:

Помощникъ дирек- Панинъ, Павелъ Федоровичъ, над-
тора по хозяйствен- ворный совѣтникъ.
ной части:

Правитель дѣлъ: Еремѣевъ, Федоръ Дмитриевичъ,
коллежскій совѣтникъ.

Бухгалтеръ: Лакашинъ, Владиміръ Петровичъ,
коллежскій совѣтникъ.

Врем. исполн. обя- Никифоровъ, Александръ Але-
зан. архитектора: ксѣевичъ, статскій совѣтникъ.

И. д. эконома: Поляковъ, Андрей Гавриловичъ,
коллежскій совѣтникъ.

Казначей и полицеймейстеръ: Глейнигъ, Николай Андреевичъ,
коллежскій совѣтникъ.

Кастелянша: Хавская, Елизавета Алексѣевна.

При церкви:

Священникъ: Виноградовъ, Николай Сергѣевичъ, кандидатъ богословія.

Діаконъ (на вакансіи псаломщика): Любимовъ, Александръ Александровичъ.

Церковный староста: Бородинъ, Николай Михайловичъ, пот. поч. гр.

При лазаретѣ:

Врачъ: Карлинъ, Михаилъ Арсеньевичъ,
дѣйствительный статскій совѣтникъ.

Сверхштат. врачъ. Боголюбовъ, Мелитонъ Петровичъ, статскій совѣтникъ.

Старш. фельдшеръ. Воронцовъ, Петръ Никитичъ,
коллежскій регистраторъ.

Младш. фельдшеръ: Кирилловъ, Александръ Кирилловичъ, коллежскій регистраторъ.

Учебныя мастерскія и механическій заводъ:

Инспекторъ учебныхъ мастерскихъ: Протопоповъ, Павелъ Петровичъ, титулярный совѣтникъ (онъ же секретарь и членъ Педагогич. Совѣта).

Завѣдывающіе механическимъ заводомъ:

Главный инженеръ-механикъ: Пермяковъ, Александръ Ивановичъ, коллежскій асессоръ.

Помощникъ главнаго инженеръ-механика: Петровъ, Никаноръ Петровичъ, коллежскій асессоръ.

Завѣдывающіе мастерскими:

Учебно-слсарною:	Гиллертъ, Вильгельмъ Арнольд- вичъ, ученый мастеръ.
Чертежною и то- карною по металлу:	Поповъ, Степанъ Дмитріевичъ, ученый мастеръ.
Токарною по де- реву:	Козловъ, Владиміръ Ильичъ, ма- стеръ.
Модельною:	Михайловъ, Андрей Михайло- вичъ, ученый мастеръ.
Кузнечною:	Лукинъ, Федоръ Григорьевичъ, ученый мастеръ.
Литейною:	Ларионовъ, Герасимъ Ларионо- вичъ, ученый мастеръ.

Смотритель мастерскихъ:

Благообразовъ, Николай Ивановичъ.

г) Движеніе по службѣ.

Уволены по прошеніямъ: а) *отъ дѣйствительной службы:* преподаватель статистики, статскій совѣтникъ Фуксъ—съ 1 февраля 1894 года; б) *отъ должности:* инспекторъ, статскій совѣтникъ Давыдовскій—съ 1 іюля 1894 года (т.-е. со дня назначенія его инспекторомъ студентовъ Московскаго университета).

Определены: а) *на дѣйствительную службу:* преподавателями проектированія: губернскіе секретари Страховъ, Марковъ и Зворыкинъ—всѣ трое съ 13 сентября 1893 года и приватный преподаватель черченія, коллежскій секретарь Зубаревъ—съ 1 ноября 1893 года; б) *изъ платы по найму:* преподавателемъ статистики, статскій совѣтникъ Фуксъ—съ 1 апрѣля 1894 года.

Назначены: помощникъ инспектора, статскій совѣтникъ Циркуновъ—инспекторомъ Императорскаго Техническаго Училища, съ 1 августа 1894 года; инспекторъ учебныхъ

мастерскихъ, титулярный совѣтникъ Протопоповъ и преподаватель черченія, надворный совѣтникъ Ронжинъ — членами Педагогическаго Совѣта на 18^{93/94} учебный годъ, съ 27 іюля 1893 года.

Избранъ: въ секретари Педагогическаго Совѣта на 18^{93/94} учебный годъ инспекторъ учебныхъ мастерскихъ, титулярный совѣтникъ Протопоповъ—13 сентября 1893 года.

Произведены, за выслугу лѣтъ, со старшинствомъ: въ *статскіе совѣтники* — преподаватель Владиміровъ (по Московскому реальному училищу); въ *надворные совѣтники:* преподаватель Ронжинъ—съ 3 декабря 1890 года и помощникъ директора по хозяйственной части Панинъ—съ 30 января 1894 года; въ *коллежскіе ассессоры:* главный инженеръ-механикъ Пермиковъ—съ 10 іюля 1893 года, воспитатель Дмитревскій—съ 1 іюня 1893 года и помощники главного лаборанта Поляковъ — съ 23 сентября 1892 года и Солонина—съ 22 апрѣля 1893 года; въ *титулярные совѣтники:* ассистентъ Румянцевъ—съ 14 сентября 1892 года и въ *коллежскіе секретари:* главный лаборантъ Ланговой—съ 18 мая 1893 года и и. д. воспитателя, бібліотекаръ Орловъ—съ 18 октября 1893 года.

Утверждены, со старшинствомъ: въ *чинъ коллежскаго секретаря:* репетиторъ Сидоровъ (по степени кандидата)—съ 1 августа 1893 года и воспитатель Богаевскій (по диплому 1-й степени)—съ 3 іюня 1893 года и въ *чинъ губернскаго секретаря* (по званію инженеръ-механика): преподаватели Гавриленко—съ 27 августа 1888 года, Зворыкинъ, Марковъ и Страховъ—всѣ трое съ 13 сентября 1893 года и репетиторъ Карельскихъ — съ 1 октября 1879 года.

Награждены: чиномъ действительнаго тайнаго совѣтника—почетный членъ Педагогическаго Совѣта, академикъ Чебышевъ и орденскими знаками *Св. Анны 2 ст.:* профессоръ Щегляевъ и доцентъ Залѣсскій; *Св. Станислава 2 ст.:* профессоръ Худяковъ и преподаватель Мѣшаевъ и *Св. Станислава 3 ст.:* преподаватель Петровъ (онъ же помощникъ главного инженеръ-механика).

Государь Императоръ, по всеподданнѣйшему докладу Г. Министра Финансовъ, въ 25 день марта 1894 года

Высочайше соизволилъ утвердить профессоръ Императорскаго Техническаго Училища Никитинскаго и Колли въ должности членовъ Московскаго Отдѣленія Совѣта торговли и мануфактуръ на четырехлѣтіе.

Высочайшимъ приказомъ по Министерству Народнаго Просвѣщенія отъ 24 мая 1894 года за № 7 профессоръ по кафедрѣ построенія машинъ Императорскаго Техническаго Училища Худяковъ былъ командированъ съ ученою цѣлю за границу, для осмотра всемірной выставки въ г. Антверпенѣ, срокомъ съ 1 іюня по 1 сентября 1894 года.

Государь Императоръ, по всеподданнѣйшему докладу Г. Министра Финансовъ, въ 27 день мая 1894 года Высочайше соизволилъ назначить профессора Императорскаго Техническаго Училища Руднева почетнымъ членомъ Московскаго Отдѣленія Совѣта торговли и мануфактуръ.

По распоряженію Господина Министра Народнаго Просвѣщенія, директоръ Императорскаго Техническаго Училища дѣйствительный статскій совѣтникъ Аристовъ былъ командированъ по дѣламъ службы въ С.-Петербургъ срокомъ съ 3 по 23 марта 1894 года.

V. Ученые труды профессоръ и преподавателей.

1. Профессоръ Н. Е. Жуковскій напечаталъ слѣдующія статьи:

а) въ «Математическомъ Сборникѣ» — «Къ вопросу о разрѣзаніи вихревыхъ шнуровъ»;

б) въ «Трудахъ отдѣленія физическихъ наукъ Общества Любителей Естествознанія» — «О скольженіи ремня на шкивахъ»,

в) въ «Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung» — «Geometrische Interpretation des Hess'schen Falles der Bewegung eines schweren starren Körpers um einen festen Punkte».

2. Профессоръ Я. Я. Никитинскій напечаталъ въ журналѣ «Техническій Сборникъ и Вѣстникъ Промышленности» рядъ статей подъ общимъ заглавіемъ: «Новости и замѣтки по техникѣ броженія», а также статьи:

а) «Заводъ для культуры чистыхъ винокуренныхъ дрожжей»; б) «Обзоръ способовъ производства картофельныхъ консервовъ и сохраненія картофеля»;

в) «Производство кукурузнаго крахмала въ Соединенныхъ Штатахъ».

3. Профессоръ П. К. Худяковъ напечаталъ нѣсколько статей въ журналъ «Техническій Сборникъ и Вѣстникъ Промышленности» — по машиностроенію, технологіи металловъ и библиографіи; редактировалъ «Бюллетени Политехническаго Общества».

4) Профессоръ В. М. Рудневъ напечаталъ въ журналъ «Хозяинъ» за 1894 г. статью: «О подсочкѣ хвойныхъ деревьевъ»; кромѣ того продолжалъ составленіе краткихъ статей по химической технологіи для «Энциклопедическаго словаря» Брокгауза.

5. Профессоръ Д. С. Зерновъ совмѣстно съ другими лицами участвовалъ въ напечатаніи обзора проектовъ водоснабженія города Баку.

6. Преподаватель А. И. Сидоровъ напечаталъ въ журналъ «Техническій Сборникъ и Вѣстникъ Промышленности» нѣсколько замѣтокъ по машиностроенію. Въ Политехническомъ Обществѣ сдѣлалъ сообщенія: «о двуцентральной діаграммѣ Брикса» и «объ электрическихъ кранахъ». Кромѣ того въ «Бюллетеняхъ Политехническаго Общества» помѣстилъ нѣсколько замѣтокъ по машиностроенію.

7. Преподаватель Н. В. Ронжинъ въ лѣтнихъ засѣданіяхъ специальной комиссіи по обученію черченію при Учебномъ Отдѣлѣ Политехническаго Музея сдѣлалъ слѣдующія сообщенія: 1) О циркуляхъ Гедерика, Эртеля, Графа, золотомъ для дѣленія угла на три равныя части и о кронциркулѣ Gloriá; 2) о параболографѣ Инварда; 3) о штриховальныхъ приборахъ Андреева, Шлейхера и Шюль, Кароли Жюрги, Рифлера, Рихтера, Кейльбаха и Парашевеску; 4) о способѣ Корр'а для построения коробовой линіи; 5) о приборѣ Кирхнера для объясненія очертанія зубьевъ по разверзающей и 6) о коллекціяхъ по линейной оттѣнкѣ и для элементарнаго изученія проекціоннаго черченія.

8. Лаборантъ В. А. Солонина напечаталъ въ «Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft» за 1893 годъ статью

подъ заглавіемъ: «Ueber die Einwirkung von Natrium auf γ—Brompropylphenyläther» и ту же статью напечатали въ журналъ Рускаго Физико-химическаго Общества за 1894 г.

VI. Личный составъ учащихся:

1) Распределение студентовъ по классамъ къ началу 1893—94 учебнаго года.

К Л А С С Ы	Казенно-коштныхъ.	Папсіоновъ.	Приходящихъ.	ИТОГО.
1 общій классъ	—	6	154	160
2 общій классъ механическаго отдѣленія....	10	6	90	106
2 общій классъ химическаго отдѣленія....	1	2	10	13
3 общій классъ механическаго отдѣленія....	13	1	103	117
3 общій классъ химическаго отдѣленія.....	1	1	14	16
I спеціальный классъ механическаго отд....	15	4	36	55
I спеціальный классъ химическаго отд.	4	—	16	20
II спеціальный классъ механическаго отд ...	10	6	54	70
II спеціальный классъ химическаго отд.....	5	—	8	13
III спеціальный классъ механическаго отд...	13	1	34	48
III спеціальный классъ химическаго отд.....	—	—	6	6
Итого	72	27	525	624

2) Распределение студентов по учебным заведениям, въ которыхъ они окончили курсъ ученія до поступленія въ Училище.

Въ Императорскихъ Университетахъ съ дипл. 1-й и 2-й ст.	30
› Лицеѣ Цесаревича Николая	1
› Классическихъ гимназійхъ	48
› Новоалександрійскомъ Институтѣ Сельскаго Хоз.	1
› Нижегородскомъ Дворянскомъ Институтѣ	2
› Коллегіи Павла Галагана.....	1
› Коммисаровскомъ Техническомъ Училищѣ.....	45
› Иркутскомъ Техническомъ Училищѣ	2
› Приготов. классѣ Рижскаго Политехническаго Училища	1
› Реальныхъ Училищахъ	450
› Гатчинскомъ Институтѣ	4
› Коммерческихъ училищахъ	8
› Практической Академіи коммерческихъ наукъ..	6
› Межевомъ институтѣ	1
› Духовныхъ семинаріяхъ	9
› Кадетскихъ корпусахъ	15
Итого....	624

3) Распределение студентовъ по вѣроисповѣданіямъ.

Православнаго	475
Единоувѣрцевъ	4
Старообрядцевъ	2
Армяно-Григоріанскаго	17
Римско-католическаго.....	64
Евангелическо-лютеранскаго	28
Англиканскаго.....	1
Иудейскаго	25
Караимовъ	6
Магометанскаго.....	2
Итого.....	624

4) Распределение студентов по званиямъ.

Дворянъ	104
Потомственныхъ почетныхъ гражданъ	48
Купцовъ	79
Духовнаго званія	23
Дѣтей чиновниковъ	111
Мѣщанъ	155
Крестьянъ	54
Цеховыхъ	6
Иностранцевъ	22
Кавказскихъ жителей	10
Казаковъ	4
Личныхъ почетныхъ гражданъ	8
Нтого	624

5) Въ теченіе 1893—94 академическаго года состояли стипендіатами:

Имени Его Императорскаго Величества (Коломенской Городской Думы) — Шевелевъ Николай и Тарасовъ Андрей.

Имени въ Бозѣ почивающей Императрицы Маріи Ѳеодоровны (Собственной Его Императорскаго Величества Канцеляріи по учрежденіямъ Императрицы Маріи)—Кузьминъ Николай.

Имени въ Бозѣ почивающаго Его Императорскаго Высочества Петра Георгіевича Ольденбургскаго—Купріяновъ Сергѣй.

Имени въ Бозѣ почивающаго Его Императорскаго Высочества Великаго Князя Константина Николаевича (Московского Биржеваго Комитета)—Мозжухинъ Василій.

Имени бывшаго Министра Финансовъ М. Х. Рейтерна (Московского Биржеваго Комитета)—Михайловъ Алексѣй.

Имени Князя С. М. Голицына—Скворцовъ Петръ.

Кавказскими стипендіатами: Авакянцъ Тевторосъ, Боровскій Викторъ, Буржинскій Владиміръ, Кржижановскій Всеволодъ, Побѣдимовъ Владиміръ, Хелаевъ Евграфъ, Худенко Алексѣй и Чхейдзе Георгій.

6) Свѣдѣнія о числѣ студентовъ къ 1 января 1894 года съ подраздѣленіемъ ихъ на группы по отбыванію воинской повинности:

Состоящихъ на отсрочкѣ:	a) по вынутымъ жеребьямъ.	93
	b) по заявленіямъ о желаніи отбыть воинскую повинность вольноопредѣляющимися	175
Подлежащихъ призыву, но не достигшихъ еще призывнаго возраста		180
Ратниковъ ополченія по неспособности или по льготамъ по семейному положенію		125
Состоящихъ въ запасѣ арміи		14
Казаковъ		7
Кавказскихъ уроженцевъ, не подлежащихъ призыву.		2
Финландскихъ уроженцевъ, состоящихъ на отсрочкѣ.		1
Иностранцевъ		20
Бывшихъ иностранцевъ, принявшихъ присягу на подданство Россіи послѣ достиженія призывнаго возраста		3
Освобожденныхъ навсегда отъ воинской повинности.		4

Итого 624

7) Вѣдомость о результатахъ переводныхъ и выпускныхъ испытаній.

К Л А С С Ы.	Переведено.	Оставлено на 2 годъ.	Уволено съ пра- вомъ держать вступительный экзаменъ въ авгу- стѣ 1894 года.	Уволено съ пра- вомъ держать переходный эк- заменъ въ маѣ 1895 года.	Уволено по разнымъ причинамъ.	Выбыло по прощеніямъ.	Кончили курсъ.	ИТОГО.
1 общій классъ.....	116	25	2	3	12	2	—	160
2 общ. кл. мех. отд....	74	20	—	2	5	5	—	106
2 общ. кл. хим. отд....	4	5	—	1	3	—	—	13
3 общ. кл. мех. отд....	88	24	—	3	1	1	—	117
3 общ. кл. хим. отд. ..	11	1	—	—	2	2	—	16
I спец. кл. мех. отд....	49	5	—	—	1	—	—	55
I спец. кл. хим. отд....	14	5	—	—	1	—	—	20
II спец. кл. мех. отд....	65	4	—	—	1	—	—	70
II спец. кл. хим. отд. .	13	—	—	—	—	—	—	13
III спец. кл. мех. отд....	—	4	—	—	—	—	44	48
III спец. кл. хим. отд....	—	—	—	—	—	—	6	6
Итого....	434	93	2	9	26	10	50	624

8) Выпускъ студентовъ въ 1893—94 учебномъ году.

А) Удостоены званія инженеръ-механика съ награжденіемъ Вы-
сочайше утвержденнымъ знакомъ отличія.

Абрамовъ Александръ.

Баккаль Илья.

Алексѣевъ Александръ.

Басовъ Степанъ.

Алексѣевъ Константинъ.

Васильевъ Николай.

Вилькенъ Густавъ.	Некрасовъ Кирилль.
Волобуевъ Степанъ.	Николаевъ-Назаровъ.
Волынко Евгений.	Владиміръ.
Головинскій Николай.	Орловскій Семенъ.
Горячкинъ Василій.	Пліонсковскій Иванъ.
Галаховъ Николай.	Семеновъ Павелъ.
Долголенко Валерьянъ.	Смирновъ Николай.
Донде Авраамій.	Соколовъ Сергій.
Ергопуло Викторъ.	Солуюъ Георгій.
Жонголовичъ Станиславъ.	Хобаевъ Василій.
Карчагинъ Дмитрій.	Чернояровъ Георгій.
Коржевинъ Дмитрій.	Шульгинъ Дмитрій.
Кузнецовъ Константинъ.	Шуръ Елья.
Кулагинъ Николай.	Юдичевъ Григорій.
Лысенковъ Сергій.	Юнге Федоръ.
Малиновскій Николай.	Шевелевъ Николай.
Машкилейсонъ Ааронъ.	Федоровъ Иванъ.
Мокиевскій-Зубокъ Сергій.	Фоминъ Василій.

Б) Удостоены званія инженеръ-механика.

Гуревичъ Самуиль.	Нигулинъ Василій.
Мадатовъ Аконъ.	

*В) Удостоены званія инженеръ-технолога съ награжденіемъ
Высочайше утвержденнымъ знакомъ отличія..*

Акуновъ Иванъ.	Либау Густавъ.
Бражниковъ Василій.	Напалковъ Викторъ.
Кислаковский Леонидъ.	Рейзинъ Иуда.

По опредѣленію Педагогическаго Совѣта, на основаніи § 22 Высочайше утвержденного Устава, удостоены званія ученаго инженеръ-технолога, инженеръ-технологъ Илья Александровичъ Федоровъ за представленное имъ сочиненіе «Газовое отопленіе и стеклоплавильныя печи».

По опредѣленію Педагогическаго Совѣта, на основаніи примѣчанія къ § 22 Устава Училища, удостоены званія инженеръ-механика ученый мастеръ Голиковъ Митрофанъ.

По опредѣленію Педагогическаго Совѣта, на основаніи § 26 Устава Училища, удостоены за выдающіяся техниче-

скія заслуги: 1) званія инженеръ-механика безъ гражданскихъ правъ, присвоенныхъ сему званію: Боклевскій Иванъ, Давыдовъ Михайлъ, Извъговъ Гавріиль, Климентовъ Николай, Сорокинъ Василій и Фихтеръ Владиміръ; 2) званія механика-строителя безъ гражданскихъ правъ, сему званію присвоенныхъ—Михайловъ Владиміръ.

9. Приѣмъ студентовъ въ августѣ мѣсяцѣ 1894 года.

Подано прошеній о приѣмѣ на I курсъ 269 и въ III общій классъ 14, а всего.....	283
Явилось къ повѣрочнымъ испытаніямъ	244
Подверглись испытаніямъ по всѣмъ предметамъ.....	198
Прекратили экзамены до окончанія оныхъ	46
Успѣшно выдержали повѣрочныя испытанія.....	190
Принято на I курсъ	110
Принято безъ экзамена въ III общій классъ	14

Распределение вновь принятыхъ студентовъ по вѣроисповѣданіямъ:

Православныхъ.....	95
Армяно-григоріанскаго	6
Римско-католическаго	8
Евангелическо-лютеранскаго	9
Иудейскаго	4
Караимовъ	1
Магометанскаго	1

Распределение вновь принятыхъ студентовъ по учебнымъ заведеніямъ, въ которыхъ они окончили курсъ:

Въ Императорскихъ университетахъ.....	14
« классическихъ гимназіяхъ.....	12
« коллегіи Павла Галагана.....	1
« реальныхъ училищахъ.....	86
« коммерческихъ училищахъ.....	2
« духовныхъ семинаріяхъ.....	1
« кадетскихъ корпусовъ.....	4
« Комисаровскомъ Техничес. Училищѣ...	4

10) Распределение студентов по классамъ къ 1 сентября 1894 года.

К Л А С С Ы.	Вновь при- ято.	Перегрето.	Остались на 2 годъ.	И Т О Г О.	Казенныхъ.	Пансіоне- ровъ.	Приходя- щихъ.	И Т О Г О.
1 общій классъ	110	—	25	135	1	2	132	135
2 общій кл. мех. отд.	—	89	20	109	1	4	104	109
2 общ. кл. хим. отд.	—	27	5	32	—	—	32	32
3 общ. кл. мех. отд.	14	74	24	112	11	4	97	112
3 общ. кл. хим. отд.	—	4	1	5	1	—	4	5
I спец. кл. мех. отд.	—	88	5	93	10	—	83	93
I спец. кл. хим. отд.	—	11	5	16	3	—	13	16
II спец. кл. мех. отд.	—	49	4	53	14	2	37	53
II спец. кл. хим. отд.	—	14	—	14	2	—	12	14
III спец. кл. мех. отд.	—	65	4	69	10	1	58	69
III спец. кл. хим. отд.	—	13	—	13	5	—	8	13
И т о г о . . .	124	434	93	651	58	13	580	651

VII. Командировки и экскурсии.

Въ теченіе лѣтняго вакаціоннаго времени 1894 г. студенты обоихъ отдѣленій, переведенные на послѣдній курсъ, были командированы на средства училища на фабрики, заводы и желѣзныя дороги для практическихъ занятій съ цѣлю приготовленія къ проектированію по машиностроенію и по специальнымъ предметамъ. Для наилучшаго обозрѣнія сихъ командировокъ прилагается нижеслѣдующая вѣдомость.

НАИМЕНОВАНИЕ ФАБРИКЪ, ЗАВОДОВЪ И ЖЕЛѢЗНЫХЪ ДОРОГЪ.	Число студентовъ командирован- ныхъ для приготовленія къ про- ектированію по				
	Технологіи металловъ и дерева.	Технологіи волоконист. веществъ.	Химическимъ производ- ствамъ.	Машино- строенію.	Инженер- ному ис- кусству.
Валтійскій судостроительный и меха- нический заводъ.....	2	—	—	2	—
Брянскій рельсовый заводъ.....	4	—	—	3	—
Коломенскій машиностроительный за- водъ.....	2	—	—	4	—
Машиностроительный заводъ бр. Бромлей и К ^о	5	—	—	—	—
Машиностроительный заводъ Добро- выхъ и Наболецъ.....	1	—	—	3	—
Обуховскій сталелитейный заводъ....	1	—	—	2	—
Путиловскій заводъ.....	3	—	—	2	—
Машиностроительный заводъ Торго- ваго дома „Густавъ Листъ“.....	2	—	—	8	—
Р. О. П. и Т. Одесскій механический и ремонтный заводъ.....	1	—	—	—	—
Механич. и чугунно-литейный заводъ Беллино-Фендерихъ.....	1	—	—	—	—
Сысертскіе чугунно-литейн. и желѣз. заводы.....	1	—	—	—	—
Московскій металлическій заводъ....	1	—	—	—	—
С.-Петербургскій металлическій заводъ.	—	—	—	2	—
Невскій механический заводъ.....	—	—	—	5	—
Сармовскіе заводы.....	—	—	—	2	—
Тульскія мастерскія Московско-Кур- ской жел. дороги.....	—	—	—	1	—
Кіевскія мастерскія Юго-Западныхъ жел. дорогъ.....	—	—	—	1	—
Ярославская большая мануфактура...	—	5	—	—	—

НАИМЕНОВАНИЕ ФАБРИКЪ, ЗАВОДОВЪ И ЖЕЛѢЗНЫХЪ ДОРОГЪ.	Число студентовъ, командирован- ныхъ для приготовления къ про- ектированію по				
	Технологіи металловъ и дерева.	Технологіи волоконист. веществъ.	Химическимъ производ- ствамъ.	Машино- строенію.	Инженер- ному искус- ству.
Раменская фабрика Пр. и Тор. Тов. „П. Мalyтина С.“	—	4	—	—	—
Фабрика Тов. мануфактуръ „Косьмы Прохорова С-ми“	—	1	—	—	—
Реутовская мануфактура.	—	1	—	—	—
Никольская мануфактура Саввы Мо- розова Сынъ и К ^о	—	2	1	—	—
Фабрика Тов. мануф. Н. Н. Коншина въ Серпуховѣ.	—	1	—	—	—
Суконная фабрика Баскакова.....	—	—	1	—	—
Богородско-Глуховская мануфактура .	—	—	2	—	—
Фабрика Никона Гарелина Сыновей.	—	—	3	—	—
Гусевскій хрустальный заводъ Нечае- ва-Мальцева	—	—	2	—	—
Свекло-сахарный заводъ Платицына .	—	—	1	—	—
Лебединскій свекло-сахарный заводъ.	—	—	1	—	—
Товар. нефтяного производства Бр. Нобель.....	—	—	3	—	—
Химическій заводъ А. А. Бродскаго въ Одессѣ	—	—	1	—	—
Химическій заводъ Н. Понизовкина Сыновья въ г. Ярославлѣ.....	—	—	1	—	—
Кожевенный заводъ Н. М. Брусни- цына.....	—	—	1	—	—
Балашово-Харьковская жел. дорога..	—	—	—	—	3
Владикавказская желѣзная дорога....	—	—	—	—	3
Закавказская желѣзная дорога.	—	—	—	—	4
Московско-Курская желѣзная дорога	—	—	—	—	1
Новоторжская желѣзная дорога.....	—	—	—	—	1
Рязско-Вяземская жел. дор.....	—	—	—	—	1
Курско-Харьковская-Азовская ж. дор.	—	—	—	—	1
Рязанско-Уральская жел. дорога.....	—	—	—	—	4
Уральская жел. дорога	—	—	—	—	1
Финляндская жел. дорога.	—	—	—	—	2
Юго-Западная жел. дор.....	—	—	—	—	1
Ярославская жел. дорога	—	—	—	—	1

Студенты во время командировокъ занимались по инструкціямъ, утвержденнымъ Педагогическимъ Совѣтомъ училища (см. отчетъ за 1892—93 учебный годъ), и по возвращеніи въ училище представили гг. профессорамъ, завѣдующимъ проектированіемъ, надлежащіе отчеты о своихъ лѣтнихъ занятіяхъ.

Педагогическій Совѣтъ долгомъ считаетъ принести глубокую благодарность гг. фабрикантамъ, заводчикамъ и управляющимъ желѣзными дорогами, при содѣйствіи которыхъ командированные студенты получили возможность собрать всѣ необходимые данныя для составленія учебныхъ проектовъ.

Кромѣ вышеозначенныхъ лѣтнихъ командировокъ студенты всѣхъ специальныхъ классовъ въ теченіе отчетнаго года во время экскурсій осмотрѣли: подъ руководствомъ профессора П. П. Петрова — Прохоровскую Трехгорную мануфактуру, Никольскую мануфактуру Саввы Морозова Сына въ Орѣховѣ-Зуевѣ, фабрику Кондрашева; подъ руководствомъ профессора В. М. Руднева — стеклянный заводъ Дютфуа, химическій заводъ бр. Лепешкиныхъ, городскія бойни, заводы: салотопленный, мангариновый, альбуминный, фабрику парфюмернаго производства т-ва Брокаръ, Невскій стеариновый заводъ, нефтяной заводъ въ Кусковѣ, газовый заводъ; подъ руководствомъ профессора П. К. Худякова — машиностроительный заводъ Струве въ г. Колѣмнѣ; подъ руководствомъ доцента С. А. Федорова — Прохоровскую Трехгорную мануфактуру; подъ руководствомъ проф. Я. Я. Никитинскаго и преподавателей А. П. Гавриленко и А. И. Сидорова — Московскій металлическій заводъ; подъ руководствомъ проф. П. К. Худякова, инспектора мастерскихъ П. П. Протопопова и главнаго инженеръ-механика А. И. Пермякова — Крестовскія башни, Алексѣевскую водокачку и Мытищинскій водопроводъ; подъ руководствомъ главнаго инженеръ-механика А. И. Пермякова, репетитора К. И. Тумскаго и завѣдующаго мастерской А. К. Весселя — Московскую городскую прачечную, фабрику Басакова, Даниловскую мануфактуру и городскія бойни.

2. Физическій кабинетъ.

Къ началу 1893—94 учебнаго года числилось по инвентарю:
 Физическихъ приборовъ,
 инструментовъ, таб-
 лицъ, книгъ, мебели и
 проч. 997 предм. на сумму 20798 р. 58 к.
 Въ теченіе года приоб-
 рѣтено 23 > > > 544 > 7 >

Итого къ началу 1894 —

1895 г. числится 1020 предм. на сумму 21342 р. 65 к.

3. Механическій кабинетъ.

Къ началу 1893—94 уч. года въ механическомъ каби-
 нетѣ по инвентарю числилось:

I. Кинематическихъ моделей	129 нум.	140 предм.
II. Моделей машинъ и деталей ма- шинъ	152 >	166 >
III. Измѣрительныхъ приборовъ и инструментовъ	89 >	100 >
IV. Книгъ, чертежей и таблицъ ...	17 >	181 >

Итого 387 нум. 587 предм.

Всего на сумму 10254 р. 80 к.

Въ теченіе 1893—94 уч. года приобрѣтено:

1 модель для изученія зубчатыхъ зацѣплений стоимостью
 147 руб. 25 коп.;

1 модель регулятора Армингтона и Симса стоимостью 96 руб.

1 модель регулятора Вестингхауса стоимостью 94 руб.
 30 коп. и

1 индикаторъ Макъ-Иннеса съ 4-мя пружинами, 1 коле-
 сомъ для уменьшенія хода и прочими принадлежностями
 стоимостью 112 руб. 50 коп.

Такимъ образомъ къ началу 1894—95 уч. года въ ме-
 ханическомъ кабинетѣ по инвентарю числится:

I. Кинематическихъ моделей	132 нум.	143 предм.
II. Моделей машинъ и деталей машинъ	152 >	166 >
III. Измѣрительныхъ приборовъ и инструментовъ	90 >	101 >
IV. Книгъ, чертежей и таблицъ	17 >	181 >

Итого 391 нум. 591 предм.

Всегѣ на сумму 10708 руб. 85 коп.

4. Кабинетъ естественной исторіи.

Къ началу 18^{93/94} учебнаго года по инвентарю числилось:

а) Минераловъ, моделей кристалловъ и пр.	1916
б) Зоологическихъ препаратовъ, моделей и пр. и по анатоміи человѣка	481
в) Ботаническихъ моделей, продуктовъ и пр.	155
г) Инструментовъ	70
д) Атласовъ, таблицъ, книгъ и пр.	140
Итого	2762

Сверхъ того мебели	98
На сумму	4749 р. 10 к.

Вновь приобрѣтено:

Минераловъ и ископаемыхъ	25
Коллекція моделей кристалловъ	1
Итого	26 предм.
На сумму	60 руб.

Всего къ 18^{94/95} числится:

Въ коллекціяхъ	2788 предм.
Мебели	98 >
На сумму	4809 р. 10 к.

5. Геодезическія кабинетъ.

Къ началу 1893—94 академическаго года по инвентарю числилось:

Различныхъ геодезическихъ инструментовъ 86

Въ теченіе года приобрѣтеній и исключеній не было.

Къ началу 1894—95 г. числится геодезическихъ приборовъ 86 на сумму 1515 р. 17 к.

6. Пособія по начертальной геометріи.

Къ началу 1893—94 академическаго года по инвентарю числилось:

Таблицъ начертальной геометріи	43
Лекаль	17
Коллекція рельефныхъ моделей	1
Всего ...	61

Въ теченіе года приобрѣтеній и исключеній не было.

Къ началу 1894—95 г. числится 61 на сумму 80 руб.

7. Учебныя пособія по черченію.

Къ началу 1893—94 учебнаго года по инвентарю числилось:

Разныхъ коллекцій, чертежей, оригиналовъ, моделей, и инструментовъ 1300 на сумму 2048 р. 38 к.
 Приобрѣтеній и исключеній не было.
 Къ началу 1894—95 учебнаго года состоитъ 1300 на сумму 2048 р. 38 к.

8. Учебныя пособія по рисованію.

Къ началу 1893—94 учебнаго года по инвентарю числилось:

Академическихъ рисунковъ, геометрическихъ тѣлъ, коллекцій гипсовыхъ орнаментовъ, деталей машинъ и пр..... 1043 на сумму 510 р. 37 к.
 Въ теченіе года никакихъ приобрѣтеній и исключеній не было:

Къ началу 1894—95 года числится..... 1043 на сумму 510 р. 37 к.

9. Пособія по техническому черченію.

Къ началу 1893—94 академическаго года по инвентарю числилось:

Различныхъ коллекцій чертежей, оригиналовъ, моделей и инструментовъ.	642 экз.	на сумму	4789 р.	5 к.
Въ теченіе года приобрѣтено	85 >	>	1345 >	92 >
> > > исключено.	28 >	>	227 >	60 >

Итого къ началу 1894—

1895 года остается ... 699 экз. на сумму 5907 р. 37 к.

10. Пособія по технологіи металловъ и дерева.

Къ началу 1893—94 учебнаго года числилось по инвентарю.

Чертежей..... 17

Образцовъ орудій 28

Разныхъ коллекцій 7

Всего 52

Въ теченіе года поступленій не было. Къ началу 1894—1895 учебнаго года числится 52 экземпляра на сумму 487 р. 39 к.

11. Кабинетъ механической технологіи волокнистыхъ веществъ.

Въ 1893—94 году состояло:

1 приборъ для опредѣленія титра шелка.

1 вѣски для опредѣленія вѣса и № пряжи.

1 динамометръ Perreux.

1 приборъ М. Alcan для испытанія пряжи.

1 модель волкъ-машины,

1 модель скатывающего аппарата.

1 модель ленточной машины.

86 настѣнныхъ таблицъ чертежей.

1 коллекція образцовъ волокнистыхъ веществъ въ сырѣ.

1 коллекція образцовъ пряжи и тканей.

- 4 коллекціи, иллюстрирующія послѣдовательный ходъ фабричныхъ производствъ.
- 1 коллекція кардныхъ лентъ русскихъ и иностранныхъ.
- 1 коллекція образцовъ орудій и разныхъ принадлежностей для прядильныхъ и ткацкихъ фабрикъ.
- 1 ручной ткацкій станъ съ машиною Жаккара.
- 1 дифференціальный механизмъ для банкаброшей.
- 1 замокъ для банкаброшей.
- 1 машина стараго типа для наборки кардъ.
- 1 коллекція кардныхъ лентъ съ фабрики Horsfalle et Bickham.
- 1 приборъ для опредѣленія крѣпости и растяжимости пряжи.
- 6 таблицъ настѣнныхъ чертежей.
- 1 приборъ Salter's для испытанія крѣпости и эластичности пряжи.
- 1 модель хлопко очистительной машины пыльной системы (Saw-gin).

12. Библіотека.

Къ началу 1893—94 учебнаго года числилось 11056 названій въ 17575 томахъ на сумму.....	38660 р. 70 к.
Въ теченіе 1893—94 учебнаго года поступило 491 названіе въ 676 томахъ на сумму.	2901 „ 9 „
Къ началу 1894—95 учебнаго года числится 11547 названій въ 18251 томахъ на сумму.....	41561 „ 79 „

13. Учебныя мастерскія.

а) Кабинетъ учебныхъ мастерскихъ.

Къ началу 1893—94 академическаго года въ кабинетѣ учебныхъ мастерскихъ числилось по инвентарю:	
Разныхъ образцовыхъ инструментовъ, приборовъ, таблицъ, коллекцій и машинъ	827
Разнаго рода предметовъ.....	34
Въ теченіе года поступленій не было.	
Къ началу 1894—95 академическаго года числится по инвентарю 861 экз. на сумму 5508 р. 41 к.	

б) Токарная по дереву мастерская.

Въ истекшемъ 1893—94 учебномъ году въ токарной по дереву мастерской занималось 94 студента, которыми исполнено 2419 отдѣльныхъ работъ.

Къ началу 1893—94 учебнаго года въ мастерской по инвентарю числилось:

Приводныхъ токарныхъ станковъ	10
Ножныхъ токарныхъ станковъ.....	37
Верстаковъ столярныхъ.....	3
Точильныхъ камней въ чугунныхъ коробкахъ.	3
Круглая приводная пила.....	1
Лобзиковой ножной станокъ	1
Разнаго рода инструментовъ	820
Разнаго рода предметовъ.....	615

Итого къ началу 1894—95 учебнаго года по инвентарю числится 1490 штукъ на сумму 2954 р. 68 к.

Учебныя пособія мастерской:

Коллекція наръзовъ, состоящая изъ	12 экз.
Коллекція моделей, состоящая изъ	25
Коллекція инструментовъ, состоящая изъ.....	161
Коллекція инструментовъ увеличенныхъ въ 6 разъ, состоящая изъ	24
Коллекція патроновъ къ токарнымъ станкамъ состоящая изъ.....	7
Коллекція породъ различныхъ деревьевъ, состоя- щая изъ	30

Итого на сумму 348 р. 68 к.

в) Модельно-столярная мастерская.

Въ истекшемъ 1893—94 учебномъ году въ модельно-столярной мастерской занималось 97 студентовъ, которыми было исполнено 1580 упражненій и 178 вполне законченныхъ моделей

Къ началу 1893—94 учебнаго года въ мастерской числилось по инвентарю:

Верстаковъ столярныхъ	57
Станковъ токарныхъ	5
Универсальная пила и сверлимая машина съ принадлежностями	2
Точиль для инструментовъ	2
Принадлежностей къ машинамъ	158
Разныхъ моделей	229
Разнаго рода инструментовъ	1937
Разнаго рода предметовъ	162

Въ теченіе года приобрѣтено разнаго рода инструментовъ 73; исключено разнаго рода инструментовъ 59.

Итого къ началу 1894—95 учебнаго года по инвентарю числится 2566 экз. на сумму 4375 р. 31 к.

Учебныя пособія мастерской.

Двѣ коллекціи соединеній дерева, состоящія изъ	135 экз.
Коллекція моделей, состоящая изъ	34 »
Коллекція инструментовъ увеличенныхъ въ 6 разъ, состоящая изъ	31 »
Коллекція инструментовъ для строганія дерева, со- стоящая изъ	21 »
Коллекція инструментовъ для пиленія дерева, со- стоящая изъ	19 »
Двѣ коллекціи инструментовъ для сверленія и дол- бленія дерева, состоящія изъ	89 »
Коллекція измѣрительныхъ инструментовъ, со- стоящая изъ	22 »

Итого на сумму 1513 р. 67 к.

г) Металло-токарная мастерская.

Въ истекшемъ 1893—94 академическомъ году въ металло-токарной мастерской занимались 87 студентовъ, которыми исполнено было 1126 отдѣльныхъ работъ.

Къ началу 1893—94 академическаго года въ мастерской числилось по инвентарю:

Самоточка	1
Суппортовъ	10
Токарныхъ станковъ съ принадлежностями ..	34
Точиль съ чугунными ящиками	2
Горнь съ вентиляторомъ	1
Наковальня	1
Разныхъ инструментовъ и принадлежностей мастерской	469

Въ теченіе года приобрѣтеній и исключеній не было.

Къ началу 1894—95 академическаго года числится въ мастерской 518 предметовъ на сумму 3919 р. 38 к.

Учебныя пособія мастерской.

Двѣ коллекціи образцоваго инструмента, со- стоящаго изъ	193 экз.
Двѣ коллекціи образцовъ токарнаго по ме- таллу искусства, состоящія изъ	106 >

На сумму 154 р. 24 к.

д) Слесарная мастерская.

Въ истекшемъ 1893—94 академическомъ году въ учебно-слесарной мастерской занималось 173 студента, которыми исполнено 716 отдѣльныхъ работъ.

Къ началу 1893—94 академическаго года числилось по инвентарю:

1. Верстаковъ	28
2. Тисокъ слесарныхъ	113
3. Машинъ стругальныхъ ручныхъ	2
4. Машинъ сверлильныхъ ручныхъ	5
5. Станокъ для сверленія коловоротомъ	1
6. Точило двойное	1
7. Горнь съ вентиляторомъ	1
8. Столовъ чугунныхъ	4
9. Разнаго рода предметовъ	1201
10. Разнаго рода инструментовъ	3663

Въ теченіе года приобрѣтено разнаго рода инструментовъ 36 штукъ, исключено разнаго рода инструментовъ 227 штукъ.

Итого къ началу 1894—95 академическаго года числится по инвентарю 4828 экз. на сумму 5443 р. 7 к.

Учебныя пособія мастерской отнесены къ кабинету учебныхъ мастерскихъ.

е) Чугунно-мѣдно-литейная мастерская.

Въ истекшемъ 1893—94 академическомъ году въ чугунно-мѣдно-литейной мастерской занималось 56 студентовъ, которыми исполнено 1081 отдѣльная работа.

Къ началу 1893—94 академическаго года въ мастерской числилось по инвентарю:

Паровой горизонтальный двигатель въ 4 силы съ котломъ системы Фильда.....	1
Вентиляторовъ.....	1
Вагранокъ.....	2
Самодувный горнъ для трехъ тиглей.....	1
Печь для плавки мѣди системы Piut.....	1
Литейныхъ крановъ.....	1
Опокъ чугунныхъ.....	613
Грузовъ чугунныхъ вѣсомъ 814 пуд.....	28
Моделей чугунныхъ.....	23
Печь для сушки стержней.....	1
Станковъ для шаблонной формовки.....	2
Верстаковъ съ козлами.....	7
Разныхъ инструментовъ.....	222
Разнаго рода предметовъ.....	260
Въ теченіе года приобрѣтенъ вентиляторъ Рута.....	1

Итого къ началу 1894—95 академическаго года числится по инвентарю 1164 шт. на сумму 7331 р. 46 к.

Учебныя пособія мастерской.

Коллекція образцовыхъ инструментовъ, состоящая изъ..... 76 экз.

Коллекція принадлежностей для формовки состоящая изъ..... 60 „

Кромѣ занятій со студентами въ литейной мастерской съ

помощью наемныхъ рабочихъ съ 1 сентября 1893 по 1 сентября 1894 г. отлито 15483 п. 15¹/₄ ф. чугуна и 231 п. 27³/₄ ф. мѣди.

ж) *Кузнечная мастерская.*

Въ истекшемъ 1893—94 учебномъ году въ кузнечной мастерской занималось 54 студента, которыми исполнено 1096 отдѣльныхъ работъ.

Къ началу 1893—94 учебного года числилось по инвентарю:

Паровой молотъ въ ¹ / ₂ тонны	1
Горны ordinарные и двойные	6
Кузнечный мѣхъ въ станкѣ	1
Станокъ для сварки желѣза	1
Жомъ для гнутаго колѣнчатыхъ валовъ	1
Вентиляторъ	1
Тисокъ столовыхъ желѣзныхъ	2
Желѣзныхъ резервуаровъ для воды	2
Вѣсы десятичные съ гирями и разновѣсками ..	1
Шкафовъ для храненія работъ	2
Разныхъ кузнечныхъ инструментовъ	649
Разнаго рода предметовъ	112

Въ теченіе 1893—94 учебного года помѣщеніе кузнечной мастерской было расширено и вновь поставлено 4 горна. Кромѣ того было приобрѣтено разнаго рода предметовъ 41 экз.

Итого къ началу 1894—95 учебного года числилось по инвентарю 824 экз. на сумму 3867 р. 97 к.

Учебныя пособія мастерской.

Образцовая коллекція инструментовъ, состоящая изъ 110 экз.

Образцовая коллекція кузнечныхъ работъ состоящая изъ

40 >

На сумму 224 р. 29¹/₄ к.

з) *Механическая мастерская.*

Въ истекшемъ 1893—94 академическомъ году въ механической мастерской занималось 111 студентовъ, исполнившихъ 89 отдѣльныхъ работъ по сборкѣ машинъ.

Между работами наиболѣ выдающіеся: паровые насосы, паровыя машины, токарныя станки, супорты, ручныя насосы и проч.

Къ началу 1893—94 академическаго года въ механической мастерской числилось по инвентарю:

Трубчатый паровой котель въ 30 силъ....	1
Постоянный котель батарейной системы...	1
Вертикальная паровая машина системы «Уай- та» съ коромысломъ низ. давл. въ 25 силъ.	1
Паровая горизонтальная машина въ 16 силъ.	1
Паровыхъ водокачекъ	1
Водомѣръ «Шмидта»	1
Приводовъ трансмиссій	3
Сверлильных машинъ разныхъ системъ:	
> > приводныхъ	6
> > ручныхъ	3
Стругальныхъ машинъ	7
Долбежныхъ машинъ	2
Шпоночныхъ машинъ	1
Винторѣзныхъ машинъ	1
Фрезовыхъ машинъ	2
Дѣлительныхъ машинъ	1
Станковъ токарныхъ по металлу	8
Самоточекъ разныхъ величинъ	9
Разныхъ принадлежностей къ машинамъ ...	1977
Тисокъ слесарныхъ	64
Верстаковъ слесарныхъ	8
Разнаго рода предметовъ	221
Разныхъ инструментовъ	4137

Въ теченіе года приобрѣтено:

Приборъ для опредѣленія сухости пара	1
Водотрубный паровой котель сист «Шухова	1
Болторѣзная машина съ принадлежностями.	1
Разныхъ инструментовъ	948

Исключено:

Паровая водокачка	1
Трубчатый паровой котель въ 30 силъ	1

Винторѣзная машина съ принадлежностями	1
Разныхъ инструментовъ	752
Токарный станокъ съ принадлежностями	1
Разнаго рода предметовъ	10

Итого къ началу 1894—95 академическаго года числится 6641 экз. на сумму 38110 р. 36 к.

Учебныя пособія отнесены къ кабинету учебныхъ мастерскихъ.

Механическая мастерская при участіи остальныхъ мастерскихъ кромѣ занятій со студентами съ помощью наемныхъ рабочихъ съ 1 сентября 1893 года и по 1 сентября 1894 года исполнила заказовъ для частныхъ лицъ на сумму 75160 р. 50 к.

Выдающимися работами изъ числа этихъ заказовъ были слѣдующія:

Паровыхъ машинъ «Танги» отъ 2 до 35 силъ.	7
Конденсаторовъ къ паровой машинѣ	1
Турбинъ «Конваля» различныхъ конструк.	4
Гидравлическихъ прессовъ	2
Винтовыхъ прессовъ	1
Стругальныхъ продольныхъ «Шеппинга» и др.	4
Токарныхъ станковъ разныхъ	17
Насосовъ разныхъ	16
Супортовъ и патроновъ для токарныхъ станковъ	20
Тисковъ разныхъ	36
Задвижекъ водопроводныхъ	106
Пожарныхъ крановъ	68
Подъемниковъ для доменной печи	1
Вальцевыхъ станковъ	1
Вѣтряныхъ двигателей «Давыдова»	14

Краткій отчетъ о дѣятельности Политехническаго Общества, состоящаго при Императорскомъ Техническомъ Училищѣ

за 1893—94 г.

Къ 1 апрѣля 1894 года Политехническое Общество состояло: изъ 22 почетныхъ членовъ по избранію, 14 почетныхъ по § 9 Устава, 12 членовъ сотрудниковъ и 300 дѣйствительныхъ членовъ.

Въ отчетномъ году Общество имѣло 9 засѣданій: одно годовичное Собраніе Общества 30 марта 93 г.; шесть обыкновенныхъ засѣданій, въ которыхъ слушались и обсуждались доклады по различнымъ техническимъ вопросамъ, происходили выборы новыхъ дѣйствительныхъ членовъ Общества, обсуждались текущіе дѣла и проч., и два обыкновенныхъ засѣданія, въ которыхъ, кромѣ обсужденія техническихъ вопросовъ и текущихъ дѣлъ, обсуждался уставъ ссудо-вспомогательной кассы, предположенной къ открытію при Обществѣ.

Отчеты обо всѣхъ засѣданіяхъ были помѣщены въ бюллетеняхъ Общества, которые выходили заранѣе передъ каждымъ засѣданіемъ и были своевременно разсылаемы членамъ Общества.

Въ засѣданіи 24 апрѣля 1893 года слушались 2 сообщенія:

а) Почетнаго члена Н. Е. Жуковского: «О часовомъ механизмѣ *«échappement libre»* съ демонстраціей приборовъ».

б) Дѣйствительнаго члена П. К. Энгельмейера: «Наглядное объясненіе устройства и классификація динамо-машинъ, съ демонстраціей чертежей и моделей».

Въ засѣданіи 25 сентября 1893 г. слушалось 1 сообщеніе:

Члена-сотрудника Е. Э. Бромлей: «О водоподъемныхъ машинахъ Мытищинской водокачки».

Въ засѣданіи 23 октября 1893 г. слушались 4 сообщенія:

а) Дѣйствительнаго члена А. П. Гавриленко: «О примѣненіи электричества для нагрѣванія металловъ».

б) Дѣйствительнаго члена С. Я. Тимоховича:

1. «О нормальной укладкѣ трубъ при паровомъ и водяномъ отопленіи».

2. «Объ открытыхъ паровыхъ котлахъ».

3. По поводу сочиненія Вебба и Кокса—«Восьмичасовой рабочій день». Дополнительные данныя изъ русской фабричной практики.

Кромѣ назначенныхъ на это засѣданіе сообщеній, Н. П. Зиминъ, дѣйствительный членъ Общества, доложилъ: «О случаѣ выбрасыванія воды изъ резервуара Крестовской водонапорной башни Московскаго водопровода».

Въ засѣданіи 20 ноября 1893 г. слушалось 1 сообщеніе:

Почетнаго члена Н. Е. Жуковскаго: «О скользяніи ремня на шкивахъ».

Кромѣ сообщенія разсматривались:

1. докладъ комиссіи, занимавшейся разработкой проекта кассы при Обществѣ, и

2. докладъ Справочнаго Отдѣла о привлеченіи окончившихъ курсъ техникувъ къ дѣлу взаимопомощи.

Въ засѣданіи 18 декабря 1893 г. слушались 2 сообщенія:

а) Дѣйствительнаго члена С. И. Меерсона: «Объ изобрѣтенномъ имъ электро-сигналѣ при манометрѣ», съ демонстраціей прибора.

б) Дѣйствительнаго члена К. И. Тумскаго: «О Петербургской Гигіенической выставкѣ».

Въ засѣданіи 19 февраля 1894 г. слушались 2 сообщенія:

а) Дѣйствительнаго члена Н. П. Зимина: «О гидравлическихъ подъемникахъ системы Отиса».

б) Дѣйствительнаго члена А. И. Сидорова: «О двухцентровой золотниковой діаграммѣ, точно указывающей перемѣщенія золотника».

Кромѣ назначенныхъ на это засѣданіе сообщеній А. Э. Ливенъ, дѣйствительный членъ Общества, сдѣлалъ сообщеніе: «О новомъ приборѣ для пришабриванія вентилей», съ демонстраціей прибора.

Въ засѣданіи 19 марта 1894 г. слушались 2 сообщенія:

а) Почетнаго члена Н. Е. Жуковского: «О теоріи летанія, предложенной Д. К. Черновымъ и о летательномъ аппаратѣ профессора Вельнера», съ демонстраціей рисунковъ съ помощью волшебнаго фонаря.

б) Дѣйствительнаго члена А. И. Сидорова: «Объ электрическомъ подъемномъ кранѣ, работающемъ на Коломенскомъ заводѣ», съ чертежами.

Въ отчетномъ году Общество напечатало:

1. Отчетъ о своей дѣятельности за 1892—93 годъ (около 5 печатныхъ листовъ).

2. Десять бюллетеней въ объемѣ около $41\frac{3}{4}$ печатн. листовъ и 5 приложений къ нимъ около $8\frac{3}{4}$ печатн. лист. Бюллетени и приложенія снабжены всѣми нужными чертежами, которыхъ въ общей сложности было 27 листовъ.

Съ № 4 бюллетеней началось печатаніе въ нихъ объявленій техническаго характера, которыхъ къ концу года напечатано около $13\frac{3}{8}$ печатн. листовъ.

Въ отчетномъ году каждый членъ Общества получилъ 50 печатныхъ листовъ текста бюллетеней съ приложениями, не считая чертежей и объявленій.

Такого огромнаго количества печатнаго матеріала Общество еще никогда не давало безвозмездно своимъ членамъ.

При сравненіи съ прошлыми годами обнаруживается слѣдующая разница: въ 1892—93 году дано было около 14 печатныхъ листовъ, а въ предыдущіе 3 года менѣе 5 печатныхъ листовъ.

Совѣтъ Общества стремился не только къ увеличенію объема бюллетеней путемъ печатанія въ нихъ въ возможно большей полнотѣ дѣлаемыхъ сообщеній, но желалъ по мѣрѣ возможности ввести въ нихъ все то, что могло быть интересно и полезно для членовъ Общества.

Съ этой цѣлью въ бюллетеняхъ Общества началось печатаніе хроники И. Т. Училища, хроники Политехническаго Общества, библиографическія замѣтки, разныя техническія статьи въ видѣ приложений и наконецъ объявленія, имѣющія интересъ и могущія быть полезны въ технической дѣятельности членовъ Общества.

Вотъ перечень статей, помѣщенныхъ въ бюллетеняхъ Общества и въ приложенияхъ къ нимъ за отчетный годъ:

1. «Новые чертежные инструменты» (съ чертежемъ). Дѣйствительнаго члена Н. В. Ронжина.

2. «Къ вопросу о расчетѣ и выполненіи ременной передачи». Дѣйствительнаго члена А. И. Сидорова.

3. «Ножной кузнечный молотъ» (съ чертежемъ). Дѣйствительнаго члена Ф. А. Данилова.

4. «Къ вопросу о расчетѣ канатной передачи». Дѣйствительнаго члена А. И. Сидорова.

5. «Случай деформаци топочныхъ трубъ парового котла при чрезмѣрномъ паденіи въ немъ уровня воды во время работы» (съ чертежемъ). Почетнаго члена и вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

6. «Примѣненіе электрической спайки металловъ въ Воронежскихъ паровозныхъ мастерскихъ». Почетнаго члена П. К. Худякова.

7. «Приемы, употребляемые на Сызрано-Вяземской ж. дор. при ремонтѣ и установкѣ главныхъ частей машины паровоза» съ чертежемъ. Воспитанника Кулагина.

8. «Расцѣпочныя таблицы и сдѣльные цѣны на кузнечныя, токарныя и строительныя работы». Дѣйствительнаго члена Н. В. Кречмера.

9. «Объ инструментальной стали: «Выборъ стали,ковка, варка, закаливаніе и отпусканіе стали». Дѣйствительнаго члена Ѳ. И. Щеголева.

10. «О теоретическомъ циклѣ паровыхъ машинъ», съ рисунками въ текстѣ. Дѣйствительнаго члена А. Э. Ливена.

11. «Техническія условія на постановку рельсовъ на западно-Сибирской жел. дор.» Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

12. «Новый аппаратъ для надѣванія ремней на шкивы», съ рисункомъ въ текстѣ. Дѣйствител. члена А. А. Мигулина.

13. «Вагранка Гербертца». Инж.-техн. П. С. Степанова.

14. «Марганцовая сталь». Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

15. «Наивыгоднѣйшее соотношеніе между размѣрами цилиндровъ въ паровыхъ прямодѣйствующихъ насосахъ многократнаго расширенія». Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

16. «Сравненіе механическихъ фабричныхъ приводовъ съ электрической передачей къ машинамъ-орудіямъ». Дѣйствительнаго члена А. И. Сидорова.

17. «Употребленіе литого желѣза въ машиностроеніи и постройкахъ». Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

18. «Описаніе установки вертикальной паровой машины въ 3500 индикаторн. силъ съ черт. Инж.-мех. Н. В. Кабачинскаго.

19. «Первый желѣзо-дѣлательный заводъ въ Китаѣ». Дѣйствительнаго члена Г. Л. Гречина.

20. «Техническія условія на поставку рельсовыхъ скрѣпленій». Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

21. «Паровые котлы Шухова» съ чертежемъ. Вице-предсѣдателя П. К. Худякова.

22. «Техническія примѣненія алюминія». Вице-предсѣдателя Н. К. Худякова.

23. «Отчетъ о заграничной поѣздкѣ въ 1891—92 году». Дѣйствительнаго члена А. А. Зяблова.

24. «О примѣненіи паровыхъ и гидравлическихъ двигателей для совмѣстнаго движенія фабрикъ и заводовъ», съ чертеж. на отдѣл. таблицѣ. Дѣйствител. члена А. Ф. Грязнова.

25. «Переносная печь для сжиганія зараженныхъ вещей», съ чертежемъ на отдѣльной таблицѣ. Дѣйствительнаго члена М. С. Давыдова.

26. «Кузнечный нефтяной горнъ» съ чертежемъ на отдѣльной таблицѣ. Дѣйств. чл. М. М. Гладышева.

27. «О дѣйствии кислоты на свинецъ». И. Н.

28. «Насосы прямого дѣйствія», съ черт. Дѣйств. члена В. Г. Шухова.

29. «Матеріалы къ вопросу объ освѣщеніи свѣтильнымъ газомъ большихъ городовъ», съ чертежами. Дѣйствительнаго члена К. П. Агеева.

30. «Обточка эксцентриговъ». Дѣйств. чл. О. И. Щеголева.

31. «О замѣнѣ обыкновенныхъ кузнечныхъ горновъ печами», съ чертежами. Инж.-мех. А. П. Боклевскаго.

32. «О перегонкѣ сѣрной кислоты». Дѣйствител. члена С. П. Лангового.

33. «Къ вопросу объ отопленіи большихъ заводскихъ котловъ нефтяными остатками», съ чертежами. Дѣйствительнаго члена С. А. Нетыкса.

34. «Консервированіе дерева», съ черт. Дѣйствител. члена Н. А. Филипова.

35. «Поврежденіе топокъ», съ черт. Дѣйств. члена Г. Л. Гречина.

36. «Опыты съ керосиновымъ двигателемъ Яковлева».

37. «Случай сплющиванія трубы у конденсатора» съ чертежемъ. Дѣйств. члена М. С. Давыдова.

38. «Антифрикціонные сплавы», съ черт. Дѣйств. члена П. С. Страхова.

39. «Очеркъ развитія и совершенствованія грузоподъемныхъ машинъ». Дѣйств. члена А. И. Сидорова.

40. «Гидравлическіе подъемники Отисъ». Дѣйств. члена Н. П. Зимина.

Въ этомъ перечнѣ не упомянуты библиографическія замѣтки и разныя мелкія техническія статьи.

Приливъ денежныхъ пожертвованій въ Общество за истекшій годъ былъ вполне удовлетворителенъ.

Поступило пожертвованій:

I. Въ капиталъ имени покойнаго профессора О. Е. Орлова 1340 р. 53 к.

II. Въ фондъ для вспомошествованія нуждающимся техникамъ 984 р. 90 к.

III. Въ капиталъ имени покойнаго профессора А. В. Лѣтникова 5 р.

IV. Въ пользу ослѣпшаго товарища, ученаго мастера И. Я. Колмогорова 151 р.

V. На усиленіе средствъ для изданія бюллетеній 135 р.

VI. Въ оборотный капиталъ для взаимопомощи 555 р.

Всѣхъ денежныхъ пожертвованій въ различные капиталы Общества въ отчетномъ году поступило на сумму 3171 р. 43 к.

Изъ постановленій годичнаго собранія Общества, состоявшагося 19 апрѣля 1894 г., особаго вниманія заслуживаютъ:

1. Годичное Собраніе утвердило 2 нижеслѣдующія темы для сочиненій на премію почетнаго члена О-ва Ю. С. Нечаева-Мальцова, имѣющихъ быть предствленными къ 1 января 1897 года.

а) **Керосиновые двигатели.** Сочиненіе должно заключать въ себѣ ясно изложенную теорію этихъ двигателей, описаніе наиболѣе извѣстныхъ типовъ ихъ, критическую оцѣнку ихъ конструкціи и указанія на достоинства и недостатки ихъ со стороны экономичности дѣйствія и удобства примѣненія. Въ сочиненіи д. б. указаны литературные источники, которыми пользовался авторъ.

б) **Очистка сточныхъ водъ свекло-сахарныхъ и крахмальныхъ заводовъ.** Работа д. б. литературнаго характера и должна содержать обзоръ и критическій разборъ матеріаловъ, имѣющихся въ иностранныхъ и русскихъ литературныхъ источникахъ. Желательны также собственныя лабораторныя изслѣдованія и наблюденія изъ практики.

2. По предложенію Совѣта О-ва, годичное Собраніе, желая почтить плодотворную педагогическую дѣятельность бывшаго профессора И. Т. У. и бывшаго (съ 1883/4 по 1885/6 г.) вице-президента Политехническаго О-ва *Александра Карловича Эшлмана*, на основаніи пункта б § 9 устава, единогласно избрало его въ почетные члены Политехническаго О-ва, какъ лицо, оказавшее важныя услуги дѣлу техническаго образованія въ Россіи.

3. По предложению Совета О-ва, годовичное Собрание, желая почтить плодотворную деятельность инженеръ-механика *Александра Беніаминовича Бари*, весьма много способствовавшего развитію отечественной нефтяной промышленности и всегда сочувственно относившагося къ Императорскому Техническому Училищу, къ бывшимъ его воспитанникамъ и къ Политехническому Обществу, на основаніи пунктовъ 6 и 2 § 9 устава, единогласно избрало А. В. Бари въ почетные члены Политехническаго О-ва, какъ лицо, оказавшее важныя услуги русской промышленности, Императорскому Техническому Училищу и Политехническому Обществу.

ОТЧЕТЪ

о дѣятельности Общества вспомошествованія нуждающимся студентамъ Императорскаго Московскаго Техническаго Училища

за 1893 годъ,

Къ 1 января 1893 г. личный составъ Общества состоялъ: изъ 1 почетнаго члена и 238 дѣйствительныхъ членовъ.

Въ теченіе отчетнаго года поступило 11 членовъ и было по разнымъ причинамъ 10 членовъ. Къ 1-му января 1894 года состоитъ: 1 почетный членъ и 239 дѣйствительныхъ членовъ.

Въ теченіе года было одно Общее Собраніе членовъ Общества (30 мая) и 5 засѣданій Комитета Общества (11 марта, 17 апрѣля, 13 октября, 9 ноября и 17 декабря).

Въ засѣданіи Комитета Общества 11 марта Предсѣдательницей Общества В. А. Морозовою возбужденъ былъ вопросъ объ увеличеніи денежныхъ средствъ Общества и ею предложено было устроить концертъ въ театрѣ Корша съ участіемъ Мазини и другихъ выдающихся пѣвцовъ итальянской труппы. Къ сожалѣнію, концертъ этотъ по непредвидѣннымъ обстоятельствамъ не могъ состояться. Тѣмъ не менѣе Предсѣдательницею Общества внесено было въ кассу Общества 1600 рублей, собранныхъ ею въ видѣ пожертвованій на устроенномъ ею домашнемъ вечерѣ.

Въ засѣданіи Комитета Общества 13 октября Товарищъ Предсѣдателя Н. П. Зиминъ доложилъ Комитету составленную казначеемъ Общества вѣдомость о должникахъ Общества, причемъ обратилъ вниманіе Комитета на то обстоя-

тельство, что многіе изъ означенныхъ должниковъ уплатили свой долгъ, не дожидаясь истечения трехлѣтняго срока, постановленнаго Общимъ Собраніемъ членовъ Общества, въ продолженіе котораго они имѣли право не производить никакихъ уплатъ. Въ виду сего, а также въ виду заявленій нѣкоторыхъ изъ должниковъ Общества, окончившихъ курсъ Училища, о томъ, что многіе изъ нихъ легко могли бы уплатить свой долгъ, еслибы имъ было предъявлено со стороны Комитета требованіе объ уплатѣ ранѣе трехлѣтняго срока, Н. П. Зиминъ пришелъ къ заключенію, что Комитету Общества было бы весьма полезно, независимо отъ постановленія Общаго Собранія о нетребованіи уплаты долга до истечения трехлѣтняго срока со дня окончанія курса, посылать напоминаніе и ранѣе сего срока тѣмъ должникамъ Общества, матеріальныя средства которыхъ уже вполне обезпечены. Комитетомъ Общества было постановлено: 1) просить Товарища Предсѣдателя Н. П. Зимина выработать текстъ напоминанія должникамъ Общества въ формѣ письма, изложивъ въ ономъ просьбу объ уплатѣ долга ранѣе истечения трехгодичнаго срока, напечатать это письмо и разослать только къ тѣмъ должникамъ Общества, которые, по имѣющимся свѣдѣніямъ, занимаютъ мѣста съ хорошимъ содержаніемъ; 2) вѣдомость о должникахъ Общества окончившихъ курсъ Училища въ 1890, 1891, 1892 и 1893 годахъ, а также о вышедшихъ изъ Училища до окончанія полного курса, съ показаніемъ въ оной количества выданныхъ и возвращенныхъ пособій и количество оставшагося за ними долга напечатать въ отчетѣ за 1893 годъ. Вышеизложенныя постановленія Комитета въ настоящее время уже приведены въ исполненіе.

Въ томъ же засѣданіи Комитета Предсѣдательница Общества вновь возбудила вопросъ о томъ, какія именно слѣдуетъ принять мѣры для увеличенія денежныхъ средствъ Общества и съ своей стороны предложила Комитету устроить по примѣру 1891 г. рядъ публичныхъ лекцій, давшихъ Обществу болѣе 800 руб. чистаго сбора.

Непремѣнный членъ Комитета Общества И. В. Аристовъ предложилъ Комитету по примѣру 1890 г. обратиться съ особыми письмами къ фабрикантамъ, заводчикамъ, а также

въ Правленія желѣзныхъ дорогъ и Товарищества объ оказаніи Обществу вспоможенія нуждающимся студентамъ Императорскаго Техническаго Училища денежныхъ пособій.

Товарищъ Предсѣдателя Н. П. Зиминъ предложилъ устроить по примѣру прошлыхъ лѣтъ музыкально-литературный вечеръ съ танцами.

По всестороннемъ обсужденіи всѣхъ вышеозначенныхъ предложеній Комитетомъ Общества было постановлено:

1) Просить непремѣннаго члена Комитета Общества директора Императорскаго Техническаго Училища И. В. Аристова переговорить съ профессорами Училища, не найдутъ ли они возможнымъ послѣ 1 января 1894 года прочесть въ пользу Общества нѣсколько публичныхъ лекцій.

2) Устроить въ теченіе ноября мѣсяца музыкально-литературный вечеръ съ танцами.

3) Послать печатныя приглашенія на означенный музыкально-литературный вечеръ съ танцами въ Правленія желѣзныхъ дорогъ, фабрикантамъ, заводчикамъ и въ Правленія Товариществъ.

Означенныя мѣры были приведены въ исполненіе и состоявшійся 12 декабря 1893 года музыкально-литературный вечеръ съ танцами въ залахъ Россійскаго Благороднаго Собранія далъ чистаго сбора 5070 руб. 10 коп.

Въ теченіе отчетнаго года нуждающимся студентамъ для взноса платы за ученіе по 183 поданнымъ прошеніямъ на сумму 11345 р. выдано было 170 лицамъ 5546 р. 24 к. и только 13 лицамъ отказано въ пособіи по разнымъ причинамъ. Сверхъ того въ теченіе года выдано было пособій для взноса платы за столъ при пансіонѣ Училища на сумму 850 р. 83 к. Всего же въ отчетномъ году выдано пособій на сумму 6397 р. 7 к. и сверхъ того израсходовано на почтовые, канцелярскіе и мелкіе расходы 77 р. 79 к.

Изъ отчета казначея Общества слѣдуетъ придти къ заключенію, что отчетный 1893 г въ финансовомъ отношеніи былъ весьма удачнымъ и что къ 1 января 1894 г. въ кассѣ Общества остается наличными деньгами 6023 р. 11 к.

Изъ сравненія же отчетовъ казначея Общества за истекшій 1893 г. съ 1892 г. видно, что въ 1893 г. какъ касса Общества, такъ и всѣ капиталы Общества значительно возрасли, а именно: касса Общества увеличилась на 2832 р. 26 к., капиталъ возвращенныхъ пособій на 215 р., капиталъ имени Д. Н. Лебедева 69 р. 43 к. и капиталъ имени Д. И. Кастальскаго на 11 р. 88 к., всего же на сумму 3128 р. 57 к.

ДЕНЕЖНЫЙ ОТЧЕТЪ

общества вспомошествованія нуждающимся студентамъ Императорскаго Московскаго Техническаго Училища.

за 1893 годъ.

І. О т ч е т ъ п а с с ѣ О б щ е с т в а.

П Р И Х О Д Ъ.		Р А С Х О Д Ъ.		
		Рубли.	Коп.	
Къ 1 января 1893 года состояло:				
Наличными деньгами.....	3150	Выдано пособій для взноса платы за учение 170-ти лицамъ.....	5546	24
Гербовыми марками въ пользу Вѣдомства учреждений Императрицы Маріи.....	39	Выдано пособій для взноса платы за столъ при пансіонѣ Училища.....	850	83
И т о г о...	3190	Израсходовано по устройству вечера 12-го декабря 1893 года:		
		Наличными деньгами.....	215	—
		Гербовыми марками въ пользу Вѣдомства учреждений Императрицы Маріи.....	39	89
		Израсходовано на почтовые, канцелярскіе и мелкіе расходы.....	77	79
		На страхование билетовъ неприкосновеннаго капитала.....	3	50
		И т о г о...	6733	25
Въ теченіе 1893 года поступило:		Къ 1 января 1894 года состоитъ:		
Членскихъ взносов за 1890 г.—10 р., за 1891 г.—30 р., за 1892 г.—160 р., за 1893 г.—1605 р., за 1894 г.—80 р. и за 1895 г.—10 р., всего....	1895	Наличными деньгами.....	5963	21
Единовременныхъ пожертвованій.....	665	Гербовыми марками въ пользу Вѣдомства учреждений Императрицы Маріи.....	59	90
Поступило пожертвованій, собранныхъ Предсѣдательницею Общества В. А. Морозовою.....	1600	И т о г о...	6023	11
Процентовъ съ неприкосновенныхъ капиталовъ....	57			
Поступило пожертвованій по поводу устройства вечера 2-го декабря 1892 года.....	22	В с е г о.....	12756	36
Поступило сбора отъ вечера 12-го декабря 1893 г.: Наличными деньгами.....	5264			
Гербовыми марками въ пользу Вѣдомства учреждений Императрицы Маріи.....	59			
И т о г о...	9565			
В с е г о.....	12756			

II. Отчетъ по капиталамъ Общества.

1) Неприкосновѣй капиталъ.

Приходъ.	Рубли.	Къ Расходъ.	Рубли.	Коп.
Къ 1 января 1893 года состояло:		Перечислено процентовъ съ капитала въ кассу Общества согласно съ правилами пользования капиталомъ	9	50
Билетами 2-го внутрен. съ выигрышами займа.	200			
Въ течение 1893 года поступило:		Къ 1 января 1894 года состоитъ:		
Процентовъ на капиталъ.....	9	Билетами 2-го внутрен. съ выигрыш. займа 200 р..	200	—
И т о г о...	209	Балансъ..	209	50

2) Капиталъ имъ Д. Н. Лебедева.

Приходъ.	Рубли.	Къ Расходъ.	Рубли.	Коп.
Къ 1 января 1893 года состояло:		Перечислено въ кассу Общества половина процен- товъ съ капитала, согласно правилъ пользования капиталомъ.....	25	17
4% облигаціями 4-го внутреннего займа.....	200	Уплачено за пріобрѣтенныя покупкою 5% облигаціи 2-го восточнаго займа.....	205	75
5% облигаціями 2-го восточнаго займа	800	Перечислено въ капиталъ возвращенныхъ пособій..	—	28
Наличными деньгами.....	152			
	1152	Къ 1 января 1894 года состоитъ:		
Въ течение 1893 года поступило:		Облигаціями 4-го 4% внутреннего займа.....	200	—
Процентовъ на капиталъ.....	50	Облигаціями 2-го 5% восточнаго займа.....	1000	—
Пожертвовано А. В. Бари.....	50	Наличными деньгами.....	21	88
5% облигаціями 2-го восточнаго займа пріобрѣтен- ныхъ покупкою.....	200			
Перечислено изъ капитала возвращенныхъ пособій..	—			
	300			
И т о г о...	1453	Балансъ..	1453	08

3) Капиталь имени Кастальскаго.

Приходъ.	Рубли.	Расходъ.	Рубли.	Коп.
Къ 1 января 1893 года состояло:		Перечислено въ кассу Общества половина процен-		
5% облигациями 2 восточнаго займа.....	500	товъ съ капитала, согласно правилъ пользованія		
Наличными деньгами.....	33	капиталомъ	11	87
	533	Къ 1 января 1893 года состоитъ:	11	87
Въ теченіе 1893 г. поступило процентовъ съ капитала	23	5% облигациями 2-го восточнаго займа.....	500	—
		Наличными деньгами.....	45	57
Итого...	537		545	57
		Балансъ...	557	44

4) Капиталь возвращенныхъ пособій.

Приходъ.	Рубли.	Расходъ.	Рубли.	Коп.
Къ 1 января 1893 года состояло:		Перечислено въ кассу Общества процентовъ съ капи-		
4% облигации 4-го внутренняго займа.....	100	тала согласно правилъ пользованія капиталомъ ..	10	92
5% облигации 2-го восточнаго займа.....	100	Платено за прибрѣтенныя 5% облигации 2-го во-		
Наличными деньгами.....	102	сточнаго займа.....	309	20
		Возвращено въ капиталъ имени Д. Н. Лебедева....	—	28
	302			
Въ теченіе 1893 года поступило:			320	40
Процентовъ на капиталъ.....	10	Къ 1 января 1894 года состоитъ:		
Возвращено пособій 9 лицами на сумму	224	4% облигации 4-го внутренняго займа ..	100	—
5% облигациями 2-го восточнаго займа прибрѣтен-	300	5% облигации 2-го восточнаго займа.....	400	—
ныхъ покупкою	—	Наличными деньгами.....	17	32
Временно-позаимствовано изъ капитала Д. Н. Лебе-				
дева.....			517	32
	535	Балансъ...	837	72
Итого...	837			

Счетъ долговыхъ обязательствъ.

	Рубли.	Коп.	Рубли.		Рубли.	Коп.	Рубли.	Коп.
Къ 1 января 1893 года состояло долгу:				списываются долги, возвращенные и по-				
За окончившими курсъ въ 1890 г. на сумму.	35	—	—	купившие въ капиталъ возвращенныхъ по-				
» » » 1891 » » »	1500	19	—	собой:				
» » » 1892 » » »	2599	87	—	» 1 лица выпуска 1890 года.....	35	—	—	—
» » » 1893 » » »	2076	15	—	» 3 лицъ » 1891 »	89	20	—	—
» продолжающими учиться въ Училищѣ				» 1 лица » 1892 »	20	—	—	—
на сумму.....	9988	38	—	» 1 » » 1893 »	25	—	—	—
» вышедшими до окончанія курса на сумму	1265	96	—	» 1 учащагося въ Училищѣ.....	20	—	—	—
» умершими до окончанія » » »	203	92	17669	» 2 лицъ вышедшихъ изъ Училища...	35	—	224	20
Въ теченіи 1893 года выдано студентамъ				Списываются по постановленію годич-				
Императорскаго Техническаго Училища по-				наго Собранія по долговымъ обязатель-				
собой, подлежащихъ возврату по окончаніи				ствамъ отъ 3 лицъ, умершихъ до окон-				
ими курса:				чанія курса.....	203	92	203	92
За право слушанія лекцій на сумму.....	5546	24	—	» 1 января 1894 года числится долгомъ:				
» » пользованія столомъ въ пансіонѣ				» 11 лицами выпуска 1891 года	1410	99	—	—
Училища на сумму.....	850	83	6399	» 25 » » 1892 »	2579	87	—	—
				» 14 » » 1893 »	12051	15	—	—
				» продолжающими учиться въ Училищѣ	6365	45	—	—
				» вышедшими изъ Училища до окончанія				
				курса.....	1230	96	23638	42
Всего выдано за 5 лѣтъ...	—	—	24069	Балансъ....	—	—	24066	54

РАСПРОСТРАНЕНІЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХЪ ВОЛНЪ ВЪ ПРОВОЛОКАХЪ.

Вл. Щегляева.

Проф. И. М. Техническаго Училища.

Занимаясь уже нѣсколько лѣтъ вопросомъ объ электрическихъ колебаніяхъ, я задумалъ въ 1892 году собрать вмѣстѣ и изложить въ системѣ наиболѣе важныя теоретическія работы по этому вопросу. Но съ этого времени появились въ свѣтъ такія обширныя сочиненія по интересующему меня предмету, какъ сочиненія Дж. Томсона ¹⁾, Друде ²⁾, Пуанкаре ³⁾ и Винкельмана ⁴⁾. Въ этихъ трудахъ заинтересовавшія меня теоріи нашли свое мѣсто. Тѣмъ не менѣе считаю не лишеннымъ интереса привести здѣсь выдержку изъ моей работы.

Я останавлиюсь на изученіи распредѣленія медленныхъ электрическихъ колебаній въ подземныхъ кабеляхъ и быстрыхъ электрическихъ колебаній въ нѣкоторыхъ системахъ линейныхъ проводниковъ. При этомъ я заинтересовался выполнить всѣ выводы, основываясь на уравненіяхъ движенія электричества въ той формѣ, какую далъ имъ Гельмгольцъ.

Замѣчу, что при окончательной редакціи я руководствовался также и вышеуказанными работами.

I. Движеніе электричества въ телеграфныхъ кабеляхъ.

§ 1. Представимъ себѣ, что по нѣкоторому проводнику, окруженному діэлектрикомъ, распространяется электрическій токъ.

¹⁾ J. J. Thomson. Recent Researches in El. a Mag. Oxford. 1893.

²⁾ P. Drude. Physik des Aethers. Stuttgart. 1894.

³⁾ H. Poincaré. Les Oscillations Electriques. Paris. 1894.

⁴⁾ A. Winkelmann.. Handb. d. Physik. B. III. 2 Abt. 1895.

Назовемъ черезъ u, v, w слагающія по осямъ координатъ тока въ какой либо точкѣ проводника x, y, z ; пусть ϕ есть потенціалъ свободнаго электричества въ этой точкѣ, а U, V, W суть слагающія векторъ-потенціала.

Тогда слагающія токовъ можемъ выразить такъ *):

$$\begin{aligned}\frac{u}{\sigma} &= -\frac{d\phi}{dx} - A^2 \frac{dU}{dt} \\ \frac{v}{\sigma} &= -\frac{d\phi}{dy} - A^2 \frac{dV}{dt} \\ \frac{w}{\sigma} &= -\frac{d\phi}{dz} - A^2 \frac{dW}{dt}\end{aligned}\quad (1)$$

гдѣ $A = \frac{1}{V}$, если черезъ V назовемъ скорость электричества, а σ есть коэффициентъ электропроводности даннаго проводника.

Кромѣ того, слагающія векторъ-потенціала U, V, W удовлетворяютъ уравненію **):

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{dW}{dz} = -k \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Дифференцируя ур. (1) соотвѣтственно по x, y, z и сложивши ихъ, получимъ, послѣ уравненія (2)

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + \frac{d^2\phi}{dy^2} + \frac{d^2\phi}{dz^2} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) + A^2 k \frac{d^2\phi}{dt^2}.$$

Далѣе можно указать, что въ разсматриваемой системѣ **):

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = \frac{1}{4\pi} \frac{d\Delta\phi}{dt} \quad (3)$$

Послѣ чего можемъ писать:

$$\Delta\phi + \frac{1}{4\pi\sigma} \frac{d\Delta\phi}{dt} = A^2 k \frac{d^2\phi}{dt^2}.$$

Замѣтимъ, что потенціалъ ϕ есть функція координатъ разсматриваемой точки x, y, z и времени t . Допустимъ, что зависимость ϕ отъ времени выражается тѣмъ, что ϕ пропорціонально величинѣ e^{int} . Такъ какъ $\frac{d\phi}{dt} = in\phi$, то можемъ писать:

*) Helmholtz. Wis. Abh. B. I p. 573.

**) Helm. I. c. p. 569—572.

$$\left(1 + \frac{ni}{4\pi\sigma}\right) \Delta\varphi = Ak \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (I).$$

Здѣсь n представляетъ число колебаній распространяющагося по проводнику тока. Если это число не очень велико, а сопротивление проводника $\frac{1}{\sigma}$ весьма мало, то членомъ $\frac{n}{4\pi\sigma}$ можно пренебречь передъ 1 и писать просто:

$$\Delta\varphi = kA^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (I')$$

Это уравненіе, какъ извѣстно, есть основное уравненіе движенія электричества въ проводникѣ. Приложимъ его къ слѣдующему частному случаю.

§ 2. Пусть имѣемъ цилиндрическій проводникъ, ось котораго примемъ за ось z , а плоскость x, y расположимъ нормально къ нему. Такъ какъ все симметрично относительно такого проводника, то мы можемъ принять, что потенциалъ φ есть функція t, z и r , гдѣ r есть разстояніе любой разсматриваемой точки отъ оси z .

$$r^2 = x^2 + y^2.$$

Тогда уравненіе (I') можемъ преобразовать въ форму:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = A^2k \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (1a.)$$

Интеграль этого уравненія можемъ выразить такъ:

$$\varphi = f(r)e^{i(nt + \beta z)} \quad (4)$$

Тогда:
$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = -\beta^2\varphi, \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -n^2\varphi$$

и мы имѣемъ:

$$\frac{d^2f(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df(r)}{dr} - q^2f(r) = 0 \quad (5)$$

гдѣ:
$$q^2 = -n^2kA^2 + \beta^2 \quad (6)$$

Уравненію (5) можно удовлетворить, положивши что:

$$f(r) = AJ_0(qr) + BS_0(qr) \quad (7)$$

гдѣ A и B суть постоянные коэффициенты, опредѣляемые началь-

ными условіями задачи, а $J_0(qr)$ и $S_0(qr)$ суть Бесселевы функціи вида:

$$J_0(x) = 1 + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{(2.4)^2} + \dots$$

$$S_0(x) = -J_0(x) (\lg x - \lg 2 + 0,577) + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4(1 + \frac{1}{2})}{(2.4)^2} + \dots$$

Для окончательнаго опредѣленія функціи $S_0(x)$ должно добавить, что входящій въ нее членъ $\lg \frac{x}{2}$ долженъ быть дѣйствительнымъ, если x дѣйствительная и положительная величина, и долженъ измѣняться непрерывно при измѣненіи x . Кромѣ того $S_0(qr)$ исчисляется при $r = \infty$ и обращается въ безконечность при $r = 0$; наоборотъ функція $J_0(qr)$ остается конечною при $r = 0$ и становится безконечностью при $r = \infty$.

Послѣ этого окончательно мы можемъ выразить потенціалъ въ разсматриваемомъ случаѣ въ слѣдующей формѣ:

$$\varphi = e^{i(nt \pm \beta z)} [AJ_0(qr) + BS_0(qr)] \quad (8)$$

Обратимся теперь къ нашей спеціальной задачѣ о движеніи электрическаго переменнаго тока въ подводномъ, или подземномъ кабелѣ. Этотъ вопросъ былъ изслѣдованъ С. В. Томсономъ въ 1855 г. и позднѣе Кирхгофомъ *) (1877). Представимъ себѣ, что цилиндрическій проводникъ радіуса a окруженъ цилиндрическимъ слоемъ полупроводника, или діэлектрика, внѣшній радіусъ котораго равенъ b ; этотъ діэлектрикъ снова окруженъ проводникомъ, который можетъ распространяться до безконечности.

Будемъ обозначать черезъ φ , K и σ потенціалъ, коэффициентъ діэлектрическаго проникновенія и электропроводность, соотвѣтственно съ указателемъ 1 для перваго проводника, 0 для діэлектрика и 2 для втораго проводника. Пусть по первому проводнику распространяются электрическія колебанія.

Замѣтимъ, что потенціалъ φ_1 на первомъ проводникѣ не долженъ обращаться въ безконечность при $r = 0$, а потенціалъ φ_2 на второмъ проводникѣ долженъ обращаться въ нуль при $r = \infty$. Поэтому мы можемъ удовлетворить нашей задачѣ, положивши, что:

$$\varphi_1 = e^{i(nt \pm \beta z)} A_1 J_0(q_1 r)$$

*) Kirchhoff. Ges. Abh. p. 182.

$$\varphi_0 = e^{i(nt \pm \beta z)} \{ A_0 J_0(q_0 r) + B_0 S_0(q_0 r) \} \quad (9)$$

$$\varphi_2 = e^{i(nt \pm \beta z)} B_0 S_0(q_2 r).$$

Изъ этихъ выраженій мы уже видимъ, что электричество въ кабелѣ распространяется въ видѣ волны.

§ 3. Опредѣлимъ періодъ и скорость распространенія такой волны. Для этого воспользуемся условіями, которымъ потенциалъ φ и его производныя по нормалямъ къ поверхностямъ раздѣла должны удовлетворять при поверхностяхъ раздѣла проводниковъ т.-е. при $r = a$ и при $r = b$.

1) Потенціалъ долженъ измѣняться непрерывно; стало быть:

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } r = a; (\varphi_0)_a = (\varphi_1)_a. \\ r = b; (\varphi_0)_b = (\varphi_2)_b. \end{array} \right\} \quad (10)$$

2) Кромѣ того при поверхности раздѣла должно имѣть мѣсто уравненіе *).

$$- \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\varphi_0}{dn_0} + \frac{d\varphi_1}{dn_1} \right) = e + k_0 \frac{d\varphi_0}{dn_0} + k_1 \frac{d\varphi_1}{dn_1} \quad (11)$$

Гдѣ e представляетъ плотность свободного электричества на рассматриваемой пограничной поверхности, а два слѣдующіе члены правой части даютъ плотность зарядовъ, возникшихъ вслѣдствіе поляризации среды.

Иначе можемъ написать:

$$K_0 \frac{d\varphi_0}{dn_0} + K_1 \frac{d\varphi_1}{dn_1} = -4\pi e, \quad (12)$$

гдѣ полагаемъ: $K_0 = 1 + 4\pi k_0$; $K_1 = 1 + 4\pi k_1$.

Дифференцируя это выраженіе по t , получаемъ:

$$K_0 \frac{d^2\varphi_0}{dt dn_0} + K_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt dn_1} = -4\pi \frac{de}{dt}$$

Но $\frac{de}{dt}$ выражаетъ электрическій токъ при поверхности проводника; его можемъ выразить такъ:

$$\frac{de}{dt} = \sigma_0 \frac{d\varphi_0}{dn_0} + \sigma_1 \frac{d\varphi_1}{dn_1}$$

*) Kirchhoff. 1. с.

Послѣ чего второе условіе на границѣ между проводниками приметъ видъ:

$$K_0 \frac{d^2 \varphi_0}{dt dn_0} + K_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt dn_1} + 4\pi \left(\sigma_0 \frac{d\varphi_0}{dn_0} + \sigma_1 \frac{d\varphi_1}{dn_1} \right) = 0 \quad (13)$$

Замѣтимъ, что въ нашемъ случаѣ функція φ пропорціональна e^{int} , поэтому можемъ писать иначе; положивши, что $\mu_0 = \frac{K_0}{4\pi}$ и $\mu_1 = \frac{K_1}{4\pi}$:

$$\left. \begin{aligned} \text{При } r = a; (\sigma_0 + \mu_0 in) \frac{d\varphi_{0a}}{dn_{0a}} + (\sigma_1 + \mu_1 in) \frac{d\varphi_{1a}}{dn_{1a}} &= 0 \\ \text{Подобнымъ же образомъ при} \\ r = b; (\sigma_0 + \mu_0 in) \frac{d\varphi_{0b}}{dn_{0b}} + (\sigma_2 + \mu_2 in) \frac{d\varphi_{2b}}{dn_{2b}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставимъ выраженія φ въ условія при поверхностяхъ раздѣла (10), (14); причѣмъ будемъ обозначать:

$$\frac{dJ_0(qr)}{dr} = J'_0(qr)$$

$$\frac{dS_0(qr)}{dr} = S'_0(qr)$$

Получимъ изъ условій (10):

$$\left. \begin{aligned} A_0 J_0(q_0 a) + B_0 S_0(q_0 a) &= A_1 J_0(q_1 a) \\ A_0 J_0(q_0 b) + B_0 S_0(q_0 b) &= B_2 S_0(q_2 b). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Изъ условій (14) подобнымъ же образомъ имѣемъ:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_0 + \mu_0 in) \{ A_0 J'_0(q_0 a) + B_0 S'_0(q_0 a) \} &= (\sigma_1 + \mu_1 in) A_1 J'_0(q_1 a) \\ (\sigma_0 + \mu_0 in) \{ A_0 J'_0(q_0 b) + B_0 S'_0(q_0 b) \} &= (\sigma_2 + \mu_2 in) B_2 J'_0(q_2 b) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Изъ послѣднихъ уравненій можемъ исключить постоянныя величины: A_0 , B_0 , A_2 , B_2 .

Сдѣлаемъ это въ предположеніи что qa и qb могутъ считаться безконечно малыми величинами. Впослѣдствіи увидимъ, что q настолько мало, что это предположеніе справедливо.

Положимъ для краткости, что:

$$\lg 2 - 0,577 = - \lg \gamma;$$

тогда при нашемъ допущеніи имѣемъ:

$$\left. \begin{aligned} J_0(qa) &= 1 & J_0'(qa) &= \frac{qa}{2} \\ S_0(qa) &= -\lg r qa & S_0'(qa) &= -\frac{1}{qa} \\ J_0(qb) &= 1 & J_0'(qb) &= \frac{qb}{2} \\ S_0(qb) &= -\lg r qb & S_0'(qb) &= -\frac{1}{qb} \end{aligned} \right\} (17)$$

При такихъ допущеніяхъ пограничныя условія принимаютъ слѣдующій видъ; гдѣ для краткости положимъ:

$$P = \sigma_0 + \mu_0 in; \quad Q = \sigma_1 + \mu_1 in; \quad R = \sigma_2 + \mu_2 in;$$

$$\left. \begin{aligned} A_0 - B_0 \lg r qa &= A_1 \\ B_0 - A_0 \frac{1}{\lg r qb} &= B_2 \end{aligned} \right\} (15a)$$

$$\left. \begin{aligned} P \{ A_0(qa)^2 - 2B_0 \} &= Q A_1(qa)^2 \\ P \{ 2B_0 - A_0(qb)^2 \} &= 2R B_2 \end{aligned} \right\} (16a)$$

Исключивши изъ этихъ уравненій постоянныя величины A_0 , B_0 , A_1 , B_2 , получимъ:

$$2(P - Q)^2(qa)^2 = \{ Q(qa)^2 \lg r qa - 2P \{ \frac{2Q}{\lg r qb} - P(qb)^2 \} \}$$

Такъ какъ электропроводность металла весьма велика, а діэлектрика очень мала, то Q весьма велико сравнительно съ P ; кромѣ того членъ $P(qb)^2$ бесконечно малъ передъ членомъ $\frac{2Q}{\lg r qb}$.

Поэтому можемъ писать наше уравненіе въ слѣдующей болѣе простой формѣ:

$$Q \frac{a^2}{2} \lg \frac{b}{a} q^2 + P = 0$$

Или иначе:

$$\sigma_1 \frac{a^2}{2} \lg \frac{b}{a} q^2 + \sigma_0 + in\mu_0 = 0. \quad (18)$$

Это уравнение было выведено В. Томсономъ въ теоріи теплопроводности и потомъ Кирхгоффомъ *) въ теоріи распространения электричества въ телеграфныхъ проволокахъ.

Обратимъ вниманіе, что у насъ:

$$q^2 = \beta^2 - A^2 k n^2,$$

гдѣ k есть нѣкоторый постоянный факторъ, введенный Гельмгольцемъ. Если согласно теоріи Максвелла примемъ, что $k=0$, то можемъ положить просто $q = \beta$.

Пусть теперь:

$$\beta = m + p i$$

тогда уравненіе (18) приметъ видъ:

$$\sigma_1 \frac{a^2}{2} \lg \frac{b}{a} (m^2 - p^2) + \sigma_0 + i (n \mu_0 - \sigma_1 a^2 \lg \frac{b}{a} m \cdot p) = 0 \quad (18a)$$

Откуда имѣемъ:

$$p^2 - m^2 = - \frac{2\sigma_0}{\sigma_1 a^2 \lg \frac{b}{a}} \quad (19)$$

$$mp = \frac{n \mu_0}{\sigma_1 a^2 \lg \frac{b}{a}} \quad (20)$$

Положимъ, что изоляція разсматриваемаго кабеля совершенна, такъ что электропроводность ея можетъ считаться нулемъ: $\sigma_0=0$; тогда $p=m$ и мы имѣемъ

$$m^2 = \frac{n K_0}{4\pi \sigma_1 a^2 \lg \frac{b}{a}}, \quad (20a)$$

ибо $\mu_0 = \frac{K_0}{4\pi}$, гдѣ K_0 есть діэлектрическая постоянная изоляціи.

Но замѣтимъ далѣе, что факторъ $\frac{1}{\sigma_1 \pi a^2}$ есть ничто иное, какъ сопротивленіе единицы длины кабеля, а факторъ $\frac{K_0}{2 \lg \frac{b}{a}}$ представ-

ляетъ электростатическую емкость единицы длины кабеля.

Положивши, что:

*) Kirchhoff. 1. с.

$$R = \frac{1}{\sigma_1 \pi a^2} \quad \text{и} \quad C = \frac{K_0}{2 \lg \frac{b}{a}},$$

можемъ писать окончательно:

$$m = \pm \left\{ n R \cdot C \right\}^{1/2} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (20b)$$

Если изоляція кабеля не совершенна, и стало быть электропроводность діэлектрика σ_0 не равна нулю, но все-таки весьма мала сравнительно съ величиною n , то изъ нашихъ уравненій (19) и (20) можемъ получить:

$$m = \left\{ n R C \right\}^{1/2} \left(1 - \frac{2\pi\sigma_0}{n \cdot K_0} \right) \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (21)$$

$$p = \left\{ n R C \right\}^{1/2} \left(1 + \frac{2\pi\sigma_0}{n K_0} \right) \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (22).$$

§ 4. Возвратимся теперь къ выраженію потенціала на внутреннемъ проводѣ кабеля (9).

Если радіусъ его a малъ, то можемъ принять, что $q_1 a$ весьма малая величина и съ достаточною точностью положить, что $J_0(q_1 a) = 1$. Тогда при $p = m$

$$\varphi_1 = A_1 e^{-mz + i(nt - mz)}.$$

Дѣйствительную часть этой функціи, какъ извѣстно, можно представить въ слѣдующемъ видѣ:

$$\varphi_1 = e^{-mz} [A \cos (nt - mz) + B \sin (nt - mz)].$$

Пусть при началѣ кабеля при $z = 0$, потенціалъ $\varphi_1 = A \cos nt$, т.-е. кабель соединенъ съ источникомъ электрическихъ колебаній. Тогда можемъ писать просто:

$$\varphi_1 = A e^{-mz} \cos (nt - mz). \quad (23).$$

Такимъ образомъ мы видимъ, что по кабелю электричество распространяется въ видѣ волны, идущей отъ источника колебаній вдоль проволоки въ положительномъ направленіи оси z . Скорость распространенія этой волны есть:

$$\frac{n}{m}.$$

Амплитуда волны уменьшается на $\frac{1}{e}$ своей начальной величины черезъ разстояніе $z = \frac{1}{m}$.

Подставивши величину m изъ (20b) въ выраженіе скорости, мы получимъ, что скорость распространенія волнъ равна:

$$\left(\frac{2n}{RC} \right)^{1/2} \quad (24)$$

Если же изоляція проводящая, то скорость равна:

$$\left(\frac{2n}{R \cdot C} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{2\pi\sigma_0}{nK}} \quad (25)$$

Отсюда видимъ, что при совершенной изоляціи скорость волны въ кабелѣ прямо пропорціональна квадратному корню изъ числа колебаній электрическаго тока n и обратно пропорціональна квадратному корню изъ произведенія сопротивленія на электростатическую емкость единицы длины кабеля. Стало-быть скорость передачи по кабелю электрическихъ колебаній увеличивается съ возрастаніемъ числа колебаній и уменьшается съ увеличеніемъ емкости кабеля, а слѣдовательно зависитъ отъ его геометрическихъ размѣровъ и свойствъ изолятора. Кромѣ того, при одномъ и томъ же числѣ колебаній, скорость волны увеличивается съ увеличеніемъ проводимости изоляціи, какъ это видно изъ выр. (25).

Разстояніе $\frac{1}{m}$, на которое успѣетъ распространиться волна, прежде чѣмъ амплитуда ея уменьшится на $\frac{1}{e}$ своей начальной величины, будетъ равно:

$$\left\{ \frac{2}{R \cdot C \cdot n} \right\}^{1/2}, \quad (26)$$

или для проводящей изоляціи:

$$\left\{ \frac{2}{R \cdot C \cdot n} \right\}^{1/2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\pi\sigma_0}{nK_0}} \quad (27)$$

Такимъ образомъ разстояніе, на которое распространяется колебаніе, обратно пропорціонально квадратному корню изъ числа колебаній, емкости и сопротивленія единицы длины кабеля (26).

При плохой изоляціи амплитуда волны будетъ уменьшаться скорѣе (27).

Приложимъ эти выводы къ слѣдующему примѣру *). Положимъ мы передаемъ по телефонному кабелю электрическія колебанія, число которыхъ $n = 100$ въ 1 *Sec.* Пусть діаметръ срединной мѣдной проволоки кабеля $2a = 4 \text{ mm.}$, а радіусъ гуттаперчевой изоляціи въ 2,5 раза болѣе радіуса проволоки $b = 2,5 a$. Тогда сопротивленіе единицы длины R равно (около) $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ohms}$, или въ абсолютныхъ единицахъ равно $1,3 \cdot 10^4$, а электростатическая емкость единицы длины C равна $15 \cdot 10^{-22}$. Подставивъ эти величины R и C въ выр. (26), мы найдемъ, что колебанія пройдутъ около 128 километровъ прежде, чѣмъ ослабнутъ на $\frac{1}{e}$ своей начальной величины.

Скорость распространенія электрическихъ колебаній равна въ этомъ случаѣ 80,000 километровъ въ секунду.

Представимъ себѣ теперь, что мы будемъ передавать колебанія того же періода по желѣзной телеграфной проволоцѣ въ 4 *mm.* въ діаметрѣ. Тогда сопротивленіе единицы длины ея равно $9,4 \cdot 10^4$; емкость такой проволоки, помѣщенной въ 4 *met.* разстоянія отъ поверхности земли Хагенбахъ оцѣниваетъ **) въ 10^{-22} на одинъ сантиметръ. Разстояніе, на которое колебанія, съ числомъ колебаній $n = 100$ въ секунду, успѣютъ распространиться прежде, чѣмъ амплитуда ихъ уменьшится на $\frac{1}{e}$ своей начальной величины, оказывается въ 1,43 больше, чѣмъ въ случаѣ передачи по кабелю. Итакъ, по проволоцѣ можно передать электрическія колебанія на разстояніе почти въ полтора раза бѣльшее, чѣмъ по кабелю; увеличеніе сопротивленія при употребленіи желѣзной телеграфной проволоки болѣе чѣмъ вознаграждается уменьшеніемъ емкости провода.

Замѣтимъ, кромѣ того, что при передачѣ электрическихъ колебаній по кабелю затуханіе ихъ зависитъ отъ числа колебаній. Это имѣетъ важное значеніе при телефонной передачѣ звуковъ. Именно высокіе тоны загасають скорѣе, чѣмъ низкіе, а стало-быть, при передачѣ по телефону музыкальныхъ пьесъ, мы замѣтимъ бѣльшее ослабленіе высокихъ нотъ, чѣмъ низкихъ.

*) J. J. Thomson. Rec. Researches in El. a Mag. p. 272 Art. 263.

**) Wied. Ann. 29. p. 377. 1886.

II. Электрическія колебанія въ нѣкоторыхъ системахъ проводниковъ.

§ 5. Представимъ себѣ, что имѣемъ два проводника 1 и 2, изъ которыхъ каждый заряженъ до своего потенціала φ_1 и φ_2 . Соединимъ два эти проводника линейнымъ проводникомъ. Тогда равновѣсіе электричества въ системѣ установится, какъ извѣстно, не мгновенно. Прежде наступленія равновѣсія зарядъ на каждомъ изъ проводниковъ успѣетъ много разъ переимѣнить свой знакъ; электричество въ нашей системѣ проводниковъ придетъ въ колебательное состояніе. Для рѣшенія вопроса объ распространеніи электрическихъ колебаній въ такомъ соединительномъ проводникѣ мы можемъ снова воспользоваться основнымъ уравненіемъ движенія электричества (I). При этомъ получимъ, что потенціалъ φ , а стало-быть и электрическій токъ J въ такой системѣ будутъ распространяться въ видѣ волны и могутъ быть выражены функциею $e^{i(nt + mx)}$.

Я имѣю въ виду рассмотреть нѣсколько случаевъ распространенія электрическихъ колебаній въ подобныхъ системахъ. При этомъ необходимо опредѣлить въ каждомъ частномъ случаѣ періодъ колебаній, возможныхъ въ системѣ. Для такого опредѣленія надо къ уравненію движенія прибавить еще уравненіе, которое устанавливаетъ связь между разностью потенціаловъ на концахъ проводника $\varphi_1 - \varphi_2$ съ токомъ въ проводникѣ J , емкостью системы C и наконецъ сопротивленіемъ R и самоиндукціею проводника L .

Если токъ J измѣняется только со временемъ, но въ каждый данный моментъ одинаковъ на протяженіи всего проводника, то это уравненіе можно написать въ видѣ:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = L \frac{dJ}{dt} + RJ.$$

Но вопросъ осложняется, если токъ измѣняется на протяженіи проводника по закону:

$$J = J_0 e^{i(nt + mx)} \quad (1).$$

Этотъ случай можемъ свести къ предыдущему. Примемъ направление проводника за направленію оси x — ось и рассмотримъ элементъ проводника dx ; пусть потенціалы на концахъ этого элемента суть φ и $\varphi + d\varphi$. Пусть далѣе P и Q суть самоиндук-

ція и сопротивленіе единицы длины проводника, а слѣдовательно Pdx и Qdx есть самоиндукція и сопротивленіе элемента dx . Въ предѣлахъ этого элемента мы можемъ принимать, что токъ J въ каждый данный моментъ постояненъ и измѣняется только со временемъ. Тогда по предыдущему имѣемъ:

$$-\frac{d\phi}{dx} = P \cdot \frac{dJ}{dx} + Q \cdot J$$

Положивши $E = -\frac{d\phi}{dx}$ и обративши вниманіе на выраженіе (1) для J , мы можемъ писать иначе:

$$E = (inP + Q) \cdot J \quad (II)$$

Вполнѣ строгое доказательство этого предложенія дано Дж. Томсономъ *). Вслѣдствіе сложности этого доказательства я позволю себѣ ограничиться лишь приведеннымъ элементарнымъ соображеніемъ.

Разрядъ конденсатора.

§ 6. Пусть имѣемъ двѣ пластины одинаковой электростатической емкости C , заряженные одна до $+$ ф потенциала, а другая до $-$ ф. Соединимъ ихъ проволокою; тогда въ этой послѣдней возникаетъ колебательный разрядъ. Опредѣлимъ періодъ его.

Средину проволоки примемъ за начало координатъ, и такъ какъ все симметрично относительно этой середины, то мы можемъ предположить, что электростатическій потенциалъ имѣетъ равныя и противоположныя величины по обѣ стороны отъ начала. Рѣшеніемъ ур. (I) для нашего случая можетъ служить функція:

$$\phi = B \cdot \sin mx \cdot e^{int} \quad (2)$$

Отсюда

$$E = -\frac{d\phi}{dx} = -B \cdot m \cdot \cos mx \cdot e^{int}$$

Потенціалъ на пластинахъ т. е., при $x = \pm l$ выразится:

$$\phi_{\pm l} = \pm B \cdot \sin ml \cdot e^{int} \quad (3)$$

Далѣе пусть Q есть зарядъ на пластинѣ, разность потенциаловъ на обѣихъ пластинахъ есть 2ϕ , а емкость пластины есть C ; стало-быть:

*) J. J. Thomson l. c. art. 272. p. 202.

$$Q = 2 \cdot C\phi$$

или

$$Q = 2 B \cdot C \cdot \sin ml \cdot e^{int}$$

А отсюда токъ J при обкладкѣ конденсатора выразится такъ:

$$J = \frac{dQ}{dt} = 2 in BC \cdot \sin ml \cdot e^{int} \quad (4)$$

Подставляя эти величины въ уравненіе (II.)

$$E = (in P + Q) J,$$

имѣемъ:

$$- Bm \cos ml = + 2inB(inP + Q)C \cdot \sin ml.$$

или окончательно*):

$$m \cot g ml = - 2 in (inP + Q)C \quad (5)$$

§ 7. Переходя къ частнымъ случаямъ примѣненія этого общаго выраженія, выведемъ прежде всего извѣстную зависимость періода колебаній разряжаемаго конденсатора отъ его электростатической емкости, коэф. самоиндукціи и сопротивленія замыкающаго линейнаго проводника. Предположимъ, что длина $2l$ проволоки, соединяющей обкладки конденсатора, весьма мала сравнительно съ длиною электрической волны, идущей по проволокѣ, такъ что ml есть величина весьма малая. Тогда выраженіе (5) можемъ написать въ видѣ:

$$\frac{1}{l} = - 2in(inP + Q)C. \quad (6).$$

Пусть далѣе L есть коэффиціентъ самоиндукціи всего проводника $2l$, а R его сопротивленіе; тогда:

$$P = \frac{L}{2l}$$

$$Q = \frac{R}{2l}$$

и мы имѣемъ

$$(in)^2 L + in R + \frac{1}{C} = 0 \quad (7).$$

Откуда:

$$in = -\frac{R}{2L} \pm i \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (8)$$

Если

$$\frac{1}{CL} > \frac{R^2}{4L^2},$$

*) J. J. Thomson. l. c. art. 290.

то имѣемъ періодическое электрическое колебаніе. Выраженіе упрощается, если положимъ, что R такъ мало, что членомъ $\frac{R^2}{4L^2}$ можно пренебречь передъ членомъ $\frac{1}{CL}$; тогда можемъ писать проще:

$$in = -\frac{R}{2L} \pm i \sqrt{\frac{1}{CL}} \quad (9)$$

Послѣ этого выраженіе (2) потенціала можемъ представить въ видѣ:

$$\varphi = B e^{-\frac{Rt}{2L}} \cos(t/\sqrt{CL}). \sin mx \quad (10)$$

Итакъ потенціалъ разряжаемаго конденсатора измѣняется періодически и амплитуда его убываетъ со временемъ. Періодъ колебанія очевидно опредѣлится изъ выраженія:

$$T/\sqrt{CL} = 2\pi,$$

откуда:

$$T = 2\pi \sqrt{CL} \quad (11).$$

Чѣмъ меньше емкость конденсатора C и коэффициентъ самоиндукціи L замыкающаго проводника, тѣмъ меньше періодъ колебанія. Такое выраженіе періода колебаній было выведено теоретически С. В. Томсономъ въ 1853 г.

Амплитуда колебанія пропорціональна величинѣ $e^{\frac{Rt}{2L}}$, а стало-быть она непрерывно уменьшается съ возрастаніемъ времени. Отношеніе амплитудъ двухъ послѣдовательныхъ колебаній характеризуетъ степень, или быстроту затуханія колебанія; это отношеніе таково:

$$e^{-\frac{Rt}{2L}} : e^{-\frac{R(t+T)}{2L}} \quad \text{или} \quad e^{\frac{RT}{2L}}$$

Затуханіе стало-быть тѣмъ больше, чѣмъ больше сопротивление замыкающей проволоки и для даннаго періода колебанія тѣмъ меньше, чѣмъ больше ея коэффициентъ самоиндукціи L . Если подставимъ величину $T = 2\pi \sqrt{CL}$, то для коэф. затуханія получимъ величину $e^{\frac{\pi R \sqrt{CL}}{L}}$. Отсюда видимъ, что затуханіе колебаній тѣмъ меньше, чѣмъ меньше емкость разряжаемаго проводника C . Обыкновенно вмѣсто коэф. затуханія разсматриваютъ натураль-

ный лагориомъ этой величины, такъ называемый „лагориомическій декрементъ δ “. Величина его будетъ:

$$\delta = RT/2L = \pi R\sqrt{C/L} \quad (12).$$

§ 8. Первые точныя наблюденія электрическихъ колебаній были произведены Феддерзеномъ *) (1859—1862 г.). Онъ разряжалъ обкладки лейденской банки и наблюдалъ разрядную искру въ вращающемся зеркалѣ. Взявши вогнутое зеркало, онъ проектировалъ изображение искры на чувствительную фотографическую бумагу и сдѣлалъ такимъ образомъ фотографическій снимокъ искры. На этомъ снимкѣ получился цѣлый рядъ изображеній искры, раздѣленныхъ темными промежутками. Измѣряя разстояніе между этими изображеніями, а также зная разстояніе бумаги отъ зеркала и скорость вращенія послѣдняго, можно опредѣлить время между двумя послѣдовательными искрами, а стало-быть половину періода электрическаго колебанія. Чтобы прослѣдить зависимость періода колебаній отъ емкости, Феддерзенъ измѣнялъ число лейденскихъ банокъ и установилъ, что періодъ пропорціоналенъ квадратному корню изъ емкости: $\sqrt{C}$.

Точно также онъ измѣнялъ самоиндукцію L цѣпи, измѣняя длину замыкающаго проводника и провѣрилъ, правда съ меньшею точностью, пропорціональность періода квадратному корню изъ самоиндукціи $\sqrt{L}$. Пользуясь 10 банками, Феддерзенъ получилъ слѣдующіе періоды:

При длинѣ проволоки 5,3 met. $T = 2,6 \cdot 10^{-6}$ sec.

„ „ „ 445 „ $T = 45,4 \cdot 10^{-6}$ sec.

Позднѣе Лоренцъ **) повторилъ опыты Феддерзена, причемъ онъ измѣрялъ тщательно емкость и самоиндукцію разряжающейся системы. Онъ нашелъ полное подтвержденіе формулы (11) для періода T . Такъ напр. онъ наблюдалъ величину $T = 12,64 \cdot 10^{-6}$ sec; тогда какъ для соотвѣтствующаго опыта періодъ, опредѣленный по формулѣ (11), оказался $T = 12,76 \cdot 10^{-6}$ секундъ.

Гертцу ***) удалось еще болѣе уменьшить періодъ колебаній,

*) Feddersen. Pogg. Ann. 113, p. 437, 1861, 116, 1862.

** L. Lorenz. Wied Ann. 7, p. 161. 1879.

***) H. Hertz. Wied. Ann. 31 p. 421, 1887.

уменьшивши емкость и самоиндукцію разряжающихся проводниковъ. Для устройства своего разрядника-вибратора онъ взялъ два стержня расположенные рядомъ. На концахъ стержней, обращенныхъ другъ къ другу, укрѣплены сферы радіуса 0,25 *см.*, а на удаленныхъ концахъ сферы радіусовъ 15 *см.* Центры этихъ сферъ отстояли въ одномъ опытѣ на разстояніи 150 *см.*, а въ другомъ на 70 *см.* Малыя сферы соединялись проводниками съ борнами батареи Румкорфа, работа которой поддерживала электрическія колебанія въ системѣ.

Опредѣляя періодъ колебаній по формулѣ (11), получимъ для перваго случая:

$$T = 2,21 \cdot 10^{-8} \text{ sec},$$

а для втораго:

$$T = 1,60 \cdot 10^{-8} \text{ sec}.$$

Но можетъ возникнуть вопросъ: примѣнима ли данная формула (11) для періода и въ случаѣ весьма быстрыхъ колебаній, такъ какъ мы вывели эту формулу въ предположеніи, что число колебаній n мало? Докажемъ, что и въ случаѣ большаго числа колебаній n періодъ имѣетъ такое же простое выраженіе.

При n — весьма большомъ въ выраженіи:

$$m \operatorname{Cotg} ml = -2in(inP + Q)C \quad (5)$$

мы можемъ пренебречь величиною сопротивленія Q передъ членомъ inP и напомнимъ прозе:

$$m \operatorname{Cotg} ml = 2n^2 P \cdot C$$

Но $\frac{n}{m} = V$, гдѣ V есть скорость электрической волны въ проводѣ, а стало быть иначе можемъ писать:

$$\frac{\operatorname{Cotg} ml}{ml} = \frac{V^2 \cdot 4P \cdot l \cdot C}{2l^3}$$

или

$$\operatorname{Cotg} ml = 2P [C] m,$$

гдѣ $[C] = V^2 C$ есть емкость разсматриваемаго конденсатора въ электростатическихъ единицахъ. Но $2l \cdot P = L$, а потому предыдущее уравненіе можно написать иначе въ видѣ:

$$\frac{\operatorname{Cotg} ml}{ml} = \frac{L \cdot [C]}{l^2} \quad (13)$$

Замѣтимъ, что если величина $\frac{L[C]}{l^2}$ весьма велика, т.-е. емкость конденсатора $[C]$ весьма велика, а длина замыкающей проволоки $2l$ весьма мала, тогда и ml должно быть весьма мало.

А стало быть можемъ писать:

$$\frac{1}{m^2 l^2} = \frac{L \cdot [C]}{l^2},$$

т.-е.

$$m = 1/\sqrt{L \cdot [C]} = 1/V\sqrt{L \cdot C} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

послѣ чего снова для періода колебанія $T = \frac{\lambda}{V}$ получаемъ прежнее выраженіе:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (11a).$$

Итакъ и въ случаѣ большаго числа колебаній мы получаемъ то же выраженіе періода, какъ и раньше.

Если же съ другой стороны величина $\frac{L \cdot [C]}{l^2}$ весьма мала, что можетъ быть, когда емкость проводниковъ на концахъ проволоки весьма мала, а длина проволоки $2l$ весьма велика, тогда $\text{Cotg } ml$ долженъ быть весьма малъ и мы можемъ съ достаточнымъ приближеніемъ положить, что:

$$\text{Cotg } ml = 0$$

а стало быть:

$$ml = \frac{2h+1}{2} \pi,$$

гдѣ h — есть любое цѣлое число.

Такъ какъ $m = \frac{2\pi}{\lambda}$, то мы видимъ, что длина электрической волны, которую можетъ давать наша проволока, равна:

$$\frac{2\pi \cdot l}{\lambda} = \frac{2h+1}{2} \pi$$

$$\lambda = \frac{4l}{2h+1} \quad (14)$$

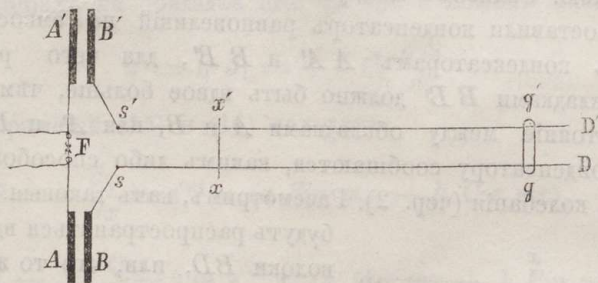
Иными словами проволока наша колеблется электрически такъ, что длина ея $2l$ разбивается на любое нечетное число полуволнъ.

Мы получили въ нашемъ случаѣ разбѣіеніе проволоки на нечетное число полувольтъ вслѣдствіе того, что предположили, что распре- дленіе потенціала симметрично по обѣ стороны отъ середины проволоки. Если мы не будемъ накладывать этого условія, то найдемъ, что половина волны, издаваемой изслѣдуемой проволокой, равна длинѣ проволоки, подѣленной на любое цѣлое число. Мы встрѣтимся далѣе и съ такимъ случаемъ.

Система двухъ конденсаторовъ, соединенныхъ длинными линейными проводниками.

§ 9. Обобщимъ теперь разсмотрѣнный нами частный случай колебанія проволоки, на болѣе сложную комбинацію развѣтвлен- ныхъ проволокъ. Разматриваемая система принадлежитъ Лехеру *). Ею пользовались для опредѣленія длинъ электрическихъ волнъ въ проволокахъ многіе наблюдатели, какъ напр. Рубенсъ **), Кohn и Хирвагенъ***) и другіе. Состоитъ эта комбинація въ слѣдующемъ.

Представимъ себѣ, что $АFA'$ есть Герцовскій разрядникъ (ви- браторъ), снабженный на концахъ пластинами A и A' (черт. 1)



Чер. 1.

Противъ этихъ пластинъ помѣщаются двѣ другія равныя метал- лическія пластины B и B' , одинаковыхъ размѣровъ; къ послѣд- нимъ прикрѣплены двѣ мѣдныя проволоки SD и SD' , которыя протянуты параллельно другъ другу. Концы ихъ остаются либо свободными, или же соединяются съ конденсаторомъ, разстояніе между пластинами котораго можно измѣнять по желанію. На кон- цахъ этихъ проволокъ Лехеръ помѣщалъ Гейсслерову трубку gg' . Какъ скоро вибраторъ даетъ искру F , то трубка начинаетъ свѣ-

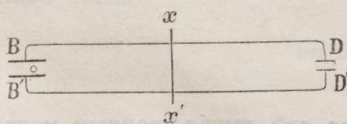
*) E. Lecher. Wied. Ann. 41, p. 850—870 1890.

**) H. Rubens. Wied. Ann. 42. p. 154—164 1891.

***) E. Cohn и F. Heerwagen Wied. Ann. 43. p. 343. 1891.

таться. Если теперь на параллельныя проволоки наложим проволоку въ видѣ мостика xx' , то при любомъ положеніи этой послѣдней Гейслерова трубка погаснетъ. Но, передвигая мостикъ по проволокамъ, мы найдемъ такія положенія его, при которыхъ трубка снова начинаетъ свѣтиться. Это показываетъ, что въ данномъ положеніи мостикъ соединяетъ точки равнаго и въ данномъ случаѣ нулеваго потенціала, (ибо противоположныя точки двухъ нашихъ проволокъ всегда имѣютъ противоположныя заряды). Разстоянія между такими узловыми точками оказываются одинаковыми и даютъ возможность измѣрить длину электрической волны, идущей по проволокамъ. Подобныя измѣренія, сдѣланныя Кономъ и Хирвагеномъ *) показываютъ, что длина электрическихъ волнъ, распространяющихся въ системѣ проволокъ не зависятъ отъ періода колебанія первоначальнаго возбудителя—вибратора. Напротивъ она зависитъ только отъ длины самихъ проволокъ и емкостей тѣхъ конденсаторовъ AB , $A'B'$, съ которыми эти послѣдніе соединены.

Основываясь на этомъ, мы можемъ упростить теоретическій разборъ описанной системы проволокъ, замѣнивши ее слѣдующею комбинаціею. Сближимъ между собою обкладки B и B' такъ, чтобы онѣ составили конденсаторъ равновеликій по емкости двумъ прежнимъ кондексаторамъ AA' и BB' , для чего разстояніе между обкладками BB' должно быть вдвое больше, чѣмъ отдѣльное разстояніе между обкладками A и B , или A' и B' . Пусть такому конденсатору сообщаются, какимъ либо способомъ, электрическія колебанія (чер. 2). Рассмотримъ, какъ таковыя колебанія



Чер. 2.

будутъ распространяться вдоль проволоки BD , или, что то же вслѣдствіе симметріи, вдоль проволоки $B'D'$. Какъ рѣшеніе ур. (I) въ данномъ случаѣ можемъ взять выраженія:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для части } Bxx' B': \\ \varphi = e^{int} (a \cos mx + b \sin mx) \\ \text{и для части } Dxx' D': \\ \varphi' = e^{int} \{ a \cos m(l-x) + b \sin m(l-x) \} \end{array} \right\} \quad (15)$$

За начало координатъ возьмемъ средину конденсатора BB' и положимъ, что длина проволоки BD есть l .

Отношеніе между постоянными a и b можемъ опредѣлить, пользуясь уравненіемъ (II) и условіями для концовъ проволоки для конденсаторовъ BB' и DD' . Эти условія будутъ таковы:

*) 1. с.

1) Пусть зарядъ обкладки B конденсатора BB' будетъ Q ; тогда токъ, направленный вдоль проволоки BD отъ конденсатора, равенъ *убыли* заряда въ единицу времени т. е.

при:

$$x = 0; J_0 = - \frac{dQ}{dt} \quad (16)$$

или, такъ какъ,

$$Q = 2C. \phi_0,$$

то:

$$J_0 = - 2C. \frac{d\phi_0}{dt} \quad (16a)$$

2) Если назовемъ черезъ Q_1 зарядъ обкладки D конденсатора DD' , то токъ, притекающий къ обкладкѣ D , долженъ равняться *прибыли* заряда на обкладкѣ въ единицу времени т. е.

при:

$$x = l; J_l = + \frac{dQ_1}{dt} \quad (17)$$

а такъ какъ $Q_1 = 2 C_1 \phi_1$, гдѣ C_1 есть емкость конденсатора DD' , а ϕ_1 потенциалъ на обкладкѣ его, то иначе можемъ писать:

$$x = l; J_l = + 2 C_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (17a)$$

Изъ выраженій (15) и (16) находимъ:

$$E = - \frac{d\phi}{dx} = e^{int} m (a \sin mx - b \cos mx)$$

$$J = - \frac{dQ}{dt} = 2 in e^{int} C (a \cos mx + b \sin mx);$$

при $x = 0$; $E_0 = - e^{int} m b$.

$$J_0 = in 2 C. a e^{int},$$

или послѣ урoвня (II): $E = n^2 P. J$

$$m b = - 2 a n^2 P. C, \quad (18)$$

а такъ какъ $n^2 = m^2 V^2$, то:

$$b = - 2 a. m. P$$

Подобнымъ же образомъ выраженія (15) и (17) даютъ:

при $x = l$:

$$m (a \sin ml - b \cos ml) = 2 n^2 C_1 P (a \cos ml + b \sin ml) \quad (19)$$

Или, исключивши a и b изъ уравненія (18) и (19), иначе можемъ писать:

$$\begin{aligned} & (\sin ml + 2 m P [C] \cos ml) = \\ & = 2 m [C] P (2 m P [C] \sin ml - \cos ml) \end{aligned} \quad (20)$$

Положимъ для краткости:

$$c_1 = 2 m P [C]$$

$$c_2 = 2 m P [C];$$

тогда:

$$\sin ml + c_1 \cos ml = c_2 (c_1 \sin ml - \cos ml).$$

Отсюда окончательно получаемъ:

$$\cotg ml = \frac{c_1 c_2 - 1}{c_1 + c_2} \quad (21)$$

Корни этого уравненія даютъ періоды колебаній, которыя возможны для разсматриваемой развѣтвленной цѣпи. Мы видимъ снова, что этихъ періодовъ колебаній весьма много, и что всѣ они зависятъ отъ емкостей конденсаторовъ, находящихся въ цѣпи и длины цѣпи l . Для контроля нашихъ разсужденій можемъ положить что емкость конденсатора DD' $c_2 = \infty$, т. е. что обкладки его сдвинуты, а стало быть въ этой точкѣ установленъ узелъ колебаній; тогда наше уравненіе снова приметъ видъ:

$$\cotg ml = 2 P [C] m,$$

т. е. тотъ, который мы имѣли для колебаній въ одной проволоцѣ съ пучностью на концахъ ея и съ узломъ въ серединѣ (см. 13).

Послѣ условія (18) мы имѣемъ слѣдующее выраженіе (15) потенциала вдоль проволоки:

$$\varphi = e^{int} a (\cos mx - 2 m P [C] \sin x) \quad (22)$$

Отсюда видимъ, что потенциалъ равенъ нулю, т. е. имѣемъ узловую точку, всякій разъ какъ разстояніе точки проволоки x_1 отъ перваго конденсатора BB' удовлетворяетъ слѣдующему условію:

$$\cos mx_1 - 2 m P [C] \sin mx_1 = 0 \quad (23)$$

или:

$$\cotg mx_1 = 2 m P [C] \quad (23a)$$

Но этого мало; нетрудно указать изъ ур. (21) и (23), что разстояніе x_2 узла и отъ другаго конца проволоцѣ, т. е. отъ конденса-

сатора DD должно удовлетворять нѣкоторому условію, иначе, что для образованія узла между обѣими частями проволоки по обѣ стороны мостика должно существовать опредѣленное соотношеніе.

Въ самомъ дѣлѣ, подставимъ въ ур. (23) вмѣсто x_1 равную ему величину $x_1 = l - x_2$, получимъ:

$$(2 m P [C] \sin ml - \cos ml) \cos mx_2 - \\ - (2 m P [C] \cos ml + \sin ml) \sin mx_2 = 0;$$

или послѣ уравненія (20) имѣемъ:

$$\cos mx_2 - 2 m P [C] \sin mx_2 = 0$$

иначе:

$$\cotg mx_2 = 2 P m [C]. \quad (24)$$

Самоиндукція двухъ параллельныхъ проволокъ.

§ 10. Чтобы сравнить приведенные выше вывода съ результатами наблюденій, намъ надо знать коэффиціентъ самоиндукціи P нашей цѣпи. Займемся его опредѣленіемъ. *) Въ системѣ Лехера мы имѣемъ двѣ проволоки, идущія параллельно другъ другу. Поэтому мы должны принять во вниманіе вліяніе индукціи одной проволоки на другую. На это указываютъ уже частью опыты самого Лехера, который замѣчалъ, что разстояніе между проволоками вліяетъ на ходъ явленія; съ другой стороны опыты Гейтлера **) ясно доказываютъ, что измѣненіе разстоянія между проволоками, какъ напр. мѣстное нарушеніе параллельности, вліяютъ на величину и расположеніе междоузлій въ проволокахъ. Итакъ полная самоиндукція нашей системы $L=2 P \cdot l$ должна состоять изъ коэф. индукціи проволоки на себя самоё L_0 безъ коэф. индукціи одной проволоки на другую L_1 ; $L=L_0-L_1$. Опредѣлимъ обѣ эти части. Замѣтимъ, что опредѣленіе это въ нашемъ случаѣ затрудняется тѣмъ обстоятельствомъ, что плотность тока въ разныхъ сѣченіяхъ проволоки различна. Поэтому мы упростимъ задачу, предположивши, что плотность всюду постоянна.

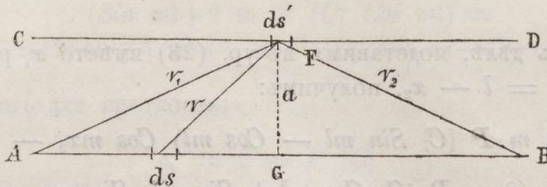
Мы знаемъ, что коэф. индукціи выражается слѣдующимъ образомъ:

$$L = \iint \cos \epsilon / r. ds ds' \quad (25)$$

*) См. напр. C. Christiansen. Elem. d. Th. Physik. Leipzig. 1894.

**) J. v. Geitler. Wied. Ann. B. 49. p. 184. 1893.

Этотъ интегралъ распространяется на все элементы первой ds и второй ds' проволоки; ϵ есть уголъ между элементами ds и ds' , а r разстояніе между ds и ds' (чер. 3).



Чер. 4.

Пусть имѣемъ двѣ параллельныя линіи AB и CD и пусть $AB = CD = l$ и $CF = s'$:

$$L = \int_0^l \int_0^l ds ds' / r, \quad (26)$$

ибо у насъ $\cos \epsilon = 1$.

Составимъ прежде величину интеграла:

$$P_1 = \int_0^l \frac{ds}{r} \quad (27)$$

Опустимъ изъ разсматриваемаго элемента ds' перпендикуляръ на проволоку AB и пусть $FG = a$. Обозначимъ кромѣ того:

$$AG = b_1; BG = b_2; FA = r_1; FB = r_2;$$

тогда имѣемъ:

$$P_1 = \int_0^{b_1} ds/r + \int_0^{b_2} ds/r, \quad (27a)$$

гдѣ черезъ s мы выражаемъ разстояніе точекъ проволоки AB отъ A , а $r^2 = a^2 + s^2$.

Но:

$$\int ds/r = \int ds / \sqrt{a^2 + s^2} = \lg (s/a + \sqrt{1 + s^2/a^2}), \quad (28)$$

а потому имѣемъ:

$$P_1 = \lg [(r_1 + b_1) (r_2 + b_2)/a_2] \quad (29)$$

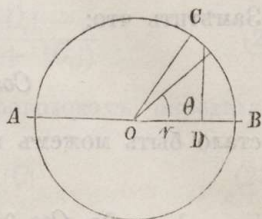
Допустимъ, что разстояніе между двумя проволоками a весьма мало сравнительно съ длиною проволокъ l ; тогда можемъ положить, что:

$$r_1 = b_1 = s'; \text{ и } r_2 = b_2 = l - s'$$

тогда:

$$P_1 = \lg [4 s' (l - s')/a^2] . \quad (30)$$

Разсмотримъ теперь наведеніе проволоки на самое себя. Представимъ, что AB (чер. 4) есть сѣченіе радіуса R эемента ds' проволоки и допустимъ, что электричество распространяется только на поверхности проволоки и съ постоянною плотностью u ; тогда $2\pi R u = i$ есть сила тока на разсматриваемомъ элементѣ. Разсмотримъ какую либо полосу, параллельную оси элементарнаго цилиндра ds' и опредѣлимъ электродвижущую силу, наведенную этою полосою на какую либо точку D , отстоящую отъ полосы въ разстояніи a , причемъ:



Чер. 4.

$$a^2 = R^2 + r^2 - 2 R r \cos \theta,$$

гдѣ R радіусъ сѣченія проволоки, r разстояніе разсматриваемой точки D отъ центра; $OD = r$, а θ уголъ между направлениемъ AB , выбраннымъ за начальное и направлениемъ радіуса проведеннаго къ разсматриваемому элементу. Количество электричества на этомъ элементѣ есть $R u d\theta$. Возьмемъ для этого случая выраженіе индукціи одной проволоки на единицу длины другой (30):

$$P_0 = M - \lg a^2,$$

гдѣ для краткости полагаемъ $M = \lg 4 s' (l - s')$.

Послѣ этого эл. дв. сила отъ элемента C есть:

$$u R . d\theta (M - \lg a^2),$$

а полная электродв. сила наведенія всѣми элементами поверхности проволоки на единицу длины ея измѣряется производной по времени отъ величины $P_0 i$,
причемъ:

$$P_0 i = 2 R u M \int_0^\pi d\theta - 2 R u \int_0^\pi d\theta \lg a^2 \quad (31)$$

но

$$\int_0^\pi d\theta \lg a^2 = \int_0^\pi d\theta \lg (R^2 + r^2 - 2 R r \cos \theta),$$

или можемъ писать иначе:

$$\int_0^\pi d\theta \lg \alpha^2 = \pi \lg R^2 + \int_0^\pi d\theta \lg (1 - 2\alpha \cos \theta + \alpha^2)$$

гдѣ:

$$\alpha = \frac{r}{R}$$

Замѣтить что:

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left(e^{i\theta} + e^{-i\theta} \right),$$

а стало быть можемъ писать:

$$1 - 2\alpha \cos \theta + \alpha^2 = \left(1 - \alpha e^{i\theta} \right) \left(1 - \alpha e^{-i\theta} \right),$$

$$\lg (1 - 2\alpha \cos \theta + \alpha^2) = \lg (1 - \alpha e^{i\theta}) + \lg (1 - \alpha e^{-i\theta})$$

но:

$$\lg (1 - \alpha e^{i\theta}) = -\alpha e^{i\theta} - \frac{1}{2} \alpha^2 e^{2i\theta} - \frac{1}{3} \alpha^3 e^{3i\theta} - \dots$$

$$\lg (1 - \alpha e^{-i\theta}) = -\alpha e^{-i\theta} - \frac{1}{2} \alpha^2 e^{-2i\theta} - \frac{1}{3} \alpha^3 e^{-3i\theta} - \dots$$

Отсюда ясно, что для $\alpha < 1$

$$\int_0^\pi d\theta \lg (1 - 2\alpha \cos \theta + \alpha^2) = 0.$$

Послѣ этого:

$$P_0 i = 2\pi R i M - 4\pi R i \lg R. \quad (32)$$

а такъ какъ $i = 2\pi R i$

то:

$$P_0 = M - 2 \lg R, \quad (33)$$

а съ другой стороны коэффициентъ обоюдной индукціи между проволоками на разстояніи b есть по предыдущему (30):

$$P_1 = M - 2 \lg b \quad (34)$$

Отсюда полный коэф. самоиндукціи нашей системы $P = P_0 - P_1$

$$P = 2 \lg \frac{b}{R}, \quad (35)$$

гдѣ b есть разстояніе между проволоками, а R —радіусъ сѣченія проволоки.

Сравненіе теоретическихъ выводовъ съ опытами.

§ 11. Сопоставляя выводы послѣднихъ параграфовъ, мы видимъ, что періодъ электрическихъ колебаній въ системѣ проводниковъ Лехера опредѣляется уравненіемъ:

$$\text{Cotg } ml = \frac{4 m^2 P^2 [C] [C_1] - 1}{2 m P ([C] + [C_1])} \quad (21)$$

При этомъ положеніе узловъ въ проволокахъ опредѣляется уравненіемъ:

$$\text{Cotg } mx_1 = 2 m P [C] \quad (23a)$$

Совокупность этихъ ур. даетъ для опредѣленія положенія узловъ, отсчитываемыхъ отъ другаго конденсатора, уравненіе:

$$\text{Cotg } mx_2 = 2 m P [C_1] \quad (24)$$

при этомъ:

$$P = 2 \lg \frac{b}{R}, \quad (35)$$

гдѣ b —есть разстояніе между проволоками а R радіусъ сѣченія проволоки.

Эти выводы вполне совпадаютъ съ выводами Эльзаса ¹⁾, Кона и Хирвагена ²⁾. При этомъ послѣдніе авторы получаютъ для опредѣленія узловъ только условіе (24).

Ниже я приведу сравненіе этихъ теоретическихъ выводовъ съ данными опытовъ, но прежде остановлюсь на слѣдующихъ замѣчаніяхъ.

Если сравнить условія (23a, 24), опредѣляющія электрическія колебанія въ частяхъ Лехеровской системы по обѣ стороны отъ мостика, съ уравненіемъ (13), дающимъ условія колебаній въ одной проволоцѣ, снабженной емкостями на концахъ, то замѣтимъ, что эти условія тождественны.

Отсюда обнаруживается, что каждая часть Лехеровской системы $Bxx' B'$ и $Dxx' D'$ колеблется такъ, какъ будто она была самостоятельна.

Такое представленіе о распространеніи колебаній въ разсматриваемыхъ проводникахъ находитъ подтвержденіе въ слѣдующемъ опытѣ Лехера. Онъ дѣлалъ мостикъ xx' изъ двухъ параллельныхъ проволокъ и находилъ положеніе его, при которомъ Гейсселерова трубка даетъ наибольшее свѣченіе, т. е. помѣщалъ мостикъ въ

¹⁾ A. Elsass. Wied. Ann. 49 p. 487, 1893.

²⁾ I. c.

узелъ. Послѣ этого проволоки мостика припаивались къ основнымъ проволокамъ и послѣднія разрывались между двумя мостиками.

При этомъ не замѣчалось ослабленія свѣченія трубки, хотя теперь обѣ части системы не соединены между собою металлически. Итакъ колебанія, наводимыя индукторомъ избираютъ такъ сказать путь главнымъ образомъ по контуру $Bxx' B'$ и наводятъ колебанія въ контурѣ $Dxx' D'$.

И въ самомъ дѣлѣ Лехеръ указываетъ, что на силу свѣченія трубки имѣетъ большое вліяніе длина мостика, т. е. длина наводящей части проводника xx' . Трубка свѣтится сильнѣе при увеличеніи длины мостика, и перестаетъ совершенно свѣтиться, если мостикъ слишкомъ коротокъ.

§ 12. Существованіе въ проволокахъ волнъ различной длины, иначе явленіе такъ называемаго многократнаго резонанса Лехеръ и послѣдующіе наблюдатели обнаруживали слѣдующимъ образомъ.

При помощи перваго мостика находились на проволокахъ мѣста, при наложеніи на которыя мостика получается наибольшее свѣченіе Гейслеровою трубкой. Эти мѣста будутъ расположены по проволокамъ, на первый взглядъ, совершенно произвольно.

Такъ наприм. у Лехера при длинѣ проволоки въ 1632 см. мѣста узловъ оказались на

$$\underline{22} - \underline{145} - \underline{631} - \underline{1151} - \underline{1232} \text{ см.},$$

при чемъ эти длины отсчитываются отъ нѣкотораго условнаго нуля. Если же первый мостикъ помѣстимъ на узелъ, напр. на 22 см. и будемъ изслѣдовать проволоку вторымъ мостикомъ, то замѣтимъ, что свѣченіе трубки происходитъ при положеніи второго мостика на 631 и 1232, но трубка гаснетъ при положеніи его на 145 и 1151.

Такимъ образомъ найдемъ на проволокахъ два междуузлія почти одинаковой длины 609 см. 601 см. Положимъ теперь второй мостикъ на 631, оставивши первой на 22, тогда при помощи третьяго мостика найдемъ опять узелъ на 1232 см.

Подобнымъ же образомъ мы можемъ положить мостикъ на мѣсто 145 (снявши, или даже не снимая мостиковъ съ другихъ узловъ 22, 631 и 1232), тогда найдемъ узелъ на 1151 см., т. е. измѣримъ междуузліе въ 1106 см.

Итакъ на данной проволоки въ 1632 см. мы обнаруживаемъ колебанія двухъ разныхъ длинъ волнъ: $\frac{\lambda}{2} = 1106 \text{ см.}$ и $\frac{\lambda}{2} = 601 \text{ см.}$

Конъ и Хирвагенъ ¹⁾ повторяли опытъ Лехера, при чемъ имъ удалось обнаружить до пяти и шести порядковъ тоновъ волнъ въ проволокахъ. При этомъ высшіе тоны колебаній не представляютъ гармоническихъ тоновъ основнаго тона; волна самаго высокаго изъ возможныхъ колебаній болѣе чѣмъ вдвое меньше волны основнаго колебанія и не находится вообще въ простомъ отношеніи съ ней. Въ своей теоріи авторы приходятъ къ выраженію (24), опредѣляющему разстояніе послѣдняго узла отъ конца проволоки. Выр. (24) можемъ написать иначе въ слѣдующей формѣ, замѣтивши

что $m = \frac{\pi}{\lambda}$, гдѣ λ есть половины волны:

$$tg \frac{\pi x_2}{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi q [C_1]}, \quad (24a)$$

гдѣ:

$$q = 2 P = 4 lg \frac{b}{R}.$$

Для провѣрки этого выраженія авторы поступаютъ слѣдующимъ образомъ. Пусть K_n есть разстояніе послѣдняго узла отъ произвольнаго нуля масштаба, а X_n разстояніе этого узла отъ второго конденсатора, вычисленное по формулѣ (24a) для соответствующей длины волны λ_n ; тогда очевидно должно быть

$$K_n + X_n = t$$

гдѣ t есть постоянное разстояніе второго конденсатора отъ нуля масштаба.

Я приведу одну изъ таблицъ (II) результатовъ Кона и Хирвагена, которая вполне оправдываетъ формулу (24a). Весь богатый матеріалъ наблюденій авторовъ даетъ тѣ же результаты.

Условія опыта, результаты котораго сопоставлены въ этой таблицѣ I были таковы. Разстояніе между проволоками $b=10$ см., радіусъ проволоки $R=0,1$ см. Радіусъ диска, составляющаго обкладку второго конденсатора $r=10$ см.; разстояніе между обкладками его $e=0,5$ см. Отсюда вычисляемъ емкость конденсатора $[C_1] = 49$ и величину $q = 18,42$.

Первые семь столбцовъ даютъ положенія узловъ K_n^0 до K_n^6 для шести наблюденныхъ разныхъ тоновъ колебаній.

Столбецъ восьмой представляетъ величины полувольтъ; девятый соответствующія имъ величины X_n , вычисленные по формулѣ (24a) и наконецъ десятый постоянную величину $t = K_n^n + X_n$.

¹⁾ 1. с.

ТАБЛИЦА I.

n	K_n^0	K_n^1	K_n^2	K_n^3	K_n^4	K_n^5	K_n^6	λ_n	X_n	t
0	752									
1	211	1007	—	—	—	—	—	796	69,3	1076,3
2	71	559,5	(1048)	—	—	—	—	488,5	26,5	1074,5
3	12	360	712	—	—	—	—	—	—	—
	(11,3)	(361,3)	(711,3)	(1061,3)				350,0	13,7	1075,0
4	—	253	523	795	—	—	—	—	—	—
		(252,7)	(523,7)	(794,7)	(1065,7)			271	8,2	1073,9
5	—	182	404	627	848	—	—	—	—	—
		(182,1)	(404,2)	(626,3)	(848,4)	(1070,5)		222,1	5,5	1076,0
6	—	130	319	508	696	884	—	—	—	—
		(130,4)	(318,9)	(507,4)	(695,9)	(884,4)	(1072,9)	188,5	4,0	1076,9

Эльзасъ *) инымъ путемъ пришелъ къ тѣмъ же результатамъ, какъ и мы.

Онъ контролируетъ свои выводы нѣсколько иначе, чѣмъ Конъ и Хирвагенъ. Въ самомъ дѣлѣ, положимъ, что обкладки второго конденсатора сближены до соприкосновенія, а стало быть емкость его $[C_1] = \infty$, тогда изъ ур. (24) видимъ, что одинъ узелъ x_1 будетъ находиться на удаленныхъ концахъ проволокъ $x_1 = 0$. При этомъ далѣе ур. (21), которое устанавливаетъ зависимость длины полуволны λ_n отъ длины проволокъ и постоянныхъ величинъ $[C]$ и P системы принимаетъ видъ:

$$\text{Cotg } ml = 2 m P [C]$$

или:

$$\text{Cotg } \frac{\pi l}{\lambda_n} = \frac{2 P [C] \pi}{\lambda_n} \quad (21a)$$

Въ работѣ Кона и Хирвагена находимъ результаты, соотвѣтствующие разсматриваемому случаю; при этомъ длины наблюдаемыхъ полуволнъ измѣняются отъ $\lambda_1 = 499,0$ до $\lambda_6 = 189,1$, а длина проволокъ есть $l = 1160$ см. (около), $[C] = 7$ см. (около), $2 P = 18,42$.

Подставляя въ нашу формулу различныя значенія $\lambda_1 \dots \lambda_6$ и опредѣляя каждый разъ изъ формулы длину l , мы должны получить для l одну и ту же величину около 1160 ст.

Правда Эльзасъ замѣчаетъ, что точная провѣрка формулы (21a) затрудняется тѣмъ обстоятельствомъ, что емкость конденсатора $[C]$ не была въ данномъ случаѣ точно опредѣлена наблюдателями.

*) л. с.

По частному сообщенію Кона за вѣроятную величину емкости перваго конденсатора можно принять 7 см.; но кажется, говорить Эльзасъ, величина $[C]$ должна быть меньше, около 6 см., чтобы величины l , опредѣленные для разныхъ длинъ волнъ изъ формулы (21a), возможно мало отклонялись отъ средней величины.

Кромѣ того нельзя ожидать, чтобы вычисленная по форм. величина l вполне совпадала съ истинною длиною проволоки по той причинѣ, что въ опытахъ Кона проволоки не на всемъ протяжении были параллельны между собою, тогда какъ формула выведена подѣ условіемъ параллельности проволокъ. Тѣмъ не менѣе приводимая ниже таблица II показываетъ что средняя величина вычисленной длины l довольно близка къ истинной длинѣ l при $[C] = 6$ см. и только на 10 см. меньше истинной при $[C] = 7$ см. Въ опытахъ Кона и Хирвагена измѣренная длина проволокъ отъ искроваго разрыва до втораго конденсатора была равна 1158 см.

ТАБЛИЦА II.

2 P [C] π = 347 cm.		2 P [C] π = 405.	
$\lambda_1 = 845$	$l = 1161,9 \text{ cm.}$	$\lambda_1 = 845$	$l = 1147,3$
$\lambda_2 = 499$	$l = 1153,5 \text{ "}$	$\lambda_2 = 499$	$l = 1141,6$
$\lambda_3 = 354$	$l = 1151,6 \text{ "}$	$\lambda_3 = 354$	$l = 1142,9$
$\lambda_4 = 274,5$	$l = 1156,5 \text{ "}$	$\lambda_4 = 274,5$	$l = 1150,0$
$\lambda_5 = 223,1$	$l = 1156,1 \text{ "}$	$\lambda_5 = 223,1$	$l = 1151,2$
$\lambda_6 = 189,1$	$l = 1165,0 \text{ "}$	$\lambda_6 = 189,1$	$l = 1160,6$
	$l = 1157,4 \text{ "}$		$l = 1148,7$

Если второй конденсаторъ имѣетъ конечную емкость, то провѣрить формулу (21) удобнѣе слѣдующимъ образомъ. Изъ ур. (23a, 24) опредѣлимъ положеніе x_1 перваго и x_2 послѣдняго узла для любой наблюдаемой длины волны λ_n . Тогда очевидно длина проволоки l должна равняться

$$l = x_1 + n\lambda_n + x_2$$

ТАБЛИЦА III.

$2 P [C_1] \pi = 2835 \text{ cm.}$			
$2 P [C] \pi = 347 \text{ cm.}$		$2 P [C] \pi = 405 \text{ cm.}$	
$\lambda_1 = 796 \text{ cm.}$	$l = 1159,1 \text{ cm.}$	$\lambda_1 = 796 \text{ cm.}$	$l = 1143,7 \text{ cm.}$
$\lambda_2 = 488,5 \text{ "}$	$l = 1151,7 \text{ "}$	$\lambda_2 = 488,5 \text{ "}$	$l = 1139,9 \text{ "}$
$\lambda_3 = 350 \text{ "}$	$l = 1151,6 \text{ "}$	$\lambda_3 = 350 \text{ "}$	$l = 1143,0 \text{ "}$
$\lambda_4 = 271 \text{ "}$	$l = 1149,4 \text{ "}$	$\lambda_4 = 271 \text{ "}$	$l = 1143,1 \text{ "}$
$\lambda_5 = 222,1 \text{ "}$	$l = 1156,3 \text{ "}$	$\lambda_5 = 222,1 \text{ "}$	$l = 1151,5 \text{ "}$
$\lambda_6 = 188,5 \text{ "}$	$l = 1164,8 \text{ "}$	$\lambda_6 = 188,5 \text{ "}$	$l = 1160,3 \text{ "}$
	$l = 1156,5 \text{ cm.}$		$l = 1146,9 \text{ cm.}$

Таблица III даетъ длины l вычисленныя для данныхъ въ табл. II наблюдений Кона и Хирвагена *), снова въ предположеніи, что $[C] = 6 \text{ cm.}$ и $[C] = 7 \text{ cm.}$ Снова видимъ полное подтвержденіе вышеуказанной формулы, особенно для первой величины $[C] = 6 \text{ cm.}$

§ 14. Положимъ наконецъ, что опытъ расположенъ такъ, что емкости на концахъ проволоки $[C]$ и $[C_1]$ весьма малы. Тогда при большой длинѣ волнъ, мы получимъ въ правой части уравненій (23a), (24) величины весьма малыя и можемъ писать условія, опредѣляющія положеніе узловъ въ проволокахъ просто въ формѣ:

$$\text{Cotg } mx_1 = 0 \text{ и } \text{Cotg } mx_2 = 0,$$

а стало быть:

$$mx_1 = (2p - 1) \frac{\pi}{2}$$

и

$$mx_2 = (2q - 1) \frac{\pi}{2}$$

гдѣ p и q суть цѣлыя числа.

Отсюда:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{2p - 1}{2q - 1} \text{ или } \frac{x_1}{l - x_1} = \frac{2p - 1}{2q - 1} \quad (36)$$

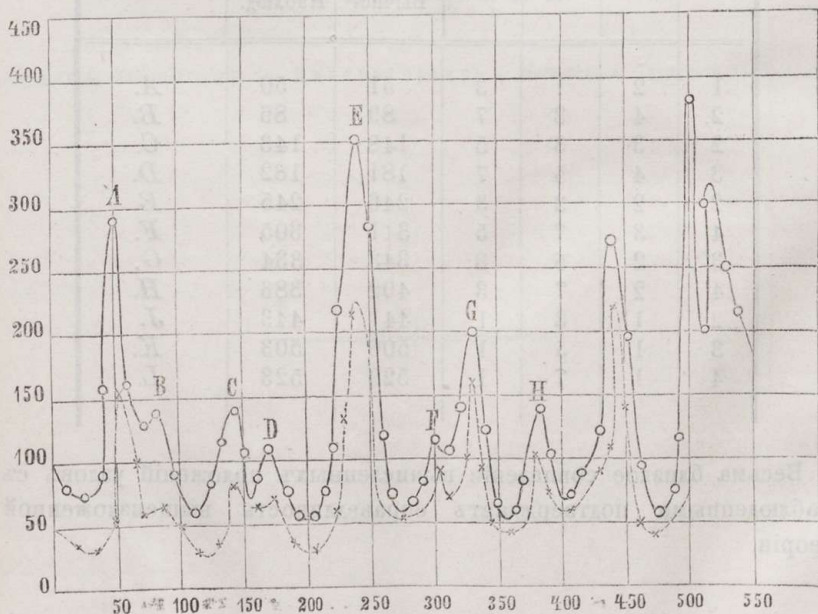
Итакъ, если мостикъ находится въ узлѣ, то обѣ части проволоки должны разбиться на длины, которыя относятся какъ нечетныя числа. Этотъ выводъ вполне подтверждается опытами Рубенса **), которому принадлежать наиболѣе точныя измѣренія длинъ волнъ въ проволокахъ. Рубенсъ пользовался тоже системою раз-

*) I. с.

**) Н. Rubens. Wied. Anu. 42. p. 154—164, 1892.

въведенныхъ проволокъ Лехера. Но вмѣсто наблюденія наибольшаго свѣченія Гейслеровой трубки онъ наблюдалъ положеніе мостика при помощи болометра. Послѣдній былъ введенъ въ окончательныхъ опытахъ слѣдующимъ образомъ. На концы проволокъ, въ которыхъ распространяются электрическія колебанія, надѣты маленькія стеклянныя трубки. На каждую изъ нихъ намотано по одному обороту проволоки, такъ что плоскости этихъ оборотовъ перпендикулярны къ проволокамъ. Въ такомъ случаѣ каждый оборотъ и часть проволоки, имъ огибаемая, дѣйствуютъ какъ лейденскія банки весьма малой емкости. Эти обороты соединены съ концами весьма тонкой желѣзной проволоки *L*, которая представляетъ одно изъ плечъ Витстонова мостика, который въ свою очередь снабженъ батареею и гальванометромъ. Пока быстрыя колебанія не проходятъ черезъ проволоку *L*, мостикъ сбалансированъ и гальванометръ не даетъ отклоненія.

Но какъ скоро въ цѣпи возбуждены быстрыя колебанія, то они, проходя черезъ проволоку *L*, нагреваютъ ее и тѣмъ измѣняютъ ее сопротивленія и стало быть нарушаютъ равновѣсіе мостика, вслѣдствіе чего гальванометръ отклоняется. Такой снарядъ оказался настолько чувствительнымъ, что повышеніе температуры



Черт. 5.

проволоки на $\frac{1}{10000}$ градуса соотвѣтствуетъ одному миллиметру отклоненія гальванометрической скалы. На проволоки накла-

дывался мостикъ, положеніе котораго измѣнялось, причемъ наблюдалось измѣненіе отклоненія гальванометра. Результаты такихъ наблюденій приведены на чертежѣ 5-омъ, гдѣ ординаты представляютъ отклоненія гальванометра, а абсциссы положенія мостика.

Замѣтимъ что длина мостика въ этихъ опытахъ равнялась 14 см., искривленная часть проволоки имѣла 83 см., а часть прямой проволоки 570 см. Емкость конденсаторовъ на концахъ проволокъ можемъ замѣнить равновеликими длинами проволоки; для этого, какъ оказывается, нужно прибавить 55 см. съ конца, обращеннаго къ вибратору, и 60 см. съ конца, обращеннаго къ болометру. Въ приведенной таблицѣ сопоставлены положенія узловъ, опредѣленные по формулѣ (36) для различныхъ p и q съ дѣйствительно наблюдаемыми.

ТАБЛИЦА IV.

p	q	$2p-1$	$2q-1$	Положенія узловъ		Соотвѣтств. точки черт.
				Вычис.	Наблюд.	
1	2	1	3	51	50	A.
2	4	3	7	89	86	B.
2	3	3	5	148	143	C.
3	4	5	7	181	182	D.
2	2	3	3	246	245	E.
4	3	7	5	311	305	F.
3	2	5	3	343	334	G.
4	2	7	3	402	386	H.
2	1	3	1	441	443	J.
3	1	5	1	506	503	K.
4	1	7	1	529	523	L.

Весьма близкое совпаденіе вычисленныхъ положеній узловъ съ наблюдаемыми подтверждаетъ справедливость вышеизложенной теоріи.

ПЛОСКІЕ РЕГУЛЯТОРЫ

БЫСТРОХОДНЫХЪ МАШИНЪ

(РЕГУЛЯТОРЫ ВЪ МАХОВИКЪ)

ИХЪ УСТРОЙСТВО, ТЕОРІЯ И РАСЧЕТЪ.

СОСТАВИЛЪ

А. Сидоровъ.

Преподаватель Машиностроенія въ Императорскомъ Московскомъ Техническомъ Училищѣ.

МОСКВА.

Университетская типографія, Страстной бульв.

1895.

ПРЕДИСЛОВІЕ.

Исторія развитія человѣческихъ знаній и изобрѣтеній показываетъ, что нерѣдко поводомъ къ обширному иногда развитію какой нибудь отрасли ихъ являлись потребности другой отрасли, такъ какъ дальнѣйшее развитіе второй оказывалось невозможнымъ безъ надлежащаго развитія первой.

Такъ, напримѣръ, было съ развитіемъ аналитической механики и необходимыхъ для нея отдѣловъ чистой математики, преимущественно интегрированія дифференціальныхъ уравненій. Послѣ открытія закона тяготѣнія Ньютономъ явилась необходимость разрѣшить задачу о движеніи трехъ и болѣе тѣлъ, взаимно притягивающихъ другъ друга, чтобы результатами этой задачи пользоваться для вычисленій движеній небесныхъ свѣтилъ. Но при этомъ астрономы встрѣтились съ трудностями чисто математическими и настолько большими, что всѣ великіе математики того времени — Лапласъ, Лагранжъ, Клеро и др. заинтересовались ими и стали астрономами, направивъ всѣ свои силы на рѣшеніе задачъ о движеніи тѣлъ, притягивающихся по закону Ньютона (и другимъ). Благодаря этому, мы обладаемъ теперь томами драгоценныхъ сочиненій, служащихъ основой нашихъ знаній въ аналитической механикѣ и чистой математикѣ.

Въ техникѣ встрѣчаются подобные же примѣры. Не болѣе 25 лѣтъ тому назадъ началось усиленное движеніе, имѣвшее цѣлью расширить область примѣненій электричества въ промышленности. До этого времени примѣненія его были по большей части, если можно такъ выразиться, игрушечнаго или оптическаго характера, какъ-то — телеграфъ освѣщеніе вольтовой дугой отъ батарей, электрическіе звонки и пр. мелкіе и слабые приборы, получавшіе токъ изъ чинно и тихо стоявшихъ батарей. Настоящихъ, сильныхъ машинъ тутъ еще не было и тогдашній электротехникъ былъ оптикомъ и физикомъ, а не механикомъ.

Но вотъ, въ виду неудобства батарей начали появляться сперва магнито, а потомъ и денамо-электрическія машины Сименса,

Ледда, Вильда и наконецъ Грамма. Для приведенія въ движеніе этихъ машинъ потребовались уже вещи, непривычныя для физическаго кабинета—сильные приводы съ ремнями и шкивами, передававшіе уже по нѣскольку лошадиныхъ силъ. Примѣненіе машины эти сначала имѣли исключительно для электрическаго освѣщенія, въ особенности послѣ гениальнаго изобрѣтенія лампочки накаливанія. Вскорѣ же обнаружилось, что весьма неудобно приводить динамо въ движеніе отъ привода, вращаемаго обыкновенными тогдашними паровыми машинами старыхъ типовъ. Ходъ этихъ старыхъ паровыхъ машинъ оказался на столько неравномѣрнымъ, что электрическій свѣтъ мерпалъ, дрожалъ и тухъ, а лампочки перегорали отъ сильныхъ колебаній напряженія тока, которое есть непосредственно функція числа оборотовъ машины. Эти непріятности заставили думать о томъ, чтобы строить для движенія динамо спеціальныя паровыя машины, обладающія возможно равномернымъ ходомъ и большимъ числомъ оборотовъ, чтобы возможно болѣе упростить передачу къ динамо, требовавшей для своего наиболѣе экономичнаго дѣйствія весьма большихъ чиселъ оборотовъ. Конструкторамъ паровыхъ машинъ представилась нелегкая задача, ибо ничего подобнаго до тѣхъ поръ не встрѣчалось. Паровозъ, правда, давно уже существовалъ, но этой быстроходной машинѣ и до сихъ поръ еще позволяется дергать поѣздъ сколько угодно, хотя это, правда и происходитъ безъ особаго вреда для него, такъ что паровозъ является машиной весьма неравномѣрной, и ходъ его регулируется отъ руки. Въ требуемыхъ же для вращенія динамо паровыхъ машинахъ необходимо было автоматическое регулированіе при весьма высокой равномерности хода; задача усложнялась еще постепеннымъ повышеніемъ давленія пара, что имѣло слѣдствіемъ болѣе давленіе на органы парораспределенія, для перестановки которыхъ требовалась и болѣшая работа со стороны регулятора, если только не употребляются уравновѣшенные золотники. Поэтому, требовалось устроить весьма сильные и вмѣстѣ чувствительные регуляторы, до тѣхъ поръ еще неизвѣстные.

Первые и главнѣйшіе шаги къ рѣшенію этой задачи сдѣлали Американцы.

Филадельфійская выставка 1876 года (и отчетъ о паровыхъ машинахъ ея Радингера) впервые познакомила Европу съ быстроходными машинами. Въ машинахъ, бывшихъ на ней, была уже рѣшена задача быстрого автоматическаго регулированія. Регуляторы нѣкоторыхъ изъ этихъ машинъ были плоскіе, сидѣвшіе прямо на главномъ валу машины, шары регулятора передвигали

особой системы эксцентрикъ и тѣмъ измѣняли отсѣчку машины; вращаясь въ вертикальной плоскости регуляторы эти, конечно, не могли для удержанія шаровъ въ равновѣсіи быть снабжены муфтой, какъ обыкновенные, а должны были быть снабжены пружинами. Созданіе такихъ регуляторовъ открыло новую эпоху въ исторіи построенія быстроходныхъ машинъ для цѣлей электротехники.

Какъ въ Америкѣ, такъ и въ Европѣ начали строить быстроходныя машины, пользуясь для регулированія ихъ принципомъ плоскаго пружиннаго регулятора. Наибольшую извѣстность въ Европѣ получила Американская машина Вестингауза съ цилиндрами простаго дѣйствія. Вскорѣ фizioномія электротехники измѣнилась. Изъ физическаго кабинета и лабораторіи она переходитъ въ мастерскую, въ заводъ. Электротехникъ-физикъ зоветъ уже на помощь механика и общими усиліями они создаютъ динамо-машины въ *тысячи* лошадиныхъ силъ и рассылаютъ въ такихъ количествахъ электрическую энергію на *десятки* верстъ. Одна изъ послѣднихъ побѣдъ этихъ двухъ союзниковъ—это утилизація энергіи Ніагарскаго водопада, считавшаяся нѣсколько десятковъ лѣтъ тому назадъ чистѣйшей научной фантазіей, вродѣ путешествія на луну въ пушечномъ ядрѣ.

Не малой долей своихъ успѣховъ электротехника обязана, безспорно, маленькому пружинному регулятору, скромно спрятавшемуся отъ глазъ въ маховикъ машины или даже внутри коробки, какъ въ машинѣ Вестингауза. Тамъ вертится онъ и изъ своего уголка зорко слѣдитъ за всѣми измѣненіями въ нагрузкѣ машины, контролируя тысячи огней, сіящихъ въ домахъ и на улицахъ и свѣтящихъ массѣ людей, незнающихъ даже о существованіи этого неусыпнаго контролера. Но публикѣ простительно такое невѣдѣніе; страннымъ является то обстоятельство, что и сами механики, люди знающіе объ этомъ регуляторѣ, а многіе и имѣющіе съ нимъ дѣло, мало имъ занимаются.

Въ самомъ дѣлѣ, тогда какъ обыкновенные центробѣжныя регуляторы имѣютъ обширную литературу и изслѣдованы со всѣхъ сторонъ, до сихъ поръ, насколько мнѣ извѣстно, въ иностранной литературѣ (не говоря уже объ русской) нѣтъ *ни одного* отдѣльнаго сочиненія, посвященнаго плоскимъ регуляторамъ и только въ техническихъ журналахъ изрѣдка встрѣчаются отдѣльныя статьи ооъ нихъ, написанныя иногда, вѣроятно, не безъ цѣлей рекламы своего патента и не лишенныя крупныхъ ошибокъ.

Вполнѣ понятно поэтому затруднительное положеніе механика, который бы захотѣлъ получить понятіе объ конструкціяхъ, усло-

віяхъ работы и достоинствахъ этихъ новыхъ регуляторовъ, а тѣмъ болѣе встрѣчаются затрудненія, если явится необходимость *построить* такой регуляторъ, когда для него нельзя даже достать и детального чертежа для образца или копировки.

Такъ какъ примѣненія электричества въ промышленности начинаютъ понемногу распространяться и у насъ въ Россіи, и весьма возможно, что въ скоромъ времени русскимъ заводамъ придется заняться постройкой быстроходныхъ машинъ, то весьма желательнымъ является въ настоящее время дать какъ учащимся, такъ и окончившимъ уже ученіе техникамъ возможность ознакомиться съ плоскими регуляторами безъ затраты значительнаго труда на разыскиваніе, разборъ и критику немногихъ статей, разбѣянныхъ въ техническихъ журналахъ, и не дающихъ понятія о предметѣ во всей полнотѣ и строгости. Тѣсное и обширное знакомство съ технической литературою, а тѣмъ болѣе разработка мало затронутыхъ ею вопросовъ, лежитъ, по справедливому замѣчанію профессора Худякова на обязанности преподающихъ машиностроеніе въ высшихъ техническихъ школахъ. Раздѣляя вполне это воззрѣніе и желая принести посильную пользу дѣлу, я рѣшился взяться за составленіе руководства къ изученію плоскихъ регуляторовъ, причемъ предстояло пополнить многіе пробѣлы и исправить ошибки, вкравшіяся въ предшествовавшія статьи.

Намѣреніе это встрѣтило поддержку со стороны проф. Худякова, одобрившего какъ выборъ темы, такъ и выработанный мною планъ сочиненія, которое лежитъ теперь передъ читателемъ.

Чтобы придать изложенію цѣльность, я предпосылаю въ первой главѣ основныя понятія и опредѣленія, относящіяся до всѣхъ регуляторовъ вообще, считая это далеко не лишнимъ, такъ какъ, между прочимъ, часто при изложеніи регуляторовъ не упоминается вовсе, напр., о такой важной вещи, какъ *полная степень неравномерности* (Resultirende Ungleichförmigkeitsgrad) и т. п.

Затѣмъ я рассматриваю плоскій регуляторъ, сперва въ его простѣйшей, идеальной формѣ—груза,двигающагося своимъ центромъ тяжести по радіусу вращающагося диска, а потомъ и въ томъ видѣ, въ какомъ онъ употребляется обыкновенно въ практикѣ и изучаю его съ точки зрѣнія статики, т. е. рассматриваю условія его относительнаго равновѣсія при различныхъ скоростяхъ машины или положеніяхъ груза; изъ этого разсмотрѣнія выясняется вліяніе различныхъ элементовъ на степень изохронизма регулятора и находятся точки привѣса пружины, дающія близость къ состоянію изохронизма. Въ третьей главѣ я привожу примѣры

подробнаго разсчета строящагося регулятора и предлагаю вырабатанный мною ходъ разсчета.

Долгое время изученія регуляторовъ съ точки зрѣнія статики считалось вполне достаточнымъ, и главнѣйшій пунктъ теоріи регулятора вовсе не разсматривался. Я разумѣю здѣсь вліяніе регулятора на ходъ машины, т. е. разсмотрѣніе регулятора съ динамической точки зрѣнія, изученіе его, безспорно весьма запутаннаго, движенія за тотъ промежутокъ времени, когда онъ послѣ измѣненія въ нагрузкѣ машины начинаетъ двигаться, регулировать, и колеблется взадъ и впередъ, пока наконецъ не установится въ новомъ положеніи равновѣсія, сообразно измѣнившейся нагрузкѣ машины. Только въ 70-хъ годахъ были впервые сдѣланы двѣ попытки поставить и рѣшить эту задачу; одна принадлежитъ профессору *Kargl'у* (*Civilingenieur*, 1871 г.), причемъ постановка задачи и основныя черты рѣшенія были намѣчены еще раньше *Lüders'омъ*, другая — профессору *Вышнеградскому* (*Civilingenieur* 1877 г.). Въ изслѣдованіи Вышнеградскаго изучается, впрочемъ, преимущественно *дифференціальное* уравненіе движенія регулятора съ катарактомъ и изъ него выводятся условія хорошей работы регулятора. Самое же движеніе регулятора здѣсь не разсматривается. Въ изслѣдованіи *Kargl'a* мы имѣемъ уже весьма полное изученіе колебаній регулятора въ періодъ регулированія и вліянія ихъ на ходъ машины. Въ болѣе подробномъ видѣ это изслѣдованіе вошло въ „*Theoretische Maschinenlehre*“ *Grashof'a*. Попытка изложить рѣшеніе задачи въ примѣненіи къ плоскому регулятору сдѣлана въ прошедшемъ году американцемъ *Begtrup'омъ*, причемъ изложеніе наглядно, безъ употребленія высшаго анализа; хотя попытка эта не можетъ считаться вполне удачной, но за то наводитъ на многіе важные вопросы. Болѣе подробный разборъ перечисленныхъ сочиненій находится въ концѣ четвертой главы.

Такъ какъ для чтенія въ оригиналѣ изслѣдованій *Kargl'a* и *Grashof'a* требуется извѣстная математическая подготовка, а для чтенія втораго еще и большая привычка къ его, безспорно, строго-научному и точному, но крайне тяжелому слогу, съ періодами иногда въ страницу, то я счелъ весьма полезнымъ дать въ 4-й главѣ возможно простое и ясное изложеніе задачи о движеніи плоскаго регулятора въ его простѣйшей формѣ, начиная съ болѣе легкаго случая—ненагруженного регулятора съ постоянной скоростью и переходя затѣмъ къ настоящему регулятору.

Изложеніе мое немного отступаетъ отъ метода *Kargl'a* *Grashof'a* въ нѣкоторыхъ частностяхъ.

Къ сожалѣнію, точное рѣшеніе задачи представляетъ математическія трудности настолько значительныя, что приходится довольствоваться пока приближеннымъ рѣшеніемъ задачи. Несмотря на это, я вошелъ въ 4-й главѣ въ нѣкоторыя подробности, имѣя въ виду съ одной стороны ознакомить учащихся съ этимъ вопросомъ а съ другой—привлечь вниманіе и возбудить интересъ математиковъ къ этой интересной для нихъ задачѣ анализа и важной для насъ, техникувъ, задачѣ механики. Поэтому глава 4-я назначена не только для учащихся и практиковъ, но и для специалистовъ теоретиковъ, привлечь вниманіе которыхъ я воспользовался удобнымъ случаемъ. Все же сочиненіе преслѣдуетъ цѣли главнымъ образомъ педагогическія и отчасти практическія, вызвано къ жизни интересомъ къ новѣйшимъ успѣхамъ машиностроенія моихъ учениковъ — московскихъ техникувъ и имъ преимущественно и посвящается.

А. Сидоровъ.

Москва, 1 сентября 1894 г.

ГЛАВА I.

Общія понятія о регуляторахъ.

Для всякаго почти производства существуетъ своя опредѣленная скорость, при которой работа идетъ наилучшимъ образомъ, и въ нѣкоторыхъ случаяхъ поддержаніе этой скорости по возможности неизмѣнной имѣетъ рѣшающее значеніе для доброкачественности фабриката или вообще для правильной и экономичной работы исполнительныхъ машинъ (или машинъ-орудій). Примѣрами могутъ служить машины для тонкаго пряденія, гдѣ при неровномъ ходѣ нити порвутся и динамо-машины для электрическаго освѣщенія лампочками накаливанія, гдѣ при небольшихъ (процентно) колебаніяхъ въ угловой скорости вращенія якоря, а слѣдовательно и въ напряженіи тока, лампочки перегораютъ.

Колебанія въ скорости исполнительныхъ машинъ являются результатомъ колебаній скорости машины-двигателя, связанной съ исполнительными машинами при помощи приводовъ, благодаря которымъ отношеніе скорости машинъ-орудій къ скорости двигателя постоянно во всякій моментъ времени, такъ что всякое измѣненіе послѣдней вызываетъ соответствующее по пропорціи измѣненіе первой. Колебанія скорости машины-двигателя могутъ происходить отъ двухъ разныхъ причинъ.

Изъ теоріи машинъ извѣстно, что равномерное движеніе машины-двигателя можетъ происходить и происходить, если движущая сила, рассматриваемая приложенной къ какой нибудь точкѣ машины-двигателя, равна сопротивленію, приложенному въ той же точкѣ машины. Поэтому, измѣненіе скорости машины можетъ произойти или отъ того, что измѣнится величина движущей силы, или отъ того, что измѣнится величина сопротивленія.

Первое происходитъ наприм. при случайномъ повышеніи или пониженіи давленія пара въ котлѣ паровой машины или при измѣненіи напора въ гидравлическомъ двигателѣ; второе при остановкѣ нѣкоторыхъ машинъ-орудій или при измѣненіи подаваемого въ нихъ сырого матеріала, количественномъ или качественномъ.

Какъ для правильной работы исполнительныхъ машинъ, такъ и для экономической и безопасной работы машины-двигателя является не только желательнымъ, но и безусловно необходимымъ (исключая нѣкоторые частные случаи, о которыхъ упомянемъ ниже) поддерживать скорость машины-двигателя хотя и не абсолютно постоянной, — такъ какъ это практически невозможно, — но *по возможности* постоянной, т.-е. таковой, чтобы колебанія скорости не выходили изъ извѣстныхъ предѣловъ, указываемыхъ въ каждомъ частномъ случаѣ характеромъ производства.

Для поддержанія по возможности постоянной скорости необходимо поддерживать равенство движущей силы и сопротивленія, а для этого возможно опять или дѣйствовать на сопротивленіе или на движущую силу.

Устройства, воздѣйствующія на сопротивленіе, называются *тормазами* или *модераторами*, а устройства, воздѣйствующія на движущую силу — *регуляторами*. Мы займемся здѣсь только регуляторами.

Регуляторъ можетъ дѣйствовать или отъ руки машиниста или автоматически отъ самой машины. Примѣръ перваго — паровозъ. Но въ заводскомъ и фабричномъ дѣлѣ полагаться на вниманіе машиниста рискованно, и предпочитаютъ регуляторы *автоматическіе*, т.-е. такіе, которые, будучи связаны кинематически съ машиной, приходятъ въ дѣйствіе, разъ нарушается равенство движущей силы и сопротивленія.

Въ зависимости отъ фактора, *непосредственно* приводящаго регуляторъ въ дѣйствіе, можно регуляторы раздѣлить на три класса:

I) Регуляторы, которые приводятся въ дѣйствіе той же причиной, которая измѣняетъ сопротивленіе.

II) Регуляторы, которые приводятся въ дѣйствіе вслѣдствіе происшедшаго уже измѣненія въ *величинѣ* сопротивленія.

III) Регуляторы, которые приходятъ въ дѣйствіе лишь тогда, когда наступило уже неравенство движущей силы и сопротивленія и измѣнилась нѣсколько *скорость* машины, и которые приходятъ въ дѣйствіе вслѣдствіе этого измѣненія *скорости*.

Первые два класса можно назвать динамометрическими регуляторами, послѣдній — тахометрическими.

Въ практикѣ почти исключительное распространеніе имѣютъ регуляторы тахометрическіе, которыми мы только и будемъ заниматься въ дальнѣйшемъ. (Регуляторы I-го класса употребляются на пароходахъ, чтобы, въ случаѣ качки, при сильномъ погруженіи въ воду одного колеса или вытѣзаніи изъ воды винта, и слѣдо-

вательно, сильномъ увеличеніи или уменьшеніи сопротивленія движенію ихъ, открывать или прикрывать паропускной клапанъ, причемъ движеніе клапана вызывается или относительнымъ отклоненіемъ маятника или давленіемъ воды на особый поршень, сообщающійся съ открытымъ моремъ.

Регуляторы II-го класса были предложены для приводовъ, причемъ приводъ перерывается и въ перерывъ въ приводъ вставляется упругое тѣло, деформирующееся $\div$ передаваемому усилию и, слѣдовательно, при измѣненіи сопротивленія мѣняющее величину деформаціи и тѣмъ вызывающее на мгновеніе относительное движеніе обѣихъ частей привода; это то относительное движеніе и передается дальше для регулированія движущей силы).

Изучимъ теперь подробнѣ свойства тахометрическихъ регуляторовъ.

Тахометрическіе регуляторы опять дѣлятся на интерференціонные, гидравлическіе, крыльчатые и инерціонные. Мы рассмотримъ наиболѣе употребительные для двигателей—инерціонные.

Каждый инерціонный тахометрическій регуляторъ состоитъ изъ 2-хъ частей, которые назовемъ *A* и *B*.

Часть *A* связана непосредственно съ органомъ (назовемъ его *C*), открывающимъ движущей силѣ, несомой какимъ нибудь тѣломъ, доступъ къ приѣмнику машины-двигателя, наприм. съ паропускнымъ (дроссельнымъ) клапаномъ или же золотникомъ паровой машины, щитомъ водопроводнаго канала и проч. Другая часть *B* устроена такъ, что ей сообщается отъ машины-двигателя нѣкоторое періодическое движеніе (наболѣе часто вращательное), такъ что амплитуда этого движенія зависитъ, очевидно, отъ силъ инерціи массъ части *B* и измѣняется съ измѣненіемъ скорости машины; эту часть можно назвать маятникомъ.

Части *B* и *A* или связаны между собой все время или же приходятъ въ соединеніе только по временамъ, а именно при измѣненіи скорости машины и, слѣдовательно, и амплитуды колебаній части *B*.

Въ обоихъ случаяхъ измѣненіе амплитуды вызываетъ перемѣненіе части *A*, причемъ приборъ расположенъ такъ, что при увеличеніи скорости часть *A* и связанный съ ней органъ *C* убавляетъ притокъ движущей силы, а при уменьшеніи скорости—прибавляетъ, пока въ обоихъ случаяхъ не будетъ достигнуто равенство движущей силы и сопротивленія, послѣ чего движеніе части *A* прекращается, ибо скорость снова стала равномерной. Замѣтимъ, что для тахометрическаго регулятора совершенно безразлично, *отчего* измѣнилась скорость—отъ измѣненія-ли сопротивленія

или движущей силы. Для его дѣйствія достаточно, чтобы измѣнилась *скорость*, а отчего—ему все равно.

Въ этомъ состоитъ его важное преимущество передъ регуляторами динамометрическими, для которыхъ это безразлично.

Регуляторы съ качательнымъ движеніемъ части *B* встрѣчаются сравнительно рѣже (между прочимъ употребляются въ газомоторахъ Отто, Кертинга и др.) *), а наиболѣе распространены регуляторы съ вращательнымъ движеніемъ части *B*. Сила инерціи въ этомъ случаѣ называется по русски, въ силу рутины, до сихъ поръ еще „центробѣжной“ и самые регуляторы центробѣжными. Ихъ теперь и рассмотримъ.

Тѣло *B* здѣсь состоитъ изъ массы, могущей вращаться вокругъ оси *I*, которая въ свою очередь вращается вокругъ другой оси *II*, приводимой во вращеніе отъ машины-двигателя. Подъ вліяніемъ центробѣжныхъ силъ частицъ тѣла *B* центръ тяжести тѣла *B* стремится удалиться отъ оси *II*; этому удаленію препятствуетъ пружина или грузъ, расположенные такъ, что съ удаленіемъ центра тяжести тѣла *B* отъ оси *II* возрастаетъ натяженіе пружины или моментъ груза относительно оси *I*, такъ что при извѣстномъ отклоненіи тѣла *B* центробѣжная сила вообще уравнивается пружинной или грузомъ и *B* придетъ въ состояніе относительнаго равновѣсія (относительно оси *II*), а органъ *C*, соединенный съ частью *A*, будетъ выпускать при этомъ положеніи въ машину извѣстное количество движущей силы.

Предположимъ, что мы устроили и установили приборъ такъ, что при нормальной угловой скорости ω_0 главного вала машины тѣло *B* какъ разъ пришло въ положеніе относительнаго равновѣсія при угловой скорости ω_r оси *II*, причемъ

$$\frac{\omega_r}{\omega_0} = \lambda$$

есть передаточное число между осью *II* регулятора и главнымъ валомъ машины, а механизмъ, соединяющій *B* и *A*, предположимъ, устроенъ такъ, что при такомъ положеніи равновѣсія тѣла *B* органъ *C* открываетъ доступъ движущей силѣ какъ разъ на столько, на сколько нужно для преодоленія сопротивленія. При такихъ условіяхъ машина будетъ идти равномерно неограниченное время. Положимъ теперь, что внезапно измѣнилась величина движущей силы или сопротивленія. Пусть до нарушенія равновѣсія

*) Теорію этого регулятора см. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1894 г. № 34.

величина движущей силы и равная ей величина сопротивленія были P .

Пусть внезапно сопротивленіе измѣнилось, для опредѣленности положимъ уменьшилось, до величины $P' < P$. Съ момента уменьшенія сопротивленія, еслибы регуляторъ не дѣйствовалъ, машина приметъ равномѣрно-ускоренное движеніе, причемъ угловое ускореніе $p = \frac{d\omega}{dt}$ будетъ равно

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{(P - P')\rho}{J} \dots \quad (1)$$

гдѣ ρ —радіусъ, на концѣ котораго приложены силы P и P' , а J —моментъ инерціи всѣхъ частей, сидящихъ на главномъ валу машины.

Интегрируя уравненіе (1), находимъ

$$\omega = pt + C.$$

Если время будемъ считать съ момента нарушенія равенства силы и сопротивленія, то при $t=0$ имѣемъ $[\omega]_{t=0} = \omega_0$

и слѣдовательно $C = \omega_0$, такъ что

$$\omega = \omega_0 + pt \dots \quad (2).$$

Съ такою возрастающей угловой скоростью будетъ вращаться машина въ отсутствіи или при бездѣйствіи регулятора.

Посмотримъ теперь, можетъ-ли регуляторъ начать уже регулировать въ самый моментъ нарушенія равенства силы и сопротивленія.

Тѣло B находится въ положеніи относительнаго равновѣсія; для того чтобы оно пришло въ движеніе, необходимо, чтобы измѣнилась сумма M моментовъ центробѣжныхъ силъ частицъ тѣла B вокругъ оси I , которая выражается черезъ

$$M = \sum m \omega_r^2 \cdot x \cdot p = \omega_r^2 \sum m x p$$

гдѣ m —масса какой нибудь частицы, x —ея разстояніе отъ оси II , а p —плечо элементарной центробѣжной силы $m\omega_r^2 x$ вокругъ оси I . Для измѣненія момента должна измѣниться угловая скорость ω_r . Безконечно малое измѣненіе $d\omega_0$ угловой скорости машины въ первый моментъ послѣ нарушенія равенства силы и сопротивленія произведетъ безконечно малое же измѣненіе $d\omega_r = \lambda d\omega$ угловой скорости вращенія вокругъ оси II и вызоветъ безконечно малое измѣненіе суммы моментовъ центробѣжныхъ силъ равное

$$(\omega_r + d\omega_r)^2 \Sigma m x r - \omega_r^2 \Sigma m x r = dM.$$

Если при перемещении тѣла B и связанныхъ съ нимъ A и C , не приходится преодолевать никакихъ вредныхъ сопротивленій, то подѣ дѣйствию избытка момента dM тѣло B придетъ въ движеніе вокругъ оси I съ нѣкоторымъ бесконечно малымъ угловымъ ускореніемъ

$$j = \frac{dM}{\Delta},$$

гдѣ Δ моментъ инерціи тѣла B вокругъ оси I , и начнетъ перемѣщать части A и C , измѣняя притокъ движущей силы. Следовательно, въ этомъ случаѣ регуляторъ безъ всякаго замедленія начнетъ дѣйствовать въ первый же моментъ, ибо для приведенія его въ дѣйствіе достаточно бесконечно малого измѣненія $d\omega$, угловой скорости машины или измѣненія $d\omega_r$, угловой скорости оси II регулятора. Такой регуляторъ можно назвать „регуляторомъ съ совершенной чувствительностью“

На самомъ дѣлѣ такой регуляторъ невозможенъ. Вредныя сопротивленія всегда существуютъ и для перемѣшенія тѣла B (особенно если связанное съ нимъ тѣло A постоянно соединено съ C) приходится преодолѣть треніе въ шарнирахъ и пр.; моментъ всѣхъ этихъ сопротивленій, приведенный къ оси I не будетъ бесконечно малъ, ибо треніе въ частяхъ, соединенныхъ съ B , вызывается суммой центробѣжныхъ силъ всѣхъ частицъ тѣла B и вѣсами какъ тѣла B , такъ и груза, удерживающаго его и пр. Если моментъ всѣхъ сопротивленій относительно оси I назовемъ M_s , то, для приведенія тѣла B въ движеніе, моментъ центробѣжныхъ силъ долженъ возрасти на величину равную или большую M_s , такъ что регуляторъ придетъ въ дѣйствіе лишь при угловой скорости оси $II = \omega'_r$, опредѣляемой изъ условія:

$$\omega'^2_r \Sigma m x r = \omega_r^2 \Sigma m x r + M_s.$$

откуда

$$\omega'^2_r - \omega_r^2 = (\omega'_r - \omega_r)(\omega'_r + \omega_r) = \frac{M_s}{\Sigma m x r} \dots (3).$$

Изъ уравненія (3) видно, что разность $\omega'_r - \omega_r$, т. е. приращеніе угловой скорости вала регулятора, пока тѣло B не сдвинется съ мѣста, будетъ величиной конечной. Угловая скорость машины

измѣнится при этомъ на величину $\frac{\omega'_r - \omega_r}{\chi}$

Если бы мы не уменьшили сопротивление на величину $P - P'$, а увеличили бы его на ту же величину, то машина пошла бы замедленно съ отрицательнымъ ускореніемъ, равнымъ по абсолютной величинѣ прежнему p , опредѣленному изъ форм. (1), и тогда центръ тяжести тѣла B долженъ былъ бы приблизиться къ оси II, преодолевая тотъ же моментъ M_s , но лишь дѣйствующій въ обратную сторону, и регуляторъ пришелъ бы въ дѣйствіе лишь при угловой скорости оси II $= \omega_r''$, опредѣляемой изъ уравненія

$$\omega_r'^2 - \omega_r^2 = - \frac{M_s}{\Sigma m x p} \dots (4).$$

Изъ сказаннаго слѣдуетъ, что при всѣхъ измѣненіяхъ начальной угловой скорости ω_r между ω_r' и ω_r'' , регуляторъ остается въ бездѣйствіи и какъ бы не чувствуетъ ихъ. Онъ приходитъ въ дѣйствіе лишь тогда, когда угловая скорость отъ величины ω_r упадетъ до ω_r'' , или подыметься до ω_r' . Разность $\omega_r' - \omega_r''$ можетъ быть названа *полемъ* нечувствительности, а отношеніе ея къ нормальной угловой скорости ω_r очевидно измѣряетъ, насколько велико поле нечувствительности сравнительно съ нормальной скоростью и называется *степенью нечувствительности регулятора въ данномъ положеніи* (или при данной скорости ω_r). Означимъ ее буквою ϵ , такъ что;

$$\epsilon = \frac{\omega_r' - \omega_r''}{\omega_r} \dots (5)$$

Величина ϵ есть отвлеченное число. Изъ форм. (3) и (4) видно, что степень нечувствительности тѣмъ больше, чѣмъ больше вредныя сопротивленія при движеніи тѣла B и связанныхъ съ нимъ A и C .

Упомянемъ объ одномъ весьма важномъ обстоятельстве, которое не всегда достаточно разъясняется при изложеніи теории регуляторовъ: *степень нечувствительности зависитъ отъ тренія покоя, а не отъ тренія движенія*.

При равномерномъ движеніи машины и оси II регулятора всѣ части его находятся другъ относительно друга въ состояніи покоя и между ними подѣ дѣйствіемъ силъ инерціи, силы вѣса и натяженія пружинъ возбуждаются нормальныя давленія. При желаніи произвести относительное перемѣщеніе частей регулятора необходимо будетъ преодолѣть треніе покоя подѣ дѣйствіемъ этихъ нормальныхъ давленій. Когда же тѣло B регулятора стронулось съ мѣста, тогда, при дальнѣйшемъ движеніи, оно преодолеваетъ

уже трение *движения*. Поэтому, при вычислении величины M_s —момента трений, необходимо вносить в него величины коэффициентов трения *покоя*, если желаемъ найти *степень нечувствительности и коэффициентовъ трения движения*, если желаемъ изслѣдовать законъ *перемѣщенія* тѣла.

Величина коэффициентовъ трения покоя при данныхъ материалахъ и формахъ деталей опредѣляетъ нѣкоторую предѣльную величину степени нечувствительности ϵ , меньше которой ее нельзя сдѣлать никакимъ способомъ. Обыкновенно этотъ предѣлъ равенъ отъ 0,04 до 0,05 въ обыкновенныхъ, неплоскихъ регуляторахъ.

Центробѣжные тахометрическіе регуляторы можно раздѣлить на два большихъ класса, въ зависимости отъ характера ихъ движения при измѣненіяхъ скорости машины. Предположимъ сперва, что сопротивленій движению тѣла B , A и C нѣтъ, такъ что пока будемъ говорить о регуляторѣ совершенно чувствительномъ. При различныхъ положеніяхъ органа C , соответствующихъ различнымъ нагрузкамъ машины, часть B также принимаетъ различные положенія относительно оси регулятора Π (предполагая, что обѣ части связаны постоянно) и въ каждомъ положеніи центробѣжныя силы тѣла B должны уравниваться натяженіемъ пружинъ или слагающей вѣса груза. Въ зависимости отъ измѣненія конфигураціи частей законъ измѣненія момента всѣхъ центробѣжныхъ силъ и момента натяженій пружинъ или вѣса груза можетъ быть двоякій.

I) Если въ какомъ нибудь положеніи тѣло B регулятора находится въ равновѣсіи при угловой скорости ω , его оси Π , то и при всякомъ другомъ положеніи тѣла B оно останется въ равновѣсіи при той же скорости ω . Это будетъ происходить при такомъ устройствѣ регулятора, когда при измѣненіи положенія тѣла B моментъ центробѣжныхъ силъ все время равенъ моменту сдерживающихъ силъ—вѣса груза, натяженія пружинъ и проч., при неизмѣнной нормальной скорости ω . При всякой другой скорости нѣтъ такого положенія, въ которомъ тѣло B могло бы быть въ равновѣсіи. Слѣдовательно, въ такомъ регуляторѣ тѣло B можетъ быть въ равновѣсіи при *всякомъ* отклоненіи, но лишь при *одной* опредѣленной скорости. Такіе регуляторы называются *астатическими* или *изохроническими*.

II) Если въ какомъ нибудь положеніи регуляторъ находится въ равновѣсіи при извѣстномъ отклоненіи и при угловой скорости ω , то для того, чтобы онъ пришелъ въ равновѣсіе при другомъ отклоненіи, необходимо увеличить или уменьшить угловую скорость. Для устойчивости равновѣсія необходимо устроить такъ,

чтобы при увеличенномъ отклоненіи требовалась *большая* угловая скорость, а при уменьшенномъ отклоненіи—меньшая угловая скорость для поддержанія регулятора въ равновѣсіи; при этомъ равновѣсіе будетъ, очевидно, устойчиво, ибо, если, при неизмѣнной угловой скорости ω , отклонимъ тѣло B далѣе отъ оси вращенія его Π , то оно очутится въ такомъ положеніи, въ которомъ могло бы быть въ равновѣсіи лишь при большей скорости; теперь же моментъ вѣса груза или натяженія пружины болѣе момента центробѣжныхъ силъ, соотвѣтствующихъ угловой скорости ω , и потому тѣло B возвратится въ прежнее положеніе равновѣсія. Если приблизить тѣло B къ оси Π , то моментъ центробѣжныхъ силъ при скорости ω , больше чѣмъ моментъ груза или пружины и тѣло B опять вернемся въ нормальное положеніе. Такого рода регуляторы, въ которыхъ тѣло B для всякой угловой скорости имѣетъ лишь одно соотвѣтствующее ей положеніе равновѣсія, называются *статическими* или *неизохроническими регуляторами*. Они, слѣдовательно, могутъ быть въ равновѣсіи при *разныхъ* скоростяхъ, но лишь въ *одномъ* опредѣленномъ для каждой скорости положеніи.

Астатическіе регуляторы, какъ показали и теорія и практика, неудобны и почти негодны для регулированія машинъ - двигателей и потому для этой цѣли въ настоящее время употребляются исключительно регуляторы статическіе. Иногда въ сочиненіяхъ о о регуляторахъ попадаетъ еще терминъ „псевдо-астатическіе регуляторы“, бывшій одно время въ большой модѣ. Но такъ какъ этотъ терминъ, несмотря на его извѣстность, не выражаетъ никакого опредѣленнаго понятія, то мы его вовсе и не будемъ употреблять.

Употребленіе астатическаго регулятора для машинъ-двигателей было бы теоретически самымъ правильнымъ, ибо такой регуляторъ заставлялъ бы машину дѣлать одно и тоже неизмѣнное число оборотовъ при всякихъ нагрузкахъ ея. Но такъ какъ, вслѣдствіе своего непокойнаго хода и малой устойчивости, астатическіе регуляторы не годятся, то приходится употреблять регуляторы статическіе и заботиться лишь о томъ, чтобы скорость машины не переходила за извѣстные предѣлы. Здѣсь мы встрѣчаемся съ новымъ понятіемъ—*степенью неравномѣрности*, которое сейчасъ объяснимъ подробно.

Разсмотримъ два крайнихъ положенія регулятора. При одномъ органѣ C совершенно закрываетъ доступъ движущей силы и тѣло B при этомъ находится въ своемъ наибольшемъ отклоненіи, а при другомъ органѣ C открываетъ вполнѣ доступъ движущей силы

и тѣло B находится въ наименьшемъ отклоненіи. Для поддержанія тѣла B въ первомъ положеніи требуется наибольшая угловая скорость ω_{r1} оси регулятора, а для поддержанія тѣла B во второмъ положеніи требуется наименьшая скорость ея ω_{r2} .

Этимъ скоростямъ соответствуют скорости

$$\omega_1 = \frac{\omega_{r1}}{\lambda}$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_{r2}}{\lambda}$$

главного вала машины.

Отношеніе:

$$i = \frac{\omega_{r1}}{\omega_{r2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \dots \quad (6bis)$$

(большее единицы) показываетъ, на сколько регуляторъ далекъ отъ состоянія полной астагичности, (при которомъ $\omega_{r1} = \omega_{r2}$ и $i = \frac{\omega_{r1}}{\omega_{r2}} = 1$) и называется *степенью изохронизма регулятора*.

Отношеніе разности $\omega_{r1} - \omega_{r2}$ крайнихъ скоростей къ средней скорости оси регулятора ω_n называется *степенью неравномѣрности δ регулятора*. За среднюю скорость ω_n для простоты принято считать среднее арифметическое предѣльныхъ скоростей, такъ что:

$$\omega_n = \frac{\omega_{r1} + \omega_{r2}}{2} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_n} = 2 \frac{\omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_{r1} + \omega_{r2}} \dots \quad (7)$$

Можно δ выразить черезъ i ; изъ (7) и (6) имѣемъ

$$\delta = 2 \frac{\omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_{r1} + \omega_{r2}} = 2 \frac{\frac{\omega_{r1}}{\omega_{r2}} - 1}{\frac{\omega_{r1}}{\omega_{r2}} + 1} = 2 \frac{i - 1}{i + 1} \dots \quad (8)$$

Если извѣстна средняя скорость регулятора ω_n , принимаемая за нормальную, и степень неравномѣрности δ , то можно найти скорости въ крайнихъ положеніяхъ ω_{r1} и ω_{r2} , при помощи уравненій (6) и (7), именно:

$$\omega_{r1} = \omega_n \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) \dots \quad (9)$$

$$\omega_{r2} = \omega_n \left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \dots \quad (10)$$

Представимъ для большей наглядности движеніе совершенно чувствительнаго статическаго регулятора * графически. Возьмемъ прямоугольныя оси координатъ (фиг. 1) и на оси абсциссъ будемъ откладывать какую нибудь величину, измѣряющую отклоненіе тѣла B отъ нѣкотораго его положенія; за такую величину возьмемъ уголъ α отклоненія прямой, соединяющей какую нибудь точку тѣла B съ центромъ вращенія I , отъ ея внутренняго, крайняго положенія. По оси ординатъ будемъ откладывать угловыя скорости ω оси II , необходимыя для поддержанія тѣла B въ равновѣсіи при отклоненіи, изображенномъ абсциссой α . Продѣлавъ это для всѣхъ положеній тѣла B между крайними отклоненіями α_2 и α_1 , получимъ нѣкоторую кривую $A_2 A_1$, представляющую законъ измѣненія угловой скорости въ зависимости отъ отклоненія тѣла B . Видъ этой кривой можетъ быть весьма разнообразенъ и на немъ лучше всего можно дать понятіе объ устойчивости и неустойчивости регулятора.

Пусть кривая между A_2 и A_1 не имѣетъ ни *maximum*'а, ни *minimum*'а, и ω съ увеличеніемъ α все время возрастаетъ, какъ на фиг. 1. При такомъ устройствѣ равновѣсіе регулятора во всякомъ положеніи будетъ устойчивое, ибо при отклоненіяхъ тѣла B изъ какого нибудь положенія равновѣсія, оно стремится вернуться въ него. Если кривая имѣетъ *maximum* въ точкѣ A' (фиг. 2), то на части кривой $A_2 A'$ регуляторъ устойчивъ, а на части $A' A_1$ —неустойчивъ, ибо будучи отклоненъ отъ положенія равновѣсія, онъ стремится удалиться отъ него все болѣе и болѣе.

Если имѣется *minimum* въ точкѣ A'' , то на части $A_2 A''$ регуляторъ неустойчивъ, а на части $A'' A_1$ —устойчивъ (фиг. 3). Если имѣется и *maximum* въ точкѣ A' и *minimum* въ точкѣ A'' (фиг. 4), то на части $A'' A'$ регуляторъ устойчивъ, а на частяхъ $A_2 A''$ и $A' A_1$ —неустойчивъ. Послѣдній видъ кривой встрѣчается въ регуляторѣ Бусса и въ плоскомъ пружинномъ регуляторѣ.

Очевидно, что для *регулированія машинъ можно пользоваться*

* Профессоръ Salaba называетъ регуляторъ безъ сопротивленій или вполнѣ чувствительный—*ненагруженнымъ*, а регуляторъ дѣйствительный—*нагруженнымъ*. Этими названіями мы будемъ также пользоваться въ дальнѣйшемъ. Подъ нагрузкой разумѣется какъ сопротивленіе въ органѣ C , такъ и треніе въ механизмахъ частей A и B .

только размахом регулятора въ предѣлахъ устойчивой части кривой. Пренебреженіе этимъ весьма простымъ и понятнымъ закономъ не разъ наказывалось полнѣйшей негодностью построеннаго безъ соблюденія его регулятора.

Теперь посмотримъ, что будетъ происходить съ нагруженнымъ регуляторомъ, въ которомъ имѣются какъ свои внутреннія сопротивленія въ частяхъ B и A , такъ и сопротивленія органа C . Разсмотримъ регуляторъ устойчивый и пусть его размахи заключаются между крайними положеніями α_2 и α_1 (фиг. 5), которымъ соотвѣтствовали бы, если этотъ регуляторъ не былъ нагруженъ, крайнія угловыя скорости ω_2 и ω_1 , такъ что имѣли бы

$$\delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n}, \text{ (гдѣ } \omega_n = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \text{)}$$

и δ была бы степень неравномѣрности ненагруженного регулятора, а кривая $A_2 A_1$ выражала бы законъ измѣненій отклоненія и угловой скорости его. Возьмемъ какое нибудь отклоненіе α , которому соотвѣтствуетъ для ненагруженного регулятора угловая скорость ω , изображаемая точкой A . Такъ какъ регуляторъ нагруженъ, то при отклоненіи α онъ можетъ быть въ равновѣсіи не только при скорости ω , но и при всѣхъ другихъ скоростяхъ, заключенныхъ между

$$\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right)$$

и

$$\omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right),$$

гдѣ ϵ —степень нечувствительности при отклоненіи α , такъ что отклоненію α соотвѣтствуетъ не одна угловая скорость ω , а цѣлый рядъ ихъ, между

$$\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right)$$

и

$$\omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right).$$

Если отложимъ отъ точки A вверхъ и внизъ величины

$$\overline{AA'} = \overline{AA''} = \frac{\omega \epsilon}{2},$$

то отклоненію α соотвѣтствуютъ всѣ точки между A' и A'' и всѣ ординаты между $\overline{A'B}$ и $\overline{A''B}$. При измѣненіи угловой скорости

оси регулятора тѣло B придетъ въ движеніе лишь при пониженіи угловой скорости до

$$A'B = \omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right)$$

или при повышеніи до

$$A''B = \omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right).$$

Пока же она измѣняется отъ ω до $\omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right)$ или до $\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right)$, тѣло B не трогается съ мѣста. Слѣдовательно, при отклоненіи α регуляторъ не будетъ въ движеніи при угловой скорости ω , а лишь при угловой скорости $\omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right)$ и ббльшихъ. Построивъ для каждаго α соотвѣтствующія крайнія точки A'' и A' , причемъ ϵ будетъ мѣняться при разныхъ α , мы получимъ двѣ кривыя $A''_2A'_1$ и $A'_2A'_1$, которыя и представляютъ законъ измѣненій отклоненій и угловыхъ скоростей *нагруженного* регулятора.

Кривая $A''_2A'_1$ пробѣгается лишь слѣва направо (стрѣлка 1), а $A'_2A'_1$ лишь справа налѣво (стрѣлка 2).

Разсмотримъ каково будетъ движеніе нагруженного регулятора при измѣненіи скорости вращенія его оси. Возьмемъ регуляторъ въ покоѣ и начнемъ вращать ось его все быстрее и быстрее. Тѣло B регулятора стоитъ въ положеніи α_2 , пока угловая скорость не достигнетъ величины $B_2A''_2$, причемъ тѣло B сдвинется и начнетъ отклоняться при дальнѣйшемъ увеличеніи угловой скорости. Дальнѣйшее движеніе будетъ происходить въ зависимости отъ постепенныхъ измѣненій угловой скорости и инерціи тѣла B ; пусть наконецъ оно остановится при отклоненіи $\alpha = OB$, а угловая скорость установилась, положимъ, наибольшая $A''B$. Если послѣ нѣкотораго промежутка времени начнемъ ее уменьшать, то пока она не убудетъ до величины $A'B$, тѣло B регулятора стоитъ неподвижно, а затѣмъ начнетъ двигаться, приближаясь къ оси, и для поддержанія движенія его угловая скорость должна убывать по кривой $A'A'_1$, такъ что репрезентативная точка A' будетъ по кривой $A'_2A'_1$ двигаться влѣво. Слѣдовательно, истинная зависимость между α и ω *при движеніи* тѣла B выражается кривыми: $A'_2A'_1$ при уменьшеніи его отклоненія и $A''_2A'_1$ при увеличеніи его отклоненія отъ оси. Отсюда слѣдуетъ также, что перемѣна направленія движенія центра тяжести тѣла B можетъ имѣть мѣсто лишь на кривыхъ $A'_1A'_2$ и $A''_1A''_2$.

Изъ разсмотрѣнія фиг. 5 видно, что при наименьшемъ откло-

неніи α_2 тѣло B регулятора можетъ еще быть въ равновѣсіи при угловой скорости

$$A'_2 B_2 = \omega_2 \left(1 - \frac{\epsilon_2}{2}\right);$$

а при наибольшемъ отклоненіи α_1 тѣло B регулятора можетъ быть еще въ равновѣсіи при скорости

$$A''_1 B_1 = \omega_1 \left(2 + \frac{\epsilon_1}{2}\right),$$

такъ что наибольшая разность скоростей, которыя допускаетъ для себя, (а слѣдовательно соотвѣтственно передаточному числу λ и для машины) регуляторъ, будетъ больше, чѣмъ для регулятора ненагруженного, и именно будетъ:

$$\omega_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{2}\right) - \omega_2 \left(1 - \frac{\epsilon_2}{2}\right) =$$

$$= \omega_1 - \omega_2 + \frac{\omega_1 \epsilon_1}{2} + \frac{\omega_2 \epsilon_2}{2},$$

такъ что истинная степень неравномѣрности Δ должна измѣряться отношеніемъ этой разности къ средней скорости ω_n :

$$\Delta = \frac{\omega_1 - \omega_2 + \frac{\omega_1 \epsilon_1}{2} + \frac{\omega_2 \epsilon_2}{2}}{\omega_n},$$

гдѣ

$$\omega_n = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}.$$

Разница между ϵ_1 и ϵ_2 обыкновенно невелика, такъ что можно положить $\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ равнымъ нѣкоторой средней величинѣ ϵ , напр.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$$

и тогда:

$$\Delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n} + \epsilon \frac{\omega_1 + \omega_2}{2 \omega_n} = \delta + \epsilon \quad (8)$$

гдѣ δ — по прежнему коэффициентъ неравномѣрности ненагруженного регулятора а ϵ — средняя степень нечувствительности. Величину Δ можно назвать еще *полной или составной степенью неравномѣрности* (Resultirende Ungleichförmigkeitsgrad), ибо она характеризуетъ всю неравномѣрность, зависящую и отъ нечувствительности и отъ несовершенной астатичности.

Мы подробно остановились на этомъ весьма важномъ понятіи потому, что въ нѣкоторыхъ учебникахъ? (особенно „краткихъ“ и „элементарныхъ“) объ немъ вовсе не упоминается, не говоря уже о прейскурантахъ, въ которыхъ дается лишь величина δ , что способствуетъ, конечно, лучшему сужденію о достоинствѣ регулятора со стороны неопытнаго покупателя.

Если конструктору предписывается къмъ нибудь степень неравномѣрности хода машины, напр. если электротехникъ требуетъ, чтобы колебанія скорости динамо и, слѣдовательно, паровой машины, въ каждую сторону не превосходили 3%, слѣдовательно, требуетъ степени неравномѣрности 0,06, то при расчетѣ регулятора конструкторъ долженъ принять $0,06 = \Delta$, а не $0,06 = \delta$, а затѣмъ, задавшись сперва величиной ϵ опредѣлить уже $\delta = \Delta - \epsilon$, и эту величину δ принять для вычисленія ненагруженного регулятора.

Кромѣ обычнаго, изложеннаго выше, графическаго представленія есть еще другой способъ графическаго представленія, менѣе извѣстный, но также весьма наглядный; въ нѣкоторыхъ же случаяхъ онъ гораздо удобнѣе изложеннаго выше. Способъ этотъ предложенъ профессоромъ *Salaba* и представляетъ построеніе почти обратное предъидущему, ибо здѣсь по оси абсциссъ откладываются величины, зависящія отъ угловой скорости, а по оси ординатъ перемѣщенія какой нибудь точки тѣла *B*.

Возьмемъ оси координатъ и, разсматривая сперва регуляторъ ненагруженный, будемъ по оси абсциссъ откладывать вправо отъ начала *O* отношенія приращенія угловой скорости, считая отъ средней, къ средней угловой скорости, т. е. величины

$$\xi = \frac{\omega - \omega_n^*}{\omega_n},$$

а по оси ординатъ отклоненія η какой нибудь точки тѣла *B* отъ положенія, соответствующаго скорости ω_n далѣе отъ оси. Влѣво же отъ точки *O* будемъ откладывать убыль угловой скорости въ процентахъ средней, т. е. величины

$$\xi = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} < 0;$$

на ординатахъ же соответствующія уклоненія той же точки тѣла *B* отъ средняго положенія ближе къ оси. Начало, слѣдовательно,

* Причемъ $\xi > 0$.

соотвѣтствуетъ средней скорости и соотвѣтствующему ей положенію тѣла B . Совокупность окончностей всѣхъ ординатъ даетъ кривую KK (фиг. 6), показывающую измѣненіе отклоненій тѣла B въ зависимости отъ приращенія угловой скорости. Устойчивость и неустойчивость и здѣсь должны характеризоваться maximum'омъ или minimum'омъ величины ω или все равно величины

$$\xi = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n},$$

т. е. абсциссы. Часть кривой KK лѣвѣе оси ординатъ начерчена неустойчивой *.

Если регуляторъ нагруженъ, то каждому положенію η тѣла B соотвѣтствуютъ двѣ различныхъ опредѣленныхъ скорости—одна, при которой центръ тяжести тѣла B начнетъ удаляться отъ оси регулятора, и другая, при которой центръ тяжести тѣла B начнетъ приближаться къ оси. Если ω есть скорость, при которой *ненагруженный* регуляторъ имѣетъ отклоненіе η , то обѣ сказанныя скорости будутъ, какъ мы знаемъ:

$$\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right) \text{ и } \omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right).$$

Откладывая вправо и влѣво отъ A величины

$$AA' = AA'' = \frac{\epsilon \omega}{2\omega_n}$$

получимъ двѣ точки: A' и A'' . Значеніе ихъ таково, что при всѣхъ значеніяхъ угловой скорости между значеньями, соотвѣтствующими ξ' и ξ'' , т. е. между скоростями

$$\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right) \text{ и } \omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right),$$

* Примѣчаніе. Замѣтимъ, что весьма хорошо совмѣстное присутствіе устойчивыхъ и неустойчивыхъ положеній характеризуется *однозначностью* или *многозначностью* функции (при обоихъ графическихъ представленіяхъ. Напр. на фиг. 6 въ части кривой KK лѣвѣе точки O каждому значенію ξ' соотвѣтствуютъ два значенія η — η' и η'' ; одно изъ нихъ устойчиво, а другое—неустойчиво.

Въ части правѣе точки O величина η вездѣ однозначна и слѣдовательно регуляторъ устойчивъ (конечно, если η возрастаетъ). На фиг. 3 одной и той же величиной ординаты соотвѣтствуютъ два значенія α — α' и α'' , одно изъ нихъ неустойчиво.

регуляторъ не двинется изъ положенія, опредѣляемаго отклоненіемъ η . Величины $\frac{\epsilon \omega}{\omega_n}$ вообще мѣняются вмѣстѣ съ ξ или съ ω , и, строя по двѣ сказанныхъ точки, мы получимъ для нагруженнаго регулятора вмѣсто кривой KK двѣ кривыя $K'K'$ и $K''K''$, изъ которыхъ лѣвая $K'K'$ соотвѣтствуетъ приближенію центра тяжести тѣла B къ оси и пробѣгается репрезентативной точкой A' лишь въ направленіи стрѣлки 1, а кривая $K''K''$ соотвѣтствуетъ удаленію центра тяжести тѣла B отъ оси и пробѣгается репрезентативной точкой лишь въ направленіи стрѣлки 2.

Посмотримъ, какъ здѣсь получится понятіе о полной степени неравномѣрности.

Пусть (фиг. 7) η_1 и η_2 — крайнія положенія тѣла B , которыя ненагруженнымъ регуляторомъ были бы достигнуты при угловыхъ скоростяхъ ω_1 и ω_2 , соотвѣтствующихъ абсциссамъ ξ_1 и ξ_2 . Благодаря сопротивленіямъ, нагруженный регуляторъ можетъ при тѣхъ же отклоненіяхъ быть еще въ равновѣсіи при угловыхъ скоростяхъ ω_1'' и ω_2' , соотвѣтствующихъ величинамъ ξ_1'' и ξ_2' . По опредѣленію:

$$\xi_1'' = \frac{\omega_1'' - \omega_n}{\omega_n};$$

$$\xi_2' = \frac{\omega_2' - \omega_n}{\omega_n}.$$

(Причемъ величины ξ_1'' и ξ_2' взяты съ ихъ знаками, такъ что $\xi_1'' > 0$ и $\xi_2' < 0$).

Отсюда:

$$\xi_1'' - \xi_2' = \frac{\omega_1'' - \omega_2'}{\omega_n} = \Delta. \quad (9)$$

Разность же: (величины ξ_1 и ξ_2 взяты съ ихъ знаками)

$$\xi_1 - \xi_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n} = \delta \quad (10)$$

будетъ степень неравномѣрности ненагруженнаго регулятора.

Такимъ образомъ здѣсь обѣ величины Δ и δ прямо получаются на чертежѣ.

Во многихъ случаяхъ практики величина ϵ весьма мало мѣняется для различныхъ положеній регулятора и можетъ быть взята постоянной и равной значенію ϵ для средней скорости ω_n , такъ что тогда на фиг. 6,

$$AA' = AA'' = OO' = OO'' = \frac{\epsilon \omega_n}{2\omega_n} = \frac{\epsilon}{2},$$

и кривыя K и K' идутъ съ кривой K все время на одинаковомъ отъ нея разстояніи, причемъ разстояніе кривыхъ K' и K'' считается параллельно оси ξ ; оно будетъ, слѣд., постоянно и равно степени нечувствительности ϵ , такъ что въ этомъ случаѣ и третья величина ϵ тоже получается на чертежѣ. Но, какъ сказано, такое постоянство ϵ не всегда имѣетъ мѣсто.

Теперь упомянемъ еще объ одномъ раздѣленіи регуляторовъ, по способу ихъ воздѣйствія на органъ C машины. По способу воздѣйствія на органъ C машины всѣ регуляторы можно раздѣлить на 2 класса.

1) Регуляторы *прямаго* дѣйствія (Direkt-wirkende Regulatoren).

2) Регуляторы *непрямаго* дѣйствія (Indirekt-wirkende Regulatoren).

Въ регуляторахъ прямого дѣйствія тѣло A непосредственно и постоянно соединено съ органомъ C , открывающимъ доступъ движущей силѣ (дроссельнымъ клапаномъ, золотникомъ, щитомъ турбины etc).

Въ этомъ случаѣ при измѣненіи скорости машины и регулятора и движеніи тѣла B , тѣло A начинаетъ переставлять упомянутый органъ C , измѣняя притокъ движущей силы. Въ этомъ случаѣ регуляторъ долженъ при движеніи своемъ преодолевать и сопротивленія органа C , которыя и причисляются къ нагрузкѣ регулятора. Положеніе этого органа въ какой нибудь моментъ есть непосредственно кинематически функція положенія тѣла B и лишь косвенно—функція переменной скорости машины въ періодъ регулированія, отъ которой зависитъ и положеніе тѣла B .

Въ регуляторахъ непрямаго дѣйствія при измѣненіи скорости машины тѣло A регулятора почти моментально производитъ сцѣпленіе какой нибудь муфточки (и тому подобн.), которая соединяетъ между собой органъ, пускающій движущую силу, съ *главнымъ валомъ машины*, движеніе котораго передаваясь муфточкой и передвигаетъ регулирующий органъ C , а тѣло A держитъ лишь въ сцѣпленіи муфточку. При такомъ устройствѣ положеніе этого органа есть *непосредственная функція скорости машины* и *совершенно не зависитъ* отъ дальнѣйшаго движенія тѣлъ B и A регулятора, лишь бы они держали муфточку въ сцѣпленіи. Здѣсь регулятору приходится преодолевать лишь свое внутреннее треніе, слѣдовательно, онъ можетъ быть слабѣе и чувствительнѣе. Ихъ употребляютъ тамъ, гдѣ сопротивленіе органа C машины слип-

комъ велико, напр. цѣтъ турбины, цѣтъ плюза, большіе золотники Мейера и проч. Въ паровыхъ машинахъ употребляются преимущественно регуляторы прямого дѣйствія.

Чтобы закончить настоящую главу остается упомянуть еще о *силѣ, энергіи и запасѣ работы* регулятора.

Мы уже видѣли, что нагруженный регуляторъ не можетъ дѣйствовать на машину мгновенно. Для того, чтобы регуляторъ получилъ способность преодолѣть моментъ M_s всѣхъ сопротивленій, приведенный къ оси I тѣла B , нормальная угловая скорость ω оси регулятора должна или увеличиться до величины

$$\omega \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right)$$

или уменьшиться до величины

$$\omega \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right),$$

гдѣ ϵ — степень нечувствительности. Для удобства, въ практикѣ обыкновенно говорятъ не о моментѣ M_s , а о сопротивленіи перестановкѣ или о *силѣ* регулятора; именно, выбираютъ, для опредѣленности, извѣстное плечо p , находятъ усиліе W , которое будучи приложено къ тѣлу B на этомъ плечѣ относительно оси I даетъ моментъ M_s , такъ что

$$Wp = M_s$$

и въ дальнѣйшемъ вмѣсто момента M_s говорятъ уже о сопротивленіи W , которое долженъ преодолѣть регуляторъ. Очевидно, что для преодоленія его регуляторъ долженъ развить на плечѣ p силу, тоже равную W . Ее будемъ называть перестановочной *силой* регулятора, или просто его силой. Въ регуляторахъ плоскихъ обыкновенно плечо берутъ равнымъ плечу пружины, такъ что W представляетъ силу, развиваемую регуляторомъ и отнесенную къ пружинамъ.

Ясно, что съ любымъ регуляторомъ можно получить любую данную величину W , стоитъ лишь позволить скорости его измѣниться въ достаточной степени, чтобы развить данную силу W , т. е. стоитъ лишь допустить большую степень нечувствительности. Поэтому величина W — сила, развиваемая регуляторомъ, никакъ не можетъ служить мѣрой его мощности. Для сужденія о мощности нужно еще знать, при *какой степени неравномерности* онъ способенъ развить эту силу.

Мѣрой же мощности можно принять *отношеніе* силы W къ степени нечувствительности ϵ . Отношеніе это въ старину названо

было *энергіей*, и хотя теперь это понятіе означаетъ совсѣмъ другое, но названіе утвердилось въ наукѣ, и мы тоже удержимъ его.

Означая энергію черезъ E , имѣемъ:

$$E = \frac{W}{\epsilon} \quad (11).$$

Если мы примемъ ϵ постояннымъ для нѣсколькихъ сравниваемыхъ регуляторовъ, что въ практикѣ почти всегда имѣетъ мѣсто, то тогда E будетъ пропорціонально W , слѣдовательно при *данной* степени неравномѣрности, величина W можетъ служить мѣрой мощности, ибо, очевидно, тотъ регуляторъ сильнѣе, который при данныхъ предѣлахъ измѣненія скорости (данной), способенъ развить бѣльшую силу W , а слѣдовательно, и способенъ преодолѣть бѣльшее сопротивленіе со стороны органовъ C , A и B , тоже равное W .

Для разныхъ отклоненій тѣла B регулятора величины W и E вообще тоже различны, и въ практикѣ приходится опредѣлять эти величины для нѣсколькихъ положеній регулятора.

Упомянемъ, наконецъ, о *запасѣ работы* регулятора. При переходѣ изъ даннаго положенія въ безконечно близкое, регуляторъ совершаетъ элементарную работу dL , при чемъ

$$dL = W \cos \varphi \, ds$$

гдѣ ds — безконечно малое перемѣщеніе точки приложенія силы W (точки привѣса пружины въ плоскомъ регуляторѣ), а φ — уголъ между нимъ и направлениемъ силы W . Полную работу, которую можетъ совершить регуляторъ при переходѣ изъ одного крайняго положенія въ другое получимъ, взявъ интеграль:

$$L = \int W \cos \varphi \, ds,$$

гдѣ интеграль берется по всей дугѣ качанія тѣла B между крайними положеніями.

Нелишнимъ считаемъ замѣтить еще, что часто при проектированіи регулятора обращаютъ главное вниманіе лишь на то, чтобы регуляторъ развилъ *силу*, потребную для преодоленія сопротивленія W , для нахождения коего необходимо вычислить или взять изъ опыта величину сопротивленій органа C и частей A и B самаго регулятора, и не слѣдятъ за тѣмъ, удовлетворяетъ ли регуляторъ и другому, не менѣе важному требованію — способности произвести *работу* L , необходимую для *полной* перестановки

органа C , не выходя из предписанныхъ границъ нечувствительности.

Въ заключеніе этой главы необходимо сказать нѣсколько словъ объ обозначеніяхъ или названіяхъ. Въ литературѣ регуляторовъ до сихъ поръ господствуетъ еще въ обозначеніяхъ странная рознь, только путающая дѣло. Мы приняли названія, которыхъ держалось большинство авторитетныхъ ученыхъ, напр. *Weisbach*, *Grashof* и проч.

Прёлль началъ почему-то называть энергіей величину W , перестановочную силу регулятора (!) и, кромѣ того, степенью нечувствительности онъ называетъ не наше ϵ , а $\frac{\epsilon}{2}$, степень же неравномѣрности беретъ, хотя и не вдвое меньше, но дѣлить разность крайнихъ скоростей не на среднюю, а на *меньшую* (?) (*Civilingenieur* 1872, S. 199), тоже неизвѣстно на какомъ основаніи. Последнее впрочемъ не важно, принятіе же за степень нечувствительности половины ϵ нехорошо еще и тѣмъ, что эта величина $\frac{\epsilon}{2}$ помѣщена въ прейскурантахъ Прёлля (а за нимъ и другихъ) подъ титуломъ „степени нечувствительности“, такъ что люди, незнакомые съ этимъ расколомъ, считаютъ регуляторъ Прёлля вдвое чувствительнѣе, чѣмъ онъ есть, принимая прейскурантную цифру за *всю* степень нечувствительности.

Профессоръ *Salaba* (въ Прагѣ) весьма рачительно предлагаетъ называть и называетъ энергіей то, что я назвалъ запасомъ работы, но такое названіе, хотя и соответствующее нынѣшнему смыслу слова энергія, не вошло въ употребленіе, вѣроятно, вслѣдствіе затрудненія придумать теперь новый терминъ для прежней энергіи $\frac{W}{\epsilon}$, и ввести оба новые названія въ употребленіе.

ГЛАВА II.

Основанія теоріи плоских регуляторовъ.

Плоскимъ регуляторомъ называется такой центробѣжный регуляторъ, въ которомъ ось *I*, вокругъ которой качается маятникъ или тѣло *B*, параллельна оси *II*, вокругъ которой вращается весь регуляторъ, такъ что плоскость колебаній маятника *B* параллельна плоскости вращенія регулятора и перпендикулярна къ его оси вращенія. На основаніи этого опредѣленія названіе плоскій регуляторъ (*Flachregulator*), предложенное нѣмецкими инженерами, есть самое удачное и вполне выражающее сущность дѣла. Но это названіе, къ сожалѣнію, не вошло еще во всеобщее употребленіе и гораздо болѣшимъ распространеніемъ какъ за границей такъ и въ Россіи пользуются другія названія, именно „регуляторъ въ маховикѣ“ (*Schwungrad-regulator*) „осевой регуляторъ“ (*Axenregulator*).

Первое названіе появилось благодаря тому, что части плоскаго регулятора въ нѣкоторыхъ изъ первыхъ быстроходныхъ машинъ, снабженныхъ имъ, были укрѣплены не къ особому диску, надѣтому на валъ машины, а къ спицамъ маховика. Признакъ этотъ очевидно, несущественный и, напр., въ машинѣ Вестингауза маховики снаружи а регуляторъ внутри, такъ что названіе „регуляторъ въ маховикѣ“ неудачно. Названіе „регуляторъ на оси“ совсѣмъ ничего не выражаетъ, ибо всякій регуляторъ сидитъ на оси, вокругъ которой вращается.

Удачнѣе было бы выразить названіемъ ту мысль, что въ паровыхъ машинахъ плоскій регуляторъ сидитъ на главномъ валу ея, но такое названіе не придумано и кромѣ того названіе плоскій регуляторъ правильнѣе, ибо есть и не плоскіе регуляторы, сидящіе на главномъ валу, такъ, напр., регуляторъ машины *Sautter, Lemonnier & Cie*, машины *Willans* и пр.

Поэтому, названіе „плоскій регуляторъ“ самое правильное и характеристичное и мы предлагаемъ ввести его въ Россіи, благо не укоренилось еще, въ виду новости предмета, какое нибудь

другое. Мы будемъ разсматривать плоскіе регуляторы въ примѣненіи къ паровымъ машинамъ (другаго они пока почти и не имѣютъ) и дадимъ теперь понятіе объ устройствѣ плоскаго регулятора примѣнительно къ регулированію паровой машины.

Въ паровой машинѣ плоскій регуляторъ сажается на главный или коренной валъ ея, такъ что число оборотовъ его равно числу оборотовъ машины и слѣдовательно угловая скорость оси *II* регулятора равна угловой скорости машины, и $\lambda = 1$.

Измѣненіе притока движущей силы здѣсь совершается наиболѣе часто измѣненіемъ степени отсѣчки (хотя иногда плоскіе регуляторы дѣйствуютъ и на дроссельный клапанъ), а это достигается при помощи измѣненія нѣкоторыхъ элементовъ конструкціи парораспределенія. Парораспределеніе здѣсь всегда совершается золотниками (принимающими иногда форму крановъ, напр. у Pröll'a); иногда употребляется простой золотникъ и одинъ эксцентрикъ (напр. у Westinghaus'a) иногда простой золотникъ и два эксцентрика (Armington & Sims, Pröll) иногда же двойной золотникъ по системѣ Полонсо и три эксцентрика (Hoffmann, Budil и др.) При распределеніи простымъ золотникомъ эксцентрикъ сажается на валъ машины не наглухо, а соединяется съ нимъ шарнирно, такъ что, вообще, можетъ имѣть относительно его нѣкоторое движеніе. Очевидно, что передвигая эксцентрикъ и закрѣпляя его въ разныхъ положеніяхъ, мы должны мѣнять координаты его центра относительно центра вала и относительно какого нибудь радіуса его. Полярными координатами центра эксцентрика будутъ эксцентриситетъ и уголъ предваренія его. При передвиженіи эксцентрика можетъ мѣняться эксцентриситетъ, а уголъ предваренія не мѣняется, или же могутъ мѣняться и уголъ предваренія и эксцентриситетъ. Въ обоихъ случаяхъ эксцентрикъ имѣетъ продолговатый вырѣзъ, въ которомъ помѣщается валъ машины. Эксцентрикъ поддерживается или какъ бы закрѣпляется въ какомъ нибудь положеніи при помощи шатуновъ, соединяющихъ его съ маятниками *B*, (пбо ихъ обыкновенно два, симметрично расположенныхъ относительно вала машины) и поддерживается въ данномъ положеніи насчетъ упругой силы пружинъ, оказывая на нихъ извѣстное давленіе, зависящее отъ того, что сила тренія при передвиженіи золотника по зеркалу передается черезъ золотниковый штокъ и тягу на эксцентрикъ (конечно это нарушаетъ правильность дѣйствія регулятора и нужно стараться располагать конструкцію такъ, чтобы на пружины передавалась возможно малая часть этой силы). Явленіе это называется обратнымъ дѣйствіемъ парораспределенія на регуляторъ (*Rückwirkung*).

Схема регулятора въ соединеніи съ простымъ эксцентрикомъ показана на фиг. 8.

При распредѣленіи двумя золотниками нижній или коренной золотникъ ведется обыкновеннымъ заклиненнымъ на валу машины эксцентрикомъ, отсѣчной же золотникъ, представляющій одну цѣльную пластинку (система Polonceau), ведется особой конструкціи эксцентрикомъ, у котораго регуляторъ можетъ измѣнять эксцентриситетъ и уголъ предваренія, благодаря чему измѣняется и относительное движеніе обоихъ золотниковъ, слѣдствіемъ чего является измѣненіе отсѣчки. Этотъ эксцентрикъ состоитъ изъ двухъ эксцентриковъ, или лучше кружковъ, изъ которыхъ первый, внутренній, заклиненъ эксцентрически на валу машины, а второй надѣтъ эксцентрически на первый какъ на валъ и охваченъ хомутомъ, соединеннымъ съ золотниковой тягой; очевидно, что если скрѣпить оба кружка—то истинный эксцентриситетъ и уголъ предваренія получатся теперь какъ бы для одного цѣльнаго кружка, если соединить центръ втораго кружка съ центромъ вала. Поворачивая второй кружокъ вокругъ перваго, мы измѣняемъ эксцентриситетъ и уголъ предваренія составнаго эксцентрика. Въ этой системѣ, слѣдовательно, съ тѣломъ *B* сочленяется наружный кружокъ, который и поворачивается регуляторомъ вокругъ внутренняго.

Схема такого регулятора показана на фигурѣ 9, причемъ эксцентрикъ коренного золотника непоказанъ для простоты.

Пружина, употребляемая въ плоскихъ регуляторахъ, наиболѣе часто спиральная.

Рессорныя пружины изъ плоскихъ листовъ употребляются гораздо рѣже. Поэтому мы при дальнѣйшемъ изложеніи будемъ разсматривать лишь регуляторы со спиральными пружинами, тѣмъ болѣе что общія основанія теоріи ихъ прилагаются и къ рессорнымъ пружиннымъ регуляторамъ, если принять, что для рессоры прогибъ ея пропорціоналенъ нагрузкѣ, что приблизительно и имѣетъ мѣсто.

Этихъ предварительныхъ свѣдѣній о конструкціи парораспредѣленія пока достаточно, чтобы приступить къ изложенію общей теоріи плоскихъ регуляторовъ.

Болѣе подробное описаніе различныхъ системъ дано будетъ впослѣдствіи.

Прежде чѣмъ приступить къ изложенію теоріи плоскихъ регуляторовъ, мы предварительно рѣшимъ 2 слѣдующія задачи изъ аналитической механики, результаты которыхъ потребуется намъ при изложеніи этой теоріи.

Задача 1). Твердое тѣло T произвольной формы вращается равномерно вокруг оси OO (фиг. 10). Найти проэктію равнодѣйствующей центробѣжныхъ силъ всѣхъ точекъ тѣла на нѣкоторое направленіе $\xi\xi$, пересекающее ось OO въ точкѣ A и перпендикулярное къ ней, а слѣдовательно параллельное плоскостямъ вращенія частицъ тѣла (чертежъ сдѣланъ въ перспективѣ).

Рѣшеніе. Возьмемъ въ тѣлѣ безконечно малый элементъ объема или частицу M съ массой m , находящуюся отъ оси OO на разстояніи $A'M=r$, такъ что $A'M$ перпендикулярно къ OO . Центробѣжная сила ея направлена по радіусу $A'M$ и равна $m\omega^2 r$, гдѣ ω —угловая скорость вращенія, общая для всѣхъ точекъ тѣла. Проведемъ черезъ A' прямую $A'E' \parallel A\xi$ и пусть уголъ $MA'E'$ есть φ , тогда проэктія силы $m\omega^2 r$ на $A\xi$, или, все равно, на $A'E'$ будетъ:

$$dC = m \omega^2 r \cos \varphi = m \omega^2 p \dots \quad (1)$$

гдѣ $p = A'P$, есть проэктія радіуса r на $A'E'$.

Чтобы получить полную слагающую C , нужно суммировать величины dC для всего тѣла такъ что

$$C = \iiint m \omega^2 p = \omega^2 \iiint m p, \dots \quad (2)$$

гдѣ интегрированіе распространяется на весь объемъ тѣла T .

Проведемъ черезъ M плоскость перпендикулярную къ $A'E'$, которая пересѣчетъ тѣло по контуру $abcd$ и другую, ей параллельную, на безконечно близкомъ разстояніи, которая пересѣчетъ тѣло по контуру $a'b'c'd'$.

Если производить двойную интеграцію въ безконечно маломъ элементѣ 1-го порядка, заключеннымъ между этими двумя безконечно близкими сѣченіями, то при этой интеграціи p будетъ постоянно и получимъ:

$$\iint m p = \mu p$$

гдѣ μ масса элемента объема между взятыми сѣченіями. Теперь имѣемъ:

$$C = \omega^2 \int \mu p$$

Величина $\int \mu p$, взятаго на весь объемъ, есть ничто иное, какъ статическій моментъ тѣла относительно плоскости, проходящей черезъ OO и перпендикулярной къ $\xi\xi$; какъ извѣстно:

$$\int \mu p = M \bar{p}$$

гдѣ M —масса всего тѣла, а $\bar{p}$ —разстояніе центра тяжести его отъ сказанной плоскости.

Поэтому

$$C = M \omega^2 \bar{p} \dots (3)$$

Величина $\bar{p}$ есть, очевидно, проэція на направленіе $\xi\xi$ радіуса вращенія R центра тяжести тѣла.

Если направленіе $\xi\xi$ взять такъ, чтобы оно прошло черезъ центръ тяжести тѣла, то при этомъ $\bar{p} = R$ и

$$C = M \omega^2 R \dots (4)$$

т.-е. сумма проэцій всѣхъ центробѣжныхъ силъ частицъ на радіусъ вращенія центра тяжести равна центробѣжной силѣ центра тяжести, въ которомъ сосредоточена вся масса тѣла, независимо отъ его формы.

Задача 2). Твердое тѣло T произвольной формы можетъ вращаться вокругъ оси CC (фиг. 11), соединенной накрѣпко съ системою, вращающейся равномерно вокругъ оси OO , параллельной CC . Найти въ данное мгновеніе равнодѣйствующій моментъ всѣхъ центробѣжныхъ силъ частицъ тѣла T находящагося въ относительномъ покоѣ { вокругъ оси CC (чертежъ въ перспективѣ).

Рѣшеніе. Возьмемъ въ тѣлѣ безконечно малую частицу M съ массой m ; центробѣжная сила этой частицы будетъ $m \omega^2 r$, гдѣ $r = A'M$ есть радіусъ вращенія точки M вокругъ оси OO , и направлена по радіусу $A'M$. Опустимъ изъ A' на CC перпендикуляръ $A'A = a$, разстоянію осей OO и CC . Уголъ $AA'M = \varphi$ лежитъ въ плоскости вращенія точки M , а потому, если опустимъ изъ A на $A'M$ перпендикуляръ $AP = p$, то моментъ элементарной центробѣжной силы частицы M вокругъ оси O напишется такъ:

$$dM = m \omega^2 r p = m \omega^2 r a \sin \varphi.$$

Полный моментъ всѣхъ центробѣжныхъ силъ всего тѣла будетъ:

$$M = \iiint m \omega^2 r a \sin \varphi = \omega^2 a \iiint m r \sin \varphi = \omega^2 a \iiint m q \dots (5)$$

гдѣ q есть проэція радіуса r на плоскость, проходящую черезъ OO перпендикулярно къ $A'A$, иначе говоря, q есть длина перпендикуляра MU , опущеннаго изъ M на плоскость, въ которой лежатъ оси OO и CC .

Проведемъ черезъ M плоскость, параллельную плоскости, содержащей оси OO и CC и другую на бесконечно близкомъ разстояніи, параллельную первой. Онѣ вырѣжутъ бесконечно тонкій элементъ объема перваго порядка, интегрируя по которому двойной интеграціей, мы имѣемъ q постояннымъ, а потому:

$$\iint mq = \mu q,$$

гдѣ μ равно массѣ элемента между взятыми сѣченіями. Теперь имѣемъ:

$$\mathfrak{M} = \omega^2 a \int \mu q$$

Величина $\int \mu q$ есть статическій моментъ всего тѣла T относительно плоскости, проходящей черезъ оси OO и CC . Какъ извѣстно:

$$\int \mu q = M \bar{q},$$

гдѣ M масса всего тѣла, а $\bar{q}$ — разстояніе центра тяжести его отъ сказанной плоскости. Поэтому:

$$\mathfrak{M} = M \omega^2 a \bar{q}$$

Величина $\bar{q}$ есть, очевидно, проеція на плоскость, проходящую черезъ OO и перпендикулярную къ линіи $A'A$, радіуса вращенія R центра тяжести всего тѣла, и если уголъ его съ линіей AA' назовемъ ϕ , то

$$R \sin \phi = \bar{q}$$

$$\mathfrak{M} = M \omega^2 R a \sin \phi$$

Но $a \sin \phi$ есть ничто иное, какъ кратчайшее разстояніе p между осью CC и радіусомъ вращенія R центра тяжести тѣла, которое перпендикулярно къ CC и къ R , а потому

$$\mathfrak{M} = M \omega^2 R p \dots \quad (6)$$

т.-е равнодѣйствующій моментъ всѣхъ центробѣжныхъ силъ частей тѣла вокругъ оси CC равенъ моменту центробѣжной силы центра тяжести, въ которомъ сосредоточена вся масса тѣла.

Замѣтимъ, что въ обѣихъ задачахъ какъ форма тѣла, такъ и плотность его въ различныхъ точкахъ совершенно произвольны. Обѣ задачи весьма важны для теоріи плоскихъ регуляторовъ, ибо позволяютъ вмѣсто разсмотрѣнія тѣлъ сложной формы, входящихъ въ составъ подвижной части или маятника регулятора и

состоящихъ изъ разныхъ матеріаловъ, разсматривать одну матеріальную точку, именно центръ тяжести всей системы, считать сосредоточенными въ немъ массы всѣхъ отдѣльных частей и брать центробѣжную силу или моментъ центробѣжной силы этой одной точки вокругъ центра вращенія маятника. Для краткости будемъ называть эту точку—центръ тяжести съ конечной массой—*шаромъ*; слѣдовательно, въ дальнѣйшемъ мы всегда будемъ трактовать о „шарѣ“, двигающемся по радіусу или сидящемъ на нематеріальной ручкѣ и вращающемся съ ней вокругъ шарнира.

Теперь переходимъ къ теоріи плоскихъ регуляторовъ. При изученіи регулятора однимъ изъ главныхъ вопросовъ является степень изохронизма регулятора. Какъ уже было сказано, регуляторы астатическіе негодятся для регулированія хода машинъ—двигателей и поэтому употребляютъ регуляторы статическіе, но близкіе къ астатическимъ т. е. со степенью изохронизма, близкой къ единицѣ, чтобы получить числа оборотовъ машины при различныхъ положеніяхъ маятника регулятора близкими между собой. Для того чтобы по возможности ясно представить себѣ, отъ чего именно зависитъ степень изохронизма разсмотримъ сперва плоскій регуляторъ въ его простѣйшемъ, идеальномъ видѣ.

Пусть (фиг. 12) дискъ D можетъ вращаться вокругъ оси C , а шаръ * соединенъ съ дискомъ такъ, что можетъ скользить своимъ центромъ по радіусу CN . Если привести дискъ во вращеніе съ постоянной угловой скоростью ω , то вслѣдствіе центробѣжной силы шаръ будетъ скользить по радіусу CN отъ центра къ окружности, причемъ при нахожденіи шара (центра его, ибо шаръ названіе лишь условное) на разстояніи x отъ центра C , центробѣжная сила C будетъ равна $m\omega^2x$, гдѣ ω —угловая скорость диска, а m —масса шара. Если помѣстимъ спиральную цилиндрическую пружину между шаромъ (центромъ его) и точкой N , въ которую она упирается, какъ въ опору, и такъ, что ея ось совпадаетъ съ радіусомъ CN , то шаръ, удаляясь отъ центра, будетъ сжимать пружину, пока наконецъ сила сжатія пружины не уравнивается центробѣжной силой шара, что случится, положимъ, на разстояніи r отъ центра диска, причемъ центробѣжная сила шара $= m\omega^2r$. На какомъ разстояніи r шаръ остановится—зависитъ, очевидно, отъ свойствъ пружины.

Изъ теоріи пружинъ извѣстно, что сила, сжимающая пружину, $\propto$ ея удлинению.

* Шаръ въ томъ смыслѣ какъ сейчасъ было условлено, т. е. какъ матеріальная точка съ конечной массой, такъ что подразумѣвается центръ шара, въ которомъ какъ бы сконцентрирована его масса.

Установимъ нашу пружину такъ, чтобы, когда шаръ M находится въ центрѣ C , она была бы въ своемъ нормальномъ, ненапряженномъ состояніи и имѣла, слѣдовательно, длину $= CN$.

Тогда, при переходѣ шара въ точку M , укороченіе пружины будетъ равно x и, слѣдовательно, упругая сила сжатія пружины можетъ быть выражена черезъ

$$S = \beta x,$$

гдѣ β —постоянное, зависящее отъ матеріала и размѣровъ пружины. Выберемъ такую пружину, чтобы

$$\beta = m\omega^2,$$

тогда

$$\beta x = m\omega^2 x$$

тождественно, при всякомъ x , т.-е. при всякомъ положеніи шара сила упругости пружины равна центробѣжной силѣ и, при вращеніи диска съ постоянной угловой скоростью ω , шаръ можетъ находиться въ равновѣсіи въ *любомъ* разстояніи отъ оси. Слѣдовательно, такой снарядъ можетъ представить собой астатическій регуляторъ, если посадить его на главный валъ паровой машины и соединить шаръ съ эксцентрикомъ ея, могущимъ передвигаться относительно вала, чтобы измѣнять отсѣчку.

Для большей наглядности воспользуемся графическимъ представленіемъ силъ (фиг. 13). Будемъ величину центробѣжной силы при угловой скорости ω откладывать на ординатахъ, перпендикулярныхъ къ радіусу CN , тогда концы всѣхъ ординатъ будутъ лежать, очевидно, на наклонной прямой Cn , ибо центробѣжная сила $\propto$ разстоянію шара x отъ центра.

Если пружина выбрана какъ сказано выше, то упругая сила сжатія пружины въ какой нибудь точкѣ M изобразится той же ординатой Mm , какъ и центробѣжная сила, ибо онѣ равны, слѣдовательно прямая, изображающая распределеніе силъ сжатія по радіусу, совпадетъ съ Cm , и регуляторъ будетъ астатическій. Если шаръ, для цѣлей регулированія, долженъ былъ бы перемѣщаться лишь въ предѣлахъ отъ p_1 до p_2 (фиг. 14), то можно выразиться еще такъ: чтобы регуляторъ былъ астатическимъ, пружина, при нахожденіи шара въ p , должна быть заложена въ регуляторъ будучи сжатой такъ, чтобы ея сила сжатія при закладкѣ была равна центробѣжной силѣ шара при положеніи его въ p_1 , а укороченіе было бы Cp_1 , равное разстоянію шара отъ центра.

Не трудно теперь видѣть, какъ выбрать пружину, чтобы получить статическій регуляторъ. Именно, теперь пружину выберемъ такъ, что упругія силы ея сжатія изображаются ординатами прямой $C'qn'$, пересекающей прямую Cn центробѣжныхъ силъ въ точкѣ O' ; слѣдовательно, свободная длина пружины въ ненапряженномъ состояніи $= qN$, а сама пружина, очевидно, сильнѣе предъидущей. Разстояніе Cq отъ центра до точки q , гдѣ находится центръ шара при ненапряженномъ состояніи пружины, будемъ въ дальнѣйшемъ называть черезъ r .

Раземотримъ, что произойдетъ, если дискъ опять вращается равномерно съ угловой скоростью ω . Если шаръ M помѣщенъ въ точкѣ O радіуса, гдѣ центробѣжная сила и упругая сила пружины равны, то онъ здѣсь и останется въ равновѣсіи. Если шаръ помѣстимъ въ точкѣ M , ближе къ центру, то здѣсь на него будутъ дѣйствовать: центробѣжная сила равная Mm и сила пружины равная Mm' , меньшая Mm . Слѣдовательно, подѣйствіемъ разности этихъ силъ, равной отрѣзку mm' , шаръ начнетъ двигаться вправо, стремясь придти въ точку O съ ускореніемъ, обусловливаемымъ въ каждый моментъ разностью центробѣжной силы и силы пружины. Если шаръ помѣститъ правѣе точки O , то сила пружины будетъ больше центробѣжной и шаръ опять пойдетъ къ точкѣ O . Слѣдовательно, равновѣсіе шара устойчивое и такая система можетъ служить статическимъ регуляторомъ.

Если бы мы выбрали и монтировали пружину такъ, что ея упругая сила сжатія изобразилась бы прямой $C'n'$, то равновѣсіе шара было бы, очевидно, неустойчиво и такое расположеніе негодится, ибо шаръ при малѣйшемъ отклоненіи отъ O или отлетитъ къ окружности, или придетъ въ центръ диска. Если съ шаромъ полученнаго нами статическаго регулятора связать эксцентрикъ или дроссельный клапанъ паровой машины, такъ чтобы при удаленіи шара отъ центра наполненіе цилиндра уменьшалось или мялся бы паръ, а при приближеніи къ центру наполненіе увеличивалось или паръ меньше мялся бы, то такая комбинація будетъ регулировать ходъ машины. Въ самомъ дѣлѣ, пусть дискъ нашъ сидитъ на главномъ валу машины, который вращается равномерно со скоростью ω , причемъ шаръ находится въ равновѣсіи въ нѣкоторой точкѣ O радіуса. Пусть нагрузка внезапно увеличилась; машина, очевидно, пойдетъ тише, ибо теперь ей не хватаетъ пару. Центробѣжная сила шара уменьшится, а упругая сила пружины останется та же, слѣдовательно, сила, равная разности между ней и уменьшенной центробѣжной силой начнетъ двигать шаръ къ центру, а отъ этого увеличивается наполненіе

или упругость пара, машина пойдетъ скорѣй и наконецъ наступитъ моментъ, когда пару будетъ достаточно—машина опять будетъ вращаться равномерно, но такъ какъ шаръ приблизился къ центру и теперь находится, положимъ, въ M , то для равновѣсія его здѣсь (а только здѣсь онъ и выпускаетъ пару какъ разъ сколько нужно) необходимо, чтобы центробѣжная сила была равна Mm' , слѣдовательно, машина должна принять теперь угловую скорость ω' меньшую ω и именно такую, что

$$m\omega'^2x = Mm'.$$

Слѣдовательно, статическій регуляторъ не возстановитъ вполнѣ прежнюю скорость машины ω .

Если бы нагрузка машины уменьшилась, то она пошла бы быстрѣе, шаръ подвинулся бы къ окружности диска и началъ бы припирать паръ, пока машина опять не пошла бы равномерно, но уже со скоростью $\omega'' > \omega$, ибо шаръ теперь ушелъ изъ точки O дальше отъ центра, а здѣсь упругая сила пружины больше центробѣжной силы при угловой скорости ω , слѣдовательно, для равновѣсія шара здѣсь скорость должна быть $> \omega$.

Посмотримъ отчего здѣсь зависитъ степень изохронизма и какъ она выражается.

Пусть C есть центръ диска, N — точка укрѣпленія пружины, Cn — прямая, представляющая законъ распредѣленія центробѣжныхъ силъ при средней угловой скорости ω_n диска или регулятора, а qn' — прямая, изображающая законъ силы сжатія пружины (фиг. 14).

Пусть для регулированія машины достаточно перемѣщенія шара регулятора изъ точки p_2 , гдѣ онъ будетъ при наименьшей угловой скорости ω_2 вала машины, въ точку p_1 , гдѣ онъ будетъ при наибольшей скорости ω_1 вала машины—(на дѣлѣ размахъ шара внутри предписанныхъ предѣловъ часто ограничивается особыми резиновыми буферками).

Тогда, называя силы сжатія пружины для положеній шара въ p_1 , O и p_2 , черезъ S_1 , S_n и S_2 , а разстоянія Cr_1 , CO и Cr_2 черезъ R_1 , R_n и R_2 , имѣемъ условія равновѣсія шара въ трехъ этихъ положеніяхъ:

$$m\omega_1^2 R_1 = S_1 = \beta (R_1 - r) \quad (7)$$

$$m\omega_n^2 R_n = S_n = \beta (R_n - r) \quad (8)$$

$$m\omega_2^2 R_2 = S_2 = \beta (R_2 - r) \quad (9)$$

ибо сила сжатія пружины $\div$ ея укороченію отъ нормальной длины $qN = L_0$.

Опредѣлимъ степень неравномѣрности регулятора δ въ предѣлахъ размаха $p_1 p_2$. По опредѣленію:

$$\delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n}$$

Изъ (7) и (9) имѣемъ:

$$\omega_1^2 - \omega_2^2 = (\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 + \omega_2) = \frac{\beta r}{m} \times \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \dots \quad (10)$$

откуда, замѣняя $\omega_1 + \omega_2$ черезъ $2\omega_n$ и дѣля обѣ части на $2\omega_n^2$, имѣемъ:

$$\delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n} = \frac{\beta r}{m} \times \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2 2\omega_n^2} \dots \quad (11)$$

а замѣняя ω_n^2 его выраженіемъ изъ (8), находимъ послѣ сокращеній:

$$\delta = \frac{R_1 - R_2}{2R_1 R_2} \times \frac{R_n r}{R_n - r} = \frac{R_1 - R_2}{2R_1 R_2} \times \frac{R_n}{\frac{R_n}{r} - 1}. \quad (12)$$

Въ ур. (12) входятъ *исключительно* однѣ длины: R_1 , R_2 , R_n и r . Поэтому изъ него вытекаетъ слѣдующая весьма важная *теорема*, высказанная впервые Pröhl'емъ, однимъ изъ творцовъ пружинныхъ регуляторовъ въ ихъ теперешнемъ совершенномъ видѣ:

Теорема Прёлля. *Степень неравномѣрности пружиннаго регулятора, въ нашемъ спеціальномъ изслѣдованіи плоскаго, зависитъ только отъ геометрическихъ величинъ.*

Такъ какъ степень изохронизма i выражается черезъ δ , именно:

$$i = \frac{2 + \delta}{2 - \delta}, \dots \quad (13)$$

то она тоже зависитъ лишь отъ геометрическихъ величинъ.

Итакъ, близость регулятора къ состоянію астатичности зависитъ, при данныхъ R_1 , R_2 и R_n лишь отъ r . Чтобы еще яснѣе выразить эту зависимость, введемъ въ вычисленіе длину пружины.

Выраженіе δ получится довольно сложное, и потому удобнѣе разсматривать степень изохронизма i , которая, по опредѣленію выразится такъ:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \dots \quad (14)$$

Изъ (7) и (9) находимъ

$$i^2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{R_1 - r}{R_2 - r} \times \frac{R_2}{R_1} \dots \quad (15).$$

Если свободную длину пружины назовемъ черезъ L_0 , а длины ея при положеніяхъ шара въ p_1 , O и p_2 черезъ L_1 , L_n и L_2 , то имѣемъ изъ фиг. 14.

$$R_1 + L_1 = L_0 + r \dots \quad (16).$$

$$R_n + L_n = L_0 + r \dots \quad (17).$$

$$R_2 + L_2 = L_0 + r \dots \quad (18).$$

и отсюда:

$$R_1 - r = L_0 - L_1 = \lambda_1 \dots \quad (19).$$

$$R_2 - r = L_0 - L_2 = \lambda_2 \dots \quad (20).$$

$$R_2 = L_0 - L_2 + r = \lambda_2 + r \dots \quad (21).$$

$$R_1 = L_0 - L_1 + r = \lambda_1 + r \dots \quad (22),$$

если черезъ λ_1 и λ_2 назовемъ укороченія пружины.

Подставляя въ ур. (14) находимъ:

$$i^2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \times \frac{R_2}{R_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \times \frac{\lambda_2 + r}{\lambda_1 + r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \times \frac{1 + \frac{\lambda_2}{r}}{1 + \frac{\lambda_1}{r}} \quad (23).$$

Отсюда видно, что i зависитъ *только* отъ геометрическихъ величинъ и даже лишь отъ ихъ **отношеній**; при данныхъ λ_1 и λ_2 , величина i зависитъ отъ отношеній $\frac{\lambda_2}{r}$ и $\frac{\lambda_1}{r}$; чѣмъ r больше, тѣмъ дробь

$$\frac{1 + \frac{\lambda_2}{r}}{1 + \frac{\lambda_1}{r}}$$

ближе къ единицѣ, а величина i^2 ближе къ $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, т. е. дальше отъ единицы. Величины же силы сжатія пружины, угловой скорости, длины пружины и прочее совсѣмъ не вліяютъ на степень изохронизма и потому всѣ регуляторы, сильные или слабые, имѣющіе общія величины отношеній:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \quad \frac{\lambda_1}{r}; \quad \frac{\lambda_2}{r}$$

будутъ имѣть одну и ту же степень изохронизма.

Уравненіе (15) или, все равно, (23) служить исходной точкой

при вычисленіи необходимаго *начальнаго сжатія* пружины въ внутреннемъ положеніи, т. е. величины λ_2 или, вообще, для вычисленія r при данныхъ R_1 и R_2 .

Именно, если задана степень неравномѣрности δ , то по ней вычисляемъ i по уравненію (13) и затѣмъ изъ (15) находимъ r , если даны R_1 и R_2 , а по найденному r и величины λ_1 и λ_2 изъ ур. (19) и (20). Абсолютныя величины силъ сжатія пружины сюда совсѣмъ не входятъ.

Для примѣра положимъ, что даны:

$$\delta = 0,04.$$

$$R_1 = 400^m/m.$$

$$R_2 = 360^m/m.$$

Имѣемъ:

$$i = \frac{2 + \delta}{2 - \delta} = \frac{2,04}{1,96} = 1,04; i^2 = 1,0816.$$

Пишемъ уравненіе (15):

$$1,0816 = \frac{400 - r}{360 - r} \times \frac{360}{400},$$

откуда

$$r = 161, 7^m/m$$

и

$$\lambda_1 = R_1 - r = 238,3^m/m$$

$$\lambda_2 = R_2 - r = 198,3^m/m.$$

Если, при заданной δ , даны еще не величины R_1 и R_2 , а силы сжатія пружины S_1 и S_2 при крайнихъ положеніяхъ шара, т. е. при укороченіяхъ пружины λ_1 и λ_2 и дано сокращеніе $p_1 p_2$ пружины при полномъ размахѣ шара, равное $\lambda_1 - \lambda_2$, то сперва изъ уравненій:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

и

$$\lambda_1 - \lambda_2 = p_1 p_2$$

находимъ λ_1 и λ_2 , и затѣмъ изъ (23) находимъ величину r .

Слѣдовательно, какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ могутъ быть найдены сокращенія λ_1 и λ_2 пружины. Длина ея и размѣры опредѣляются для каждаго регулятора лишь тогда, когда зададутъ числа оборотовъ его.

Заканчивая этимъ разсмотрѣніе регулятора въ простѣйшей

формъ матеріальной точки („шара“), двигающейся по радіусу, напоминая еще разъ, что на основаніи 1-й задачи полученные здѣсь результаты относятся къ матеріальному тѣлу произвольной формы, помѣщенному такъ, что центръ тяжести его двигается по радіусу, ибо на основаніи задачи 1-й, сила, развиваемая такимъ тѣломъ вдоль радіуса CN , равна центробѣжной силѣ центра тяжести, въ которомъ сосредоточена вся масса тѣла, что равносильно матеріальной точкѣ, „шару“, нашего разсмотрѣнія, причемъ, вмѣсто разстоянія ея отъ центра C , надо брать разстояніе центра тяжести тѣла.

Въ практикѣ регуляторъ съ тѣломъ, направляемымъ по радіусу встрѣчается рѣдко (примѣръ такого типа представляетъ регуляторъ паровой машины *Lecouteux & Garnier*, только въ немъ пружина не спиральная, а рессорная; если считать, что прогибъ рессоры $\div$ ея нагрузкѣ, то изложенная выше теорія можетъ быть приложена къ нему съ соотвѣтствующими измѣненіями).

Обыкновенно матеріальную точку или „шаръ“ M заставляютъ описывать дугу круга вокругъ центра O , укрѣпляя ее къ стержню MO , а пружина однимъ концомъ прикрѣпляется къ какой нибудь точкѣ P этого стержня, другой же ея конецъ загибается въ глазокъ и надѣвается на ось A , укрѣпленную, конечно, тоже къ диску. (Фиг. 14 bis). Иногда вмѣсто спиральной употребляютъ плоскую рессорную пружину, соединяя ея конецъ съ точкой P ручки шара (фиг. 15).

Изслѣдуемъ теперь, какъ вліяютъ въ такомъ регуляторѣ положеніе и начальная деформация пружины на главнѣйшее свойство его—степень изохронизма.

Постараемся сперва опять узнать, какъ получить астатическій регуляторъ.

Пусть C (фиг. 16) — центръ вала машины, вращающагося равномерно съ угловой скоростью ω , O — центръ шарнира, на которомъ вращается ручка съ матеріальной точкой (или „шаромъ“) M , масса которой есть m . Центробѣжная сила точки M будетъ $m\omega^2 x$, гдѣ x — радіусъ вращенія точки M и направлена по радіусу CM .

Если мы одинъ конецъ пружины укрѣпимъ шарнирно въ M , а другой такъ же въ C , такъ что ось ея совпадетъ съ радіусомъ CM и назовемъ натяженіе пружины черезъ S , то для изохронизма, т. е. для равновѣсія точки M во всякомъ положеніи при той же угловой скорости ω , необходимо чтобы:

$$m\omega^2 xy = Sy \dots \quad (24)$$

(гдѣ y — перпендикуляръ изъ O на направленіе M).

или

$$m\omega^2 x = S \dots \quad (25)$$

при всякомъ x , т. е. тождественно.

Пусть пружина выбрана такъ, что она пришла бы въ ненапряженное состояніе, если бы конецъ ея M совпалъ бы съ C , т. е. такъ, чтобы удлинненіе пружины было равно x , когда шаръ находится въ M (практически невозможно привести M въ C , но представить себѣ такой выборъ пружины математически возможно). Тогда напряженіе S на основаніи теоріи пружинъ выразится:

$$S = \beta x, \dots \quad (26)$$

гдѣ β — постоянное, зависящее лишь отъ свойствъ пружины, и если подставить это въ выраженіе (25), то получимъ

$$m\omega^2 x = \beta x, \dots \quad (27)$$

откуда и опредѣлится, при условіи астатичности, характеристика пружины β :

$$\beta = m\omega^2 \dots \quad (27 \text{ bis}).$$

Слѣдовательно, если β равна $m\omega^2$, то при всякомъ положеніи шара онъ будетъ въ равновѣсіи при одной и той же угловой скорости ω и получится полный изохронизмъ или астатичность.

Если, оставляя одинъ конецъ пружины въ центрѣ C (фиг. 17), прикрѣпимъ другой къ какой нибудь точкѣ P ручки OM *, то, называя натяженіе пружины черезъ S , а перпендикуляръ изъ O на его направленіе черезъ p , для изохронизма мы должны имѣть тождественно, т. е. при всякомъ x , равенство моментовъ вокругъ точки O , т. е.

$$m\omega^2 xy = Sp \dots \quad (28).$$

Выберемъ пружину такъ, чтобы она пришла бы въ ненапряженное состояніе, еслибы P совпало съ C , т. е. такъ, чтобы удлинненіе ея было равно $PC = z$, при разсматриваемомъ положеніи системы.

Тогда :

$$S = \beta z \dots \quad (29)$$

*) Подъ *ручкой* шара мы здѣсь понимаемъ, какъ сказано раньше, математическую прямую, соединяющую центръ вращенія O съ центромъ тяжести массы M , хотя физическая ручка можетъ быть и кривая.

и для изохронизма необходимо *тождественно* имѣть :

$$m\omega^2 xy = \beta zp$$

или

$$\frac{xy}{zp} = \frac{\beta}{m\omega^2} \dots \dots (30).$$

Такъ какъ m , ω и β не зависятъ отъ положенія шара, то заключаемъ, что равенство (30) будетъ возможно, если $\frac{x y}{z p}$ будетъ постоянно и равно $\frac{\beta}{m\omega^2}$. Но xy есть двойная площадь $\triangle MCO$, а zp двойная площадь $\triangle ROC$. А такъ какъ оба эти $\triangle$ имѣютъ при всѣхъ положеніяхъ ручки общую высоту, равную перпендикуляру изъ C на MO , то площади ихъ относятся, какъ основанія, т.-е.

$$\frac{x y}{z p} = \frac{MO}{PO} = \frac{L}{l} = const \dots \dots (31)$$

Слѣдовательно, равенство (30) удовлетворено при всякомъ x . Подставляя въ (30) изъ (31) отношеніе

$$\frac{x y}{z p} = \frac{L}{l}$$

находимъ:

$$\frac{\beta}{m\omega^2} = \frac{L}{l}$$

и

$$\beta = \frac{m\omega^2 L}{l}, \dots \dots (32)$$

чѣмъ и опредѣляется, при данныхъ m , ω , L и l , величина β , дающая изохронизмъ.

Теперь возьмемъ точку привѣса пружины гдѣ нибудь на прямой CO , положимъ въ E (фиг. 18). Для изохронизма опять должно при всякомъ x существовать равенство:

$$m \omega^2 x y = S p \dots \dots (33)$$

Выберемъ опять пружину такъ, чтобы ея удлинненіе при разсматриваемомъ положеніи шара M было равно $\overline{PE} = z$, такъ что:

$$S = \beta z, \dots \dots (34)$$

тогда

$$m\omega^2 xy = \beta z p \dots \dots (35)$$

или

$$\frac{xy}{z p} = \frac{\beta}{m \omega^2} \dots \quad (36)$$

Но xy есть двойная площадь $\triangle MOC$, а $z p$ есть двойная площадь $\triangle PEO$, а такъ какъ эти треугольники имѣютъ общій уголъ POC , то, по извѣстной теоремѣ Геометріи, площади ихъ относятся какъ произведенія сторонъ, обнимающихъ этотъ уголъ, т. е.

$$\frac{xy}{z p} = \frac{\overline{MO} \times \overline{CO}}{\overline{PO} \times \overline{OE}} = const; \dots \quad (37)$$

слѣдовательно, равенство (36) удовлетворено и находимъ изъ него:

$$\beta = \frac{L a}{d l} m \omega^2 \dots \quad (38)$$

И такъ мы имѣемъ слѣдующую *теорему*. Если одну точку привѣса пружины взять на направленіи „ручки“ шара (между O и M или внѣ—все равно), въ любой точкѣ ея, а другую точку привѣса пружины взять на прямой, соединяющей центръ вала регулятора съ центромъ вращенія ручки шара, но тоже въ любой точкѣ ея, то всегда можно получить полный изохронизмъ, если выбрать пружину такъ, чтобы ея удлинненіе, считаемое изъ ненапряженного состоянія, было пропорціонально разстоянію двухъ взятыхъ точекъ.

Замѣтимъ что въ практикѣ нельзя совмѣстить обѣ точки привѣса пружины, ибо сама пружина матеріальна и имѣетъ извѣстную толщину, поэтому условіе относительно выбора пружины можно для ясности выразить иначе. Если OM' и OM'' два положенія ручки шара, а $\overline{EP}$ и $\overline{EP'}$ соотвѣтствующія длины пружины, S и S' ея натяженія, то пружину нужно выбрать такъ, чтобы

$$\frac{S}{S'} = \frac{\overline{EP}}{\overline{EP'}} \dots \quad (39)$$

Условіе это получается изъ выраженій натяженій пружины въ положеніяхъ EP и EP'

$$S = \beta \cdot \overline{EP};$$

$$S' = \beta \cdot \overline{EP'}.$$

Посмотримъ теперь, нельзя-ли достигнуть изохронизма, взявши точку привѣса пружины къ ручкѣ не на направленіи ручки OM , а гдѣ нибудь внѣ ея; если дѣйствительная матеріальная ручка пря-

мая, то, слѣдовательно, къ ней прикрѣпляемъ отростокъ (фиг. 18 bis) и въ точкѣ Q его привѣсиваемъ на шарниръ пружину. Отмѣримъ отъ линіи CO уголъ

$$\theta = \angle COA = MOQ$$

между ручкой и прямой, соединяющей точку Q привѣса пружины съ O . Очевидно, что уголъ MOC равенъ углу QOA , а потому, если вторую точку S привѣса пружины возьмемъ на линіи OA и выберемъ такую пружину, чтобы ея натяженіе измѣнялось пропорціонально $QS = z$, то моментъ центробѣжной силы будетъ $m \omega^2 x y$, а моментъ натяженія пружины $\beta z p$ и для изохронизма необходимо, чтобы при всякомъ отклоненіи ручки:

$$\frac{x y}{z p} = const.$$

Но $x y$ есть двойная площадь $\triangle MOC$, а $z p$ есть двойная площадь $\triangle OSQ$, а такъ какъ уголъ $MOC = QOS$, то, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, площади двухъ треугольниковъ, имѣющихъ общій уголъ, относятся какъ произведенія сторонъ, обнимающихъ этотъ уголъ, т.-е.

$$\frac{x y}{z p} = \frac{MO \times CO}{QO \times SO} = const, \dots \quad (40)$$

слѣдовательно, получимъ изохронизмъ.

И такъ, выбравъ произвольно точку привѣса пружины къ ручкѣ, мы можемъ найти линію OA , на которой и взять гдѣ угодно вторую точку привѣса пружины. Наоборотъ, взявъ изъ конструктивныхъ соображеній центръ S мы, отмѣривъ $\angle MOQ = COS$, найдемъ линію OQ , на которой и можемъ взять гдѣ угодно вторую точку привѣса пружины.

Центръ Q шарнира можетъ, конечно, лежать и выше линіи OM , тогда линія OA пройдетъ внутри угла MOC . Но обыкновенно длина пружины получается такъ велика, что OA придется брать внѣ $\angle MOC$.

Послѣ всего сказаннаго нетрудно вывести еще одинъ общій законъ относительно замѣны одной пружины другою, дающею на *всемъ размахъ регулятора* то же дѣйствіе въ смыслѣ уравниванія центробѣжной силы шара (эквивалентной первой). Пусть имѣемъ пружину, прикрѣпленную какъ-нибудь къ ручкѣ шара и къ диску. Пусть L_0 длина пружины въ свободномъ состояніи, L — длина ея при какомъ-нибудь положеніи шара,

p —плечо натяженія этой пружины вокругъ центра O и β — характеристика, зависящая отъ размѣровъ и матеріала пружины. Моментъ натяженія этой пружины для какого-нибудь положенія выразится черезъ:

$$M = \beta (L - L_0) \cdot p.$$

Мы желаемъ теперь замѣнить эту пружину другой, ей эквивалентной. Тогда для новой пружины всѣ величины— β , L , L_0 и пр. будутъ иныя, но моментъ долженъ быть тотъ же, т.-е. необходимо существованіе равенства:

$$\beta (L - L_0) p = \beta' (L' - L'_0) p', \dots \quad (41)$$

при всѣхъ значеніяхъ L и L' въ предѣлахъ размаха шара. Изъ (41) имѣемъ

$$\frac{(L - L_0) p}{(L' - L'_0) p'} = \frac{\beta'}{\beta} \dots \quad (42)$$

Это тождество будетъ вѣрно, если новая пружина выбрана и помѣщена такъ, что площади двухъ треугольниковъ, изображающихъ моменты $(L - L_0) p$ и $(L' - L'_0) p'$ всегда остаются въ постоянномъ отношеніи.

Если выберемъ это отношеніе $= C$, то изъ него опредѣлится характеристика новой пружины:

$$\beta' = \beta C \dots \quad (43)$$

Отношеніе C зависитъ только отъ геометрическихъ величинъ. Посмотримъ теперь, возможно-ли, если потребуется, замѣнить данную матеріальную точку M другою ей эквивалентной, помѣщенной въ другомъ мѣстѣ M' „ручки“ MO . Пусть масса новой точки m' ,—плечо центробѣжной силы ея y' , а радіусъ вращенія x' (фиг. 19). Тогда для эквивалентности моменты обѣихъ точекъ должны быть равны при всѣхъ отклоненіяхъ, т.-е. необходимо тождество:

$$m \omega^2 x y = m' \omega^2 x' y' \dots \quad (44)$$

откуда

$$\frac{x y}{x' y'} = \frac{m'}{m}; \dots \quad (45)$$

этому условію всегда можно удовлетворить, ибо площади $x y$ и $x' y'$ относятся, очевидно, какъ $\frac{MO}{M'O}$, слѣдовательно нужно только массу m' новаго шара взять такъ, чтобы:

$$m' = m \times \frac{MO}{M'O}.$$

и условіе (45) обратится въ тождество.

Принципъ эквивалентныхъ пружинъ и массъ весьма полезенъ при проектированіи новыхъ регуляторовъ, ибо позволяетъ, въ случаѣ если принятые при первомъ расчетѣ размѣры поведутъ къ неудобному помѣщенію грузовъ или пружинъ, замѣнить эти грузы и пружины другими, большими или меньшими, совершенно не трогая сдѣланныхъ расчетовъ.

Мы не можемъ употребить изохроническаго или астатическаго регулятора для регулированія машины, но тѣмъ не менѣе предъидущія соображенія относительно полученія астатическаго регулятора важны для насъ въ томъ отношеніи, что, зная, какъ устроить астатическій регуляторъ, мы имѣемъ руководящую нить для того, чтобы изслѣдовать, какъ устроить статическій регуляторъ *близкій* къ астатическому; для этого необходимо *слегка* измѣнить условія, причиняющія полную астатичность и тогда мы получимъ приближенную астатичность, т.-е. регуляторъ со степенью неравномѣрности близкой къ нулю, что и желательно.

Пусть (фиг. 20) опять C —центръ вала регулятора, O —центръ вращенія, „ручки“ шара и M —„шаръ“. Возьмемъ длину ручки шара MO равной разстоянію центровъ O и C , такъ что дуга, описываемая шаромъ вокругъ O *проходитъ черезъ* C . Проведемъ произвольную хорду MM' , возьмемъ на продолженіи ея точку A Укрѣпимъ шарнирно одинъ конецъ пружины въ точкѣ A диска, и выберемъ пружину такъ, чтобы длина ея въ ненапряженномъ состояніи равнялась AA_0 , причемъ точка A_0 есть пересѣченіе прямой AM съ продолженіемъ радіуса CO , соединяющаго центры вала C и шарнира O . Не трудно доказать, что при такомъ устройствѣ ручка съ шаромъ будетъ находиться въ положеніяхъ равновѣсія OM и OM' при одной и той же угловой скорости ω вала регулятора. Пусть $MC = x$, $M'C = x'$, $AA_0 = L_0$, $AM = L$ и $AM' = L'$. Перпендикуляры изъ O на x и x' назовемъ черезъ y и y' , а перпендикуляръ изъ O на MM' — p . Пусть для равновѣсія шара угловые скорости въ положеніяхъ OM и OM' должны быть ω и ω' , а натяженіе пружины пусть будетъ при этомъ S и S' . Тогда для положеній равновѣсія OM и OM' имѣемъ:

$$\left. \begin{aligned} m \omega^2 x y &= S p \\ m \omega'^2 x' y' &= S' p \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (46)$$

но на основаніи пропорціональности натяженія пружины ея удлинению имѣемъ

$$\left. \begin{aligned} S &= \beta (L - L_0) \\ S &= \beta (L' - L_0) \end{aligned} \right\} \dots \quad (47)$$

и

$$\left. \begin{aligned} m \omega^2 x y &= \beta (L - L_0) p \\ m \omega'^2 x' y' &= \beta (L' - L_0) p \end{aligned} \right\} \dots \quad (48)$$

откуда

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2} = \frac{(L - L_0) p}{(L' - L_0) p} \cdot \frac{x' y'}{x y} \dots \quad (49)$$

Но $(L - L_0) p$ есть двойная площадь $\triangle A_0 MO$, а $x y$ есть двойная площадь $\triangle COM$, и такъ какъ эти $\triangle$ имѣютъ общій уголъ при O , то площади ихъ относятся какъ произведенія сторонъ, обнимающихъ этотъ уголъ, т.-е.

$$\frac{(L - L_0) p}{x y} = \frac{\overline{MO} \times \overline{A_0 O}}{\overline{MO} \times \overline{CO}} = \frac{\overline{A_0 O}}{\overline{CO}}, \dots \quad (50)$$

точно также:

$$\frac{(L' - L_0) p}{x' y'} = \frac{\overline{M' O} \times \overline{A_0 O}}{\overline{M' O} \times \overline{AO}} = \frac{\overline{A_0 O}}{\overline{CO}} \dots \quad (51)$$

Отсюда слѣдуетъ, что:

$$\frac{(L - L_0) p}{x y} \cdot \frac{x' y'}{(L' - L_0) p} = 1 \dots \quad (52)$$

и слѣдовательно:

$$\omega = \omega' \dots \quad (53)$$

что и требовалось доказать.

Посмотримъ, какъ измѣняется угловая скорость, необходимая для поддержанія шара въ равновѣсїи, при положеніяхъ ручки, промежуточныхъ между OM и OM' .

Не трудно доказать, что между OM и OM' есть еще одно и *только одно* положеніе, въ которомъ шаръ будетъ въ равновѣсїи при *той же* скорости ω , какъ и въ крайнихъ положеніяхъ OM и OM' . Аналитическое доказательство этого предложенія довольно сложно и, вѣроятно поэтому, самое предложеніе дано авторомъ его *Mansfield*, безъ доказательства; принятой мною методъ представленія моментовъ площадями сдѣлалъ для меня доказательство весьма простымъ, нагляднымъ и изящнымъ.

Возьмемъ какое нибудь промежуточное положеніе шара, (фиг 21) въ точкѣ M_n , въ разстояніи x_n отъ C . Опишемъ изъ точки A ,

неподвижной точки укрѣпленія пружины, дугу радіусомъ $\overline{AA_0}$ равнымъ L_0 , ненапряженной длинѣ пружины. Пусть шаръ находится въ точкѣ M_n въ равновѣсіи при угловой скорости ω_n . Тогда имѣемъ:

$$m \omega_n^2 \cdot x_n y_n = S_n p_n = \beta (L_n - L_0) p_n, \dots \quad (54)$$

гдѣ y_n —перпендикуляръ изъ O на x_n , $L_n - L_0$ есть очевидно длина $\overline{A_n M_n}$, а p_n — перпендикуляръ изъ O на направленіе $\overline{A M_n}$. По прежнему $x_n \cdot y_n$ есть двойная $\triangle M_n OC$, а $(L_n - L_0) p_n$ есть двойная площадь $\triangle M_n OA_n$; изъ (54) имѣемъ:

$$\omega_n^2 = \frac{\beta}{m} \times \frac{\text{плоч. } \triangle M_n OA_n}{\text{плоч. } \triangle M_n OC} \dots \quad (55)$$

Треугольники $M_n OC$ и $M_n OA_n$ имѣютъ общее основаніе $\overline{M_n O}$ и потому площади ихъ относятся какъ высоты CV и $A_n W$, такъ что:

$$\omega_n^2 = \frac{\beta}{m} \cdot \frac{A_n W}{CV} \dots \quad (56)$$

Уравненіе (56) даетъ законъ измѣненія угловой скорости въ зависимости отъ перемѣщенія шара по дугѣ $\overline{M M}$, и имъ можно съ удобствомъ пользоваться для вычисленія угловой скорости при данномъ положеніи шара, если имѣется чертежъ, съ котораго можно брать длины $A_n W$ и CV .

Мы имѣли раньше уравненіе (48):

$$\omega^2 = \frac{Sp}{mxy} = \frac{\beta(L - L_0)}{mxy} = \frac{\beta}{m} \cdot \frac{\overline{A_0 O}}{\overline{CO}} \dots \quad (57)$$

Возьмемъ теперь отношеніе $\frac{\omega_n^2}{\omega^2}$; находимъ:

$$\frac{\omega_n^2}{\omega^2} = \frac{A_n W}{CV} \cdot \frac{\overline{CO}}{\overline{A_0 O}} \dots \quad (58)$$

Но изъ подобія $\triangle CVO$ и $\triangle A_0 QO$ слѣдуетъ:

$$\frac{\overline{CO}}{\overline{A_0 O}} = \frac{\overline{CV}}{\overline{A_0 Q}} \dots \quad (59)$$

и подставляя это въ (58), находимъ:

$$\frac{\omega_n^2}{\omega^2} = \frac{A_n W}{CV} \cdot \frac{\overline{CV}}{\overline{A_0 Q}} = \frac{A_n W}{\overline{A_0 Q}} \dots \quad (60)$$

Изъ этого уравненія видно, что равенство ω_n и ω имѣеть мѣсто когда высоты A_0Q и A_nW равны. Такое равенство высотъ имѣеть мѣсто для положеній шара въ M' и M , гдѣ обѣ высоты совпадаютъ и мы уже видѣли, что дѣйствительно здѣсь ω одно и то же. Посмотримъ, когда и сколько разъ A_nW и A_0Q могутъ еще быть равны. Проведемъ хорду A_0A_n и продолжимъ ее до пересѣченія съ продолженіемъ OM_n въ точкѣ T . Прослѣдимъ за движеніемъ точки T , при вращеніи радіуса изъ положенія OC въ OM .

Когда шаръ въ C , то точка T , очевидно, совпадетъ съ A_0 и уголъ OTA_0 здѣсь равенъ $(90^\circ - MA_0O)$, такъ какъ линія A_0T здѣсь будетъ касательная къ дугѣ A_0U ; при вращеніи радіуса OC вверхъ точка T подвигается влѣво и уголъ OTA_0 , очевидно, уменьшается. Проведемъ изъ A касательную къ дугѣ MM и пусть M_k точка касанія, а A_k соотвѣтствующая точка на дугѣ A_0U . Пока ручка OM движется отъ C до M_k , хорда A_0A_n приближается къ положенію A_0A_k . При этомъ нужно различить 2 случая въ зависимости отъ относительныхъ размѣровъ регулятора.

I) Раньше прихода шара въ M_k , радіусъ OM_n и хорда A_0A_n уже сдѣлаются параллельными, ибо уголъ OTA_0 обратится въ нуль. Слѣдовательно, точка T уйдетъ въ безконечность влѣво, и такъ какъ безконечно удаленныхъ точекъ у прямой имѣется лишь одна, то при слѣдующемъ безконечно маломъ поворотѣ ручки точка T появится на хордѣ A_0A_n *справа* и начнетъ опять приближаться къ точкѣ A_0 , которой и достигнетъ, если радіусъ, перейдя за M , станетъ по продолженію OA_0 .

II) Если до перехода точки черезъ M_k прямая OM_n и A_0A_n не стали параллельными, то это *непремѣнно* произойдетъ за точкой M_k и *раньше* перехода черезъ точку M . Это слѣдуетъ изъ того, что MO пересѣкаетъ (по продолженіи) касательную къ A_0U , проведенную въ точкѣ A_0 справа, слѣдовательно, точка T должна была перейти черезъ безконечность и притомъ, очевидно, одинъ только разъ. Изъ сказаннаго слѣдуетъ, что *всегда* между точками M' и M есть такое положеніе M_3 ручки шара, при которомъ OM_n и A_0A_n сдѣлаются параллельными, а въ этотъ моментъ высоты A_0Q и A_nW дѣлаются равными между собой, представляя разстояніе упомянутыхъ параллелей. Слѣдовательно, для этого положенія M_3 шара изъ (60) слѣдуетъ что:

$$\omega_3 = \omega,$$

т.-е. между M и M' есть еще одна (и только одна) точка, гдѣ

угловая скорость ω_3 , необходимая для равновѣсія шара, равна скорости ω въ крайнихъ точкахъ.

Съ помощью уравненія (60) нетрудно уже прослѣдить весь ходъ измѣненія угловой скорости при движеніи шара.

Начиная отъ точки M' и до точки M_3 , гдѣ ω_n опять равно ω , высота $A_n W$ все время меньше $A_0 Q$, слѣдовательно ω_n меньше ω ; поэтому, начиная отъ точки M' , угловая скорость убываетъ до нѣкотораго minimum'a, а потомъ начинаетъ возрастать, пока въ M_3 не сдѣлается опять равной ω . За точкой M_3 высота $A_n W$ будетъ больше $A_0 Q$ и ω_n больше ω ; слѣдовательно, начиная отъ M_3 , угловая скорость будетъ возрастать до нѣкотораго maximum'a, а потомъ будетъ убывать до ω въ точкѣ M . Для наглядности изобразимъ этотъ ходъ измѣненій графически. По оси абсциссъ откладываемъ углы отклоненія ручки шара, начиная отъ положенія OM' , а по оси ординатъ соотвѣтственно величины угловой скорости ω . Получимъ (фиг. 22) волнообразную кривую I, II, III, IV, V. Пусть 2 II minimum, а 4 IV maximum угловой скорости, соотвѣтствующіе положеніямъ ручки OM_2 и OM_4 (фиг. 23). Очевидно, что регуляторъ устойчивъ въ предѣлахъ II—IV и не устойчивъ на частяхъ I—II и IV—V. Поэтому, при осуществленіи регулятора, необходимо ограничиться размахомъ шара его лишь внутри угла, соотвѣтствующаго скоростямъ 2 II и 4 IV, иначе регуляторъ окажется негоднымъ *). Расположеніе регулятора, разсмотрѣнное нами сейчасъ, соотвѣтствуетъ тому, которое преимущественно употребляется и въ практикѣ. Только въ виду неудобства прикрѣпленія пружины къ центру шара, ее обыкновенно прикрѣпляютъ къ какой-нибудь точкѣ ручки или къ отростку. Какъ замѣнить пружину, укрѣпленную къ центру шара, другой, ей эквивалентной, мы уже видѣли выше. Для этого, выбравъ точку D (фиг. 24) привѣса пружины, нужно описать дугу радіусомъ OD и провести хорду DD' такъ, чтобы $\triangle ODD'$ былъ

*) Неясность понятій относительно зависимости устойчивости регулятора отъ закона измѣненія моментовъ натяженія пружины и центробѣжной силы центра тяжести маятника, или, по нашему, центра „шара“, встрѣчается даже у специалистовъ-конструкторовъ. Такъ, С. Budil, давшій въ журналѣ „Der Practische Maschinen-Constructeur“ описаніе и подробную теорію построеннаго имъ плоскаго регулятора (о немъ будетъ сказано далѣе) говорить, что для устойчивости регулятора плечи натяженія пружины и центробѣжной силы центра тяжести маятника должны сперва возрастать, а потомъ убывать; между тѣмъ это вовсе не существенно и имѣетъ мѣсто лишь въ томъ частномъ случаѣ, когда разстояніе MO центра шара отъ оси O меньше длины CO , что и имѣетъ мѣсто у Budil'a. Вообще же это условіе не имѣетъ мѣста и нужно слѣдить за измѣненіемъ моментовъ, а не однихъ плечъ.

подобенъ $\triangle MOM'$, и, соотвѣтственно радіусу OD , найти новую характеристику пружины.

Чтобы получить небольшую степень неравномѣрности, уголъ размаха ручки регулятора не долженъ быть великъ, ибо величина степени неравномѣрности тѣмъ больше, чѣмъ больше стрѣлка дуги MM' (фиг. 20 и 21) сравнительно съ радіусомъ OM , т.-е. чѣмъ больше весь уголъ MOM' , а слѣдовательно и уголъ M_2OM_4 устойчиваго размаха шара. Обыкновенно уголъ размаха берутъ не болѣе 40° — 50° .

Напомнимъ, что результаты этого изслѣдованія приближеннаго изохронизма получены нами при нѣкоторыхъ специальныхъ предположеніяхъ относительно размѣщенія частей и выбора пружины, перечисленныхъ вначалѣ доказательствъ. При конструированіи регулятора необходимо помнить объ этомъ, когда выбираютъ начальныя данныя. Конечно, все изложенное здѣсь относится лишь къ тому случаю, когда мы, въ первомъ приближеніи, не принимаемъ въ расчетъ вліянія центробѣжной силы пружины и деталей, соединяющихъ ее съ шарниромъ ручки шара. При точномъ, окончательно расчетѣ вліянія эти вводятся и измѣняютъ нѣсколько полученные нами результаты, какъ увидимъ далѣе, но для уясненія себѣ *сущности дѣла* и *предварительнаго* выбора размѣровъ и расположенія частей регулятора разсмотрѣнныя здѣсь соображенія весьма важны и полезны, ибо онѣ выясняютъ, *отъ чего* зависитъ степень изохронизма регулятора и *какъ* вліяетъ на нее расположеніе пружины. Эти свѣдѣнія даютъ при проэктированіи регулятора руководящую нить при размѣщеніи его частей—пружины и маятника. Несмотря на свою простоту выясненіе условий астатичности плоскаго пружиннаго регулятора недавно еще считалось весьма труднымъ.

Теперь выведемъ главнѣйшія общія уравненія для плоскихъ регуляторовъ. Возьмемъ плоскій регуляторъ (фиг. 25) въ общемъ видѣ; пружина хватается за ручку гдѣ-нибудь въ точкѣ P , а тяга, ведущая къ переставляемому эксцентрику и т. п. органу — въ точкѣ Q .

Обыкновенно дѣлаютъ два „шара“ или маятника на двухъ ручкахъ и располагаютъ ихъ симметрично по обѣ стороны вала, связывая иногда кинематически въ одну систему, чтобы заставить дѣлать всегда симметричныя размахи. Вычисленія ведутъ поэтому лишь для одного маятника, дѣля сопротивленіе перестановки парораспределительнаго органа пополамъ между обоими маятниками. Въ дальнѣйшемъ мы такъ и будемъ поступать.

Если оба шара регулятора находятся въ состояніи равновѣсія

при угловой скорости ω , то центробѣжная сила уравнивается натяженіемъ S пружины и условіе равновѣсія выразится такъ

$$m \omega^2 x y - Sp = 0 \dots \quad (61)$$

Строго говоря, на маятникъ MO дѣйствуетъ еще одна сила. Дѣло въ томъ, что какова бы ни была конструкция плоскаго регулятора, всегда эксцентрикъ удерживается въ положеніи, соотвѣтствующемъ работѣ машины въ разсматриваемое время, *вися* на рычагахъ QR , соединенныхъ съ ручками шаровъ, а такъ какъ при передвиженіи золотника приходится преодолевать извѣстное сопротивленіе, то это сопротивленіе стремится сдвинуть эксцентрикъ и сдвигаетъ его нѣсколько, такъ что для удержанія его въ равновѣсіи пружины должны развивать еще нѣкоторое добавочное натяженіе, мѣняющееся въ теченіи оборота вала въ зависимости отъ положенія золотника и конфигураціи рычаговъ, соединяющихъ эксцентрикъ съ точкой Q , такъ что, если рычаги размѣщены на обоихъ маятникахъ симметрично, то на каждый маятникъ въ точкѣ Q дѣйствуетъ на плечѣ f нѣкоторая сила R , зависящая отъ сказаннаго противодѣйствія и равная его половинѣ, такъ что условіе равновѣсія будетъ

$$m \omega^2 x y - Sp \pm Rf = 0 \dots \quad (62)$$

гдѣ знакъ $+$ или $-$ зависитъ отъ того, направлена-ли сила R отъ центра C къ окружности или наоборотъ. Такъ какъ за время одного оборота машины мѣняется сила R , то для равновѣсія должна мѣняться и сила S пружины, что возможно лишь при измѣненіи ея длины. Слѣдовательно, сила R стремится вызвать періодическія легкія колебанія ручки и пружины, имѣющія періодомъ время одного оборота машины. Но, благодаря присутствію вредныхъ сопротивленій въ шарнирахъ, сила R можетъ и не вызывать движенія ручки, если ея моментъ вокругъ оси маятника меньше момента M_c вредныхъ сопротивленій въ шарнирахъ самого маятника. Въ виду этого, а также и того, что стараются по возможности уменьшать эту силу, мы ее не будемъ вводить въ разсмотрѣніе. Замѣтимъ лишь, что въ зависимости отъ своего направленія сила R увеличиваетъ или уменьшаетъ чувствительность регулятора. Силу R не надо смѣшивать съ сопротивленіемъ F , появляющимся при перестановкѣ эксцентрика при измѣненіи отсѣчки. Въ этотъ періодъ перестановки силы R и F , строго говоря, складываются. Мы для простоты не будемъ вводить силу R въ расчетъ.

Выразимъ теперь степень нечувствительности регулятора. Пусть F —сила отъ сопротивленій эксцентрика перемѣщенію, дѣйствующая по шатуну QR , а M_v —моментъ всѣхъ вредныхъ сопротивленій при передвиженіи маятника MO , т.-е. треній въ шарнирахъ въ Q , P , O и E . Тогда, если ω' и ω'' тѣ угловыя скорости, при которыхъ регуляторъ только что начинаетъ двигаться въ одну или другую сторону, то мы имѣемъ въ послѣдній моментъ передъ началомъ движенія

$$m \omega'^2 x y - Sp - Ff - M_v = 0 \dots \dots (63)$$

$$m \omega''^2 x y - Sp + Ff + M_v = 0 \dots \dots (64)$$

Обыкновенно для простоты всѣ сопротивленія приводятъ къ точкѣ P и къ оси пружины подобно тому, какъ въ обыкновенномъ регуляторѣ къ муфтѣ, такъ что считаютъ все сопротивленіе дѣйствующимъ въ точкѣ P по направленію оси пружины. Это приведенное сопротивленіе W опредѣлится изъ уравненія:

$$Wp = Ff + M_v \text{ или } W = \frac{Ff + M_v}{p} \dots \dots (65)$$

такъ что уравненія (63) и 64) напишутся такъ:

$$m \omega'^2 x y - (S + W)p = 0 \dots \dots (66)$$

$$m \omega''^2 x y - (S - W)p = 0 \dots \dots (67)$$

Вычитая находимъ:

$$m(\omega'^2 - \omega''^2)xy = 2Wp$$

или

$$m(\omega'^2 - \omega''^2)xy = \frac{2Wp}{\omega' + \omega''} \dots \dots (68)$$

или, полагая приблизительно:

$$\frac{\omega' + \omega''}{2} = \omega \dots \dots (69)$$

имѣемъ:

$$m(\omega' - \omega'')xy = \frac{Wp}{\omega} \dots \dots (70)$$

и

$$\frac{\omega' - \omega''}{\omega} = \epsilon = \frac{Wp}{m \omega^2 xy} = \frac{Wp}{Sp} = \frac{W}{S} \dots \dots (71)$$

или

$$W = S\epsilon \dots \dots (71 \text{ bis})$$

Эта формула даетъ весьма простое соотношеніе: *степень нечув-*

ствительности равна отношенію силы регулятора къ натяженію пружины.

Изъ ур. (71) получаемъ еще другое, замѣтивъ что $\frac{W}{\epsilon}$ есть то, что мы назвали *энергіей*:

$$\frac{W}{\epsilon} = E = S \dots \quad (72)$$

Этотъ замѣчательный результатъ выражаетъ теорему: *энергія (приведенная къ точкѣ привѣса пружины) регулятора равна натяженію пружины (теорема Prölla *)*.

Эта теорема объясняетъ намъ теперь, почему пружинные регуляторы годны и способны преодолевать большія сопротивленія. Такъ какъ въ обыкновенномъ регуляторѣ съ муфтой (наприм. Уатта-Портера) энергія пропорціональна *вѣсу* муфты и шаровъ, то для полученія значительной энергіи потребовались бы шары и муфты немаловажнаго вѣса; въ пружинномъ же регуляторѣ энергія равна натяженію пружины. Достичь же большаго натяженія пружины всегда возможно и съ сравнительно легкими шарами, если только дать регулятору значительное число оборотовъ, ибо тогда центробѣжная сила можетъ быть велика, а слѣдовательно и S значительно. Поэтому-то именно только въ быстроходныхъ машинахъ и могли быть съ удобствомъ устроены сильные регуляторы въ формѣ плоскихъ пружинныхъ регуляторовъ, ибо при данной степени нечувствительности ϵ сила W регулятора пропорціональна натяженію пружины S .

Вообще величины ϵ , W и S суть функціи положенія маятника, на примѣръ функціи x . Обыкновенно, въ виду малаго размаха маятника, величина W почти не измѣняется, такъ что измѣняется лишь ϵ въ зависимости отъ S . Чтобы величина S не измѣнялась слишкомъ значительно при разныхъ x , дѣлаютъ пружину возможно длиннѣе, а размахъ маятника небольшой, что упоминалось и раньше.

Нетрудно по размѣрамъ регулятора вычислить и степень неравномѣрности его.

Если $x_1, y_1, S_1, p_1, \omega_1$ и x_2, y_2, S_2, p_2 и ω_2 суть значенія этихъ величинъ въ двухъ крайнихъ положеніяхъ маятника, вышнемъ и внутреннемъ, для ненагруженного регулятора, то при равновѣсіи:

*) Теорема имѣетъ мѣсто не только для плоскаго, но и для всякаго пружиннаго регулятора.

$$m\omega_1^2 x_1 y_1 = S_1 p_1 \dots \quad (73)$$

$$m\omega_2^2 x_2 y_2 = S_2 p_2 \dots \quad (74)$$

откуда

$$\omega_1^2 - \omega_2^2 = \frac{S_1 p_1}{x_1 y_1} - \frac{S_2 p_2}{x_2 y_2} \dots \quad (75)$$

или

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{\frac{S_1 p_1}{x_1 y_1} - \frac{S_2 p_2}{x_2 y_2}}{\omega_1 + \omega_2} \dots \quad (76)$$

а полагая:

$$\omega_1 + \omega_2 = 2 \omega_n \dots \quad (77)$$

гдѣ ω_n средняя скорость:

$$\delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_n} = \frac{\frac{S_1 p_1}{x_1 y_1} - \frac{S_2 p_2}{x_2 y_2}}{2\omega_n} \dots \quad (77)$$

Часто за среднюю скорость ω_n въ этой формулѣ берутъ скорость при углѣ отклоненія шара, равномъ среднему арифметическому крайнихъ угловъ отклоненія, соответствующихъ величинахъ x_1 и x_2 . Но такая замѣна не вполне вѣрна, хотя, если полный уголъ размаха не великъ, ошибка получится незначительная.

Замѣтимъ, что если вмѣсто x_1, y_1, x_2, y_2, p_1 и p_2 ввести постоянные размѣры — разстояніе оси вращенія маятника отъ центра вала регулятора, длину ручки, положеніе концовъ пружины и проч. и переменные углы отклоненія ручки, то получается сложное и неудобное выраженіе для δ , которое, все равно, не позволитъ съ удобствомъ судить о томъ, какъ выбрать напередъ всѣ постоянныя величины, чтобы сразу получить данное δ . Поэтому лучше при конструированіи новаго регулятора (при предварительномъ расчетѣ), задавшись постоянными, вычертить два крайнихъ положенія ручки и, смѣривъ *на чертежѣ* длины $x_1, y_1, x_2, y_2, p_1, p_2$, вычислить δ . Нѣсколькими пробами легко подогнать размѣры такъ, чтобы получить желаемую величину δ . Положеніе точки Q на ручкѣ опредѣляется при выбранномъ уже размахѣ ручки по известному изъ заданной наибольшей и наименьшей отсѣчки пути эксцентрика, именно, при переходѣ точки Q вмѣстѣ съ ручкой изъ внутренняго крайняго положенія во внѣшнее, эксцентрикъ долженъ пройти весь путь, необходимый для того чтобы изъ наибольшей сдѣлать отсѣчку наименьшей.

Впослѣдствіи, когда будутъ приняты въ расчетъ всѣ вліянія, придется нѣкоторые размѣры немного измѣнить, чтобы сохранить δ равнымъ заданной величинѣ.

Удобнѣ всего начинать расчетъ съ пружины, задаваясь крайними величинами ея натяженій S_1 и S_2 , какъ покажемъ на примѣрѣ въ главѣ III.

§. Разсмотримъ теперь вліяніе на регуляторъ нѣкоторыхъ второстепенныхъ факторовъ. Кромѣ центробѣжной силы груза или массы, сидящей на ручкѣ, при значительныхъ скоростяхъ, съ какими вращаются плоскіе регуляторы, никакъ нельзя пренебрегать и центробѣжной силой самой ручки и прочихъ частей и центробѣжной силой пружины. Относительно перваго мы уже говорили и тутъ затрудненія быть не можетъ, ибо, на основаніи нашей 2-ой задачи, полный моментъ центробѣжныхъ силъ массы и ручки и всѣхъ другихъ частей, *вращающихся вокругъ оси ея*, получится, если всю массу груза и ручки и прочихъ вращающихся вокругъ оси ея частей представимъ сосредоточенною въ ихъ общемъ центрѣ тяжести и возьмемъ моментъ центробѣжной силы этой массы относительно точки O ; во всѣхъ предъидущихъ изслѣдованіяхъ мы уже и предполагали это сдѣланнымъ, называя „шаромъ“ или „точкой“ *всю массу частей, сосредоточенную въ общемъ центрѣ тяжести ихъ* и называя *направленіемъ ручки прямою, соединяющую ея съ центромъ вращенія O всѣхъ этихъ частей*. Что касается вліянія центробѣжной силы пружины, то оно нѣсколько различно, смотря по расположенію пружины и потому здѣсь необходимо дать понятіе о конструкціяхъ. Въ первоначальныхъ, американскихъ конструкціяхъ употреблялось 2 маятника и двѣ пружины, работающія на растяженіе, по обѣ стороны вала, такъ что пружина не проходитъ черезъ центръ вращенія и, слѣдовательно, отъ центробѣжныхъ силъ всѣхъ своихъ частицъ подвергается вообще и осевой силѣ и изгибу. Последнее обстоятельство нѣкоторыми считалось большимъ недостаткомъ, въ виду возможности сильнаго прогиба пружины и *Pröll* предложилъ свою извѣстную конструкцію, гдѣ пружина *одна*, двойной длины, и расположена по діаметру, такъ что проходитъ черезъ центръ вращенія, помѣщена въ цилиндрическомъ футлярѣ и работаетъ на сжатіе. Здѣсь отъ своей центробѣжной силы пружина только растягивается, но не изгибается. Впрочемъ и регуляторы американскаго типа, съ двумя пружинами подверженными растяженію, получили большое распространеніе и работаютъ прекрасно, такъ что изгибъ пружины, который иногда выставлялся какъ ихъ серьезный недостатокъ, въ практикѣ оказывается вовсе не имѣющимъ особаго значенія. При сравненіи обѣихъ системъ имѣютъ значеніе другія соображенія, которыя кстати здѣсь и приведемъ.

Регуляторъ Прёлля неудобенъ тѣмъ, что, такъ какъ пружина

проходить черезъ центръ вращенія, то регуляторъ можетъ сидѣть *лишь на концѣ вала*, а не на серединѣ его, ибо тогда пружина пересѣкаетъ валъ. Это обстоятельство значительно стѣсняетъ конструктора, такъ какъ въ закрытыхъ машинахъ Westinghouse'a и проч. регуляторъ приходится сажать внутри, посрединѣ вала. Американскій регуляторъ можно посадить гдѣ угодно.

Въ пользу регулятора Прёлля говорятъ слѣдующія обстоятельства.

Такъ какъ пружина работаетъ на сжатіе и завитки ея нарочно расположены довольно тѣсно и заключены въ трубку, то, если и лопнетъ пружина, то лопнувшій конецъ подвинется лишь на величину зазора между завитками и упрется въ слѣдующій завитокъ, такъ что машина, испытавши небольшую пертурбацію, можетъ продолжать работать, тогда какъ въ тѣхъ регуляторахъ съ двумя пружинами, гдѣ эти послѣднія растягиваются, что почти всегда и имѣетъ мѣсто, при разрывѣ пружины шаръ съ ручкой дѣлается свободенъ и причинить сильныя колебанія скорости машины, влѣдствіе чего можетъ случиться, что погаснетъ освѣщеніе во всемъ зданіи и т. п. непріятности.

Кромѣ того, трудно приготовить двѣ пружины совершенно одинаковыхъ свойствъ и хотя оба маятника связываютъ особыми шатунами, чтобы они двигались симметрично, но все-таки неравенство силъ пружинъ можетъ отзываться на плавности работы машины. Въ регуляторѣ Pröll'a пружина одна, такъ что обѣ ея половинки гораздо легче получить равноупругими.

Большинство строящихся въ настоящее время быстроходныхъ машинъ имѣютъ регуляторъ или американскаго, или Прёллевскаго типа. Рѣже попадаются другіе типы регуляторовъ. Изъ нихъ чаще прочихъ употребляется еще регуляторъ съ плоской рессорной пружиной.

Теперь переходимъ къ разсмотрѣнію вліянія массы пружины, причемъ разсмотримъ общій случай пружины, ось которой не проходитъ черезъ центръ вала, а отстоитъ отъ него на извѣстное разстояніе, т. е. разсмотримъ американскій типъ. Вліяніе пружины помѣщенной центрально получится изъ этого общаго случая, положивъ длину перпендикуляра, опущеннаго изъ центра вала на ось пружины равною нулю. Вліяніе пружины повидимому сильно интересовало всѣхъ писавшихъ о плоскомъ регуляторѣ и во всѣхъ трехъ статьяхъ: *Pröll*, *Mansfield* и *Budil*, представляющихъ, собственно, и всю наличную литературу плоскихъ регуляторовъ, имѣется рѣшеніе этого вопроса, но изъ трехъ способовъ разсмотрѣнія вліянія пружины, которые имѣются у названныхъ трехъ

авторовъ, ни одинъ не можетъ считаться вѣрнымъ и я нашель необходимымъ рѣшить задачу вновь и совершенно инымъ путемъ, причемъ получились, конечно, и результаты совсѣмъ иные.

Разсмотримъ плоскій регуляторъ (фиг. 26) и пусть $C'C'$ — ось вращенія его, O — центръ шарнира, вокругъ котораго вращается ручка OM шара. Пружина однимъ концомъ надѣта на шарниръ E ручки (на чертежѣ у насъ точки M , E и O лежатъ на одной прямой, но изслѣдованіе не измѣнится, если точка E взята и въ сторонѣ отъ OM), а другимъ на шарниръ F диска. Ось пружины лежитъ всегда въ плоскости вращенія ручки OM , пересѣкающейся съ осью $C'C'$ въ точкѣ C_0 . Опустимъ изъ C_0 перпендикуляръ $CP = a$ на ось пружины и предположимъ для общности, что точка P упадетъ между E и F ; возьмемъ въ точкѣ P начало прямоугольныхъ координатъ. Ось y возьмемъ по направленію C_0P , ось x перпендикулярно къ ней, а за ось z примемъ ось пружины, причемъ положительное направленіе ея будемъ брать или къ точкѣ E , или къ точкѣ F , о чемъ будемъ упоминать особо.

Разсмотримъ сперва часть пружины между точками P и E и для этой части ось z направимъ отъ P къ E . Возьмемъ какой нибудь элементъ массы m пружины, выдѣливъ его двумя безконечно близкими сѣченіями, перпендикулярно къ средней винтовой линіи проволоки, и пусть разстояніе центра этого элемента отъ оси $C'C'$ равно r (фиг. 26). Центробѣжная сила s этого элемента будетъ равна

$$s = m\omega^2 r \dots \quad (78)$$

и лежитъ въ плоскости, перпендикулярной къ оси вращенія $C'C'$ регулятора, т. е. въ плоскости, параллельной плоскости yz . Назовемъ уголъ между радіусомъ r и плоскостью xy черезъ ψ и разложимъ силу $m\omega^2 r$ на двѣ; одну параллельно оси z , а другую параллельно оси y . Слагающая по оси y будетъ:

$$C_y = m\omega^2 r \cos \psi \dots \quad (79)$$

а по оси z :

$$C_z = m\omega^2 r \sin \psi \dots \quad (80).$$

Но такъ какъ ось вращенія регулятора $C'C'$ лежитъ въ плоскости xy , то:

$$r \sin \psi = z \dots \quad (81)$$

и

$$C_z = m\omega^2 z \dots \quad (82)$$

Сила C_y прогибаетъ пружину въ плоскости вращенія и лишь

весьма незначительно вліяетъ на ея продольное натяженіе, поэтому дѣйствіемъ этой силы пренебрежемъ, тѣмъ болѣе, что оцѣнить ея вліяніе было бы довольно сложно.

Сила C_z , направленная вдоль пружины, оказываетъ извѣстное давленіе на точки E и F и, слѣдовательно, прибавляется къ упругому сопротивленію пружины, зависящему отъ ея сжатія или растяженія при извѣстномъ положеніи ручки OM . Поэтому, если мы хотимъ удержать ручку OM въ *данномъ положеніи*, то должны теперь увеличить или уменьшить массу шара M , чтобы уравновѣситъ всѣ эти дополнительные силы для всѣхъ элементовъ m , составляющихъ пружину.

Ошибка Pröll'a (и другихъ) состоитъ въ томъ, что, по его мнѣнію, *вся* сила C_z для *всякаго* элемента массы m пружины передается лишь на точку E привѣса пружины къ ручкѣ и вовсе не передается на точку F . Такое допущеніе совершенно *произвольно* и *неверно*. Самый элементарный опытъ съ пружинными вѣсами покажетъ, что если, при вытянутой какимъ нибудь способомъ до извѣстной степени пружинѣ, нажать завитокъ пружины близкій къ чашкѣ, то индексъ покажетъ значительное увеличеніе нагрузки, а если надавить на завитокъ близкій къ верхушкѣ пружины и далекій отъ чашки, то индексъ почти не стронется.

Вникая въ суть дѣла, я путемъ теоретическихъ соображеній пришелъ къ заключенію, что допущеніе Pröll'a совершенно *неверно* и что эффектъ центробѣжной силы выразится въ давленіи на *обѣ* точки опоры пружины. Простой опытъ съ пружинными вѣсами подтвердилъ это.

Чтобы изслѣдовать, какъ разложится какая нибудь сила, приложенная къ пружинѣ, на обѣ ея конечныя точки опоры, если онѣ неподвижны, мы сперва рассмотримъ слѣдующую задачу:

Твердый призматическій брусокъ укрѣпленъ въ неподвижныхъ точкахъ A и B (фиг. 27) и нагруженъ въ какой нибудь точкѣ C своей оси силой P , направленной вдоль его. Какъ распределиться эта сила на обѣ точки опоры A и B ?

Съ точки зрѣнія статики задача эта, очевидно, неопредѣленная, ибо мы имѣемъ лишь одно условіе: алгебраическая сумма давленій на точки A и B равна силѣ P ; *каковы* будутъ эти давленія въ отдѣльности—зависитъ отъ природы бруска и, чтобы рѣшить задачу, необходимо принять въ расчетъ, что брусокъ не абсолютно твердъ, какъ считается въ теоретической механикѣ, а *упругъ*. Если примемъ во вниманіе упругость, задача станетъ опредѣленной.

Пусть сила P приложена въ сѣченіи NN бруска, въ точкѣ C оси бруска, лежащей на разстояніи x отъ точки A и на разстояніи $l-x$ отъ B , если l длина бруска, и направлена къ точкѣ B . Подъ дѣйствіемъ силы P сѣченіе NN бруска, проходящее вначалѣ черезъ точку C , стремится подвинуться къ точкѣ B , причемъ часть бруска между A и C должна растягиваться, а часть бруска между C и B — сжиматься; очевидно, что насколько растянется часть AC , настолько же сожмется часть CB , ибо опоры мы считаемъ *неподвижными* и *неупругими*, такъ что длина бруска l останется неизмѣнной. Пусть послѣ деформаци сѣченіе NN перемѣстилось параллельно себѣ въ $N'N'$, на длину Δx .

Часть бруска AC вытянулась при этомъ на Δx , и относительное удлинненіе ея будетъ

$$\lambda_1 = \frac{\Delta x}{x} \dots \quad (83)$$

а часть CB сжалась на Δx и относительное сжатіе ея будетъ

$$\lambda_2 = \frac{\Delta x}{l-x} \dots \quad (84)$$

Если предположимъ коэффициентъ упругости одинаковымъ для сжатія и растяженія, то напряженія частей AC и CB будутъ:

$$\text{напряженіе растяженія: } \sigma_1 = E\lambda_1 = E \frac{\Delta x}{x} \dots \quad (85)$$

$$\text{„ сжатія: } \sigma_2 = E\lambda_2 = E \frac{\Delta x}{l-x} \dots \quad (86)$$

Если P_1 и P_2 суть силы, возбуждаемыя въ точкахъ A и B силой P , т. е. сопротивленія опоръ A и B , причемъ, очевидно, P_2 направлено къ точкѣ C , а P_1 отъ нея, то изъ статическаго условія равновѣсія бруса, т. е. равенства нулю суммы проэкцій всѣхъ силъ на ось бруса, имѣемъ:

$$P_1 - P + P_2 = 0$$

или

$$P_1 + P_2 = P \dots \quad (87)$$

Зная напряженія σ_1 и σ_2 частей бруса, и называя площадь его черезъ f , имѣемъ:

$$P_1 = \sigma_1 f = fE \frac{\Delta x}{x} \dots \quad (88)$$

$$P_2 = \sigma_2 f = fE \frac{\Delta x}{l-x} \dots \quad (89)$$

и отсюда:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{l-x}{x} \dots \quad (90)$$

Изъ уравненій (87) и (90) находимъ теперь:

$$P_1 = P \frac{l-x}{l} \dots \quad (91)$$

$$P_2 = P \frac{x}{l} \dots \quad (92)$$

т. е. **давленія на опоры распредѣляются обратно пропорціонально разстояніямъ точки приложенія силы**, слѣдовательно аналогично тому, какъ если бы брусъ лежалъ на опорахъ, а сила P дѣйствовала бы къ нему перпендикулярно, какъ бываетъ въ случаѣ изгиба. Если на брусъ будетъ дѣйствовать не одна сила P , а цѣлый рядъ элементарныхъ силъ, распредѣленныхъ по всей его длинѣ, такъ что на элементъ объема бруса fdx дѣйствуетъ элементарная сила

$$\frac{P f \gamma dx}{g},$$

гдѣ P есть сила, отнесенная къ единицѣ массы (γ —плотность, а g —ускореніе силы тяжести), причемъ эта сила вообще переменна и выражается какъ функція разстоянія x , такъ что

$$P = \varphi(x),$$

то для каждаго элемента объема fdx , находящагося на разстояніи x отъ A сила

$$\frac{P f \gamma dx}{g}$$

можетъ быть, по предъидущему, разложена на двѣ, въ A и B , причемъ въ A будетъ сила:

$$\frac{P f \gamma}{g} \cdot \frac{l-x}{l} dx$$

и въ B :

$$\frac{P f \gamma}{g} \cdot \frac{x}{l} dx.$$

Полныя давленія P_1 и P_2 въ A и B будутъ теперь суммы этихъ элементарныхъ и выразятся интегралами:

$$P_1 = \int_0^l \frac{P f \gamma}{g} \cdot \frac{l-x}{l} dx = \frac{f \gamma}{gl} \int_0^l \varphi(x) (l-x) dx \dots \quad (93)$$

$$P_2 = \int_0^l \frac{P f \gamma}{g} \cdot \frac{x}{l} dx = \frac{f \gamma}{gl} \int_0^l \varphi(x) x dx \dots \quad (94)$$

Такъ какъ для спиральной цилиндрической пружины удлинненіе ея пропорціонально длинѣ пружины и долеой силѣ, то спиральная пружина нашего регулятора вполне уподобляется разсмотрѣнному упругому бруску, т. е. и въ ней сила, приложенная въ какой нибудь точкѣ ея, распредѣлится на обѣ точки привѣса обратно пропорціонально длинамъ *упругихъ* частей пружины по обѣ стороны точки приложенія силы. Мы подчеркиваемъ слово *упругихъ*, ибо пружина обыкновенно состоитъ изъ спиральной, дѣйтельной части *ab* (фиг. 28) которая и есть собственно пружина, каждый элементъ которой закручивается и изъ *мертвыхъ* частей *Aa* и *bB*, соединяющихъ пружину съ глазкомъ. Деформація растяженія этихъ частей сравнительно съ удлинненіемъ пружины ничтожна и при разложеніи силы *P* за *длину бруска* надо считать лишь часть *ab*, части же *Aa* и *bB* уподобляются, сравнительно съ спиралью, абсолютно твердому тѣлу и по нимъ сила уже передается безъ измѣненія.

Съ помощью этого принципа не трудно уже рѣшить задачу о вліяніи центробѣжной силы пружины на дѣйствіе регулятора *).

Пусть длина *ab* оси *дѣйтельной* части въ разсматриваемомъ состояніи будетъ *L*, такъ что если число завитковъ спирали *n*, а шагъ винтовой линіи (по оси проволоки) *h* то,

$$L = nh \dots \quad (95)$$

Взятый нами элементъ дѣлитъ длину *L* на двѣ части; если назовемъ разстоянія отъ точекъ *a* и *b* до плоскости *xy* черезъ *z₂* и *z₁*, такъ что:

$$z_1 + z_2 = L \dots \quad (96)$$

то разстоянія элемента *m* отъ *a* и *b* будутъ

$$\text{отъ } a: z_2 - z$$

$$\text{отъ } b: z_1 - z$$

*) Мы для краткости ограничились здѣсь аналогіей, говоря, что такъ какъ въ пружинѣ удлинненіе $\propto$ силѣ и длинѣ, то въ распредѣленіи давленій на опоры она тождественна съ упругимъ брускомъ. Не трудно сдѣлать и для пружины отдѣльно точный выводъ того предложенія, что каждая долеая сила разложится обратно пропорціонально плечамъ, разсматривая и элементарныя деформаціи ея элементовъ, т. е. ихъ перекручиванія.

а давленія, возбуждаемыя его центробѣжной силой c_z въ a и b , а слѣдовательно въ шарнирахъ E и F , по нашему принципу будутъ

$$\text{въ } a (E) - c_z \cdot \frac{z_1 + z}{L} = \dots$$

$$\text{въ } b (F) - c_z \cdot \frac{z_2 - z}{L} = \dots$$

Намъ интересно знать полное давленіе лишь на точку a или E , т.-е. на ручку. Чтобы найти его необходимо взять суммы давленій на нее отъ элементарныхъ центробѣжныхъ силъ для всей части пружины Pa и для всей части пружины Pb .

Для элемента, взятаго на части aP , мы нашли уже, что давленіе на точку a будетъ:

$$c_z \cdot \frac{z_1 + z}{L} = m\omega^2 z \cdot \frac{z_1 + z}{L} \dots \quad (97)$$

Для каждаго элемента части aP сила c_z направлена отъ точки a или E вверхъ (на чертежѣ) т.-е. дѣйствіе ея стремится удалить ручку отъ вала C регулятора. Для элементовъ части bP сила c_z будетъ направлена отъ E къ F , слѣдовательно, обратно и стремится приблизить ручку. Поэтому части aP и bP мы и изслѣдуемъ отдѣльно.

Для элемента массы m на части Pb мы ось z направимъ отъ P къ b , такъ что и здѣсь координата z будетъ у насъ положительна. Для такого элемента сила c_z будетъ опять:

$$c_z = m\omega^2 z,$$

но давленіе отъ нея на точку a или E выразится здѣсь по абсолютной величинѣ уже такъ:

$$c_z \cdot \frac{z_1 - z}{L} \dots \quad (98)$$

и направлено отъ E внизъ, а полное давленіе отъ этой части равно суммѣ выраженій (98) для всѣхъ элементовъ части bP . Эту сумму надо вычесть изъ первой суммы, полученной для части aP , и тогда получимъ окончательно силу, стремящуюся удалить ручку отъ оси.

Сдѣлаемъ теперь эти вычисленія.

Выразимъ сперва элементъ массы m . Если M — масса всей спирали между a и b и T — длина винтовой линіи всей спирали

между a и b , а dl — длина отрезка винтовой линии внутри элемента m , то, очевидно, имѣемъ:

$$\frac{m}{M} = \frac{dl}{T}$$

и

$$m = M \frac{dl}{T} \dots \quad (99)$$

Если α — уголъ наклона винтовой линии къ плоскости xy , а dz — проекція длины dl элемента на ось z , то имѣемъ:

$$dz = dl \sin \alpha \dots \quad (100)$$

$$L = T \sin \alpha \dots \quad (101)$$

и отсюда:

$$\frac{dl}{T} = \frac{dz}{L} \dots \quad (102)$$

и

$$m = \frac{Mdz}{L} \dots \quad (103)$$

Теперь, элементарная сила, приходящаяся на точку E отъ элемента m части aP напишется такъ:

$$\frac{M\omega^2}{L^2} (z_1 + z) z dz \quad (104)$$

а полная сила отъ части aP .

$$P_1 = \int_0^{z_1} \frac{M\omega^2}{L^2} (z_1 + z) z dz, \dots \quad (105)$$

полная сила отъ части Pb будетъ

$$P'_1 = \int_0^{z_1} \frac{M\omega^2}{L^2} (z_1 - z) z dz \dots \quad (106)$$

и направлена обратно P_1 *).

*) Замѣтимъ, что конечно и этотъ выводъ не абсолютно точенъ. Дѣло въ томъ, что мы предположили ось пружины правильной винтовой линіей постояннаго шага h . На самомъ дѣлѣ мы должны разсматривать положеніе элементовъ ея m послѣ добавочной деформации, вызванной ихъ центробѣжной силой; результатомъ этой деформации является постепенное сближеніе завитковъ по мѣрѣ приближенія къ окружности диска, т.е. уменьшеніе шага, такъ что точно слѣдовало бы принять уголъ α функцией z , но тогда задача крайне усложнилась бы, ибо координата z к. н. элемента была бы функцией его перемѣщенія отъ собственной центробѣжной силы, которая сама есть

Окончательно сила, дѣйствующая на E отъ всей пружины будетъ

$$V = P_1 - P'_1 \dots \dots \quad (107)$$

и направлена отъ E къ окружности диска.

Вычислимъ P_1 и P'_1 .

Имѣемъ:

$$P_1 = \frac{M\omega^2}{L^2} \left\{ z_1 \int_0^{z_2} z dz + \int_0^{z_1} z^2 dz \right\}$$

$$P_1 = \frac{M\omega^2}{L^2} \left(\frac{z_1 z_2^2}{2} + \frac{z_1^3}{2} \right) \dots \quad (108)$$

$$P'_1 = \frac{M\omega^2}{L^2} \left\{ z_1 \int_0^{z_1} z dz - \int_0^{z_1} z^2 dz \right\}$$

$$P'_1 = \frac{M\omega^2}{L^2} \left(\frac{z_1^3}{2} - \frac{z_1^3}{3} \right) = \frac{M\omega^2}{L^2} \frac{z_1^3}{6} \dots \quad (109)$$

$$V = P_1 - P'_1 = \frac{M\omega^2}{L^2} \times \frac{2z_1^3 + 3z_1 z_2^2 - z_1^3}{6} \quad (110)$$

Такъ выражается вліяніе пружины въ общемъ случаѣ. Изъ него не трудно получить частные.

Разсмотримъ нѣкоторые.

1) Регуляторъ Прёлля. Пусть ось пружины проходитъ черезъ центръ вала регулятора и пружина укрѣплена однимъ концомъ въ центрѣ вала регулятора, причемъ этотъ конецъ можетъ вращаться, но не можетъ двигаться по оси пружины (Регуляторъ Прёлля, гдѣ обѣ пружины какъ-бы скрѣплены въ центрѣ вала регулятора такъ, что точка скрѣпа неподвижна). Пружина работаетъ въ регуляторѣ на сжатіе.

Здѣсь

$$z_1 = 0; \quad z_2 = L$$

(L есть длина отъ центра вала до ручки).

и

функция z , такъ, что пришлось бы искать сперва координаты элемента, выразивъ, что онъ успокоился послѣ деформации подъ вліяніемъ своей и всѣхъ прочихъ центробѣжныхъ силъ. Въ такомъ видѣ задача крайне сложна и рѣшеніе ея перестало бы имѣть практическій интересъ. На основаніи этого и въ виду незначительности ошибки, происходящей отъ пренебреженія сказаннымъ обстоятельствомъ, (зависящее отъ него измѣненіе z невелико сравнительно съ самимъ z), мы рѣшили задачу при постоянномъ шагѣ спирали.

$$V = \frac{M\omega^2}{L^2} \cdot \frac{L^3}{3} = \frac{1}{3} M\omega^2 L \dots \quad (111)$$

Результатъ этотъ разнится отъ Прёллевскаго; Прёлль приближенно замѣняетъ пружину n кольцами и выполняетъ прерывное суммирование по цѣлымъ числамъ, хотя это вовсе не неизбѣжно, ибо мы показали, что нетрудно разсматривать и непрерывную спираль. Если бы выполнить суммирование непрерывно, считая по Pröll'у, что всѣ центробѣжныя силы передаются *цѣликомъ* на точку E , то получили бы

$$V = \frac{M\omega^2}{L} \int_0^L z dz = \frac{M\omega^2 L}{2},$$

тогда какъ въ дѣйствительности мы имѣемъ

$$V = \frac{M\omega^2 L}{3}.$$

Если длины мертвыхъ частей равны нулю, что почти и имѣетъ мѣсто въ случаѣ регулятора Прёлля съ одной сквозной пружиной, то нашъ выводъ можно наглядно выразить такъ:

Вліяніе пружины можно принять въ расчетъ, помѣстивъ въ центрѣ шарнира, прикрѣпляющаго ее къ ручкѣ, *одну треть* массы пружины и взявъ ея центробѣжную силу, которая стремится уменьшить силу сжатія пружины, такъ что здѣсь давленіе пружины на ручку, обусловленное ея укороченіемъ, складывается съ вліяніемъ ея центробѣжной силы. Теорема, аналогичная той, по которой принимается въ расчетъ вліяніе инерціи шатуна на кривошипъ.

Особый случай получится если ось пружины проходитъ черезъ ось C вала регулятора, но внутренніе концы пружины *не связаны ни съ чѣмъ*, а свободно лежатъ (такой регуляторъ видѣнъ на фиг. 41), такъ что пружина имѣетъ лишь *одну* точку опоры въ E , а конецъ ея, ближайшій къ валу, можетъ двигаться вдоль ея оси, ничѣмъ не удерживаемый; *здѣсь*, дѣйствительно, *вся* центробѣжная сила каждаго элемента передается на шарниръ E , ибо второй опоры нѣтъ, и для этого случая формула (110) непримѣнима, а надо прямо взять сумму величинъ c_z отъ $+z_1$ до $+z_2$, ибо вся пружина лежитъ по одну сторону вала регулятора и получимъ:

$$V = \int_{z_1}^{z_2} \frac{M\omega^2}{L} z dz = \frac{M\omega^2}{L} \cdot \frac{z_2^2 - z_1^2}{2} \dots \quad (112)$$

или замѣтивъ, что здѣсь

$$z_2 - z_1 = L$$

$$V = M\omega^2 \frac{z_1 + z_2}{2}, \quad (113)$$

Что есть ничто иное, какъ центробѣжная сила центра тяжести пружины, чего можно было ожидать и по доказанному раньше относительно центробѣжной силы какого нибудь твердаго тѣла, такъ что здѣсь упругость пружины не играетъ роли.

II) Пружина помѣстилась въ данный моментъ симметрично относительно перпендикуляра OP , такъ что:

$$z_1 = z_2 = \frac{L}{2}.$$

Въ этомъ случаѣ

$$V = \frac{M\omega^2}{L^2} \times \frac{4}{6} z_1^3 = \frac{M\omega^2}{L^2} \cdot \frac{4}{6} \left(\frac{L}{2}\right)^3 = \frac{1}{12} M\omega^2 L \dots \quad (114)$$

Считаемъ нужнымъ напомнить, что формула (110) выведена для *одного* положенія ручки шара и пружины. Въ каждомъ новомъ положеніи величины z_1 , z_2 и L мѣняются, ибо пружина удлиняется или укорачивается и при изслѣдованіи регулятора необходимо для *каждаго* положенія ручки шара находить *соотвѣтствующія* величины z_1 , z_2 и, слѣдовательно, L .

Величиной V мы назвали силу, направленную отъ точки E къ окружности. Если выйдетъ при какомъ нибудь отклоненіи маятника, что V отрицательно, то это значить, что пружина помѣстилась теперь такъ, что вліяніе части Pb сильнѣе и сила V стремится приблизить ручку къ оси O . Это будетъ, напримѣръ, при $z_2 = 0$ и $z_1 = L$, когда

$$V = -\frac{M\omega^2 L}{6} \dots \quad (115)$$

Можно, замѣнивъ z_1 черезъ $L - z_2$ въ уравненіи (110) изслѣдовать, при какихъ значеніяхъ z_2 многочленъ

$$2z_2^3 + 3z_2^2 (L - z_2) - (L - z_2)^3$$

будетъ > 0 и при какихъ < 0 , но это не представляетъ интереса, ибо при вычисленіи V всегда обнаружится самъ собою знакъ при числовой величинѣ V .

Такимъ образомъ мы видимъ, что вліяніе пружины можетъ или помогать или противодѣйствовать моменту центробѣжной

силы шара вокруг точки O и, следовательно, для удержанія маятника въ равновѣсїи въ томъ же положенїи и при той же угловой скорости, нужно ему дать или меньшую или ббольшую массу, противъ полученной пренебрегая вліяніемъ центробѣжной силы пружины.

Вліяніе центробѣжной силы пружины составляетъ одну изъ самыхъ крупныхъ силъ среди вліяній прочихъ частей и ошибка въ немъ можетъ весьма замѣтно отозваться на ходѣ расчета и работѣ регулятора; поэтому мы и сочли необходимымъ изслѣдовать вновь этотъ важный вопросъ и такъ подробно о немъ распространиться.

Разсмотримъ теперь еще вліяніе центробѣжной силы шатуна, соединяющаго маятникъ съ эксцентрикомъ.

Пусть O (фиг. 29) центръ вращенія ручки, M —шаръ, Q —точка прикрѣпленія шатуна къ ручкѣ, которая можетъ быть между точками M и O или вѣхъ ихъ, C —центръ диска, P —точка прикрѣпленія шатуна къ эксцентрику. Для простоты предположимъ, что эксцентрикъ при измѣненїи своего положенія всегда поворачивается вокругъ центра диска; и, хотя это, особенно при двухъ эксцентрикахъ, и несовсѣмъ точно, но и въ дѣйствительности прямая, соединяющая истинную ось вращенія эксцентрика съ точкой прикрѣпленія шатуна, проходитъ весьма близко отъ центра C диска. Нетрудно было бы рѣшить задачу и точно, но тогда результатъ не представится въ видѣ такой простой теоремы, какъ при сдѣланномъ предположенїи. Разница же будетъ весьма не велика, тѣмъ болѣе что и сама задача неопредѣленна и разрѣшается лишь съ помощью гипотезы, какъ сейчасъ объяснимъ.

Соединимъ теперь точки P и C , такъ что получимъ какъ бы кривошипъ CP .

Мы можемъ разсматривать шатунъ какъ балку, лежащую на 2-хъ опорахъ Q и P и нагруженную косыми силами — центробѣжными силами отдѣльныхъ частицъ шатуна. Задача о нахожденїи давленій на опоры является неопредѣленной, ибо мы не знаемъ ни реакцій опоръ, ни ихъ направленій, следовательно имѣемъ 4 неизвѣстныхъ, а можемъ составить лишь 3 уравненія равновѣсія въ плоскости.

Чтобы сдѣлать задачу опредѣленной, воспользуемся слѣдующимъ замѣчаніемъ. Эксцентрикъ, къ которому прикрѣпленъ конецъ шатуна въ точкѣ P , можетъ двигаться довольно легко, преодолевая лишь нѣкоторое треніе хомута и золотника, поэтому сдѣлаемъ гипотезу, что опора или точка P не можетъ оказывать сопротивленія вращенію кривошипа PC вокругъ C , а можетъ лишь

сопротивляться силѣ направленной по PC , ибо тогда тѣло кривошипа PC растягивается и можетъ сопротивляться этому растяженію. Поэтому будемъ считать, что опора P можетъ дать лишь реакцію, направленную по CP , вращенію же системы рычаговъ OQ , QP и PC вокругъ шарнировъ C и O сопротивляется точка Q . Этимъ предположеніемъ направленіе одной изъ реакцій опоръ опредѣляется, такъ что остается три неизвѣстныхъ — величина реакціи опоры P и величина и направленіе реакціи опоры въ Q и задача становится статически опредѣленной, ибо мы можемъ написать два уравненія проеکцій и одно уравненіе моментовъ.

Далѣе, такъ какъ для нахождения сопротивленій опоръ мы, по обычному приему, написали бы равенство нулю моментовъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на балку (шатуна PQ), то вмѣсто суммы моментовъ всѣхъ элементарныхъ центробѣжныхъ силъ мы могли бы, на основаніи 2-й задачи, написать моментъ центробѣжной силы всей массы шатуна, сосредоточивъ эту массу въ центрѣ тяжести его. Очевидно, что если мы будемъ находить реакцію не съ помощью уравненія моментовъ, а разложеніемъ силъ (что для насъ здѣсь удобнѣе), то, все равно, и при этомъ мы можемъ вмѣсто всѣхъ элементарныхъ центробѣжныхъ силъ взять центробѣжную силу всей массы шатуна, сосредоточивъ эту массу въ центрѣ его тяжести G . Пусть m — масса шатуна, а $p = GC$ — расстояние его центра тяжести отъ оси вращенія регулятора C . Тогда центробѣжная сила всей массы, сосредоточенной въ центрѣ тяжести будетъ, при угловой скорости ω диска:

$$F = m \omega^2 p \dots (116)$$

Разложимъ ее на двѣ слагающія, одну D по направленію шатуна и другую B параллельную кривошипу CP . По нашей гипотезѣ сила D пѣликомъ передается на точку Q ручки шара, стремясь удалить ее отъ центра C . Силу же B разложимъ на двѣ, ей параллельныя, силы B' и B'' въ точкахъ P и Q . Если означимъ длины PG черезъ a и QG черезъ b , а длину шатуна PQ , равную $a + b$, черезъ L , то имѣемъ:

$$B' = B \frac{b}{L} \dots (117)$$

$$B'' = B \frac{a}{L} \dots (18)$$

Если назовемъ уголъ между силами F и B черезъ α , а уголъ

между F и D через β (фиг. 29), то имѣемъ изъ треугольника силъ:

$$D = F \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} = m \omega^2 \rho \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} \dots \quad (119)$$

$$B = F \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} = m \omega^2 \rho \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \dots \quad (120)$$

и слѣдовательно:

$$B' = m \omega^2 \rho \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} \cdot \frac{b}{L} \dots \quad (121)$$

$$B'' = m \omega^2 \rho \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \cdot \frac{a}{L} \dots \quad (122)$$

Сила B' , приложенная въ точкѣ P , уничтожается сопротивленіемъ тѣла кривошипа и не оказываетъ никакого вліянія на равновѣсіе ручки шара OM . Сила B'' стремится приблизить ручку къ центру диска.

Напишемъ моменты силъ D и B' , приложенныхъ къ точкѣ Q ручки, относительно центра O и затѣмъ сложимъ ихъ. Въ суммѣ получимъ полный моментъ, стремящійся вращать ручку вслѣдствіе вліянія шатуна.

Моментъ силы D будетъ:

$$M_D = m \omega^2 \rho \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} \times p \dots \quad (123)$$

гдѣ p —перпендикуляръ изъ O на направленіе шатуна.

Моментъ силы B'' будетъ:

$$M_{B''} = -m \omega^2 \rho \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \times \frac{a}{L} \times q \dots \quad (124)$$

гдѣ q перпендикуляръ ou изъ O на направленіе силы B'' .

Полный моментъ будетъ

$$M = m \omega^2 \rho \left\{ \frac{p \sin \alpha - \frac{a q}{L} \sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \right\} \dots \quad (125)$$

Постараемся упростить это выраженіе.

Напишемъ его въ видѣ:

$$M = \frac{m\omega^2 a}{L} \left\{ \frac{\rho p \frac{L}{a} \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\rho q \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right\} \quad (126)$$

Длину кривошипа PC назовемъ черезъ l , и продолживъ его, опустимъ на него изъ O перпендикуляръ OV , который будетъ продолженіемъ перпендикуляра q , и длину его назовемъ s .

Изъ $\triangle PCG$, подобнаго треугольнику силъ, имѣемъ

$$\frac{\rho \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} = a \dots \quad (127)$$

$$\frac{\rho \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = l \dots \quad (128)$$

Далѣе, проведя изъ точки Q прямую $QW \parallel UV$, слѣдовательно перпендикулярную къ PC , изъ прямоугольнаго треугольника PQW получимъ

$$QW = UV = q + s = L \sin(\alpha + \beta) \dots \quad (129)$$

Наконецъ, опустимъ изъ C перпендикуляръ CX на PQ и длину его назовемъ черезъ t , такъ что:

$$t = l \sin(\alpha + \beta) \dots \quad (130)$$

Замѣняя теперь въ (126)

$$\rho \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

черезъ a изъ (127),

$$\frac{\rho \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

черезъ l изъ (128) и q черезъ

$$L \sin(\alpha + \beta) - s$$

изъ (129), находимъ

$$M = \frac{m\omega^2 a}{L} \left\{ pL - l[L \sin \alpha (\alpha + \beta) - s] \right\}$$

или

$$M = \frac{m\omega^2 a}{L} \left\{ pL - tL + ls \right\} \dots \quad (131)$$

Но pL есть двойная площадь ΔPQO , ls есть двойная площадь ΔPOC и tL есть двойная площадь ΔPQC , такъ что выраженіе въ скобкахъ есть, какъ видно изъ фиг. (29), двойная площадь ΔCQO и, если назовемъ длину CQ черезъ R , а перпендикуляръ на нее изъ O черезъ y , то

$$M = \frac{m\omega^2 a}{L} \cdot Ry \dots \quad (132)$$

Это же выраженіе есть, очевидно, ничто иное, какъ моментъ вокругъ оси O центробѣжной силы массы $\frac{ma}{L}$, помѣщенной въ точкѣ Q ручки, такъ что мы можемъ установить слѣдующую теорему.

Для нахожденія вліянія шатуна слѣдуетъ сосредоточить въ точкѣ привѣса его къ ручкѣ ту часть его массы или вѣса, какая при-
шла бы по законамъ статики на точку Q , если бы шатунъ лежалъ горизонтально на точкахъ Q и P какъ на опорахъ и взять затѣмъ моментъ центробѣжной силы этой массы вокругъ центра O . Слѣдовательно, надо массу шатуна m помножить на контръ — плечо a и раздѣлить на длину шатуна L , полученную массу $\frac{ma}{L}$ помѣстить, какъ матеріальную точку, въ центрѣ Q шарнира, соединяющаго его съ ручкой и этимъ мы замѣнимъ вліяніе шатуна. (Потомъ уже не трудно, если захотимъ, перенести эту массу и въ центръ шара, сидящаго на ручкѣ по изложеннымъ раньше правиламъ).

Если шатунъ симметриченъ относительно середины своей длины, то $a = \frac{L}{2}$ и надо помѣстить *половину* его массы въ центръ шарнира, которымъ онъ соединяется съ ручкой.

Заключеніе наше о вліяніи шатуна относится не только къ разсмотрѣнному здѣсь расположенію, когда точка привѣса его помѣщается на „ручкѣ“, т. е. на прямой, соединенной съ центромъ тяжести маятника, но и къ такому, когда онъ прикрѣпленъ въ любомъ мѣстѣ маятника, ибо все наше доказательство не зависитъ отъ положенія точки прикрѣпленія и вмѣсто площади равной Ry найдемъ лишь произведеніе радіуса R' , проведеннаго въ эту произвольную точку прикрѣпленія шатуна, на соотвѣтствующій перпендикуляръ y' на него изъ центра O .

Слѣдовало бы еще разсмотрѣть вліяніе центробѣжной силы эксцентрика, ибо его центръ тяжести не совпадаетъ съ центромъ

С вала, но въ виду малости эксцентриситетовъ, встрѣчающихся въ практикѣ, мы имъ пренебрежемъ.

Теперь разсмотримъ, имѣеть-ли какое-нибудь значеніе направленіе вращенія регулятора или же безразлично, заставить его вращаться „грузомъ впередъ“ или „грузомъ позади“?

Пусть (фиг. 30) C —центръ диска регулятора, O —ось вращенія маятника и M —грузъ съ массой m , считаеый пока за материальную точку съ массой m , сосредоточенной въ его центрѣ тяжести M . Если дискъ вращается по стрѣлкѣ, такъ что касательная M_k къ окружности, описываемой центромъ тяжести груза M при какомъ-нибудь его положеніи, проведенная въ сторону вращенія, составляетъ *острый* уголъ α съ направлениемъ ручки, считаеымъ отъ M къ O , то такое вращеніе будемъ называть „грузомъ позади“. Если же касательная M_k составляетъ съ направлениемъ MO *тупой* уголъ α (фиг. 31), то такое вращеніе назовемъ „грузомъ впередъ“. Посмотримъ будетъ-ли какое-нибудь различіе въ дѣйствіи регулятора при обоихъ направленіяхъ вращенія.

Разсмотримъ сперва вращеніе грузомъ позади (фиг. 32). Пока угловая скорость ω машины постоянна, точка M имѣеть лишь нормальное ускореніе, равное $m\omega^2x$, гдѣ $x = MC$, и для разсмотрѣнія относительнаго равновѣсія ея мы и прикладывали къ ней, считая дискъ остановленнымъ, силу инерціи ея, равную тоже $m\omega^2x$, но направленную обратно, т.-е. отъ центра C къ окружности, называя ее ходячимъ терминомъ (хотя уже давно признаннымъ безсмысленнымъ, но еще къ сожалѣнію, держащимся въ наукѣ) „центробѣжная сила“. Въ сущности, это есть нормальная сила инерціи. Она уравновѣшивалась натяженіемъ пружины и относительнаго движенія не было. Касательнаго ускоренія точка M , двигающаяся вмѣстѣ съ системой (дискомъ) не имѣла, ибо вращеніе диска равномернo.

Положимъ теперь, что нагрузка машины *сразу* уменьшилась и она начинаетъ двигаться ускоренно. Вращательное движеніе диска начнетъ ускоряться и онъ получитъ въ первый моментъ по измѣненіи нагрузки нѣкоторое угловое ускореніе:

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{P-Q}{J}$$

гдѣ $P-Q$ есть избытокъ движущей силы, а J —моментъ инерціи всѣхъ частей, сидящихъ на валу машины (или регулятора). Точка M системы получаетъ теперь касательное ускореніе

$$\frac{dv}{dt} = x \frac{d\omega}{dt}$$

а центр M груза, по теоремѣ Кориолиса, подвергается дѣйствию касательной силы инерціи равной

$$U = mx \frac{d\omega}{dt}$$

и направленной въ сторону обратную движенію точки системы, съ которой онъ совпадаетъ. Такимъ образомъ, кромѣ силы, зависящей отъ измѣненія нормальнаго ускоренія $m\omega^2 x$, которое будетъ двигать шаръ вокругъ оси O , удаляя его отъ центра, и о которой одной мы и говорили раньше, неупомяная тамъ о касательной силѣ инерціи для простоты (тѣмъ болѣе, что она имѣетъ значеніе лишь въ первые моменты послѣ измѣненія нагрузки), шаръ подвергнется еще дѣйствию касательной силы инерціи U , которая въ разсматриваемомъ случаѣ будетъ стремиться приблизить грузъ къ центру, т.-е. будетъ мѣшать дѣйствию нормальной силы инерціи и слѣдовательно, замедлять регулированіе. Такую же помѣху окажетъ касательная сила инерціи и при увеличеніи сопротивленія, ибо здѣсь она будетъ стремиться двигать шаръ отъ центра, а измѣненіе нормальной силы инерціи будетъ, для регулированія, приближать его къ центру, увеличивая наполненіе цилиндра.

Слѣдовательно, при вращеніи грузомъ позади регулированіе будетъ бесполезно замедляться, и чувствительность регулятора бесполезно уменьшаться.

Разсмотримъ вращеніе грузомъ впередъ (фиг. 33). При увеличеніи скорости машины появится сила инерціи U , направленная обратно направленію вращенія. Здѣсь она стремится *удалить* грузъ отъ центра C , слѣдовательно помогаетъ регулированію, ускоряя движеніе груза и, благодаря этому, регуляторъ скорѣе придетъ въ дѣйствіе не дожидаясь, пока нормальное ускореніе возрастетъ до величины, требуемой степенью нечувствительности. А такъ какъ важно именно *стронуть* грузъ, ибо треніе покоя болѣе тренія движенія, то помощь, оказываемая здѣсь касательной силой инерціи весьма существенна. Такую же помощь окажетъ она и при уменьшеніи скорости машины.

Величина касательной силы инерціи U зависитъ отъ величины углового ускоренія $\frac{d\omega}{dt}$, а оно зависитъ отъ J , т.-е. отъ мо-

мента инерціи маховика (преимущественно) и отъ разности $P - Q$. Поэтому, чѣмъ тяжелѣе маховикъ, тѣмъ меньше $\frac{dw}{dt}$, а слѣдовательно и U .

Чѣмъ легче маховикъ, тѣмъ больше U , а потому помощь, оказываемая касательной силой инерціи тѣмъ существеннѣй, чѣмъ легче маховикъ, а такъ какъ въ быстроходной машинѣ всѣ маховика меньше, чѣмъ въ тихоходной, при той же площади поршня и давленіи, т.-е. при той же силѣ P , то именно въ нихъ и выгодно пользоваться помощью касательной силы инерціи.

Что касается зависимости силы U отъ разности $P - Q$, то очевидно, что при внезапномъ снятіи нагрузки, когда P сразу мѣняется до величины Q , величина силы U будетъ наибольшая. Если же нагрузка мѣняется не сразу, а *постепенно*, убывая или прибывая *непрерывно* въ теченіе нѣкотораго *конечнаго* промежутка времени, то угловое ускореніе въ первые моменты этого промежутка, до ближайшей отсѣчки, будетъ меньше, чѣмъ при внезапномъ измѣненіи нагрузки и U будетъ меньше. Поэтому, помощь касательной силы инерціи въ особенности замѣтна при внезапныхъ измѣненіяхъ нагрузки на значительную величину. На основаніи сказаннаго, при проектированіи паровой машины слѣдуетъ обратить вниманіе на то, чтобы регуляторъ вращался „*грузомъ впередъ*“, а не грузомъ назадъ.

Въ дѣйствительности мы имѣемъ не одну матеріальную точку M , а цѣлое сложное тѣло—маятникъ, состоящее изъ собственно груза и другихъ частей: ручки, кривошиповъ, шарнировъ и др. И здѣсь все сказанное нами остается безъ измѣненія, надо лишь примѣнить все къ цѣлому тѣлу, и здѣсь надо будетъ говорить о центрѣ инерціи этого тѣла вмѣсто точки M или о моментѣ инерціи (полярномъ) этого тѣла относительно оси O маятника.

Какъ видимъ, имѣется существенное различіе между зависимостью отъ формы тѣла, дѣйствій его нормальныхъ и касательныхъ ускореній на регулированіе.

По доказанному раньше, всѣ нормальныя силы инерціи можно замѣнить одной, помѣстивъ въ центрѣ тяжести тѣла всю массу и взявъ моментъ ея центробѣжной силы относительно оси O качанія маятника.

Такимъ образомъ, этотъ моментъ зависитъ отъ статическаго момента тѣла относительно точки O и тѣмъ больше, чѣмъ дальше центръ тяжести отъ точки O , такъ что если сдѣлать маятникъ симметричнымъ относительно O , то онъ никуда не годится, ибо равнодѣйствующая центробѣжныхъ силъ пройдетъ черезъ

точку O . Поэтому и приходится употреблять особый грузъ, относя его далеко отъ точки O .

Другое дѣло касательная сила инерціи. Ея величина зависитъ отъ момента инерціи (полярнаго) относительно точки O и не зависитъ, слѣдовательно, непосредственно отъ положенія центра тяжести. А вслѣдствіе этого для пользованія касательной силой инерціи утилизируются части, которыя не играютъ никакой роли въ дѣйствіи нормальной силы инерціи, т.-е. части коихъ общій центръ тяжести лежитъ на оси качанія маятника, напр. втулка его ручки и проч.

Иногда, недовольствуясь касательной силой инерціи маятника регулятора, присоединяютъ къ регулятору особыя массы, не играющія никакой роли въ нормальной силѣ инерціи (центробѣжной силѣ), но дающія при быстрыхъ измѣненіяхъ скорости весьма могущественныя касательныя силы инерціи.

Подобный регуляторъ изображенъ на фиг. 34. Онъ построенъ Банкрофтомъ и Льюисомъ (Bancroft & Lewis, Philadelphia) въ Филадельфій.

Въ немъ масса, назначенная для развитія касательныхъ силъ инерціи, представляетъ изъ себя цѣлое маленькое колесо kk , на подобіе маховика, надѣтое вольно на валъ регулятора. Отъ двухъ противоположныхъ спицъ этого маховичка идутъ два шатуна t, t , къ кривошипамъ z, z , составляющимъ часть маятника регулятора.

Регуляторъ вращается по стрѣлкѣ. При равномерномъ вращеніи регулятора маховикъ kk вращается вмѣстѣ съ регуляторомъ какъ одно цѣлое, ибо онъ совершенно уравновѣшенъ относительно оси регулятора, такъ что его полная центробѣжная сила равна нулю. При измѣненіи же угловой скорости онъ, подъ вліяніемъ касательныхъ силъ инерціи, или отстаетъ или забѣгаетъ впередъ относительно диска регулятора и, вслѣдствіе этого, поварачиваясь относительно диска регулятора, помогаетъ грузамъ приблизиться къ центру или удалиться отъ него. Выгода введенія этого маховичка очевидна. Онъ вполне уравновѣшенъ относительно оси регулятора и сумма моментовъ всѣхъ его центробѣжныхъ силъ относительно ея равна нулю, запасъ же живой силы въ немъ весьма значителенъ и при измѣненіи скорости эта накопленная живая сила заставляетъ маховикъ опередить или отстать отъ диска, проявляясь въ видѣ касательной силы инерціи для этого относительнаго поворота. Если бы мы захотѣли получить такой же запасъ живой силы въ самомъ грузѣ маятника, то должны были бы сдѣлать его весьма массивнымъ, причемъ вышли бы велики и его центробѣжная сила и натяженіе пружины, а отъ этого

увеличилось бы и давлѣніе на всѣ шарниры и размѣры шарнировъ, во вредъ чувствительности регулятора. Между тѣмъ колесо регулятора Bancroft & Lewis не вызываетъ никакихъ давлѣній въ шарнирахъ маятника и, слѣдовательно, не вредитъ чувствительности регулятора.

Въ обыкновенныхъ центробѣжныхъ регуляторахъ, съ коническимъ маятникомъ, плоскость качанія котораго сама вращается вмѣстѣ съ нимъ вокругъ вертикальной оси регулятора, касательная сила инерціи пропадаетъ даромъ, ибо она перпендикулярна къ плоскости качанія маятника и лишь вредитъ чувствительности, прижимая маятникъ къ торцу шарнира, на которомъ онъ качается. Въ плоскихъ же регуляторахъ, благодаря совпаденію плоскостей качанія и вращенія, касательная сила инерціи можетъ, при надлежащемъ направленіи вращенія, помогать центробѣжной силѣ и способствовать болѣе быстрому регулированію. Это тоже одно изъ преимуществъ плоскихъ регуляторовъ передъ обыкновенными съ коническимъ маятникомъ.

Скажемъ теперь объ опредѣленіи прочныхъ размѣровъ нѣкоторыхъ деталей регулятора. Вопросъ этотъ можетъ представить при расчетѣ нѣкоторое затрудненіе преимущественно въ томъ случаѣ, если вмѣсто груза, укрѣпленнаго на ручкѣ, маятникъ вмѣстѣ съ ручкой выполненъ изъ одного куска сложной иногда формы, какъ напр. въ регуляторѣ машины Вестингауза (фиг.). Здѣсь можетъ представитъ затрудненіе нахожденіе давлѣнія на ось вращенія O , знаніе котораго необходимо для опредѣленія ея діаметра. Поэтому рѣшимъ такую задачу.

Положимъ, что маятникъ нашъ имѣетъ плоскость симметріи, параллельную плоскости вращенія (что всегда имѣетъ мѣсто если не принимать въ расчетъ одностороннее прикрѣпленіе шарнировъ, встрѣчающееся довольно часто) и удерживается въ равновѣсіи пружиной натянутой съ силой S *) (фиг. 35) и лежащей въ сказанной плоскости симметріи. Маятникъ можетъ качаться вокругъ шарнира O , поэтому дѣйствіе его на шарниръ должно выразиться просто силой $+N$ (направленной, положимъ, по стрѣлкѣ 1) если не считать тренія въ шарнирѣ; сопротивленіе шарнира равно по величинѣ тоже N , но направлено обратно, на чертежѣ по стрѣлкѣ 2. Приложимъ въ точкѣ O къ маятнику силу N , направленную по стрѣлкѣ 2, уничтоживъ мысленно шарниръ, тогда маятникъ

*) Подъ натяженіемъ пружины здѣсь разумѣется полная сила вдоль оси пружины, принимая въ расчетъ всѣ вліянія.

останется въ равновѣсіи и мы можемъ написать условія равновѣсія его. Возьмемъ въ центрѣ вращенія диска C какія-нибудь прямоугольныя оси x и y , а въ O параллельныя имъ ξ и η и напишемъ уравненія проэкцій силъ на оси x и y (или все равно ξ и η , ибо оси параллельны).

Имѣемъ

$$\text{На ось } x: N \cos \alpha + \int dm \cdot \omega^2 r \cdot \cos \varphi + S \cos \gamma = 0$$

$$\text{— } y: N \sin \alpha + \int dm \cdot \omega^2 r \cdot \sin \varphi - S \sin \gamma = 0,$$

гдѣ $\int$ берутся по всему объему маятника, а уголь α и углы φ для всѣхъ точекъ маятника считаются съ *положительнымъ* направлениемъ оси x .

Замѣняя $r \cos \varphi$ черезъ x , а $r \sin \varphi$ черезъ y получимъ

$$- N \cos \alpha = \omega^2 \int x dm + S \cos \gamma$$

$$- N \sin \alpha = - \omega^2 \int y dm + S \sin \gamma$$

но $\int x dm$ есть статическій моментъ маятника относительно оси y и равенъ $m\bar{x}$, гдѣ $\bar{x}$ координата его центра тяжести, и также $\int y dm = m\bar{y}$, такъ что

$$- N \cos \alpha = \omega^2 m\bar{x} + S \cos \gamma = - H$$

$$- N \sin \alpha = - \omega^2 m\bar{y} + S \sin \gamma = - V$$

гдѣ H и V горизонтальная и вертикальная слагающія давленія N . Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-\omega^2 m\bar{y} + S \sin \gamma}{\omega^2 m\bar{x} + S \cos \gamma}$$

и

$$\begin{aligned} N &= \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{(\omega^2 m\bar{x} + S \cos \gamma)^2 + (-\omega^2 m\bar{y} + S \sin \gamma)^2} = \\ &= \sqrt{\omega^4 m^2 \bar{r}^2 + S^2 + 2\omega^2 m S (\bar{x} \cos \gamma - \bar{y} \sin \gamma)}, \end{aligned} \quad (133),$$

гдѣ $\bar{r}$ — радиусъ вращенія центра тяжести маятника. Такъ какъ напередъ неизвѣстно, при какомъ положеніи маятника величина N будетъ наибольшая, то слѣдуетъ продѣлать вычисленіе для крайнихъ положеній маятника и для одного промежуточнаго.

По найденному наибольшему N надо разсчитать шарниръ на изгибъ и изнашиваніе. Обыкновенно N наибольшее при наибольшемъ отклоненіи маятника.

Что касается прочности самого маятника въ видѣ одной массы, или прочности ручки, если есть отдѣльный грузъ, то вообще это задача сложная, такъ какъ элементарныя нагрузки не параллельны и, слѣдовательно, маятникъ или ручка подвержена вытягиванію и изгибу вмѣстѣ, и ось маятника криволинейна, такъ что для цѣлага маятника надо рѣшать задачу приблизительно, допуская небольшое напряженіе. Для отдѣльнаго груза же, сидящаго на концѣ ручки задачу легко рѣшить, пренебрегши центробѣжной силой самой ручки. Опасное сѣченіе ручки будетъ въ точкѣ *P* прикрѣпленія пружины въ американскомъ регуляторѣ и у корня ея въ Прѣллевскомъ, и сгибающій моментъ отъ центробѣжной силы будетъ въ какомъ нибудь положеніи груза:

$$M_b = m\omega^2 r \cdot q$$

гдѣ *r* — радіусъ вращенія центра груза, а *q* — плечо его относительно опаснаго сѣченія (фиг. 36).

Здѣсь тоже нужно (удобно при помощи чертежа) найти величины ω , *r* и *q*, а слѣдовательно и *M_b*, для крайнихъ положеній и хотя для одного промежуточнаго и взять наибольшую величину *M_b*. Обыкновенно *M_b* будетъ maximum при наибольшемъ отклоненіи шара. По этому моменту надо ручку въ точкѣ *P* разсчитать на изломъ, принявъ въ разсчетъ ослабленіе ея шарниромъ *P*, если онъ не откованъ съ ней въ одно цѣлое и допустивъ умѣренное напряженіе, тѣмъ болѣе, что пренебрегли центробѣжной силой самой ручки.

Діаметры всѣхъ шарнировъ разсчитываются на изломъ или на срѣзъ, смотря по ихъ длинѣ, причемъ длина берется такъ, чтобы напряженіе изнашиванія не было велико. Хорошо ставить на шарнирахъ масленки, напр. штофферовскія.

Подробный разсчетъ главнѣйшихъ деталей будетъ данъ при разборѣ примѣровъ въ главѣ III.

Г Л А В А III.

Расчетъ строющагося регулятора. Конструкціи.

Прежде чѣмъ заняться примѣрами подробнаго расчета плоскихъ регуляторовъ главныхъ двухъ типовъ, считаемъ не безполезнымъ привести вкратцѣ теорію спиральной пружины, играющей такую важную роль въ нашемъ предметѣ; это тѣмъ болѣе не лишнее, что теорія пружинъ встрѣчается далеко не во всѣхъ руководствахъ по сопротивленію матеріаловъ.

Точная теорія пружинъ представляется весьма сложной. Сравнительно просто получаютъ результаты при помощи принципа „производной работы деформаціи“; въ такомъ духѣ изложена теорія пружинъ въ сочиненіи итальянскаго ученаго *Castigliano* (въ переводѣ на нѣмецкій языкъ озаглавлено „*Theorie der Biegings & Torsions-Federn, von A. Castigliano*“). Для обыкновенныхъ спиральныхъ пружинъ, съ малымъ шагомъ винтовой линіи, результаты точной теоріи немногимъ отличаются отъ результатовъ приближенной и мы здѣсь изложимъ приближенную теорію спиральной цилиндрической пружины.

Спиральная цилиндрическая пружина есть тѣло, которое получаемъ, изгибая круглую или квадратную проволоку такъ, что ось проволоки принимаетъ форму винтовой цилиндрической линіи постоянного шага. Пусть (фиг. 37) пружина закреплена однимъ концомъ въ точкѣ *A*, а къ другому концу *B* прикрѣплено плечо *BO*, простирающееся до оси цилиндра *O* пружины, и въ точкѣ *O* пружины нагружена силой *P*, дѣйствующей вдоль оси пружины (на фиг. для ясности чертежа взята пружина, состоящая лишь изъ одного неполнаго завитка), такъ что сила *P* по нашей фигурѣ проецируется точкой *O*. Пусть винтовая линія *AB* есть ось проволоки пружины, и радіусъ этой цилиндрической винтовой линіи назовемъ черезъ ρ .

Сдѣлаемъ нормальное сѣченіе пружины въ точкѣ *C* плоскостью, перпендикулярною къ оси проволоки и пусть меридіанная пло-

скость, проходящая через точку C , составляет угол ϕ с плоскостью OA ; теперь отнимем правую часть пружины замѣнивъ ея дѣйствіе частичными силами упругости. Если проволока круглая, то нормальное сѣченіе въ точкѣ C будетъ кругъ съ діаметромъ $=$ діаметру проволоки, а если проволока прямоугольнаго сѣченія, то сѣченіе въ точкѣ B будетъ прямоугольникъ, равный прямоугольному сѣченію употребленной проволоки *). Приложимъ въ C двѣ силы равныя P и прямо противоположныя, тогда мы получимъ въ точкѣ C силу P , наклоненную къ сѣченію подъ угломъ $= \alpha$, гдѣ α —уголъ наклона винтовой линіи и пару съ моментомъ $P\rho$ тоже составляющую съ сѣченіемъ уголъ α .

Силой P можно совсѣмъ пренебречь, а пару $P\rho$ слѣдовало бы разложить на сгибающую $P\rho \sin \alpha$ и крутящую $P\rho \cos \alpha$ и найти сложный моментъ, но въ виду незначительности угла α для простоты считаютъ моментъ сгибающей пары $= 0$, а крутящей $= P\rho$ и ведутъ расчетъ на крученіе. Неточность эта не важна при расчетѣ прочныхъ размѣровъ, гдѣ вся суть въ допускаемомъ напряженіи, но, конечно, измѣняетъ результаты относительно деформации пружины.

Для всякаго сѣченія, въ любомъ мѣстѣ любого завитка, получится тотъ же крутящій моментъ:

$$M_t = P\rho, \dots \quad (1)$$

слѣдовательно, для всякаго сѣченія пружины можно написать сейчасъ же извѣстное уравненіе крѣпости крученія бруса (предполагая, конечно, что это уравненіе, выводимое для бруса съ прямой осью, вѣрно для бруса съ осью искривленной).

Для круглаго сѣченія это уравненіе будетъ:

$$P\rho = \tau \frac{\pi \delta^3}{16} \dots \quad (2)$$

гдѣ:

δ — діаметръ проволоки пружины

τ — допускаемое напряженіе крученію (на поверхности проволоки). Для прямоугольнаго бруса со сторонами h и b , причемъ $h > b$, наибольшее напряженіе, какъ теперь выяснено опытами, подтвердившими теорію *S. Venant'a*, имѣетъ мѣсто на срединѣ

*) Это положеніе, конечно, приблизительно, ибо оно предполагаетъ, что при завиткѣ проволоки въ спираль, сѣченія ея, перпендикулярныя къ первоначальной прямой оси ея, остаются перпендикулярными и къ изогнутой въ винтовую линію оси.

большей стороны, т. е. въ *наиболѣе близкой къ оси бруса точкѣ*, и уравненіе *крѣпости* пишется такъ:

$$M_t = P\rho = \frac{2}{9} \tau b^3 h, \dots \quad (3)$$

а въ частности, для квадратнаго сѣченія пружины, какъ *наиболѣе употребительнаго въ плоскихъ регуляторахъ*:

$$M_t = P\rho = \frac{2}{9} \tau b^3 \dots \quad (4)$$

гдѣ b сторона квадрата. Буква τ и здѣсь обозначаетъ допускаемое напряженіе крученію (сдвигу). По уравненію (3) и (4) можно разсчитать прочные размѣры пружины. Напряженіе τ для стальныхъ пружинъ берется обыкновенно отъ 30 до 40 $kg.$ на $\square$ $mm.$, смотря по степени закалки.

Теперь опредѣлимъ деформацію пружины. Примемъ, что точка O все время остается на оси цилиндра и проведемъ сѣченіе въ точкѣ C' , на безконечно маломъ разстояніи ds отъ C , считая его по оси проволоки, такъ что уголъ двухъ меридіанныхъ плоскостей въ точкахъ C и C' будетъ:

$$d\varphi = \frac{ds \cos \alpha}{\rho}$$

или полагая

$$\cos \alpha = 1,$$

$$ds = \rho d\varphi.$$

Если безконечно малую часть ds проволоки принять за прямой брусь съ круглымъ сѣченіемъ діаметра δ или прямоугольнымъ со сторонами b и h , подверженный дѣйствию крутящаго момента $P\rho$, то уголъ закручиванія его на единицъ длины можно опредѣлить по извѣстнымъ формуламъ сопротивленія матеріаловъ. Для круглаго сѣченія проволоки

$$\theta = \frac{32}{\pi} \cdot \frac{P\rho}{G\delta^4} \dots \quad (5)$$

гдѣ G —коэффициентъ поперечной упругости, а для прямоугольнаго сѣченія со сторонами b и h , гдѣ $h > b$:

$$\theta = 3,6 \frac{b^3 + h^3}{Gb^3 h^3} P\rho \dots (6) \quad (h > b)$$

Уголъ, на который закрутится элементъ ds будетъ θds , а слѣдовательно, точка приложеніи силы P вслѣдствіе закручиванія элемента ds опишетъ дугу (принимаемъ ее за хорду, совпадающую съ осью цилиндра)

$$\rho \theta ds = \theta \rho^2 d\varphi.$$

Полное перемѣщеніе точки O приложенія силы будетъ:

$$\lambda = \theta \rho^2 \int d\varphi,$$

гдѣ интеграль берется по всей длинѣ пружины.

Но

$$\int d\varphi = 2\pi n,$$

гдѣ n число завитковъ пружины (цѣлое или дробное, все равно) такъ что:

$$\lambda = 2\pi n \theta \rho^2,$$

а замѣняя θ его значеніемъ, находимъ полное осевое удлиненіе пружины λ въ видѣ:

1) для круглаго сѣченія діаметра δ :

$$\lambda = \frac{64n P \rho^3}{G \delta^4} \dots \quad (7).$$

2) для прямоугольнаго со сторонами b и h ($h > b$):

$$\lambda = \frac{7,2\pi n P \rho^3}{G} \cdot \frac{b^2 + h^2}{b^3 h^3} \dots \quad (8),$$

а въ частности для квадрата со сторонами b :

$$\lambda = \frac{7,2\pi n P \rho^3}{G} \cdot \frac{2b^2}{b^6} = \frac{14,4\pi n P \rho^3}{Gb^4} \dots \quad (9).$$

Уравненія (2), (4), (7), (9) и представляютъ обычныя формулы, по которымъ производится расчетъ пружинъ.

Теперь переходимъ къ разсмотрѣнію примѣровъ расчета исполненныхъ регуляторовъ.

1) Регуляторъ Pröll'a.

Въ журналѣ *Civilingenieur* за 1886 г. имѣется статья Pröll'a, представляющая, насколько мнѣ извѣстно, первую попытку дать

теорію плоскаго регулятора. Здѣсь приводится вкратцѣ и примѣръ расчета одного изъ исполненныхъ регуляторовъ.

Прежде чѣмъ заняться расчетомъ регулятора Pröll'a, опишемъ подробнѣе его устройство, представляющее типичнымъ для многихъ послѣдующихъ системъ. Регуляторъ Pröll'a изображенъ на фиг. (38). Въ немъ два маятника, помѣщенные симметрично относительно вала машины. Каждый маятникъ состоитъ изъ шара P , надѣтаго на ручку a прямоугольнаго сѣченія. Ручки съ шаромъ сидятъ наглухо на валикахъ W , W , пропущенныхъ сквозь отверстія въ спицахъ маховика, служація имъ какъ бы вкладышами. По другую сторону спицъ на валики W , W надѣты накрѣпко кривошипники k , k , отъ которыхъ идутъ шатуны h , h къ поворотному эксцентрику E_0 . Кроме того, ручки a , a продолжаютъ еще за валики W , W въ видѣ кривошипниковъ C , C , концы которыхъ имѣютъ полукруглые вырѣзы, опирающіеся на шипы, придѣланные къ крышкамъ или тарелкамъ p , p , между которыми сжимается пружина F . Крышки p , p направляются круглой штангой e , e , по которой онѣ скользятъ. Пружина съ крышками и штангой заключена въ трубку H , имѣющую ось вращения въ центрѣ вала регулятора, такъ что точка оси пружины, лежащая на геометрической оси вала регулятора, неподвижна и, слѣдовательно, какъ бы имѣются двѣ пружины, надѣтые концами на ось вращения регулятора и имѣющія оси спиралей совпадающими. Гайки на концахъ штанги e служатъ для приданія пружинѣ необходимаго начальнаго сжатія. Винты v , v ограничиваютъ размахъ шаровъ во внутрь. На нихъ опираются шары, когда машина не вращается.

Особенность регулятора представляютъ шарики Q , Q , сидящіе на короткихъ ручкахъ b , b . Цѣль ихъ—дозволить измѣнять по желанію (въ извѣстныхъ, конечно, предѣлахъ) степень изохронизма регулятора, увеличивая или уменьшая ее.

Если установить обѣ ручки b , обративъ ихъ шаромъ наружу, къ окружности, такъ, чтобы при среднемъ отклоненіи маятника ось каждой ручки совпала съ радіусомъ OW , проходящимъ черезъ центръ валика W , A , слѣдовательно, въ крайнихъ положеніяхъ ручки b отклонялись бы отъ этого радіуса вправо и влѣво на тотъ же уголъ, какъ показано на фиг. 38, то при движеніи шара P отъ внутренняго положенія до средняго моментъ центробѣжной силы груза Q и ручки b будетъ помогать шару P , и, слѣдовательно, потребуются меньшія угловыя скорости вращения; а при движеніи шара P изъ средняго къ наибольшему отклоненію моментъ груза Q и ручки b будетъ противодѣйствовать моменту груза P

и, слѣдовательно, потребуются большія угловыя скорости вращенія. Поэтому, степень изохронизма и степень неравномѣрности увеличатся и тѣмъ болѣе, чѣмъ далѣе отъ W грузъ Q помѣщенъ на ручкѣ b .

Если же ручку съ шарами Q повернуть грузомъ къ центру регулятора, т. е. прямо противоположно начерченному положенію, то въ первой половинѣ отклоненія ея грузъ будетъ мѣшать грузу P ; а во второй помогать, и, слѣдовательно, степень изохронизма уменьшится. Такимъ образомъ, мы имѣемъ возможность измѣнять степень изохронизма регулятора и опытомъ установить наиболѣе удобную величину ея, исправляя этимъ всѣ неточности, встрѣчающіяся при расчетѣ.

О конструкціи эксцентриковъ скажемъ въ слѣдующей главѣ, а теперь перейдемъ къ расчету описаннаго регулятора, изображеннаго на фиг. (38) въ $\frac{1}{5}$ отъ натуры.

Нѣкоторая особенность изложенія Pröll'a состоитъ въ введеніи вспомогательной величины x (по его обозначенію), что при его центральной пружинѣ очень удобно для обобщенія и упрощенія формулъ, ибо плечо натяженія пружины сокращается изъ ур—ий. Такъ какъ переходъ отъ принятаго нами способа вычисленія момента центробѣжной силы къ Преллевскому чрезвычайно легокъ, то мы, ради исторической полноты, придержимся его способа разсмотрѣнія, который сейчасъ и изложимъ.

Если имѣемъ тѣло произвольной формы (фиг. 39), прикрѣпленное на шарнирѣ O къ диску, вращающемуся вокругъ центра C , то моментъ всѣхъ центробѣжныхъ силъ частицъ тѣла вокругъ O равенъ, по нашей теоремѣ, моменту центробѣжной силы всей массы тѣла, сосредоточенной въ центрѣ тяжести A тѣла, такъ что:

$$M_c = m\omega^2 \cdot Rp.$$

Но очевидно:

$$Rp = \Delta q,$$

гдѣ Δ — разстояніе между O и C , а q — перпендикуляръ на него изъ центра тяжести A . Далѣе, если SS есть положеніе оси пружины въ данный моментъ, то проведя AB параллельно CO до пересѣченія съ SS въ B и назвавъ отрѣзокъ CB черезъ z (у Pröll'a x), очевидно, имѣемъ:

$$\text{площадь } \triangle BOC = \text{площади } \triangle AOC$$

или

$$zh = \Delta q,$$

такъ что уравненіе равновѣсія тѣла подѣ дѣйствию центробѣжной силы и натяженія пружины

$$m\omega^2\Delta q = Sh,$$

можно написать въ видѣ

$$m\omega^2 z = S \dots \quad (10)$$

въ какомъ Pröll и употребляетъ его *).

Если мысленно разложимъ тѣло на нѣсколько частей, имѣющихъ общій центръ вращенія O и для каждой части назовемъ черезъ μ массу, а черезъ ξ — величину отрѣзка z для центра тяжести этой массы, полученнаго какъ сказано выше, то, очевидно:

$$mz = \sum \mu \xi \dots \quad (11)$$

и уравненіе (10) напишется въ видѣ:

$$\omega^2 \sum \mu \xi = S; \dots \quad (12)$$

по этому уравненію удобно разсчитывать регуляторъ, если извѣстны вѣса отдѣльныхъ частей маятника и ихъ центры тяжести.

Pröll дѣлаетъ ошибку, причисляя къ этимъ массамъ и всю массу шатуна, соединяющаго эксцентрикъ съ маятникомъ (вліяніе этого шатуна было разобрано нами раньше). Это невѣрно, ибо шатунъ вращается не вокругъ центра O , а вокругъ своего мгновеннаго центра въ каждый данный моментъ, между тѣмъ какъ Pröll вычисляетъ его вліяніе такъ, какъ будто онъ просто свободно вращается вокругъ центра O ; въ дѣйствительности шатунъ лежитъ въ двухъ опорахъ, и слагающая центробѣжной силы его центра тяжести, перпендикулярная къ нему только отчасти (если онъ симметриченъ относительно середины длины то наполовину) передается маятнику, и только долевая слагающая можетъ считаться пѣликомъ дѣйствующей на маятникъ. Погрѣшность эту (хотя и весьма незначительную) мы исправимъ, продѣлывая примѣръ. Что касается арматуры пружины: тарелки, гаекъ и шарнира, то, благодаря тому, что эти части двигаются по радіусу, вся ихъ центробѣжная сила передается на кривошипъ пружины, и по-этому вліяніе ихъ можетъ быть найдено совершенно точно и написано въ Преллевской формѣ, ибо для нихъ ξ и будетъ радіусомъ вращенія ихъ.

*) Этимъ мы какъ бы приводимъ массу груза къ оси пружины, такъ что получается какъ бы идеальный регуляторъ съ грузомъ, двигающимся по радіусу.

Далѣе, вліяніе центробѣжной силы пружины Pröll вычисляетъ, какъ уже упоминалось, совершенно невѣрно; но, ради исторической полноты, приводимъ его способъ. Онъ считаетъ пружину состоящей какъ бы изъ $2i$ замкнутыхъ плоскихъ колецъ, гдѣ $2i$ —число завитковъ *всей* пружины.

Пусть длина половины пружины L ; на ней помѣщаются i завитковъ (колецъ); разстояніе между двумя смежными кольцами будетъ $\frac{L}{i}$. Возьмемъ элементъ массы dm какого нибудь кольца,

по счету k отъ центра C , и соединимъ его съ центромъ вращенія C радіусомъ r_k . Центробѣжная сила его $dm \omega^2 r_k$ [можетъ быть разложена на двѣ, одну параллельную оси пружины и другую перпендикулярную къ ней. По симметріи пружины, по другую сторону оси ея всегда найдется другая симметричная масса, и, слѣдовательно, слагающія ихъ перпендикулярныя къ оси пружины взаимно уравниваются, не оказывая вліянія на вращеніе маятника, а осевыя слагающія будутъ растягивать пружины и, слѣдовательно, дадутъ извѣстный моментъ вокругъ оси O . Суммируемъ элементарныя осевыя слагающія центробѣжныхъ силъ для одного кольца при постоянномъ r'_k для центра тяжести одного кольца; назовавъ его массу черезъ m , имѣемъ для всего кольца силу:

$$m \omega^2 r'_k.$$

а для всѣхъ колецъ одной половины пружины

$$\sum_{k=1}^{k=i} m \omega^2 r'_k = m \omega^2 \sum_{k=1}^{k=i} r'_k$$

Но

$$r'_k = \frac{L}{i} k,$$

такъ что :

$$m \omega^2 \sum_{k=1}^{k=i} r'_k = m \omega^2 \frac{L}{i} \sum_{k=1}^{k=i} k =$$

$$\frac{m \omega^2 L}{i} (1 + 2 + \dots + i) = m \omega^2 L \frac{i + 1}{2}.$$

Моментъ этой силы вокругъ оси O будетъ по Pröll'y:

$$m \omega^2 L \frac{i+1}{2} \times h,$$

ибо онъ считаетъ всю эту силу передающейся лишь на конецъ пружины, надѣтой на шарниръ маятника. Мы уже видѣли, что это совершенно невѣрно и исправили эту ошибку.

Если площадь сѣченія проволоки пружины есть f (при круглой $f = \frac{\pi d^2}{4}$, при квадратной $f = b^2$) γ — плотность матеріала пружины, а g — ускореніе силы тяжести, то

$$m = \frac{2 \pi \rho f}{g} \cdot \gamma$$

Послѣ этихъ замѣчаній перейдемъ къ разбору примѣра провѣрки существующаго регулятора Pröll'a.

Требовалось устроить регуляторъ для машины при среднемъ числѣ оборотовъ $n = 180$ въ минуту. Степень неравномѣрности δ требовалась 0,04 или 4%, такъ что въ крайнихъ положеніяхъ маятника регулятора машина должна дѣлать

$$\text{minimum } n_2 = 180 (1 - 0,02) = 176,4 \text{ обор.}$$

$$\text{maximum } n_1 = 180 (1 + 0,02) = 183,6 \text{ обор.}$$

Принято (въ исполненномъ регуляторѣ):

$$\overline{CO} = \Delta = 200 \text{ }^m/m$$

$$\overline{CM} = 400 \text{ }^m/m$$

Уголъ SOM для внутренняго положенія шара = 44° .

Полный уголъ размаха шара = 38° .

Радіусъ пружины (т. е. радіусъ того цилиндра, на поверхности котораго лежитъ винтовая ось пружины) принять:

$$\rho = 38 \text{ }^m/m$$

Сторона квадратнаго сѣченія пружины:

$$b = 8,6 \text{ }^m/m$$

Число завитковъ всей пружины:

$$2i = 24.$$

Длина пружины при крайнемъ внутреннемъ положеніи маятника между концами оси ея:

$$2L = 380 \text{ }^m/m.$$

Уравнение равновѣсія маятника, если принять въ расчетъ центробѣжныя силы всѣхъ частей по методу Прёлля и вліяніе центробѣжной силы пружины будетъ:

$$m_0 \omega^2 zh + \omega^2 h \cdot \Sigma \mu \xi - m \omega^2 L \frac{i + 1}{2} h - Sh = 0 \dots \quad (13)$$

при чемъ во второмъ членѣ: $h \Sigma \mu \xi$, массы, дающія моментъ въ томъ же направленіи, какъ и самъ шаръ, берутся со знакомъ $+$, а въ обратномъ со знакомъ $-$.

По этому уравненію и можно найти массу m_0 шара. Чтобы видѣть, какія ошибки въ вѣсѣ шара причиняетъ невѣрное вычисленіе вліянія шатуна и вліянія пружины порознь, мы сперва вычислимъ вѣсъ шара, исправивъ лишь вліяніе шатуна, но удержавъ вычисленіе вліянія пружины по Pröll'у; затѣмъ исправимъ уже и вліяніе пружины и найдемъ точный вѣсъ шара.

И такъ, примемъ на основаніи доказаннаго раньше, что *половина* массы шатуна сосредоточена въ точкѣ его привѣса къ маятнику, (Pröll беретъ всю массу), а вліяніе пружины пока вычислимъ по Pröll'у.

Разсмотримъ внутреннее положеніе маятника.

Изъ чертежа положенія частей регулятора при крайнемъ внутреннемъ положеніи шара и всего маятника Pröll получилъ:

$$s = 824 \text{ }^m/m; \xi = 392 \text{ }^m/m; \xi' = 103 \text{ }^m/m; \xi'' = 198 \text{ }^m/m;$$

$$\xi''' = 240 \text{ }^m/m; \xi'''' = 285 \text{ }^m/m;$$

$$Q = 079 \text{ kg}; Q' = 0,271 \text{ kg}; Q'' = 1 \text{ kg};$$

$$Q''' = 0,4 \text{ kg}; Q'''' = 0,12 \text{ kg},$$

гдѣ :

Q — вѣсъ ручки a шара,

Q' — вѣсъ кривошипа c , дѣйствующаго на пружину,

Q'' — вѣсъ тарелки, закрывающей пружину, на которую опирается сказанный кривошипъ, и ея деталей.

Q''' — вѣсъ плеча k , за который хватается шатунъ h ,

Q'''' — вѣсъ шатуна h .

$\xi, \xi', \xi'', \xi''', \xi''''$ соотвѣтствующіе отрѣзки, значеніе коихъ указано выше. Для вѣса Q отрѣзокъ ξ'' будетъ прямо радіусъ вращенія.

Далѣе, пусть желаемъ, чтобы сила одной половинки регулятора W , отнесенная къ оси пружинъ, была 6 kg при степени нечув-

ствительности $\epsilon = 0,05$ при внутреннемъ положеніи шара. Тогда изъ уравненія

$$\frac{W}{\epsilon} = S$$

находимъ

$$S = \frac{6}{0,05} = 120 \text{ kg.}$$

Это и есть сила сжатія пружины при внутреннемъ крайнемъ положеніи шара.

Теперь пишемъ уравненіе (13), сокративъ его на h и помноживъ его на ускореніе тяжести g , такъ что вмѣсто массъ войдутъ вѣса; предварительно вычислимъ отдѣльно различныя величины, въ него входящія.

При $n_2 = 176,4$ оборот. $\omega = 18,47$.

Принимая удѣльный вѣсъ стали $= 7,8$, находимъ (для 1 куб. м^3)

$$\gamma = 0,0000078 \text{ kg,}$$

и

$$m = \frac{2 \pi r f \gamma}{g} = \frac{2\pi \cdot 38,86^2 \cdot 0,0000078}{9810}$$

откуда вѣсъ одного кольца

$$mg = 0,138 \text{ kg,}$$

а членъ

$$mg \omega^2 L \frac{i+1}{2} = \omega^2 \cdot 143,1.$$

Теперь пишемъ уравненіе (13).

$$18,47^2 \left\{ G824 + 0,79 \times 892 - 0,271 \times 103 - 1 \times 198 - 0,4 \times 240 - \right.$$

$$\left. \frac{0,12}{2} \times 285 - 143,1 \right\} = 120 \times 9810, \dots \quad (14)$$

откуда находимъ:

$$18,47^2 \left\{ G \times 824 - 172,433 \right\} = 120 \times 9810$$

и

$$G = \frac{120 \cdot 9810}{18,47^2 \cdot 824} + \frac{172,433}{824} = 4,19 + 0,210 = 4,4 \text{ kg} \dots (15)$$

Мы исправили зѣсь только вліяніе шатуна и получили вѣсъ $= 4,4 \text{ kg}$.

У Прелля, вслѣдствіе принятія всего шатуна, второе слагаемое вмѣсто 0,210 выходитъ 0,23 и $G = 4,42 \text{ kg}$.

Такимъ образомъ, вслѣдствіе неправильнаго принятія въ расчетъ массы шатуна шаръ у Pröll вышелъ на $4,42 - 4,4 = 0,02 \text{ kg}$ тяжелѣе.

Посмотримъ теперь, что получится, если исправить еще и его ошибку относительно пружины.

По нашему, давленіе пружины на кривошипъ c будетъ равно:

$$\frac{M\omega^2 L}{3}$$

гдѣ M вся масса пружины; но

$$M = i \sqrt{(2\pi p)^2 + h^2} \times f \cdot \gamma \cdot \frac{1}{g},$$

гдѣ h — шагъ винтовой линіи, равный во внутреннемъ положеніи $13,33 \text{ м}$.

Вѣсъ одного завитка (разсматриваемаго не какъ кольцо, а точно, какъ спираль) будетъ

$$\sqrt{(2\pi p)^2 + h^2} \cdot f \cdot \gamma = \sqrt{(2\pi \cdot 38)^2 + 13,33^2} \times 8,6^2 \times 0,0000078 = 0,138 \text{ kg},$$

а всей половины пружины:

$$Mg = 12 \cdot 0,138 = 1,656 \text{ kg}.$$

Треть массы будетъ $\frac{1,656}{3 \cdot 9810}$, а давленіе на кривошипъ c :

$$\frac{1,656}{3 \cdot 9810} \cdot 18,47^2 \cdot 160$$

Если умножимъ это выраженіе на $g = 9810$ и раздѣлимъ на $18,47^2$, то найдемъ величину, которой надо замѣнить Преллевскую 143,1 въ формулѣ (14); получимъ 88,28. Истинный вѣсъ шара будетъ

$$G = 4,19 + \frac{115,6}{824} = 4,19 + 0,14 = 4,33 \text{ kg} \dots (15 \text{ bis}).$$

Слѣдовательно, благодаря невѣрному принятію въ расчетъ вліянія шатуна и пружины, шаръ у Прелля тяжелѣе истиннаго на $4,42 - 4,33 = 0,09 \text{ kg}$ или почти на 2% . Въ дальнѣйшемъ будемъ

вести расчетъ уже точно, принимая вліяніе шатуна и пружины такъ, какъ вывели раньше.

Изъ формулы (15 bis) видно вліяніе различныхъ частей на вѣсъ шара. Если бы пренебрегли этими частями, то получили бы $G = 4,19$, т.-е. сдѣлали бы ошибку на 3,3%.

Изъ состава формулы (15), а еще лучше изъ уравненія (13), написавши его въ видѣ

$$m_0 g = G = \frac{Sg}{\omega^2 z} + \frac{\Sigma \mu \xi + mL \frac{i+1}{2}}{z}, \quad (16)$$

усматриваемъ слѣдующее важное заключеніе.

Вѣсъ шара выражается суммою двухъ членовъ. Первый членъ зависитъ отъ силы сжатія пружины S и отъ угловой скорости. Второй членъ зависитъ отъ массы всѣхъ прочихъ подвижныхъ частей маятника и не зависитъ отъ угловой скорости. Чѣмъ больше угловая скорость при всѣхъ прочихъ равныхъ величинахъ, тѣмъ меньше будетъ первый членъ при неизмѣнной величинѣ втораго и тѣмъ больше будетъ ошибка, которую сдѣлаемъ, если, пренебрегая массой всѣхъ прочихъ частей, примемъ вѣсъ шара равнымъ только первому члену. Величина этой ошибки въ процентахъ истинной величины выразится такъ:

$$\eta = 100 \cdot \frac{\Sigma \mu \xi + mL \frac{i+1}{2}}{\frac{Sg}{\omega^2} + \Sigma \mu \xi + mL \frac{i+1}{2}} = 100 \frac{1}{1 + \frac{Sg}{\omega^2 \left\{ \Sigma \mu \xi + mL \frac{i+1}{2} \right\}}}, \quad (17)$$

откуда ясно видно, что съ увеличеніемъ ω величина η тоже возрастаетъ, приближаясь къ единицѣ.

Такъ, если бы нашъ регуляторъ, при прочихъ неизмѣнныхъ величинахъ, сталъ бы дѣлать вмѣсто 180 вдвое болѣе, т.-е. 360 оборотовъ, то величина G была бы:

$$G = \frac{4,19}{4} + 0,14 = 1,048 + 0,14 = 1,188$$

и здѣсь ошибка отъ пренебреженія вторымъ членомъ была бы:

$$\eta = \frac{100 \cdot 0,14}{1,188} = \text{почти } 12\%$$

Какъ видимъ, при значительномъ числѣ оборотовъ пренебре-

гать массами подвижныхъ частей никакимъ образомъ нельзя, ибо, сдѣлавши это, мы дадимъ машинѣ совсѣмъ не то число оборотовъ, какое предполагали при разсчетѣ. Иногда ошибка доходить до 30 и болѣе процентовъ.

Чтобы узнать теперь, какова будетъ сила сжатія пружины въ другомъ крайнемъ положеніи регулятора, когда маятникъ отклонится на уголъ 38° , чертимъ всѣ части регулятора въ новомъ положеніи. При этомъ оказывается, что пружина укоротилась на $94^m/m$, такъ что для новаго положенія $L_1 = 160 - 47 = 113^m/m$. Изъ того же чертежа находимъ для крайняго вѣшняго положенія:

$$z = 1146^m/m; \xi_1 = 546^m/m; \xi'_1 = 120^m/m; \xi''_1 = 151^m/m;$$

$$\xi_1''' = 218^m/m; \xi_1'''' = 258^m/m;$$

$$\omega_1 = 19, 226,$$

и подставляя эти величины въ уравненіе (13), получимъ (помноживъ на $g = 9810^m/m$ и раздѣливъ на h):

$$\frac{19,226^2}{9810} \left\{ 4,33 \times 1146 + 0,79 \times 546 - 0,271 \times 120 - 1 \times 151 - \right. \\ \left. - 0,4 \times 218 - 0,06 \times 258 - 62,38 \right\} = S_1,$$

или, продолжавъ вычисленія:

$$S_1 = 190 \text{ kg (у Прелля 192).}$$

Такъ-какъ сила сжатія пружины пропорціональна укороченію, то средней длинѣ пружины, т.-е.:

$$2L = \frac{320 + 226}{2} = \frac{546}{2} = 273^m/m,$$

соотвѣтствуетъ сила сжатія ея:

$$S = \frac{120 + 190}{2} = 155 \text{ kg. (У Прелля 156).}$$

При этомъ шаръ будетъ почти на срединѣ своей дуги размаха и теперь посмотримъ, насколько близко къ истинѣ допущеніе, дѣлаемое обыкновенно, именно, что при среднемъ положеніи шара получится и среднее или нормальное число оборотовъ.

Измѣряя величины z и ξ для этого положенія на чертежѣ, находимъ:

$$z = 993^m/m; \quad \varepsilon = 472^m/m; \quad \varepsilon' = 111^m/m \quad \varepsilon'' = 175^m/m; \quad \varepsilon''' = 230^m/m \\ \varepsilon'''' = 280^m/m.$$

Пишемъ уравненіе (13), помноженное на $\frac{G}{h}$.

$$\frac{\omega^2}{9810} \left\{ 4,33 \times 993 + 0,79 \times 472 - 0,271 \times 111 - 1 \times 175 - 0,4 \times 230 - \right. \\ \left. - 0,06 \times 280 - 75,35 \right\} = 155,$$

откуда:

$$\omega = 18,9$$

и

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = 180,5.$$

Теперь провѣримъ пружину по наибольшей силѣ $S_1 = 190 \text{ kg}$. По формулѣ (4) находимъ.

$$\tau = \frac{190 \times 38 \times 9}{2 \times 8,6^3} = \infty 51 \text{ kg на } \square^m/m.$$

Цифра эта нѣсколько высока. При среднемъ положеніи напряженіе будетъ:

$$\tau = \frac{155 \times 38 \times 9}{2 \times 8,6^3} = \infty 42 \text{ kg на } \square^m/m.$$

Провѣримъ теперь, дѣйствительно ли пружина такихъ размѣровъ, какіе ей даны, способна, при укороченіи каждой половинки ея на $47^m/m$, развить вмѣсто начальной силы 120 kg силу сжатія въ 192 kg , какую принимала Pröll.

Если λ укороченіе половины пружины противъ нормальнаго состоянія, съ которымъ пружина заложена въ регуляторъ при сборкѣ, когда шаръ находится въ крайнемъ внутреннемъ положеніи, то должны имѣть:

$$\frac{\lambda}{\lambda + 47} = \frac{120}{192}$$

откуда находимъ требуемое λ :

$$\lambda = 79,7^m/m.$$

Посмотримъ, дѣйствительно ли каждая половина пружины при силѣ сжатія въ 120 kg сожмется на $79,7^m/m$?

По формулѣ (9) имѣемъ

$$\lambda = \frac{14,4 \pi \cdot 12 \cdot 120 \cdot 38^3}{8400 \times 8,6^4} = 78,6 \text{ } m/m.$$

Этотъ результатъ, конечно, приближителенъ, потому что величина коэффициента упругости $G = 8400$ принята нами средняя, ибо неизвѣстно, какова она для пружинъ Pröll'a. При серьезныхъ постройкахъ машинъ необходимо *узнать опытомъ* величину G для пружинъ того завода, откуда онѣ будутъ выписаны и требовать *постоянства* разъ принятаго сорта стали, повѣряя его по временамъ опытами. При такихъ условіяхъ мы будемъ обладать всегда вполне вѣрной величиной G для расчета удлиненій и укороченій по формулѣ (9), или даже прямо знать изъ опыта величину $\frac{\lambda}{S}$ для пружины данныхъ размѣровъ; для пружины Pröll, очевидно, величина G была

$$G = 8400 \cdot \frac{78,6}{79,7} = 8315 \text{ } kg \text{ на } \square \text{ } m/m.$$

Этимъ заканчиваемъ разборъ 1-го примѣра.

Теперь перейдемъ къ самому важному для конструктора вопросу: какъ рассчитать плоскій регуляторъ такъ, чтобы получить данную степень неравномѣрности Δ , если нѣтъ подъ рукой никакого образца или примѣра. Этого вопроса, несмотря на его огромную важность, совершенно не касается Pröll, дающій лишь какъ бы *повторный* расчетъ своего регулятора, но готовымъ уже размѣрамъ, не указывая, какъ онъ дошелъ до принятія этихъ размѣровъ и какъ ихъ выбирать. Между тѣмъ, при точномъ расчетѣ, когда необходимо принять во вниманіе вліяніе всѣхъ частей регулятора — самого груза, его ручки, кривошиповъ пружины и шатуна, ведущаго къ эксцентрику пружины, ея арматуры и когда пренебреженіе какой нибудь одной изъ этихъ частей можетъ повести иногда къ созданію неустойчиваго регулятора, задача представляется довольно трудной и является, естественно, затрудненіе: съ чего начать, чѣмъ задаться? При неудачномъ выборѣ можетъ случиться, что то, чѣмъ задались, зависить отъ того, что ищется и тогда все надо переделывать сначала!

Мы предлагаемъ теперь пріемъ, выработанный нами для этого расчета, который прямо и быстро ведетъ къ конечной цѣли: опредѣленію вѣса груза и позволить, можетъ быть, многимъ конструкторамъ обойти блужданіе среди массы утомительныхъ вы-

числений, которые пришлось продѣлать и намъ, пока не выяснился названный приемъ.

Пусть намъ заданы: полная степень неравномѣрности Δ будущего регулятора, сила его $2W$ (такъ что на одинъ маятникъ приходится сила W) и средняя угловая скорость ω_n или, все равно, среднее число оборотовъ n .

Задаемся прежде всего степенью нечувствительности ϵ_2 во внутреннемъ крайнемъ положеніи; здѣсь она будетъ наибольшая; обыкновенно берутъ

$$\epsilon_2 = \text{отъ } 0,03 \text{ до } 0,04,$$

(предполагая W постояннымъ).

По ϵ_2 находимъ натяженіе S_2 пружины во внутреннемъ крайнемъ положеніи, которое равно энергіи:

$$S_2 = E_2 = \frac{W}{\epsilon_2} \dots \quad (18)$$

Теперь задаемся отношеніемъ μ наибольшаго натяженія S_1 къ наименьшему S_2 , которое уже извѣстно, такъ что:

$$\frac{S_1}{S_2} = \mu$$

и

$$S_1 = S_2 \mu \dots \quad (19).$$

Величина μ берется обыкновенно отъ 1,5 до 4-хъ, такъ что:

$$\mu = 1,5 \text{ до } 4 \dots \quad (20).$$

Изъ уравненія:

$$S_1 = E_1 = \frac{W}{\epsilon_1} \dots \quad (21)$$

находимъ наименьшую степень нечувствительности ϵ_1 , при крайнемъ вѣтшнемъ отклоненіи:

$$\epsilon_1 = \frac{S_1}{W},$$

и полагаемъ приблизительно среднюю степень нечувствительности ϵ_n равной среднему арифметическому крайнихъ:

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \dots \quad (22)$$

и теперь изъ уравненія

$$\delta = \Delta - \epsilon_n \dots \quad (23)$$

находимъ степень неравномѣрности δ ненагруженного регулятора, по которой и будемъ разсчитывать его какъ не нагруженный.

Выбираемъ теперь изъ конструктивныхъ соображеній (напримѣръ въ зависимости отъ размѣровъ маховика, если они уже опредѣлены, или отъ стѣсненности пространства, какъ въ машинѣ Вестингауза и пр.) разстояніе оси качанія маятника отъ центра вращенія регулятора, затѣмъ задаемся полнымъ угломъ размаха маятника; выбираемъ точку прикрѣпленія пружины къ маятнику и назначаемъ положеніе ея оси при крайнемъ внутреннемъ положеніи маятника.

Теперь по наибольшей силѣ вдоль пружины S_1 разсчитываемъ ея прочные размѣры, задаемся радіусомъ ея ρ , находимъ размѣръ ея круглаго или квадратнаго сѣченія изъ уравненія крѣпости пружины (2) или (4). Задаемся полнымъ укороченіемъ или удлинненіемъ пружины λ при переходѣ маятника изъ одного крайняго положенія въ другое и по немъ, зная размѣры пружины, находимъ число ея завитковъ изъ ур. (7) или (9), а принявъ извѣстный шагъ пружины въ крайнемъ внутреннемъ положеніи, находимъ ея длину при этомъ положеніи и смотримъ, удобна ли она для конструирования; если нѣтъ, то перевыбираемъ λ (а иногда, если потребуется, то и величину ρ и даже μ).

Далѣе, если λ_0 начальное укороченіе или удлинненіе пружины при закладкѣ въ регуляторъ, то изъ уравненія:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda} = \frac{S_2}{S_1} \dots \quad (24)$$

находимъ λ_0 , а слѣдовательно, можемъ найти и шагъ пружины въ естественномъ состояніи, который и даемъ при заказѣ пружины.

Зная теперь длину полезной части пружины при внутреннемъ крайнемъ положеніи маятника, мы можемъ вычертить ее въ этомъ положеніи со всѣми ея деталями: тарелкой и пр., если она сжимается, или винтомъ съ вилкой и пр., если она растягивается, и такимъ образомъ — опредѣлить положеніе на дискѣ второй точки привѣса пружины.

Имѣя эту точку, мы теперь можемъ начертить положеніе пружины для любого отклоненія маятника. Начертивъ это положеніе для крайняго внѣшняго отклоненія маятника, находимъ изъ чертежей перпендикуляры p_2 и p_1 , опущенные изъ центра вращенія

маятника на ось пружины для крайнихъ ея положеній, т. е. плечи силъ S_1 и S_2 вокругъ оси вращенія маятника.

Теперь опредѣляемъ вѣса всѣхъ частей арматуры пружины, двигающихся вдоль ея оси и положенія ихъ центровъ тяжести для двухъ крайнихъ положеній пружины, а затѣмъ ихъ центробѣжныя силы для этихъ двухъ положеній, которымъ соответствуютъ угловые скорости

$$\omega_n \left(1 - \frac{\delta}{2} \right)$$

и

$$\omega_n \left(1 + \frac{\delta}{2} \right).$$

Затѣмъ находимъ часть центробѣжной силы самой пружины, причитающуюся на шарниръ, соединяющій ее съ ручкой. Пусть эти части будутъ для крайнихъ положеній P_2 и P_1 , а центробѣжныя силы арматуры Z_2 и Z_1 . Тогда полный моментъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ по оси пружины на кривошипъ маятника для обоихъ крайнихъ положеній выразится такъ:

$$M_2 = [S_2 \pm (Z_2 + P_2)] p_2$$

$$M_1 = [S_1 \pm (Z_1 + P_1)] p_1.$$

Теперь всѣ элементы, касающіеся пружины, приняты во вниманіе и остается заняться еще однимъ только маятникомъ.

Если черезъ m назовемъ всю массу маятника, состоящую изъ массъ отдѣльныхъ его частей (собственно груза, ручки его, кривошипа, за который хватается пружина, кривошипа, за который хватается шатунъ, ведущій къ эксцентрику, часть массы этого шатуна), а черезъ x_2, y_2, x_1, y_1 разстоянія общаго центра тяжести всѣхъ этихъ частей, т. е. центра тяжести маятника отъ оси регулятора и плеча этихъ разстояній вокругъ оси вращенія маятника для двухъ крайнихъ положеній, черезъ ω_2 и ω_1 наименьшую и наибольшую угловую скорость ненагруженного регулятора, такъ что

$$\omega_2 = \omega_n \left(1 - \frac{\delta}{2} \right)$$

$$\omega_1 = \omega_n \left(1 + \frac{\delta}{2} \right),$$

то имѣемъ условія равновѣсія маятника въ двухъ крайнихъ положеніяхъ:

$$m\omega_2^2 x_2 y_2 = M_2 \dots \quad (25)$$

$$m\omega_1^2 x_1 y_1 = M_1 \dots \quad (26)$$

причемъ приняты въ расчетъ всѣ обстоятельства.

Сущность нашего приѣма и состоитъ въ томъ, что, не задаваясь напередъ положеніемъ собственно груза, мы изъ ур. (25) и (26) стараемся найти *полную* массу m всего маятника, въ составъ коего входятъ всѣ части, качающіяся вокругъ оси его. Благодаря тому, что все, касающееся пружины уже извѣстно и входитъ въ M_2 и M_1 , задача рѣшается весьма легко.

Зададимся разстояніемъ $\bar{u}_2$ центра тяжести всего маятника отъ прямой OC , соединяющей центръ вращенія регулятора съ осью, вокругъ коей качается маятникъ. Прямую эту возьмемъ за ось z , а перпендикуляръ къ ней въ точкѣ O за ось u , направивъ ее въ ту сторону гдѣ находится центръ тяжести маятника. Разстояніе $\bar{OC}$ выбрано раньше; назовемъ его черезъ D . Очевидно:

$$x_2 y_2 = D\bar{u}_2 \dots \quad (27)$$

и слѣдов. ур. (25) можно написать въ видѣ

$$m\omega_2^2 D\bar{u}_2 = M_2,$$

откуда и находимъ массу маятника

$$m = \frac{M_2}{\omega_2^2 D\bar{u}_2} \dots \quad (28)$$

или вѣсъ его:

$$G = mg = \frac{M_2}{\omega_2^2 D\bar{u}_2} \dots \quad (29).$$

Если $\bar{u}_1$ будетъ разстояніе центра тяжести маятника отъ оси z при его крайнемъ внѣшнемъ положеніи, то:

$$x_1 y_1 = D\bar{u}_1 \dots \quad (30)$$

и ур. (26) напишется въ видѣ

$$m\omega_1^2 D\bar{u}_1 = M_1,$$

откуда находимъ:

$$\bar{u}_1 = \frac{M_1}{\omega_1^2 Dm} = \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \bar{u}_2 \dots \quad (31)$$

Имѣя теперь разстоянія $\overline{u_2}$ и $\overline{u_1}$ и уголъ размаха маятника, нетрудно найти (вычисленіемъ или пробами на чертежѣ) и координаты $\overline{z_2}$ и $\overline{z_1}$, а, слѣдовательно, и радіусъ вращенія $\overline{r}$ центра тяжести маятника, равный

$$\overline{r} = \sqrt{\overline{u_2}^2 + \overline{z_2}^2} = \sqrt{\overline{u_1}^2 + \overline{z_1}^2} \dots \quad (32)$$

Равенство величинъ $\overline{r}$, вычисленныхъ отдѣльно для обоихъ крайнихъ положеній, служить повѣркой вычисленій.

Теперь проектируемъ, отчасти разсчетомъ, отчасти на глазъ, всѣ части, составляющія маятникъ, исключая лишь собственно груза; длину его ручки выбираемъ по желанію, размѣры ея принимаемъ пока на глазъ. Находимъ вѣса всѣхъ этихъ частей и, начертивъ маятникъ (безъ груза) въ крайнемъ внутреннемъ положеніи, находимъ съ чертежа координаты центровъ тяжести всѣхъ этихъ частей. Пусть вѣса будутъ:

$$Q, Q', Q'', \dots Q^i$$

координаты:

$$z, z', z'', \dots z^i$$

$$u, u', u'', \dots u^i.$$

Искомый вѣсъ собственно груза назовемъ черезъ Q , а координаты его центра тяжести при крайнемъ внутреннемъ положеніи черезъ z_q и u_q .

Пишемъ теперь для этого положенія уравненія статическихъ моментовъ относительно осей z и u :

$$Qz_q + \sum_{k=1}^{k=i} Q^k z^k = G\overline{z_2} \dots \quad (32)$$

$$Qu_q + \sum_{k=1}^{k=i} Q^k u^k = G\overline{u_2} \dots \quad (33)$$

Кромѣ того, очевидно:

$$Q + \sum_{k=1}^{k=i} Q^k = G \dots \quad (34)$$

Изъ уравненія (34) мы находимъ величину Q , вѣсъ груза, а изъ (32) и (33) находимъ координаты z_q и u_q его центра тяжести при крайнемъ внутреннемъ положеніи и затѣмъ радіусъ вращенія его:

$$R = \sqrt{z_q^2 + u_q^2} \dots \quad (35)$$

чѣмъ рѣшеніе задачи и оканчивается. Для провѣрки можно начертить маятникъ въ крайнемъ вѣншнемъ положеніи и найти для него координаты центра тяжести груза и потомъ радіусъ вращенія R , который долженъ совпасть съ величиной (35).

Если принятая длина ручки окажется несообразной съ полученной изъ уравненія (35) величиной R , или прочные размѣры ея, вычисленные по грузу Q , несогласными съ принятыми раньше, то придется лишь задаться вновь размѣрами ручки и повторить лишь послѣднія несложныя вычисленія съ уравненіями статическихъ моментовъ.

Все сказанное будетъ еще лучше уяснено, если возьмемъ примѣръ, который сейчасъ и продѣлаемъ; но сперва замѣтимъ еще, что принятый нами ходъ расчета удобенъ тѣмъ, что уже сразу опредѣляется полный вѣсъ маятника и изъ него выдѣляется потомъ весьма просто вѣсъ груза и опредѣляется положеніе этого груза. Можно, конечно, выдѣлить вѣсъ и не груза, а любой другой части маятника, задавшись вѣсомъ и положеніемъ груза и прочихъ частей; но при этомъ весьма легко получить несообразные размѣры этой выдѣляемой части, ибо, если грузъ взять малъ, то эта часть выйдетъ черезъ-чуръ массивна, а если грузъ взять великъ, то—слишкомъ легка и можетъ не удовлетворить условіямъ прочности. Грузъ же безразлично получить—легкій или тяжелый, развѣ придется измѣнить ручку. Но если взять ее сразу посолиднѣе, то размѣры ея, вѣроятно, и не придется измѣнять и послѣ провѣрки на изгибъ по центробѣжной силѣ найденнаго груза и весь расчетъ возможно будетъ иногда окончить съ одного разу.

Возьмемъ примѣръ (изъ дѣйствительности).

Требуется устроить плоскій регуляторъ по типу (фиг. 40 и 41) для паровой машины при нормальной скорости $n = 116$ оборотовъ въ минуту; полная степень неравномѣрности требуется $\Delta = 0,0486$, степень нечувствительности не болѣе 0,03, сила, приведенная къ пружинѣ, должна быть равна 5,286 kg для одного маятника.

Имѣемъ слѣдовательно:

$$\epsilon_2 = 0,03 \text{ (для внутрен. крайн. положенія)}$$

$$\Delta = 0,0486$$

$$n = 116; \omega_n = 12,147$$

$$W = 5,286 \text{ kg.}$$

Находимъ теперь:

$$E_2 = S_2 = \frac{5,286}{0,03} = 176,2 \text{ kg}$$

Беремъ

$$\mu = 4,2,$$

такъ что

$$S_1 = 176,2 \times 4,2 = 740 \text{ kg.}$$

Степень нечувствительности при наибольшемъ отклоненіи будетъ:

$$\epsilon_1 = \frac{740}{5,286} = 0,0072$$

и средняя степень нечувствительности будетъ:

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} = \frac{0,03 + 0,0072}{2} = 0,0186.$$

Степень неравномѣрности ненагруженного регулятора будетъ:

$$\delta = \Delta - \epsilon_n = 0,0486 - 0,0186 = 0,03.$$

Крайнія числа оборотовъ ненагруженного регулятора будутъ

$$n_2 = 116 (1 - 0,015) = 114,26; \omega_2 = 11,965; \omega_2^2 = 143,16.$$

$$n_1 = 116 (1 + 0,015) = 117,74; \omega_1 = 12,33; \omega_1^2 = 152,03.$$

Беремъ центръ вращенія маятника O на разстояніи $D = 600^m/m$ отъ оси вращенія регулятора и выбираемъ такой уголъ размаха, что въ обоихъ крайнихъ положеніяхъ оси пружины совпадаютъ и общее плечо ихъ въ этихъ крайнихъ положеніяхъ беремъ $= 96^m/m$, а полное укороченіе пружины λ при переходѣ изъ одного крайняго положенія въ другое беремъ равнымъ тоже $96^m/m$ (фиг. 40, 41 и 40 bis). Такъ какъ пружина центральна, такъ что ось ея всегда пересѣкаетъ ось вращенія регулятора, то этихъ данныхъ достаточно, чтобы начертить направленіе оси пружины въ

крайнихъ положеніяхъ и найти уголъ размаха съ чертежа или вычисленіемъ. Онъ будетъ, очевидно, равенъ $\arctg \frac{1}{2}$, т.-е. $53^{\circ}8'$, а радіусъ вращенія центра шарнира пружины будетъ $\sqrt{96^2 + 48^2} = 107,5^m/m$.

Возьмемъ пружину съ квадратнымъ сѣченіемъ. Радіусъ ея выберемъ $\rho = 80^m/m$, а напряженіе τ допустимъ въ $33,5 \text{ kg}$ на $\square \text{ mm}$. Тогда изъ уравненія крѣпости:

$$740 \times 80 = \frac{2}{9} 33,5 \times b^3,$$

находимъ сторону квадрата:

$$b = \sqrt[3]{\frac{740 \times 80 \times 9}{2 \times 33,5}} = 20^m/m$$

Далѣе изъ уравненія

$$\lambda = \frac{14,4\pi i P \rho^3}{G b^4}$$

гдѣ

$$\lambda = 96^m/m$$

$$P = 740 - 176,2 = 563,8 \text{ kg}$$

$$\rho = 80^m/m$$

$$b = 20^m/m$$

$$G = 10630 \text{ kg на } \square^m/m \text{ (по даннымъ для исполнен-$$

наго регулятора фиг. 40 и 41).

Находимъ число завитковъ:

$$i = 13,$$

а принимая шагъ винтовой линіи ненапряженной пружины равнымъ $33,81^m/m$, находимъ длину ненапряженной пружины равной $33,81 \times 13 = 440^m/m$.

Начальное укороченіе λ_0 , которое необходимо дать пружинѣ при ея закладкѣ въ регуляторъ и которое она будетъ имѣть все время, пока маятникъ находится въ крайнемъ внутреннемъ положеніи, найдется изъ уравненія

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + 96} = \frac{176,2}{740},$$

откуда

$$\lambda_0 = 30^m/m$$

и длина пружины будетъ при крайнемъ внутреннемъ положеніи маятника (при бездѣйствіи регулятора) равна $440 - 30 = 410^m/_m$.

Теперь проектируемъ и вычерчиваемъ (лучше всего въ натуру) арматуру пружины: тарелку, надавливающую на нее, бронзовую втулку, ввинченную въ эту тарелку, стержень, однимъ концомъ скользящій для направленія въ длинной трубкѣ, могущей качаться вокругъ вала машины, а другимъ, вильчатымъ, надѣтый на шарниръ, укрѣпленный въ кривошипѣ маятника. Вычисляемъ вѣса пружины и всѣхъ этихъ частей *). Находимъ:

$$\text{Вѣсъ пружины} = 21,216 \text{ kg.}$$

$$\text{„ тарелки} = 3,6 \text{ kg.}$$

$$\text{„ втулки} = 1,45 \text{ kg.}$$

$$\text{„ стержня} = 5,28 \text{ kg.}$$

Чертимъ теперь всѣ эти части, собранными какъ слѣдуетъ, при внутреннемъ крайнемъ положеніи маятника, когда пружина имѣетъ свою наибольшую длину $410^m/_m$, и когда сила сжатія ея есть $S_2 = 176,2 \text{ kg}$, и приступаемъ къ вычисленію ихъ вліяній. Опредѣляемъ (проще всего графически) положеніе центровъ тяжести всѣхъ частей арматуры пружины и самой пружины (которые всѣ лежатъ на оси пружины вслѣдствіе симметричности этихъ частей) и находимъ разстоянія этихъ центровъ тяжести отъ оси C вращения регулятора, т.-е. ихъ радіусы вращения для разсматриваемаго положенія.

Находимъ:

$$\text{Радіусъ вращения центра тяжести тарелки} = 520^m/_m$$

$$\text{„ „ „ „ втулки} = 530^m/_m$$

$$\text{„ „ „ „ стержня} = 420^m/_m$$

$$\text{„ „ „ „ пружины} = 330^m/_m$$

Такъ какъ внутренній конецъ пружины здѣсь не закрѣпленъ, а оставленъ свободнымъ и можетъ передвигаться по направленію ея оси, то *вся* центробѣжная сила пружины будетъ передаваться на шарниръ ея кривошипа и, слѣдовательно, можетъ быть вычислена по формулѣ (113) главы II, поэтому находимъ:

$$\text{Центробѣжная сила тарелки} = \frac{3,6}{9810} \times 143,16 \times 520 = 27,3 \text{ kg.}$$

*) Мы взяли данныя, для которыхъ выполненъ регуляторъ фиг. 40 и 41 и приняли всѣ величины такими, какими они взяты въ дѣйствительности, чтобы на этомъ примѣрѣ провѣрить этотъ исполненный регуляторъ. Поэтому размѣры деталей и ихъ вѣса мы находили при помощи чертежа этого регулятора, помѣщенного въ журналъ „Der Practische Maschinen-Constructeur“ 1888 г. № 6. Чертежъ этотъ приведенъ нами на фиг. 40 и 41.

$$\text{Центробежная сила втулки} = \frac{1,45}{9810} \times 143,16 \times 530 = 11,12 \text{ kg.}$$

$$\text{„ „ стержня} = \frac{5,28}{9810} \times 143,16 \times 420 = 32,35 \text{ kg.}$$

$$\text{„ „ пружины} = \frac{21,216}{9810} \times 143,16 \times 330 = 110,8 \text{ kg.}$$

Складывая всё эти силы съ силой $S_2 = 176,2 \text{ kg.}$, находимъ полное давленіе на шарниръ равнымъ $357,77 \text{ kg}$, а моментъ его вокругъ оси O маятника:

$$M_2 = 357,77 \times 96 = 34346 \text{ kgmm.}$$

(Отсюда видно, какую громадную ошибку сдѣлалъ бы неопытный конструкторъ, который пренебрегъ бы центробѣжными силами пружины и арматуры ея).

Теперь чертимъ пружину съ арматурой при крайнемъ вѣншемъ положеніи маятника, при чемъ направленіе оси ея будетъ то же, но она укоротится на $96 \text{ }^m/m$. Находимъ опять радіусы вращенія и центробѣжныя силы частей арматуры и пружины, складывая которыя съ силой $S_1 = 740 \text{ kg}$ и помножая сумму на 96, получимъ моментъ M_1 . Получимъ

$$M_1 = \left\{ 740 + (21,216 \times 282 + 3,6 \times 424 + 1,45 \times 434 + \right. \\ \left. + 5,28 \times 324) \frac{152,03}{9810} \right\} 96$$

или, произведя вычисленія:

$$M_1 = 85693 \text{ kgmm.}$$

Теперь пишемъ ур. (31):

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_2} = \frac{85693}{34346} \times \frac{143,16}{152,03} = 2,248.$$

Выбираемъ:

$$\bar{u}_2 = 160 \text{ }^m/m,$$

такъ что

$$x_2 y_2 = D\bar{u}_2 = 600 \times 160 = 96000.$$

Теперь изъ уравненія

$$m\omega_2^2 x_2 y_2 = M_2$$

опредѣляемъ m :

$$m = \frac{34346}{96000 \times 143,16},$$

а вѣсъ маятника будетъ

$$G = mg = \frac{34346 \times 9810}{96000 \times 143,16} = 24,52 \text{ kg}.$$

Находимъ теперь

$$\bar{u}_1 = 160 \times 2,248 = 360 \text{ } ^m/m.$$

Уголъ размаха α намъ извѣстенъ, ибо мы выбрали его равнымъ $53^\circ 8'$. Поэтому теперь надо рѣшить слѣдующую геометрическую задачу: имѣемъ двѣ прямыя, параллельныя оси z , проведенныя на разстояніяхъ $\bar{u}_1 = 360 \text{ } ^m/m$ и $\bar{u}_2 = 160 \text{ } ^m/m$; провести изъ начала O координатъ дугу круга такого радіуса, чтобы часть этой дуги между сказанными прямыми содержала бы $53^\circ 8'$. Задача проще всего рѣшается при помощи тригонометріи (можно, по нуждѣ, рѣшить и съ однимъ циркулемъ на чертежѣ, при помощи пробѣ).

Пусть (фиг. 40 bis) G_2 и G_1 два крайнихъ положенія массы m на сказанныхъ прямыхъ, а OG_2 и OG_1 два крайнихъ положенія ея радіуса вращенія R_m , пока неизвѣстнаго.

Тогда уголъ G_2OG_1 есть уголъ $\alpha = 53^\circ 8'$. Назовемъ неизвѣстный пока уголъ радіуса OG_1 съ осью u черезъ φ , и проведемъ координаты:

$$G_1 B = \bar{z}_1$$

$$G_2 A = \bar{z}_2.$$

Теперь изъ $\triangle G_1OB$ и G_2OA имѣемъ:

$$\bar{u}_1 = R_m \cos \varphi. \dots (36)$$

$$\bar{u}_2 = R_m \cos (\alpha + \varphi) = R_m (\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi). \dots (37)$$

Отсюда находимъ

$$\frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1} = \cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi$$

и изъ этого уравненія находимъ:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\sin \alpha} \left\{ \cos \alpha - \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1} \right\}. \dots (38)$$

Найдя φ , изъ ур. (36) находимъ R_m .

Уравненіе (38) весьма замѣчательно. Изъ него видно, что величина φ , а слѣд. и $\alpha + \varphi$ зависитъ *только* отъ угла α и отношенія $\frac{u_2}{u_1}$, такъ что мы имѣемъ *теорему*: разъ выбранъ уголъ размаха и отношеніе крайнихъ разстояній центра тяжести маятника отъ линіи центровъ OC , то этимъ вполне опредѣляются *направленія* радіусовъ вращенія въ крайнихъ положеніяхъ, каковы бы ни были величины u_1 и u_2 въ отдѣльности, лишь бы отношеніе ихъ было равно выбранному.

Теорема эта весьма важна для проектирующаго.

Примѣняя ур. (38) къ нашему примѣру, имѣемъ:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\sin 53^\circ 8'} \left\{ \cos 53^\circ 8' - \frac{1}{2,248} \right\} = 0,1935$$

откуда

$$\varphi = 10^\circ 57'$$

Теперь изъ (36) находимъ

$$R_m = \frac{360}{\cos 10^\circ 57'} = 367^m/m.$$

Можно найти R_m и изъ чертежа, построивъ уголъ φ , причемъ рекомендуется, такъ какъ на чертежахъ линіи выходятъ точнѣе угловъ, строить углы не по транспортиру, а по величинѣ *синуса* или *тангенса*, особенно если принять радіусъ побольше.

Теперь описываемъ радіусомъ R_m дугу размаха $G_2 G_1$ и находимъ (вычисленіемъ или съ чертежа):

$$\bar{z}_1 = 330^m/m$$

$$\bar{z}_2 = 69^m/m.$$

Проектируемъ теперь всѣ части маятника (кромѣ груза) и чертимъ ихъ въ положеніи, соответствующемъ внутреннему крайнему положенію центра тяжести всего маятника. Находимъ ихъ вѣса и центры тяжести и координаты этихъ центровъ тяжести.

Находимъ (фиг. 40 *bis*).

	Коорд. z .	Коорд. u .	Вѣсъ.
Ручка груза.....	300 m/m	120 m/m	7,5 <i>kg</i>
Половина массы шатуна, сосредот. въ центрѣ шарнира.....	102 m/m	184 m/m	3,2 <i>kg</i>
Шарниръ.....	102 m/m	184 m/m	0,3 <i>kg</i>
Кривошипъ, къ которому привѣшенъ шатунъ	40 m/m	110 m/m	2,2 <i>kg</i>
Кривошипъ пружины.....	—31 m/m	—62 m/m	1,32 <i>kg</i>
		Сумма	14,52 <i>kg</i>.

Вычитая сумму вѣсовъ этихъ частей — $14,52 \text{ kg}$ изъ вѣса всего маятника — $24,52 \text{ kg}$, находимъ вѣсъ груза:

$$Q = 24,52 - 14,52 = 10 \text{ kg}.$$

Скинувъ съ него $0,24 \text{ kg}$ на вѣсъ головки болта, находимъ чистый вѣсъ груза

$$9,76 \text{ kg}.$$

Пишемъ теперь уравненія (32) и (33):

$$10 \times z_q + 7,5 \times 300 + 3,5 \times 102 + 2,2 \times 40 - 1,32 \times 31 = 24,52 \times 330$$

$$10 \times u_q + 7,5 \times 120 + 3,5 \times 184 + 2,2 \times 110 - 1,32 \times 62 = 24,52 \times 160.$$

Отсюда находимъ

$$z_q = 544 \text{ }^m/m$$

$$u_q = 226 \text{ }^m/m$$

и радиусъ вращенія центра тяжести груза:

$$R = \sqrt{226^2 + 544^2} = 589 \text{ }^m/m.$$

Грузъ отливается изъ чугуна и имѣетъ форму цилиндра; если примемъ высоту его $= 80 \text{ }^m/m$, то діаметръ d найдется изъ уравненія:

$$\left\{ \frac{\pi d^2}{4} \cdot 80 - 51 \times d \cdot 2,6 \right\} 0,0000071 = 9,76.$$

Получаемъ:

$$d = 149 \text{ }^m/m$$

Регуляторъ, выполненный для тѣхъ-же заданій, какіе взяты нами, заводомъ Maschinenbau-Actiengesellschaft, vorm. Breitfeld, Danec & Co., Prag, показанъ на фиг. 40 и 41.

Размѣры его нѣсколько не сходятся съ нашимъ расчетомъ, благодаря тому, что въ немъ при расчетѣ принята была, по Gröll'у, вся масса шатуна вмѣсто половины и еще потому, что хотя мы приняли по возможности всѣ размѣры и вѣса по этому исполненному регулятору, но масштабъ слишкомъ мелокъ и въ результатѣ вышла разница въ томъ, что у насъ центръ тяжести груза далѣе отъ оси диска, чѣмъ тамъ, и центръ груза не проходитъ черезъ центръ диска, что было принято тамъ напередъ, ибо прежде это считалось необходимымъ, хотя безъ достаточныхъ основаній. На практикѣ эта неточность расчета должна

была проявиться въ томъ, что числа оборотовъ машины немного разнятся отъ принятыхъ при расчетѣ конструкторами.

За исключеніемъ положенія шара, чертежъ этотъ можетъ служить хорошимъ образцомъ при проектированіи.

Мы приняли пока размѣры частей на глазъ, руководствуясь этимъ образцомъ; теперь, зная силы, опредѣлимъ ихъ изъ условій прочности и посмотримъ, насколько удачно были они взяты.

Начнемъ съ ручки.

Представимъ ее продолженной до самой оси шарнира ея. Сгибающій моментъ отъ центробѣжной силы груза будетъ для крайняго вышшняго положенія:

$$M_b = \infty 50000 \text{ kgmm.},$$

а отъ собственной массы

$$M'_b = \infty 21000 \text{ kgmm.}$$

Полный моментъ

$$M_b = M_b + M'_b = 71000 \text{ kgmm.}$$

Изъ уравненія:

$$71000 = B \cdot \frac{bh^2}{6},$$

задаваясь толщиной $b = 26 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$ и напряженіемъ B въ 5 kg. на $\square \text{ mm}$, находимъ

$$h = 58 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}.$$

Принято было у втулки $64 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$, слѣдовательно, ручка вполне удовлетворительна и будетъ имѣть наибольшее напряженіе не свыше $4,8 \text{ kg}$ на $\square \text{ mm}$.

Теперь повѣримъ шарниръ, на который надѣтъ стержень пружины. Диаметръ его $30 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$, длина $40 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$, наибольшее давленіе на него отъ пружины и центробѣжныхъ силъ арматуры 893 kg. , наибольшее напряженіе изнашиванія:

$$D = \frac{893}{30 \times 40} = \frac{893}{1200} = 0,744 \text{ kg. на } \square \text{ mm},$$

что вполне хорошо, ибо полного вращенія вокругъ шарнира нѣтъ, а лишь небольшія качанія.

Напряженіе его на изгибъ, какъ заземленнаго по концамъ, найдется изъ уравненія крѣпости:

$$\frac{893 \times 40}{12} = B \cdot \frac{\pi \cdot 30^3}{32}$$

откуда

$$B = 1,1 \text{ kg. на } \square \text{ mm.}$$

Повѣримъ кривошипъ пружины на изгибъ, считая его продолженнымъ до втулки, и имѣющимъ толщину въ $26 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$. Пишемъ, принимая напряженіе изгиба $B = 5 \text{ kg}$ на $\square \text{ mm}$, уравненіе крѣпости:

$$893 \cdot 96 = B \cdot \frac{26 \cdot h^3}{6}$$

откуда

$$h = 63 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}.$$

Принято въ дѣйствительности $70 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$.

Повѣримъ теперь ось маятника. Давленіе на нее будетъ наибольшее при крайнемъ внѣшнемъ отклоненіи груза и, по формулѣ (133) главы II, будетъ равно:

$$N = \sqrt{(137 - 893 \times 0,716)^2 + (202 + 893 \times 0,984)^2} = \approx 1080 \text{ kg.}$$

Хотя втулка ручки насажена накрѣпко на ось, но для надежности считаемъ ось за балку, лежащую свободно на серединахъ ея подшипниковъ, такъ что пролетъ $= 180 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$ и силу N распределенной равномерно на длинѣ $100 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}}$; находимъ сгибающій моментъ:

$$M = 540 \left(\frac{180}{2} - \frac{100}{4} \right) = 35100 \text{ kgmm.}$$

При напряженіи въ $5,5 \text{ kg}$ на $\square \text{ mm}$, находимъ діаметръ d оси изъ уравненія крѣпости на изгибъ:

$$35100 = 5,5 \frac{\pi d^3}{32}$$

и

$$d = 40 \text{ } \frac{\text{м}}{\text{м}},$$

что и взято въ дѣйствительности.

Довольно высокое напряженіе здѣсь взято, чтобы уменьшить діаметръ оси и, слѣдовательно, моментъ тренія и увеличить чувствительность.

Размѣры шатуна и его кривошипа, рассчитанные по силѣ, передаваемой ими, были-бы весьма малы и потому проектируются на глазъ, гораздо прочнѣе, въ гармоніи съ размѣрами прочихъ частей.

Этимъ заканчиваемъ разсмотрѣніе примѣра.

Теперь приведемъ примѣръ расчета, исполненнаго плоскаго регулятора американскаго типа съ двумя пружинами, помѣщенными на обѣ стороны вала машины.

Этотъ примѣръ имѣется въ журналѣ „Der Practische Maschinen-Constructeur“ за 1888 годъ и интересенъ тѣмъ, что въ основу расчета положенъ принципъ „наибольшаго запаса работы“ (по обозначенію автора С. Budil'a, придерживающагося обозначеній профессора Salaba, слѣдовало бы сказать „наибольшей энергіи“), хотя самый расчетъ тоже не безупреченъ.

Въ 1883 году профессоръ Salaba обнародовалъ мало извѣстное, но весьма замѣчательное изслѣдованіе подъ заглавіемъ: „*Die graphische Ausmittlung der Centrifugalregulatoren mit maximaler Energie*“. Von A. Salaba, Prag. 1883 г., гдѣ съ помощью графическаго представленія, приведеннаго нами въ I-й главѣ, онъ разъясняетъ принципъ „наибольшаго запаса работы“ и кладетъ его въ основу выбора элементовъ конструкции регулятора. Въ виду сравнительной малоизвѣстности этого сочиненія, мы считаемъ не лишнимъ дать понятіе о сущности изслѣдованія профессора Salaba, тѣмъ болѣе, что безъ этого не было бы полнымъ изложеніе расчета Budil'a, основаннаго на этомъ принципѣ.

Обратимся снова къ графическому представленію по способу Salaba, причемъ за ординаты будутъ принимать перемѣщенія той точки маятника, къ которой отнесена его сила W и предположимъ, что направленіе силы W всегда совпадаетъ съ направленіемъ перемѣщенія этой точки, что довольно близко къ истинѣ. Возьмемъ (фиг. 42) какую нибудь точку A на кривой kk и соотвѣтствующія ей точки A' и A'' на кривыхъ k' и k'' и проведемъ между k и k'' прямую aa'' , параллельную AA'' и весьма близко отъ нея на бесконечно маломъ разстояніи $d\eta$. Тогда величина площади $aa' A''$ равна:

$$dF = aa' \times d\eta = \frac{\omega \cdot \epsilon \cdot d\eta}{2\omega_n}.$$

Съ другой стороны, элементарная работа регулятора, при перемѣщеніи точки P маятника на величину $d\eta$, будетъ:

$$dL = Wd\eta.$$

Величина хорды aa'' изменяется не особенно значительно на всемъ протяженіи кривыхъ k , k' и k'' и приблизительно ее можно принять равной величинѣ ея для средняго положенія, гдѣ она будетъ:

$$\frac{\omega_n \epsilon_n}{2 \omega_n} = \frac{\epsilon_n}{2}$$

такъ что $\epsilon = \epsilon_n$ постоянно и

$$dF = \frac{\epsilon_n d\eta}{2}.$$

Величину сопротивленія W также можно принять постоянной и слѣдовательно

$$\frac{dF}{dL} = \frac{\epsilon_n}{2W} = const.$$

Слѣдовательно, площадь dF представляетъ въ извѣстномъ, постоянномъ масштабѣ элементарную работу регулятора.

Если точки A_1 и A_2 соотвѣтствуютъ крайнимъ положеніямъ регулятора, то площадь

$$OA_1 A_1'' A_0'' = \int_0^{r_1} dF$$

представить работу регулятора при переходѣ изъ средняго положенія во внѣшнее крайнее, а площадь;

$$OA_2 A_2' A_0' = \int_0^{r_2} dF$$

представить (по абсолютной величинѣ) работу регулятора при переходѣ изъ средняго положенія во внутреннее крайнее. Совокупность площадей $OA_1 A_1'' A_0''$ и $OA_2 A_2' A_0'$, т. е. вся заштрихованная площадь, представить полную работу регулятора (по Salaba—энергію).

Очевидно, что при постоянной полной степени неравномерности

$$\Delta = \xi_1'' + \xi_2',$$

величина этой работы зависитъ отъ силы регулятора W .

При $W=0$ и $\epsilon_n=0$, работа тоже равна нулю. Если сопротивленіе регулятора W такъ велико, что

$$\epsilon_n = \xi_1'' + \xi_2' = \Delta,$$

то $L=0$.

Такъ какъ L обращается въ нуль при $\epsilon_n=0$ и $\epsilon_n=\Delta$, то, очевидно, есть величина ϵ_n между 0 и Δ , при которой L будетъ

maximum, при данной Δ . Этот **maximum** имѣетъ мѣсто, какъ показываетъ изслѣдованіе, при значеніи ϵ_n весьма близкомъ къ $\frac{\Delta}{2}$ (если кривыя k , k' k'' будутъ прямыя, то **maximum** будетъ при ϵ_n вполне точно) и такъ какъ вблизи **maximum**'а функція всегда измѣняется весьма медленно, то величина L , соотвѣтствующая $\epsilon_n = \frac{\Delta}{2}$, будетъ близка къ наибольшей. Поэтому, условіе наибольшаго запаса работы (наибольшей энергіи по Salaba) выразится такимъ простымъ правиломъ:

*Средняя степень нечувствительности должна быть равна половинѣ полной степени неравномѣрности Δ *).*

Это условіе даетъ намъ прямо величину степени нечувствительности, которую при обыкновенномъ ходѣ расчета приходится выбирать на глазъ, безъ руководящей нити.

Если наибольшія и наименьшія угловыя скорости нагруженнаго регулятора назовемъ ω_1 и ω_2 то, какъ извѣстно, при ϵ_n постоянномъ и при заданной величинѣ Δ , имѣемъ:

$$\omega_1 = \omega_n \left(1 + \frac{\Delta}{2} \right)$$

$$\omega_2 = \omega_n \left(1 - \frac{\Delta}{2} \right)$$

гдѣ ω_n есть средняя скорость.

Если бы тотъ же регуляторъ былъ ненагруженъ, то, какъ видно изъ фигуры (42), при томъ же ходѣ точки приложенія сопротивленія W , скорость должна была бы измѣниться лишь отъ величины, соотвѣтствующей $\xi = OA'_0$, до величины, соотвѣтствующей $\xi = OA''_0$, т. е. отъ величины

$$\omega_n \left(1 - \frac{\epsilon_n}{2} \right).$$

до величины

$$\omega_n \left(1 + \frac{\epsilon_n}{2} \right)$$

*) Иначе можно выразить это условіе такъ: Въ ненагруженномъ регуляторѣ съ наибольшимъ запасомъ работы (при данной величинѣ Δ), точка приложенія силы W проходитъ путь вдвое большій того, который она пройдетъ, если регуляторъ будетъ нагруженъ, при тѣхъ-же предѣлахъ измѣненія угловой скорости т. е. той-же δ . Это тоже строго вѣрно, если k , k' и k'' прямыя и приблизительно вѣрно вообще.

или, такъ какъ $\epsilon_n = \frac{\Delta}{2}$, то отъ величины

$$\omega_n \left(1 - \frac{\Delta}{4} \right)$$

до величины

$$\omega_n \left(1 + \frac{\Delta}{4} \right)$$

и этого было-бы достаточно, чтобы ненагруженный регуляторъ совершилъ тотъ же размахъ какъ и нагруженный и прошелъ черезъ всѣ тѣ же положенія. Поэтому, при соблюденіи условія наибольшаго запаса работы, мы можемъ вмѣсто того, чтобы разсматривать регуляторъ нагруженный, съ предѣльными скоростями

$$\omega_n \left(1 - \frac{\Delta}{4} \right) \text{ и}$$

$$\omega_n \left(1 + \frac{\Delta}{4} \right),$$

разсматривать тотъ же регуляторъ какъ ненагруженный, но при предѣльныхъ скоростяхъ

$$\omega_n \left(1 - \frac{\Delta}{4} \right) \text{ и}$$

$$\omega_n \left(1 + \frac{\Delta}{4} \right)$$

Такой способъ расчета ненагруженного регулятора вмѣсто нагруженнаго употреблялся всегда и раньше, какъ мы и упоминали, ибо мы раньше говорили, что надо изъ заданной *полной* степени неравномѣрности Δ *вычесть* прежде всего величину средней степени нечувствительности ϵ_n , полученная разность $\Delta - \epsilon_n$ будетъ δ , степень неравномѣрности *ненагруженнаго* регулятора; по ней, мы говорили, и рассчитываютъ регуляторъ. По методу же профессора Salaba мы степень нечувствительности (среднюю) беремъ не произвольно, а равной половинѣ полной степени неравномѣрности, такъ что

$$\delta = \Delta - \epsilon_n = \Delta - \frac{\Delta}{2} = \frac{\Delta}{2} = \epsilon_n$$

и слѣдовательно, степень неравномѣрности ненагруженнаго регулятора равна средней степени нечувствительности. Затѣмъ раз-

считываемъ, какъ и всегда, ненагруженный регуляторъ съ крайними скоростями

$$\omega_1 = \omega_n \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) = \omega_n \left(1 + \frac{\Delta}{4} \right)$$

$$\omega_2 = \omega_n \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) = \omega_n \left(1 - \frac{\Delta}{4} \right)$$

причемъ получимъ регуляторъ съ наибольшимъ запасомъ работы. Многіе практики и раньше дошли ощупью до выполненія условія

$$\epsilon_n = \frac{\Delta}{2},$$

ибо мы находимъ его приблизительно соблюденнымъ во многихъ исполненныхъ регуляторахъ.

С. Budil, въ упомянутой статьѣ, избралъ методъ профессора Salaba и необходимо было дать понятіе объ этомъ методѣ.

Послѣ этихъ замѣчаній переходимъ къ разсмотрѣнію примѣра.

Для паровой машины требуется построить плоскій регуляторъ (исполненный регуляторъ изображенъ на фиг. (43—46). Нормальное (среднее) число оборотовъ

$$n_0 = 80.$$

Полная степень равномерности Δ требуется

$$\Delta = 0,08.$$

Запасъ работы регулятора L требуется въ 2160 *kgmm.*, слѣдовательно на каждый маятникъ его приходится

$$\frac{L}{2} = 1080 \text{ } kgmm.$$

Изъ конструктивныхъ соображеній (поворота эксцентрика для полученія требуемыхъ предѣловъ отсѣчки) путь точки привѣса пружины взять равнымъ 120 $\frac{m}{m}$, такъ что въ предположеніи постоянства сопротивления W , приведеннаго къ пружинѣ, и совпаденія направленія его съ направлениемъ перемѣщенія шарнира, прикрѣпляющаго пружину къ ручкѣ, находимъ, что

$$L = 2 W \cdot 120.$$

и отсюда

$$W = \frac{L}{2 \cdot 120} = \frac{2160}{240} = 9kg.$$

Задаваясь условіемъ наибольшаго запаса работы мы беремъ

$$\epsilon_n = \delta = \frac{\Delta}{2} = 0,04$$

и теперь, вмѣсто разсмотрѣнія нагруженнаго регулятора, будемъ вести расчетъ для ненагруженнаго.

Предѣльные числа оборотовъ этого ненагруженнаго регулятора (при томъ же ходѣ точки F , равномъ $120 \text{ }^m/m$) будутъ:

$$n_1 = 80 (1 + 0,02) = 81,6$$

$$n_2 = 80 (1 - 0,02) = 78,4$$

Числамъ оборотовъ n_0 , n_1 , n_2 соотвѣтствуютъ угловыя скорости:

$$n_0 = 80 \text{ соотвѣтствуетъ } \omega_n = 8,3776$$

$$n_1 = 81,6 \quad \text{,,} \quad \omega_1 = 8,5451$$

$$n_2 = 78,4 \quad \text{,,} \quad \omega_2 = 8,2100$$

Ходъ расчета Budil'a значительно уклоняется отъ нашего и не отличается точностью, ибо приведеніе массъ всѣхъ частей маятника къ центру груза не вѣрно, но въ виду того, что нами уже указанъ и выясненъ на примѣрѣ точный ходъ расчета, котораго советуемъ держаться при окончательныхъ расчетахъ, мы приведемъ здѣсь въ сокращенномъ видѣ сущность и результатъ расчета Budil'a, указавъ и его неточности. Для приблизительнаго, грубаго расчета можно пользоваться и имъ, чтобы получить первое понятіе объ искомыхъ величинахъ. Читатель, при помощи нашего метода и прилагаемаго чертежа (фиг. 43), можетъ уже самъ посмотрѣть, насколько результаты расчета Budil'a уклоняются отъ результатовъ точнаго расчета.

Назовемъ черезъ S_1 и S_2 наибольшее и наименьшее натяженіе пружины, а черезъ ϵ_1 и ϵ_2 — соотвѣтствующія степени нечувствительности. Тогда, принимая W постояннымъ, имѣемъ

$$S_1 = \frac{W}{\epsilon_1}$$

$$S_2 = \frac{W}{\epsilon_2}$$

откуда

$$\epsilon_1 = \frac{W}{S_1}$$

$$\epsilon_2 = \frac{W}{S_2}$$

и

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} = \frac{W}{2} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1 \cdot S_2} \dots \quad (39)$$

Мы имѣемъ уже величины $W = 9 \text{ kg}$ и $\epsilon_n = 0,04$ и вставляя эти числовые значенія въ выраженіе ϵ_n (39) находимъ

$$0,04 = \frac{9}{2} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1 \cdot S_2}$$

или

$$S_1 + S_2 = \frac{1}{112,5} S_1 \cdot S_2$$

Далѣе, называя черезъ M сумму массъ груза и приведенныхъ массъ *всѣхъ* частей (ручки, арматуры, пружины и пр.), считае-
мыхъ сосредоточенными въ центрѣ груза (такое сосредоточеніе
невѣрно, ибо его можно выполнить, сохраняя неизмѣннымъ мо-
ментъ всѣхъ центробѣжныхъ силъ, лишь для *одного* положенія
маятника, въ другихъ же положеніяхъ моментъ этой приведенной
массы не будетъ равенъ истинному моменту центробѣжныхъ силъ
частей; впрочемъ это, повидимому, сознаетъ и самъ Budil, ибо
выполняетъ это приведеніе для *средняго* положенія маятника, вѣ-
роятно съ цѣлью уменьшить ошибку), черезъ R_1 и R_2 наибольшее
и наименьшее разстояніе центра груза отъ оси вращенія
регулятора, а черезъ b_1 , a_1 , b_2 и a_2 плечи пружины и центро-
бѣжной силы массы M относительно оси качанія маятника при
наружномъ и внутреннемъ крайнихъ положеніяхъ и, не принимая
пока вліянія пружины, имѣемъ

$$S_1 b_1 = MR_1 \omega_1^2 a_1$$

$$S_2 b_2 = MR_2 \omega_2^2 a_2$$

Принято:

$$b_2 = 365 \text{ m/m}; a_2 = 1305 \text{ m/m}; R_2 = 250 \text{ m/m}$$

$$b_1 = 390 \text{ m/m}; a_1 = 1460 \text{ m/m}; R_1 = 700 \text{ m/m}.$$

Имѣемъ поэтому, принимая за единицу длины миллиметръ :

$$S_1 = M \times 700 \times 8,5451^2 \times 1460 \dots \quad (41)$$

$$S_2 = M \times 250 \times 8,21^2 \times 1305 \dots \quad (42)$$

Изъ уравненія (40), (41) и (42) находимъ

$$M = 0,002455$$

$$S_1 = 469,7 \text{ kg.}$$

$$S_2 = 147,9 \text{ kg.}$$

а вѣсъ, соотвѣтствующій массѣ M будетъ:

$$G = 0,002455 \times 9710 = 24,084 \text{ kg.}$$

Вліяніе центробѣжной силы пружины по мнѣнію Budil'a выражается не въ добавочномъ давленіи на ея концы, а въ добавочномъ удлинненіи ея и, сообразно этому, онъ и принимаетъ въ расчетъ это вліяніе, которое у него измѣняетъ *число завитковъ* пружины, на величину же M прямаго вліянія не оказываетъ и потому не входитъ въ формулы (41) и (42).

Какъ взглядъ Budil'a, такъ и принятый нами (и исправленный относительно разложенія давленія на опоры) взглядъ Pröll'a одинаково могутъ быть положены въ основу расчета. Дѣйствительно, если мы имѣемъ маятникъ въ равновѣсіи съ пружиной не имѣющей массы, то, если этой пружинѣ дать массу, такъ что появится и у ней центробѣжная сила, тогда, если пружина работаетъ на растяженіе, подъ вліяніемъ этой добавочной силы она должна еще немного растянуться и передвинуть маятникъ, что нѣсколько измѣнитъ угловую скорость, и мы можемъ найти ея новую величину. Или же мы можемъ прибавить маятнику массы настолько, что онъ не сдвинется, но тогда измѣнится его масса и мы можемъ найти прибавокъ. Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ получаются вполнѣ опредѣленные уравненія, изъ которыхъ можно найти всѣ требующія величины.

Но мы приняли методъ Pröll'a потому, что онъ гораздо удобнѣе. При немъ, отъ введенія центробѣжной силы пружины, маятникъ не сдвигается и надобно лишь перечислить его массу (и положеніе центра тяжести), по методу же Budil'a отъ прибавки центробѣжной силы пружины все передвигаются, мѣняются всѣ плеча и разстоянія и, слѣдовательно, моментъ центробѣжной силы и моментъ натяженія пружины и надо идти путемъ послѣдовательныхъ приближеній, или-же, не продѣлывая этого, допустить неточность. Въ подробности не входимъ, отсылая интересующихся къ оригиналу.

Задаваясь радіусомъ пружины $r = 65 \text{ }^m/m$ и напряженіемъ $\tau = 31 \text{ kg. на } \square \text{ mm.}$, находимъ діаметръ δ круглой проволоки ея изъ уравненія

$$470 = 31 \frac{\pi}{16} \cdot \frac{\delta^3}{65}$$

откуда

$$\delta = 17 \text{ }^m/m.$$

Число завитков Budil находить равнымъ 15,7. Вѣсъ всѣхъ частей, приведенныхъ къ центру груза, оказался равенъ 5,404 *kg*. и чистый вѣсъ груза равенъ

$$24,084 - 5,404 = 18,68 \text{ kg.}$$

Регуляторъ, выполненный по проѣкту Budil'a показанъ на фиг. 43—46.

Замѣтимъ еще, что Budil здѣсь же ошибочно утверждаетъ, что для того, чтобы регуляторъ былъ устойчивымъ на всемъ размахѣ маятника, необходимо всегда, чтобы и плечо оси пружины и плечо центробѣжной силы центра тяжести груза (или маятника) сперва возрастали, а потомъ убывали. Это совершенно невѣрно *вообще*. Для регулятора Budil'a это вѣрно потому лишь, что онъ взялъ длину ручки (идеальной) *меньше* разстоянія осей вращенія регулятора и маятника, и для этого частнаго случая утверждение Budil'a вѣрно, что, однако, у него не оговорено, да измѣненіе плечъ все и не характеристично, а надо слѣдить за измѣненіемъ *моментовъ* при помощи графическаго представленія площадей, что мы подробно развили въ главѣ II-й.

Съ помощью изложенныхъ въ этой главѣ правилъ и примѣровъ не трудно спроектировать плоскій регуляторъ съ желаемой степенью неравномѣрности. Но какъ бы хорошо ни былъ произведенъ расчетъ, все-таки полезно и даже необходимо вывѣрить окончательно регуляторъ въ мастерской, при окончательной сборкѣ машины, и установить его такъ, чтобы онъ давалъ требуемую степень неравномѣрности.

Вывѣрка эта необходима по слѣдующимъ причинамъ.

Во-первыхъ, какъ мы видѣли, расчетъ регулятора довольно хлопотливъ, требуя вычисленія вѣсовъ различныхъ частей, которое все-таки не будетъ вполне точнымъ, такъ что извѣстныя неточности всегда будутъ имѣть мѣсто, а вліяніе этихъ неточностей проявится въ томъ, что степень неравномѣрности будетъ немного отличаться отъ назначенной при расчетѣ. Поэтому необходимо окончательно вывѣрить регуляторъ путемъ опыта.

Во-вторыхъ, могутъ быть допущены ошибки въ расчетѣ при производствѣ выкладокъ, которыя останутся незамѣченными и поведутъ къ составленію неправильнаго чертежа регулятора. Если эти ошибки не будутъ открыты еще на заводѣ, испытаніемъ регулятора, то машина съ такимъ регуляторомъ, будучи пущена въ дѣло, можетъ причинить хозяевамъ массу непріятностей.

Далѣе, получить пружины именно такой длины и упругости, какія приняты при разсчетѣ, довольно трудно; въ особенности трудно всегда закалить пружины до желаемаго коэффициента упругости G . Чтобы не бросать немного неудавшихся пружинъ, можно и ихъ пускать въ дѣло, если только вывѣрить регуляторъ и небольшими поправками подогнать его степень неравномѣрности и нормальное число оборотовъ къ назначеннымъ при разсчетѣ.

Кромѣ невѣрности пружинъ могутъ быть какія нибудь отступленія и въ другихъ деталяхъ, могутъ сдѣлать какія нибудь части легче или тяжелѣе, немного иной формы, могутъ приладить какія нибудь движущіяся части слишкомъ туго и проч.

Всѣ эти отступленія отъ проекта, за которыми трудно услѣдить, отзовутся на степени неравномѣрности регулятора и суммарное вліяніе разныхъ перечисленныхъ причинъ можетъ быть весьма замѣтно и вредить равномѣрной работѣ машины при разныхъ нагрузкахъ, почему вывѣрка и является необходимой, открывая всѣ недостатки, буде они имѣются.

Вывѣрка дѣлается при помощи динамометра и хорошаго тахометра.

Сначала машину пускаютъ въ ходъ *порожнемъ* и смотрять, какъ постепенно возрастаетъ число ея оборотовъ. Такъ какъ маятники стояли, при бездѣйствіи машины, во внутреннемъ крайнемъ положеніи, соотвѣтствующемъ полной работѣ, то при пускѣ порожнемъ они должны перейти въ крайнее внѣшнее положеніе и установить наименьшую отсѣчку. Поэтому, если число оборотовъ машины при порожнемъ ходѣ, возрастая постепенно, установится то, какое и должно быть по разсчету, то стало быть регуляторъ дѣйствуетъ. Если же оно все возрастаетъ и возрастаетъ, далеко переходя за должное, то это признакъ того, что регуляторъ бездѣйствуетъ; опытъ нужно прекратить и осмотрѣть регуляторъ, чтобы узнать, отчего онъ бездѣйствуетъ; это можетъ происходить отъ тугой пригонки движущихся частей, отъ плохой смазки, черезъ-чуръ тугихъ пружинъ, неправильно установленнаго золотника, впускающаго при порожнемъ ходѣ гораздо болѣе пара, чѣмъ слѣдуетъ, и тому подобныхъ причинъ. Если-же регуляторъ хотя и будетъ дѣйствовать, но лишь давши сперва скорости перейти за нормальную дальше, чѣмъ полагается по принятой при разсчетѣ степени нечувствительности, то это покажетъ, что дѣйствительная степень нечувствительности больше разсчетной, и причиной тому можетъ быть тоже тугая пригонка шарнировъ, но болѣе слабая чѣмъ при полномъ бездѣйствіи.

Въ томъ и другомъ случаѣ нужно изслѣдовать, *отчего именно* происходитъ бездѣйствіе и устранить причину его.

Добившись того, чтобы регуляторъ свободно переводилъ эксцентрикъ въ положеніе, потребное для порожняго хода, т. е. заставляя его пройти весь свой размахъ, мы можемъ приступить къ дальнѣйшимъ испытаніямъ подъ нагрузкой, нагружая сразу машину, напримѣръ, отъ порожняго хода до половины нагрузки, или отъ половинной нагрузки до полной и проч., и слѣдя при этомъ за колебаніями скорости ея при помощи тахометра. Если регуляторъ бросается, такъ что маятники мечутся взадъ и впередъ, то онъ или весьма близокъ къ астатичности или даже можетъ быть неустойчивъ, и поэтому необходимо увеличить начальную деформацію пружинъ или уменьшить вѣсъ груза, чтобы потребовалось болѣе число оборотовъ для удаленія маятника отъ центра диска и, слѣдовательно, получился бы статистическій регуляторъ. Такое изслѣдованіе на астатичность удобнѣе всего производить при среднихъ нагрузкахъ, чтобы заставлять маятники колебаться приблизительно около средняго положенія равновѣсія, чтобы его колебанія не стѣснялись ударами его о буферки, неизбежными при колебаніяхъ вблизи крайнихъ положеній.

Числа оборотовъ машины при различныхъ положеніяхъ маятниковъ, т. е. при разныхъ нагрузкахъ измѣряются тахометромъ и по нимъ вывѣряется требуемая степень неравномѣрности.

Замѣтимъ, что за самымъ движеніемъ маятниковъ тоже возможно слѣдить при помощи снятія діаграммы, какъ покажемъ въ главѣ IV.

Давши нѣкоторые расчеты и конструктивные чертежи въ масштабъ, могущіе оказать помощь при проектированіи и всѣ три взятые изъ нѣмецкой практики, мы теперь опишемъ еще нѣсколько системъ употребительныхъ плоскихъ регуляторовъ. Вообще, число различныхъ конструкцій теперь весьма велико, подробное перечисленіе ихъ завело бы насъ слишкомъ далеко и не входитъ въ планъ нашего сочиненія, тѣмъ болѣе, что *сущность* дѣла вездѣ одна и та же, и рассмотрѣнныхъ нами примѣровъ достаточно для ознакомленія съ этой сущностью. Поэтому укажемъ еще лишь нѣсколько конструкцій, имѣющихъ или историческій интересъ, или наиболѣе типичныхъ, или, наоборотъ, имѣющихъ особую оригинальность.

А.) Регуляторы американских конструкторовъ.

1) Регуляторъ Westinghouse'a (фиг. 47).

Два тяжелыхъ маятника или груза своеобразнаго вида, имѣющаго цѣлью придать всему регулятору уютность при большой массѣ грузовъ, могутъ качаться вокругъ шарнировъ bb , укрѣпленныхъ къ диску k , надѣтому на валъ машины. Двѣ спиральныхъ пружины ff работаютъ на растяженіе. Оба маятника связаны шатуномъ i , расположеннымъ такъ, что онъ заставляетъ оба маятника двигаться симметрично относительно вала; безъ него, при неодинаковости свойствъ пружины, маятники могутъ разойтись несимметрично и ихъ *общій* центръ тяжести сойти съ центра вала машины, что дурно отзовется на плавности хода ея, ибо дискъ будетъ „бить“. Шатунъ n , прикрѣпленный къ одной изъ массъ, хватается другимъ концомъ за шарниръ, укрѣпленный къ тѣлу эксцентрика, сидящаго на ручкѣ t , качающейся вокругъ оси l , укрѣпленной къ тому же диску k . Эксцентрикъ имѣетъ прорѣзъ, очерченный дугами круговъ изъ c , въ которомъ помѣщается и перемѣщается валъ машины.

При измѣненіи положенія маятниковъ, тѣло эксцентрика вращается вокругъ точки l , отчего мѣняются и эксцентриситетъ и уголъ предваренія его. Парораспредѣленіе — цилиндрическимъ скользящимъ золотникомъ. Вся конструкція можетъ служить образцомъ по своей уютности и компактности; она выполнена въ тысячахъ экземпляровъ и работаетъ превосходно.

2) Регуляторъ Armington & Sims (фиг. 48).

Онъ подобенъ регулятору Westinghouse'a, только пружины k k работаютъ на сжатіе. Здѣсь имѣются два эксцентрика, надѣтые одинъ на другой. Внутренній эксцентрикъ, E_1 можетъ вращаться на валу машины и связанъ съ грузами PP помощью двухъ тягъ или шатуновъ ll , такъ что, благодаря этому, оба маятника дѣлаютъ симметричныя отклоненія относительно вала машины. Наружный эксцентрикъ E_2 соединенъ шатуномъ h лишь съ однимъ изъ маятниковъ.

Шатуны расположены такъ что при расхожденіи маятниковъ оба эксцентрика поворачиваются въ противоположныя стороны и измѣняются эксцентриситетъ и уголъ предваренія равнодѣйствующаго эксцентрика изъ эксцентриковъ E_1 и E_2 . Эксцентрики подобраны такъ, что при всѣхъ положеніяхъ ихъ линейное предвареніе выпуска остается почти постояннымъ.

Изъ регулятора *Armington & Sims*, какъ усовершенствованіе его, произошелъ регуляторъ *Pröll'a*.

3) Регуляторъ машины „*Buckeye*“ (фиг. 49).

Части регулятора укрѣплены къ спицамъ шкива, сидящаго на главномъ валу. Пружины работаютъ на растяженіе. Эксцентрикъ вращается вокругъ главнаго вала, такъ что при передвиженіи его мѣняется лишь уголъ предваренія.

Особенность регулятора составляютъ, во-первыхъ, вспомо- гательныя пружины *P, P*, расположенныя такъ, что при внутрен- немъ крайнемъ положеніи грузовъ онѣ прогнуты и надавливаютъ на отростки *pp*, укрѣпленные къ маятникамъ и приходятъ въ не- напряженное состояніе, когда грузы доходятъ приблизительно до средняго своего отклоненія. Цѣль этихъ пружинокъ — помогать центробѣжной силѣ грузовъ при началѣ ихъ отклоненія, ибо здѣсь сила отъ сопротивленія передвиженію эксцентрика и золотни- ка, дѣйствующая по шатунамъ *BB*, наибольшая и стремится за- держать отклоненіе шара.

Другая особенность — ролики *g, g*, имѣющіе цѣлью предупре- дить прогибъ средней части пружины, гдѣ онъ наибольшій, пре- вращая ее какъ бы въ трехъ-опорную балку.

4) Регуляторъ *Sweet* (фиг. 50, при машинахъ того же кон- структора, носящихъ названіе *Straight Line Engine*, вслѣд- ствіе прямолинейности очертаній.

Въ этомъ регуляторѣ одинъ маятникъ, состоящій изъ груза *p*, сидящаго на ручкѣ (фиг. 50), имѣющей видъ рычага, къ другому концу котораго прицѣпленъ въ точкѣ *q* шатунъ, ведущій къ шар- ниру *m*, укрѣпленному въ отросткѣ тѣла эксцентрика, могущаго качаться вокругъ шарнира *n*, укрѣпленнаго въ спицѣ маховика.

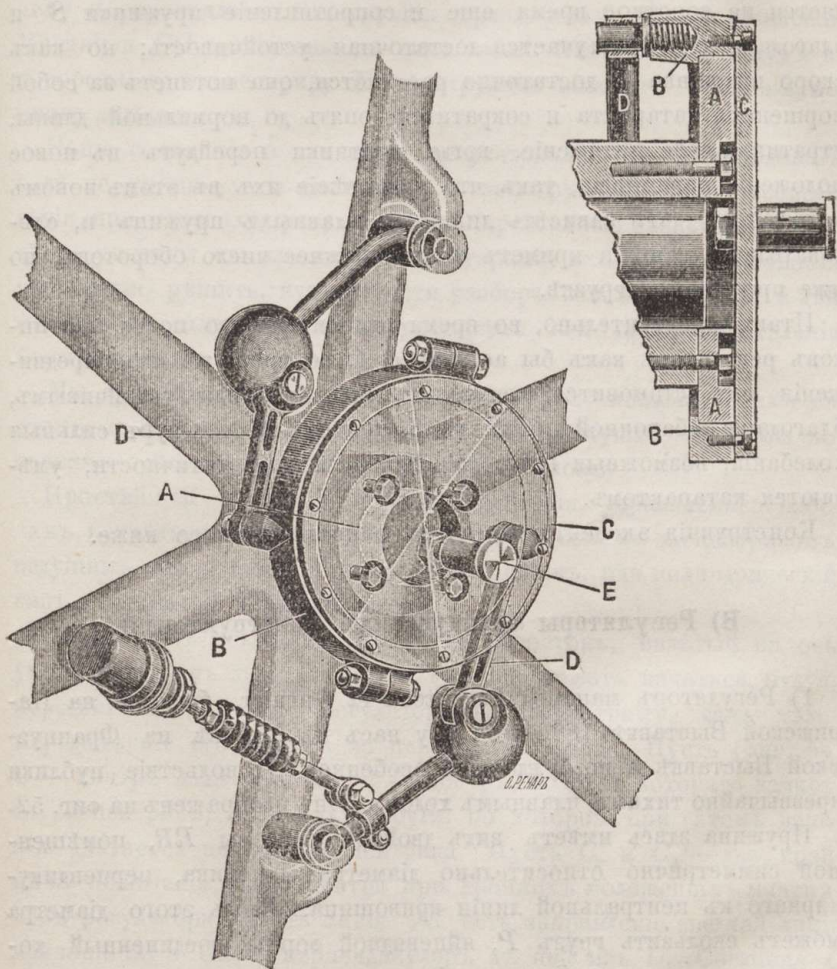
При переходѣ центра груза изъ *p* въ *p'*, центръ кружка эксцентрика переходитъ изъ *a* въ *b*, такъ что эксцентриситетъ отъ величины *ob* убываетъ до величины *oa*, соотвѣтствующей отсѣчкѣ нуль. Пружина плоская, рессорнаго типа, прикрѣплена къ маятнику при участіи ленты и особаго языковиднаго сектора, на который она навивается, позволяющаго установить такой по- рядокъ измѣненія плечъ натяженія ленты вокругъ оси качанія маятника, какой мы найдемъ нужнымъ для полученія желаемой степени неравномѣрности.

5) Регуляторъ *Ball'a*, употребляемый при машинахъ его же системы.

Идея, положенная въ основу этого регулятора очень ориги- нальна. Конструкторъ, для полученія возможно малой неравно- мѣрности, устроилъ регуляторъ астатическій, заставляя его пре-

вращаться въ статическій на время регулированія. при помощи сочетанія катаракта со спиральной пружиной.

На фиг. 51-й, изображенъ схематически боковой видъ регулятора, причемъ снятъ эксцентрикъ, а на полтипажѣ 1—его перспективный видъ [нѣкоторыя детали на этомъ полтипажѣ считаются какъ бы прозрачными, позволяя видѣть скрытое за ними (способъ Westinghouse'a)], причемъ для ясности сняты главныя пружины.



„Полит. 1-й.

Объ главныя пружины P, P выбраны такъ, чтобы регуляторъ былъ вполнѣ астатическимъ *). Къ одному изъ маятниковъ при-

*) Такая установка пружинъ называется у американцевъ особымъ термимомъ „дать пружинѣ полное теоретическое натяженіе“ (to give full theoretic tension).

цѣплена на шарпирѣ еще третья, короткая пружинка S , пригнѣ-
пленная другимъ концомъ къ стержню поршня катаракта k , укрѣ-
пленного на одной изъ спицъ маховика. Пружинкѣ S не дается
никакого начального натяженія. Вслѣдствіе сопротивленія ката-
ракта, для передвиженія его поршенька требуется извѣстная сила
и пока пружинка S не растянется настолько, чтобы развить эту
силу, поршеньекъ не тронется, несмотря на движеніе маятника.
Такимъ образомъ, къ сопротивленію главныхъ пружинъ прибав-
ляется на короткое время еще и сопротивленіе пружинки S и
благодаря этому получается достаточная устойчивость; но какъ
скоро пружинка S достаточно растянется, она потянетъ за собой
поршеньекъ катаракта и сократится опять до нормальной длины,
утративъ свое натяженіе, когда маятники перейдутъ въ новое
положеніе равновѣсія, такъ что равновѣсіе ихъ въ этомъ новомъ
положеніи будетъ зависѣть лишь отъ главныхъ пружинъ и, слѣ-
довательно, машина приметъ опять прежнее число оборотовъ, но
уже при иной нагрузкѣ.

Итакъ, дѣйствительно, во время относительнаго покоя маятни-
ковъ регуляторъ какъ бы астатическій, во время же ихъ передви-
женія онъ становится слегка статическимъ или устойчивымъ,
благодаря добавочной пружинкѣ S , причемъ черезъ-чуръ сильныя
колебанія, возможные вслѣдствіе близости къ астатичности, умѣ-
ряются катарактомъ.

Конструкція эксцентрика будетъ описана немного ниже.

В) Регуляторы французскихъ конструкторовъ.

1) Регуляторъ машины Lecouteux et Garnier, бывшей на Па-
рижской Выставкѣ 1889 года и у насъ въ Москвѣ на Француз-
ской Выставкѣ и возбуждавшей особенное удовольствіе публики
чрезвычайно тихимъ, плавнымъ ходомъ. Онъ изображенъ на фиг. 52.

Пружина здѣсь имѣетъ видъ двойной рессоры RR , помѣщен-
ной симметрично относительно діаметра маховика, перпендику-
лярнаго къ центральной линіи кривошипа. Вдоль этого діаметра
можетъ скользить грузъ P , яйцевидной формы, соединенный хо-
мутомъ съ внутренней рессорой и съ эксцентрикомъ.

Движеніе всей этой системы направляется двумя стержнями
 a и b . Центръ эксцентрика c движется по прямой, параллельной
сказанному діаметру, чѣмъ измѣняется наполненіе цилиндра. По
другую сторону эксцентрика помѣщенъ масляный катарактъ M
для скорѣйшаго затуханія вредныхъ колебаній качающейся си-

стемы. Цилиндръ катаракта укрѣпленъ неподвижно къ диску маховика, а поршень соединенъ съ эксцентрикомъ. Такъ какъ здѣсь одна пружина и одинъ грузъ, то несимметричное ихъ положеніе должно быть принято во вниманіе при расчетѣ противовѣса, иначе машина будетъ нѣсколько бить.

2) По простотѣ своей заслуживаетъ вниманія регуляторъ машинъ Hoffmann'a, строящихся на заводѣ Oerlikon (фиг. 53). Здѣсь одна центральная пружина, работающая на растяженіе, благодаря чему и упростилась конструкція сравнительно съ Преллевской. Маятники CC выполнены въ видѣ сабли. Шатуны DD ведутъ къ поворотному эксцентрику E , конструкцію котораго опишемъ немного дальше.

Наше сочиненіе о плоскихъ регуляторахъ будетъ неполнымъ, если не упомянуть о системахъ и конструкціяхъ парораспределенія при плоскихъ регуляторахъ. Переставные эксцентрики такъ тѣсно связаны съ плоскими регуляторами, ихъ переставляющими, что трудно рѣшить, куда отнести разборъ ихъ конструкцій и дѣйствія — къ плоскимъ ли регуляторамъ или парораспределенію быстроходныхъ машинъ.

Мы думаемъ, что въ виду сравнительной новизны этихъ системъ парораспределенія, читатели не посѣтуютъ, если мы посвятимъ здѣсь этому вопросу нѣсколько словъ.

Простѣйшей системой парораспределенія, управляемаго плоскимъ регуляторомъ, является система съ *однимъ* эксцентрикомъ, ведущимъ или плоскій коробчатый золотникъ, или цилиндрическій, какъ въ машинѣ Westinghouse'a.

Эксцентрикъ обыкновенно имѣетъ отростокъ, надѣтый на ось, укрѣпленную къ диску, вокругъ которой можетъ качаться, будучи передвигаемъ плоскимъ регуляторомъ. Посмотримъ, какъ такое передвиженіе его вліяетъ на парораспределеніе. Пусть (фиг. 54) O — центръ вала машины, V — центръ, вокругъ котораго качается эксцентрикъ, DD — дуга круга, по которой при этомъ качаніи двигается центръ эксцентрика. Пусть C_2 и C_1 — два крайнихъ положенія этого центра при крайнихъ положеніяхъ маятниковъ регулятора. Пусть линія OK есть направленіе средней линіи кривошипа, а OP — перпендикуляръ къ ней изъ O . Соединяя O съ C_1 и C_2 , мы видимъ, что крайніе эксцентриситеты будутъ $OC_1 = r_1$ и $OC_2 = r_2$, а соответствующіе углы предваренія будутъ: $C_1OP = \delta_1$ и $C_2OP = \delta_2$. При движеніи маятниковъ регулятора изъ одного крайняго положенія въ другое будутъ, слѣдовательно, измѣняться и эксцентриситетъ и уголъ предваренія эксцентрика, при неизмѣнныхъ характерныхъ размѣрахъ золотника —

его внѣшнемъ и внутреннемъ перекрытіи. Въ какую сторону заставить измѣняться эксцентриситетъ и уголъ предваренія — зависитъ отъ системы золотника или, все равно, отъ заклиниванія эксцентрика. Если, напримѣръ, употребляется простой плоскій золотникъ, отсѣкающій наружными краями, то эксцентрикъ долженъ идти впереди кривошипа на уголъ $90 + \delta$, гдѣ δ — уголъ предваренія; и такъ какъ, при увеличеніи скорости машины и расхожденіи маятниковъ, отсѣчка должна уменьшаться, а для этого здѣсь надо уменьшать эксцентриситетъ r и увеличивать уголъ δ , то сообразно этому и нужно устроить связь эксцентрика съ маятниками.

Вліяніе измѣненій эксцентриситета и угла предваренія на фазисы парораспределенія можно видѣть наглядно на діаграммѣ Цейнера, а еще лучше пользоваться здѣсь діаграммой Брикса *). На фиг. 55 показана діаграмма Цейнера, построенная для двухъ крайнихъ значеній r и δ , соотвѣствующихъ чертежу фиг. 54. Какъ видно, съ уменьшеніемъ r и увеличеніемъ δ отъ величины r_2 и δ_2 до величины r_1 и δ_1 , наполненіе цилиндра уменьшается отъ 0,83 до 0,12.

Если отложимъ на діаграммѣ отъ лѣваго мертваго положенія кривошипа уголъ ϕ , равный углу KOV фигуры 54 и возьмемъ на сторонѣ его точку v , такъ что разстояніе OV на фиг. 55, то не трудно убѣдиться, что центръ золотниковаго круга движется по дугѣ $M_1 M_2$ круга, описаннаго изъ v . Изъ этого слѣдуетъ, что линейное предвареніе впуска въ мертвой точкѣ будетъ перемѣннымъ при разныхъ отсѣчкахъ.

Иногда эксцентрикъ не качается вокругъ оси, а двигается въ направляющихъ такъ, что центръ его описываетъ прямую линію $C_2 C_1$ (фиг. 56), перпендикулярную къ направленію кривошипа OK , такъ что при расхожденіи маятниковъ уголъ предваренія увеличивается, а эксцентриситетъ уменьшается.

Линейное предвареніе впуска при этомъ остается постояннымъ, ибо центръ золотниковаго круга на діаграммѣ Цейнера (фиг. 57) движется по прямой, перпендикулярной къ горизонтальной линіи мертвыхъ точекъ діаграммнаго кривошипа. Конечно, это постоянство справедливо лишь по столько, по сколько допустима и самая діаграмма Цейнера, т. е. при длинныхъ тягахъ и шатунахъ. При короткихъ тягахъ и шатунахъ діаграмма Цейнера можетъ вести

*) Морской Сборникъ 1893 года № 5-й и Бюллетени Политехническаго Общества, состоящаго при Императорскомъ Московскомъ Техническомъ Училищѣ, за 1894 г. № 3-й.

къ серьезнымъ неточностямъ и вмѣсто нея рекомендуемъ употреб-
лять тогда діаграмму Брикса.

Примѣръ подобнаго распредѣленія имѣется въ машинѣ *Lecouteux et Garnier*.

Переходимъ къ системамъ съ двумя эксцентриками и однимъ золотникомъ.

О регуляторѣ машины *Armington & Sims* (фиг. 48) мы упоминали раньше. Здѣсь имѣется два эксцентрика, поворачивающіеся отъ регулятора въ разныя стороны, при чемъ центръ всего сложнаго или равнодѣйствующаго эксцентрика движется по дугѣ весьма большаго радіуса, такъ что линейное предвареніе впуска въ мертвой точкѣ почти постоянно. Впрочемъ это постоянство, котораго такъ усиленно добиваются многіе конструкторы, вовсе не имѣетъ того серьезнаго значенія, которое ему приписывали прежде, и, по мнѣнію *Pröll'a*, даже лучше, если по мѣрѣ уменьшенія степени наполненія происходитъ болѣе раннее открытіе окна, ибо этимъ устраняется черезъ чуръ сильное сжатіе пара, могущее при отсѣчкахъ близкихъ къ нулю перейти за давленіе впуска и вызвать приподыманіе золотника; это соображеніе вполне вѣрно. Сообразно такому взгляду и построена система распредѣленія *Pröll-Doerfel'a*, въ которой тоже имѣется два эксцентрика (фиг. 58), изъ которыхъ внутренній E_i сидитъ наглухо на валу машины, такъ что центръ его C_i сохраняетъ неизмѣнное положеніе относительно центра O вала и линіи OK — направленія кривошипа, слѣдовательно, его эксцентриситетъ $OC_i = r_i$ и уголъ предваренія $\angle POC_i = \delta_i$ неизмѣнны. Наружный кружокъ E_e надѣтъ на кружокъ E тоже эксцентрически, такъ что центръ его находится въ разсматриваемый моментъ, положимъ, въ точкѣ C_e'' , на разстояніи r_e отъ C_i , а направленіе $C_i C_e''$ составляетъ съ линіей OP уголъ δ_e'' ; эти величины r_e и δ_e'' можно назвать относительными—эксцентриситетомъ и угломъ предваренія.

Если скрѣпить оба эксцентрика въ одно цѣлое, то получимъ какъ бы одинъ цѣльный кружокъ, коего центръ C_e'' отстоитъ отъ точки O на разстояніе r' , представляющее абсолютный эксцентриситетъ, а уголъ $\angle POC_e'' = \delta'$ есть уголъ предваренія этого истиннаго эксцентрика.

Изъ $\triangle OC_i C_e''$ видно, что какъ величина равнодѣйствующаго эксцентриситета OC_e'' такъ и его направленіе, опредѣляемое угломъ δ' , получаются изъ слагающихъ r_e и r_i и δ_e'' и δ_i по тому же закону параллелограмма или треугольника, по которому получается равнодѣйствующая двухъ силъ.

Этот замѣчательный законъ сложения эксцентриковъ впервые высказанъ во всей полнотѣ и общности и развитъ въ примѣненіи къ разнымъ системамъ кулиссъ и другихъ парораспределеній французскимъ ученымъ инженеромъ Richault.

Маятники регулятора связаны лишь съ наружнымъ эксцентрикомъ E_e и при своихъ перемѣщеніяхъ вращаютъ его вокругъ внутренняго кружка E_i , такъ что каждая точка кружка E_e , а слѣдовательно, и центръ C_e'' его описываетъ дуги круговъ вокругъ C_i , такъ что центръ изъ положенія C_e'' перейдетъ, положимъ, въ C_e' , описавъ дугу круга $C_e'' C_e'$ вокругъ C_i . Въ точкѣ C_e' эксцентриситетъ составнаго эксцентрика будетъ $r' = OC_e'$, а уголъ предваренія его δ' . Такимъ образомъ здѣсь измѣняются и эксцентриситетъ и уголъ предваренія. На фиг. (59) показано построеніе діаграммы Цейнера для системы Pröhl'a. Не трудно изъ нея видѣть, что центръ Цейнеровской діаграммы для равнодѣйствующаго эксцентрика будетъ перемѣщаться по дугѣ $m_e'' m_e'$, описаннаго изъ середины M діаметра круга внутренняго эксцентрика радіусомъ, равнымъ половинѣ относительнаго эксцентриситета.

Діаграмма фиг. (59) начерчена для осуществленнаго золотника машины Pröhl'a, при чемъ было принято $\delta_i = 0$, такъ что r_i на діаграммѣ перпендикуляренъ къ линіи мертвыхъ точекъ.

Переходимъ къ системамъ съ *тремя* эксцентриками и двумя золотниками, кореннымъ и отсѣчнымъ.

Въ системѣ Salaba (съ регуляторомъ Budil, разобраннымъ раньше) имѣются два золотника (фиг. 60): нижній — коренной и верхній — отсѣчный, представляющій одну цѣльную пластинку, такъ что это есть собственно старинное парораспределеніе Polonseau. Коренной золотникъ ведется обыкновеннымъ эксцентрикомъ, отсѣчная же пластинка ведется составнымъ эксцентрикомъ, аналогичнымъ эксцентрику Pröhl'a и состоящимъ изъ двухъ кружковъ (фиг. 46), внутренняго K , сидящаго наглухо на валу машины и наружнаго E , сидящаго эксцентрично на немъ и могущаго вращаться вокругъ него отъ дѣйствія регулятора, какъ и въ системѣ Pröhl.

Нетрудно построить Цейнеровскую діаграмму для отсѣчнаго эксцентрика при какомъ нибудь положеніи регулятора, совершенно подобно тому, какъ въ системѣ Pröhl, и затѣмъ по ней и діаграммѣ кореннаго золотника найти относительный кругъ по извѣстному правилу параллелограмма при данномъ положеніи регулятора. При измѣненіи положенія эксцентрика E центръ относительнаго круга на діаграммѣ Цейнера будетъ двигаться такъ же, какъ и въ системѣ Polonseau.

Такъ какъ эксцентриситетъ и уголъ предваренія эксцентрика *К* и коренного эксцентрика сдѣланы здѣсь *одинаковыми*, то, какъ видно изъ діаграммы, діаметръ относительнаго круга будетъ при всякомъ положеніи *постояненъ* и равенъ эксцентриситету эксцентрика *Е*, такъ что относительный ходъ коренного и отсѣчнаго золотниковъ всегда одинъ и тотъ же, какъ при большихъ, такъ и при малыхъ отсѣчкахъ, а это весьма полезно въ смыслѣ изнашивания золотниковъ; если, на примѣръ, машина долгое время работаетъ почему либо все при той же отсѣчкѣ, то въ другихъ системахъ истираніе спинки коренного золотника произойдетъ сообразно ходу пластинки, и образуется выбоинка, здѣсь-же этого не будетъ.

Система Нoffmann'а при регуляторѣ его-же конструкціи (фиг. 53) устроена нѣсколько иначе. Здѣсь тоже имѣются три эксцентрика. На валъ машины надѣтъ вольно внутренній эксцентрикъ *ЕЕ*, который можетъ поворачиваться шатунчиками *DD*. На эксцентрикъ *ЕЕ* надѣты эксцентрически два кружка *FF*, представляющіе коренной и отсѣчный эксцентрики парораспредѣленія Polonceau. Оба кружка отлиты въ одно цѣлое и при помощи хвоста *G* и кривошипа *k* эта система подвѣшена къ диску регулятора. Очевидно, что при поворотѣ эксцентрика *ЕЕ* вслѣдствіе перемѣшенія маятниковъ регулятора, система *FF* тоже получитъ нѣкоторое перемѣшеніе, такъ что измѣнятся длины и положенія прямыхъ, соединяющихъ центры кружковъ *FF* съ центромъ вала машины, вслѣдствіе чего измѣнится и относительное движеніе обоихъ золотниковъ и измѣнятся отсѣчки.

Какъ коренной золотникъ, такъ и отсѣчная пластинка выполнены цилиндрическими.

Изслѣдованіе этого парораспредѣленія сложнѣе предыдущаго, и мы не станемъ входить въ большія подробности, которымъ мѣсто въ курсѣ паровыхъ машинъ, а не здѣсь.

ГЛАВА IV.

До сихъ поръ мы изучали плоскій регуляторъ съ точки зрѣнія статики, т.-е. рассматривали свойства его въ различныхъ положеніяхъ равновѣсія, въ которыхъ онъ устанавливается сообразно работѣ машины. Но такъ какъ регуляторъ переходитъ изъ одного положенія въ другое не мгновенно, а постепенно, и за все время перехода связь его съ парораспредѣлительнымъ органомъ машины, а слѣдовательно, и вліяніе на ея работу (понимается регуляторъ прямого дѣйствія) не прекращаются, то важно и необходимо разсмотрѣть регуляторъ и въ состояніи движенія и изучить свойства этого движенія и зависящія отъ него колебанія скорости машины, чтобы имѣть возможность судить о достоинствѣ или даже о пригодности или непригодности регулятора.

Вопросъ этотъ, къ сожалѣнію, пока мало разработанъ и даже сравнительно мало извѣстенъ, такъ что большинство сочиненій о регуляторахъ вовсе его не касается, ограничиваясь лишь разсмотрѣніемъ регуляторовъ въ состояніи равновѣсія.

Мы разсмотримъ здѣсь лишь сущность вопроса о движеніи *плоскаго* регулятора въ простѣйшей формѣ, имѣя цѣлью, съ одной стороны, дать возможность познакомиться съ этимъ вопросомъ учащимся, не владѣющимъ иностранными языками, а съ другой стороны—оживить вниманіе специалистовъ къ этому вопросу.

Чтобы возможно яснѣе подойти къ сущности явленія, мы начнемъ разсмотрѣніе съ простѣйшихъ случаевъ, усложняя его постепенно.

Представимъ себѣ дискъ, вращаемый равномерно (фиг. 61) съ угловой скоростью ω_1 . По радіусу диска можетъ скользить безъ тренія матеріальная точка съ конечной массой или „шаръ“ M , удерживаемый въ извѣстномъ разстояніи отъ центра пружиной. Пусть при угловой скорости ω_1 центръ шара находится на разстояніи R отъ центра диска, а пружина при этомъ сжата съ силой S_1 и имѣетъ длину $MN=L$. Пусть пружина выбрана такимъ образомъ, что нашъ идеальный регуляторъ статическій, такъ что

при положеніи шара на разстояніи r отъ центра, сила сжатія пружины уже равна нулю. Условіе равновѣсія шара будетъ:

$$m\omega_1^2 R = S_1 = \beta (R - r) \quad (1)$$

гдѣ β —коэффициентъ, зависящій отъ матеріала и размѣровъ пружины. Пусть линія Cn изображаетъ законъ распредѣленія по радіусу центробѣжныхъ силъ при угловой скорости ω_1 , а линія $C'n'$ —распредѣленіе силъ сжатія пружины. При положеніи шара въ точкѣ M' ихъ пересѣченія, на разстояніи R отъ центра, онъ будетъ въ равновѣсіи, что мы теперь и предположимъ.

Допустимъ, что возможно мгновенно увеличить угловую скорость диска до величины ω_2 , большей ω_1 на конечную величину, и затѣмъ поддерживать ее равномѣрной, но уже равной ω_2 . Разсмотримъ движеніе шара, вызванное этой переменнѣй. При угловой скорости ω_2 распредѣленіе центробѣжныхъ силъ по радіусу выразится другой прямой Cn'' , и положеніе равновѣсія шара при этой новой скорости будетъ въ M'' —точкѣ пересѣченія Cn'' съ діаграмой $C'n'$ пружины; разстояніе CM'' назовемъ Δ . Тогда для равновѣсія въ точкѣ M'' имѣемъ уравненіе:

$$m\omega_2^2 \Delta = \beta (\Delta - r) \quad (2)$$

Въ моментъ измѣненія скорости ω_1 шаръ находится въ точкѣ M' , лѣвѣе M'' . Когда скорость стала ω_2 и поддерживается таковою, то въ первый моментъ послѣ измѣненія скорости мы имѣемъ шаръ, находящійся въ M' т.-е. удаленный отъ положенія равновѣсія M'' , которое теперь можетъ имѣть мѣсто, на разстояніе $\Delta - R$. Ясно, что шаръ будетъ стремиться придти въ новое положеніе равновѣсія и начнетъ двигаться; явленіе, очевидно, вполне тождественно съ тѣмъ, какъ если бы мы шаръ, въ равновѣсіи въ точкѣ M'' , отклонили въ точку M' и отпустили его безъ начальной скорости, предоставивъ ему, подобно пружинному маятнику, вернуться въ положеніе равновѣсія. Въ нашемъ же регуляторѣ шаръ остался на мѣстѣ, а положеніе равновѣсія ушло отъ него вправо, такъ что шаръ какъ бы отклонился влѣво. Для строгости мы однако изслѣдуемъ движеніе шара съ помощью аналитической механики. На шаръ въ точкѣ M' въ первый моментъ по измѣненіи скорости дѣйствуютъ двѣ силы: прежняя сила пружины S_1 и новая центробѣжная $m\omega_2^2 R$, бѣльшая S_1 , такъ что подъ вліяніемъ силы, равной разности ихъ:

$$m\omega_2^2 R - S_1,$$

шаръ пойдетъ вправо. Возьмемъ его въ произвольной точкѣ на разстояніи x отъ центра, между M' и M'' и напомнимъ для этой точки уравненіе движенія шара.

Движущія силы будутъ: центробѣжная $m\omega^2 x$, дѣйствующая вправо, и сила сжатія пружины $\beta(x - r)$, дѣйствующая влѣво, такъ что уравненіе движенія будетъ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m\omega^2 x - \beta(x - r) \dots \quad (3)$$

Это уравненіе и постараемся проинтегрировать.

Для приведенія получимъ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \beta r + (m\omega^2 - \beta) x \dots \quad (4)$$

Замѣняя изъ (2) $m\omega^2 - \beta$ черезъ $-\frac{\beta r}{\Delta}$, получаемъ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \beta r - \frac{\beta r}{\Delta} x = \beta r \left(1 - \frac{x}{\Delta}\right) \dots \quad (5)$$

Положимъ

$$1 - \frac{x}{\Delta} = \frac{\xi}{\Delta}$$

и слѣдовательно:

$$dx = -d\xi \dots \quad (6)$$

и подставимъ въ уравненіе (5). Получимъ:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -\frac{\beta r \xi}{\Delta} \text{ или}$$

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = -\frac{\beta r}{m\Delta} \xi = -A\xi, \dots \quad (7)$$

если положимъ для краткости

$$\frac{\beta r}{m\Delta} = A \dots \quad (8)$$

Для интегрированія уравненія (7) положимъ

$$\frac{d\xi}{dt} = \xi' \dots \quad (9)$$

откуда

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = \frac{d\xi'}{dt}$$

Тогда уравненіе (7) приметъ видъ:

$$\frac{d\xi'}{dt} = -A\xi$$

Но

$$\frac{d\xi'}{dt} = \frac{d\xi'}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi'}{d\xi} \xi',$$

такъ что имѣемъ

$$\frac{d\xi'}{d\xi} \cdot \xi' = -A\xi \text{ или}$$

$$d\xi' \cdot \xi' = -A\xi d\xi \dots \quad (10)$$

Интегрируя находимъ:

$$\frac{\xi'^2}{2} = -\frac{A\xi^2}{2} + C \text{ или}$$

$$\xi'^2 = 2C - A\xi^2 \dots \quad (11)$$

Величину C опредѣлимъ сейчасъ же изъ начальныхъ условій.

Такъ какъ

$$\xi' = \frac{d\xi}{dt} = -\frac{dx}{dt}$$

то ξ' есть скорость движенія, взятая съ обратнымъ знакомъ.

Въ моментъ измѣненія угловой скорости, при $x = R$, или при $\xi = \Delta - R$, шару не сообщается извнѣ никакой скорости, такъ что при

$$\xi = \Delta - R$$

должно быть

$$\frac{d\xi}{dt} = \xi' = 0$$

Поэтому, полагая въ (11) $\xi = \Delta - R$ и $\xi' = 0$, находимъ:

$$0 = 2C - A(\Delta - R)^2$$

откуда

$$2C = A(\Delta - R)^2 = \frac{\beta r}{m\Delta} (\Delta - R)^2 \quad (12)$$

Подставляя въ (11) и замѣняя ξ' черезъ $\frac{d\xi}{dt}$ находимъ:

$$\left(\frac{d\xi}{dt}\right)^2 = A(\Delta - R)^2 = A\xi^2 \text{ или}$$

$$dt = \frac{d\xi}{\sqrt{-A\xi^2 + A(\Delta - R)^2}}$$

что можно представить въ видъ:

$$dt = \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \frac{d\left(\frac{\xi}{\Delta - R}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{\Delta - R}\right)^2}} \dots \quad (13)$$

Правая часть теперь имѣетъ видъ функціи отъ $\frac{\xi}{\Delta - R}$ и, интегрируя, получимъ

$$t = \frac{1}{\sqrt{A}} \int \frac{d\left(\frac{\xi}{\Delta - R}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{\Delta - R}\right)^2}} + C_1 = \frac{1}{\sqrt{A}} \arcsin \frac{\xi}{\Delta - R} + t_0 \dots \quad (14)$$

гдѣ t_0 произвольное постоянное.

Обращая функцію въ уравненіи (14), находимъ:

$$\xi = (\Delta - R) \cdot \sin \left\{ \sqrt{A} (t - t_0) \right\} \dots \quad (15)$$

или

$$x = \Delta - (\Delta - R) \cdot \sin \left\{ \sqrt{A} (t - t_0) \right\} \dots \quad (16)$$

Условимся считать время съ момента прохожденія шара черезъ новое положеніе равновѣсія, такъ что при $x = \Delta$ или $\xi = 0$, t должно быть равно нулю. Изъ этого условія находимъ t_0 , полагая въ (15) $\xi = 0$ и $t = 0$

$$0 = (\Delta - R) \cdot \sin \left\{ \sqrt{A} (0 - t_0) \right\},$$

откуда

$$t_0 = 0 + 2n\pi$$

гдѣ n произвольное цѣлое число. Для насъ безразлично, какое n взять и для простоты возьмемъ $n = 0$, такъ что и $t_0 = 0$, и тогда уравненія (15) и (16) примутъ видъ:

$$\xi = (\Delta - R) \cdot \sin \left\{ t \sqrt{A} \right\} \dots \quad (17)$$

$$x = \Delta - (\Delta - R) \cdot \sin \left\{ t \sqrt{A} \right\} \dots \quad (18)$$

Замѣтимъ, что величины ξ и x очевидно періодически повторяются, и, на примѣръ, при

$$t \sqrt{A} = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi$$

$$\xi = 0$$

$$x = \Delta,$$

такъ что при приращеніяхъ величины $t \sqrt{A}$ на 2π , ξ и x получаютъ прежнія значенія.

Промежутокъ времени T , за который повторяется значеніе ξ и x , называется періодомъ, и имѣемъ:

$$T \sqrt{A} = 2\pi \text{ и}$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} \dots \quad (19)$$

такъ что

$$\xi = (\Delta - R) \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \dots \quad (20)$$

$$x = \Delta - (\Delta - R) \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \dots \quad (21)$$

Полученныя уравненія (20) и (21) показываютъ, что шаръ будетъ совершать простое гармоническое колебаніе, подобно маятнику, вокругъ положенія равновѣсія M'' , отклоняясь въ крайнихъ точкахъ размаха вправо и влево отъ него на величину $\Delta - R$, такъ что полная амплитуда будетъ $2(\Delta - R)$. Величина ξ есть отклоненіе шара отъ положенія равновѣсія M'' . Прослѣдимъ для ясности измѣненіе величины ξ .

При $t = 0$ $\xi = 0$.

При измѣненіи t отъ 0 до $\frac{T}{4}$, ξ возрастаетъ отъ 0 до $+(\Delta - R)$.

При $t = \frac{T}{4}$ $\xi_{max} = \Delta - R$.

При измѣненіи t отъ $\frac{T}{4}$ до $\frac{T}{2}$, ξ убываетъ отъ $\Delta - R$ до нуля.

При $t = \frac{T}{2}$ $\xi = 0$.

При измѣненіи t отъ $\frac{T}{2}$ до $\frac{3T}{4}$, ξ убываетъ (отклоненіе влѣво) до величины $-(\Delta - R)$.

При $t = \frac{3T}{4}$ $\xi = -(\Delta - R)$.

При измѣненіи t отъ $\frac{3T}{4}$ до T , ξ возрастаетъ отъ $-(\Delta - R)$ до 0 .

При $t = T$ $\xi = 0$

и періодъ повторяется.

Время одного колебанія равно T и выражается такъ:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\beta r}{\Delta \cdot m}}} \dots \quad (22)$$

Замѣняя β для спиральной пружины круглаго сѣченія черезъ

$$\frac{G\delta^4}{64nr^3}$$

имѣемъ

$$T = \frac{16\pi \cdot \sqrt{nr^3}}{\delta^2 \sqrt{G \cdot \frac{r}{\Delta}}} \dots \quad (23)$$

Какъ видно изъ (22), время одного колебанія тѣмъ меньше, чѣмъ больше β при данныхъ m и $\frac{r}{\Delta}$, т.-е. чѣмъ сильнѣе пружи-

на, и тѣмъ больше, чѣмъ, при данныхъ β и m , меньше $\frac{r}{\Delta}$ т.-е. чѣмъ регуляторъ ближе къ астатическому. Для $r = 0$, т.-е. для астатическаго регулятора, $T = \infty$, т.-е. шаръ никогда не вернется самъ собою назадъ, а уйдетъ въ крайнее положеніе и тамъ останется.

Изъ уравненія (23) видно, что время колебанія тѣмъ больше, чѣмъ больше число n завитковъ пружины, чѣмъ больше ея радіусъ ρ , чѣмъ тоньше поперечные размѣры сѣченія ея (чѣмъ меньше δ) и чѣмъ менѣе упругъ матеріалъ (G).

Если нѣтъ тренія и вообще никакихъ сопротивленій, то шаръ будетъ качаться вѣчно съ амплитудой $2(\Delta - R)$. На самомъ дѣлѣ всегда будутъ имѣть мѣсто сопротивленія, главнымъ образомъ треніе. Примемъ для простоты, что шаръ испытываетъ силу тренія *постоянной* величины (эта сила направлена всегда обратно его движенію) и перерѣшимъ теперь нашу задачу, принимая въ расчетъ треніе.

Назовемъ постоянную величину силы тренія, дѣйствующей по направленію радіуса, по которому движется шаръ, черезъ F . При движеніи шара отъ центра C , сила эта направлена къ центру C , а при движеніи шара къ центру, сила F направлена отъ центра.

Представимъ себѣ опять тотъ же дискъ съ шаромъ, могущимъ двигаться по радіусу, и положимъ, что его угловая скорость мгновенно увеличилась отъ величины ω_1 до величины ω_2 .

Разсмотримъ первое колебаніе шара послѣ этого измѣненія, когда онъ удаляется отъ центра и x возрастаетъ.

Уравненіе движенія теперь напишется такъ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m\omega_2^2 x - \beta(x - r) - F \dots \quad (24)$$

ибо сила F дѣйствуетъ къ центру.

Преобразуемъ его такъ же, какъ и раньше

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= (m\omega_2^2 - \beta)x + \beta r - F = \\ &= -\frac{\beta r}{\Delta} x + \beta r - F = \beta r \left(1 - \frac{F}{\beta r} - \frac{x}{\Delta} \right) \dots \end{aligned} \quad (25)$$

Положимъ:

$$1 - \frac{F}{\beta r} - \frac{x}{\Delta} = \frac{z}{\Delta} \dots \quad (26)$$

и, слѣдовательно

$$- dx = dz \dots \quad (27)$$

Тогда уравнение (25) приметъ видъ

$$- m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\beta r z}{\Delta}$$

или

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \frac{\beta r}{m \Delta} z \dots \quad (28)$$

Полагая

$$+ \frac{\beta r}{m \Delta} = A, \dots \quad (29)$$

находимъ

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - A z \dots \quad (30)$$

Интегрируя это уравнение подобно уравнению (7), находимъ:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = - \frac{A z^2}{2} + C \dots \quad (31)$$

Здѣсь тоже начальная скорость равна нулю и слѣдовательно при

$$x = R \text{ или } z = \Delta \left(1 - \frac{F}{\beta r} - \frac{R}{\Delta} \right)$$

должно быть

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{dz}{dt} = 0$$

такъ что

$$\frac{1}{2} \cdot 0 = - \frac{A \Delta^2}{2} \left(1 - \frac{F}{\beta r} - \frac{R}{\Delta} \right)^2 + C$$

откуда

$$C = \frac{A \Delta^2}{2} \left(1 - \frac{F}{\beta r} - \frac{R}{\Delta} \right)^2 = \frac{A}{2} \left(\Delta - \frac{F \Delta}{\beta r} - R \right)^2$$

Далѣе, изъ (31) получаемъ:

$$dt = \frac{dz}{\sqrt{A \left(\Delta - R - \frac{F \Delta}{\beta r} \right)^2 - A z^2}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{d \left(\frac{z}{\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}} \right)}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{z}{\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}} \right\}^2}} \dots \quad (32)$$

Интегрируя, находимъ :

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \int \frac{d \left\{ \frac{z}{\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}} \right\}}{\sqrt{1 - \left\{ \frac{z}{\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}} \right\}^2}} + t_0 = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A}} \arcsin \frac{z}{\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}} + t_0 \dots \end{aligned} \quad (33)$$

или

$$z = \left(\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} \right) \cdot \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \}, \dots \quad (34)$$

а замѣняя z его выраженіемъ черезъ x изъ (26)

$$\Delta - \frac{F\Delta}{\beta r} - x = \left(\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} \right) \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \}$$

или

$$x = \Delta - \frac{F\Delta}{\beta r} - \left(\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} \right) \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \} \dots \quad (35)$$

Для опредѣленія постояннаго t_0 условимся считать время такъ, чтобы

$$t \text{ было равно } 0 \text{ при } x = \Delta - \frac{F\Delta}{\beta r},$$

тогда изъ (35) находимъ, что $t_0 = 0$, и

$$x = \Delta - \frac{F\Delta}{\beta r} - \left(\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} \right) \sin (t \sqrt{A}) \dots \quad (36)$$

Наибольшая величина x будетъ (предполагая что

$$x - R - \frac{F\Delta}{\beta r} > 0),$$

когда $\sin(t\sqrt{A})$ будетъ $= -1$ и тогда

$$\begin{aligned} x_{max} &= 2\Delta - R - \frac{2F\Delta}{\beta r} = \\ &= \Delta + (\Delta - R) - \frac{2F\Delta}{\beta r} \dots \end{aligned} \quad (37)$$

Дойдя до этого отклоненія въ точкѣ M'' , фиг. 62, шаръ остановится на мгновеніе и начнетъ двигаться обратно. Прежде наибольшее отклоненіе x_{max} отъ центра C было $\Delta + (\Delta - R)$, теперь-же оно меньше на величину $\frac{2F\Delta}{\beta r}$, такъ что, вслѣдствіе тренія, шаръ не достигаетъ того отклоненія какъ раньше; за положеніе равновѣсія M' онъ перейдетъ теперь не на величину $\Delta - R$, а на величину

$$\Delta - R - \frac{2F\Delta}{\beta r}.$$

Время перехода изъ прежняго положенія раавновѣсія, бывшаго на разстояніи R , въ отклоненіе

$$x_{max} = \Delta + (\Delta - R) - \frac{2F\Delta}{\beta r}$$

проще всего опредѣлить такъ: положимъ

$$\left(\Delta - \frac{F\Delta}{\beta r}\right) - x = \xi.. \quad (38)$$

тогда (36) напишется такъ:

$$\xi = \left(\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r}\right) \sin(t\sqrt{A}) \dots \quad (39)$$

такъ что не точка M' , а точка, удаленная отъ центра C на разстояніе

$$\Delta - \frac{F\Delta}{\beta r}$$

является теперь серединой размаха шара при первомъ колебаніи, и изъ (39) видно, что время одного размаха будетъ:

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\sqrt{A}} \dots \quad (40)$$

Слѣдовательно, явленіе измѣнилось такъ: шаръ прошелъ вправо путь меньшій прежняго, но въ то же время $\frac{T}{2}$, слѣдовательно треніе уменьшило отклоненіе на

$$\frac{2F\Delta}{\beta r},$$

но не измѣнило времени, т.-е. полупериода.

Докажемъ теперь, что для возможности движенія шара необходимо упомянутое условіе:

$$\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} > 0 \dots \quad (41)$$

Въ самомъ дѣлѣ, если положимъ, что

$$\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} < 0,$$

то отсюда слѣдуетъ

$$\Delta - R < \frac{F\Delta}{\beta r} \text{ и } F > \frac{\Delta - R}{\Delta} \beta r,$$

а это послѣднее выраженіе можно представить такъ:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta - R}{\Delta} \beta r &= \beta r - \frac{R}{\Delta} \beta r = \beta r - R(\beta - m\omega_2^2) = \\ &= \beta(r - R) + m\omega_2^2 R = m\omega_2^2 R - \beta(R - r), \end{aligned}$$

такъ что получимъ

$$F > m\omega_2^2 R - \beta(R - r).$$

Но $m\omega_2^2 R - \beta(R - r)$ есть сила, движущая шаръ въ первый моментъ послѣ измѣненія скорости. Если она окажется меньше силы тренія F , то шаръ, конечно, не сдвинется вовсе съ мѣста, слѣдовательно онъ можетъ двигаться лишь въ томъ случаѣ, если

$$F < m\omega_2^2 R - \beta(R - r)$$

или все равно, если

$$\Delta - R - \frac{F\Delta}{\beta r} > 0,$$

что и требовалось доказать.

Шаръ, дошедши до точки M''' , повернетъ назадъ. Изслѣдуемъ это второе полуколебаніе. Уравненіе движенія будетъ

$$-m \frac{d^2x}{dt^2} = -m\omega_2^2 x + \beta(x-r) - F \dots \quad (42)$$

или

$$\begin{aligned} -m \frac{d^2x}{dt^2} &= (\beta - m\omega_2^2)x - \beta r - F = \frac{\beta r}{\Delta} x - \beta r - F = \\ &= \beta r \left(\frac{x}{\Delta} - 1 - \frac{F}{\beta r} \right) \dots \end{aligned} \quad (42)$$

или, полагая

$$\frac{x}{\Delta} - 1 - \frac{F}{\beta r} = \frac{y}{\Delta} \dots \quad (43)$$

и, слѣдовательно

$$dx = dy \dots \quad (44)$$

имѣемъ :

$$-m \frac{d^2y}{dt^2} = \beta r \frac{y}{\Delta}$$

и

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{\beta r}{m\Delta} = -Ay, \dots \quad (45)$$

если положить

$$A = \frac{\beta r}{m\Delta} \dots \quad (45 \text{ bis})$$

Интегрируя (45), находимъ

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = -\frac{Ay^2}{2} + C \dots \quad (46)$$

Начальная скорость равна нулю, такъ что должно быть

$$\frac{dx}{dt} = 0 \text{ при } x = \Delta + (\Delta - R) - \frac{2F\Delta}{\beta r} = a$$

или

$$\frac{dy}{dt} = 0 \text{ при } y = \Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} = b$$

такъ что :

$$\frac{1}{2} \cdot 0 = -\frac{Ab^2}{2} + C$$

откуда

$$C = \frac{Ab^2}{2} = \frac{A}{2} \left(\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} \right)^2 \dots \quad (47)$$

Далѣ

$$dt = \frac{dy}{\sqrt{Ab^2 - Ay^2}} = \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \frac{d\left(\frac{y}{b}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}}$$

откуда, интегрируя

$$t = \frac{1}{\sqrt{A}} \arcsin \frac{y}{\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r}} + t_0$$

или

$$y = \left(\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} \right) \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \} \dots \quad (48)$$

а выражая y через x :

$$x - \Delta - \frac{F\Delta}{\beta r} = \left(\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} \right) \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \}$$

или

$$x = \Delta + \frac{F\Delta}{\beta r} - \left(\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} \right) \sin \{ (t - t_0) \sqrt{A} \} \dots \quad (48)$$

Выберемъ начало времени такъ, чтобы при

$$x = \Delta + \frac{F\Delta}{\beta r} \text{ было } t = 0;$$

тогда $t_0 = 0$ и

$$x = \Delta + \frac{F\Delta}{\beta r} - \left(\Delta - R - \frac{3F\Delta}{\beta r} \right) \sin (t \sqrt{A})$$

Наименьшая величина x , (если

$$\Delta - R > \frac{3F\Delta}{\beta r})$$

будетъ при

$$\sin (t \sqrt{A}) = +1$$

и

$$x_{\min} = \Delta - (\Delta - R) + \frac{4F\Delta}{\beta r} \dots \quad (50)$$

Какъ видимъ размахъ уменьшился еще на $\frac{2F\Delta}{\beta r}$ противъ перваго. Изслѣдуя далѣ увидимъ, что полупериодъ все время остается

безъ измѣненія, размахи-же все уменьшаются, пока наконецъ движущая шаръ сила не сдѣлается меньше силы тренія, послѣ чего шаръ въ нѣкоторой точкѣ радіуса остановится совсѣмъ, причемъ эта точка вообще можетъ и не совпасть съ положеніемъ *М'* равновѣсія.

Оба разсмотрѣнные нами элементарные примѣры могутъ дать первое понятіе и о движеніи шара плоскаго регулятора. Первый примѣръ можно разсматривать, какъ примѣръ плоскаго регулятора безъ тренія, отцѣпленнаго отъ органа, дающаго доступъ пару въ машину, причемъ скорость ея мы *сами извнѣ* моментально измѣнили на *конечную* величину. Второй примѣръ представляетъ движеніе того-же регулятора съ треніемъ.

Теперь переходимъ къ возможно точному и всестороннему разсмотрѣнію того, что происходитъ въ дѣйствительности съ регуляторомъ паровой машины за время перехода ея отъ одной угловой скорости къ другой. Будемъ разсматривать паровую машину съ однимъ цилиндромъ, двойного дѣйствія, снабженную плоскимъ регуляторомъ, сидящимъ на главномъ валу ея, и дѣйствующимъ на отсѣчку при помощи перестановки эксцентрика; какова именно конструкція этого эксцентрика — для нашего общаго разсмотрѣнія безразлично. Предположимъ для простоты парораспределеніе установленнымъ такъ, что отсѣчки и сжатія по обѣ стороны поршня одинаковы, и, слѣдовательно, съ достаточной точностью можно считать работы пара при прямомъ и обратномъ ходѣ поршня тоже одинаковыми. Эти предположенія близки къ дѣйствительности и небольшія отступленія отъ нихъ могутъ измѣнить немного числовыя величины результатовъ, но никакъ не сущность дѣла.

Пусть машина находится въ состояніи установившагося движенія. Движеніе это не будетъ равномернымъ, а будетъ періодическимъ, вслѣдствіе свойствъ шатуннаго механизма, вслѣдствіе расширенія и сжатія пара и пр. Продолжительность періода, при нашемъ предположеніи тождественности работъ движущей силы при прямомъ и обратномъ ходѣ, равна продолжительности одного хода поршня.

Такъ какъ присутствіе маховика, въ особенности при машинахъ для электрическаго освѣщенія, не позволяетъ колебаніямъ скорости въ теченіе періода выходить изъ извѣстныхъ тѣсныхъ предѣловъ, то, при нашемъ изслѣдованіи, мы для простоты примемъ маховикъ вполне совершеннымъ, т.-е. положимъ, что, въ теченіе промежутка отъ отсѣчки до отсѣчки, величина движущей машину силы остается *постоянной*. Слѣдовательно, мы дѣлаемъ

предположеніе, что въ моментъ отсѣчки уже сразу опредѣляется, въ зависимости отъ величины этой отсѣчки, нѣкоторая, *постоянная* для этого промежутка, сила P , дѣйствующая, положимъ, на разстояніи ρ отъ оси вращенія главнаго вала машины, равномъ радіусу кривошипа и перпендикулярно къ нему, такъ что моментъ вращенія вала ея $P\rho$ постояненъ за весь этотъ промежутокъ. Сила P найдется по среднему индикаторному давленію q на поршень изъ условія равенства работъ пара въ цилиндрѣ и силы P на кривошипѣ за одинъ ходъ.

$$P \cdot \rho = q\Omega \cdot 2\rho$$

откуда

$$P = \frac{2}{\pi} q\Omega$$

гдѣ Ω — площадь поршня. Величина-же q находится въ зависимости отъ отсѣчки, по формуламъ теоріи паровыхъ машинъ. Иначе говоря, мы вводимъ среднюю силу вращенія P , приведенную къ радіусу кривошипа, которая будетъ измѣняться скачками въ моменты отсѣчекъ, если регуляторъ переставляетъ въ это время эксцентрикъ, т.-е. въ періодъ регулированія, и будетъ оставаться постоянной за все время установившагося движенія машины; за это время будетъ имѣть мѣсто условіе:

$$P = Q$$

гдѣ Q — сопротивленіе, приведенное тоже къ радіусу кривошипа.

Назовемъ угловую скорость машины въ этомъ состояніи черезъ ω_0 .

Пусть теперь мгновенно (или практически весьма быстро) сопротивленіе Q измѣнилось, увеличилось или уменьшилось, до величины Q' . Въ тотъ же моментъ машина получаетъ стремленіе вращаться равномерно — измѣненно и угловое ускореніе этого движенія будетъ:

$$\frac{d\omega}{dt} = p = \frac{P - Q'}{I} \cdot \rho \dots \quad (52)$$

гдѣ I — полярный моментъ инерціи всѣхъ частей, сидящихъ на валу машины *). Замѣтимъ, что величины P и Q , строго говоря,

*) Замѣтимъ, что, строго говоря, величина I не совсѣмъ постоянна, ибо маятники регулятора перемѣщаются въ теченіе времени регулированія, такъ что I увеличивается или уменьшается. Но эти измѣненія весьма незначительны сравнительно съ моментомъ инерціи маховика и кромѣ того принятіе ихъ въ расчетъ усложнило-бы и безъ того сложную задачу до невозможности и было бы бесполезно.

зависятъ отъ скорости вращенія машины (благодаря чему только и наступаетъ для всякихъ машинъ-двигателей состояніе установившагося движенія), но мы будемъ, при небольшихъ измѣненіяхъ угловой скорости, о которыхъ у насъ идетъ рѣчь, считать P и Q независимыми отъ ω . Поэтому, интегрируя уравненіе (52), имѣемъ:

$$\omega = \frac{P - Q}{I} pt + Const = pt + Const.$$

Если въ этой формулѣ время начнемъ считать съ момента измѣненія сопротивленія, то при $t = 0$ должны имѣть $\omega = \omega_0$ и слѣдовательно $Const = \omega_0$ и

$$\omega = pt + \omega_0 \dots \quad (52 \text{ bis})$$

Изъ этой формулы видно, что, если регулятора не будетъ, то машина станетъ вращаться равномерно—ускоренно (при $Q' < Q$ и $p > 0$) или равномерно—замедленно (при $Q' > Q$ и $p < 0$). Но, хотя регуляторъ и есть, однако онъ всегда обладаетъ извѣстной нечувствительностью и, какъ мы знаемъ, будетъ, съ момента измѣненія сопротивленія, бездѣйствовать, пока угловая скорость вала не возрастетъ или не убудетъ до величины, опредѣляемой изъ уравненія:

$$\omega'_0 = \omega_0 \left(1 \pm \frac{\epsilon}{2} \right) \dots \quad (53)$$

гдѣ знакъ $+$ берется при $p > 0$, а знакъ $-$ при $p < 0$. Время t'_0 , потребное на это измѣненіе опредѣлится изъ уравненія:

$$\omega'_0 = \omega_0 \left(1 \pm \frac{\epsilon}{2} \right) = pt'_0 + \omega_0$$

откуда

$$t'_0 = \frac{\omega_0 \epsilon}{2p} \text{ (всегда, конечно, } > 0) \dots \quad (54)$$

Въ тотъ моментъ, когда угловая скорость достигнетъ величины ω'_0 , маятникъ регулятора сдвинется и начнетъ передвигать эксцентрикъ, начнется регулированіе.

Если черезъ x будемъ обозначать перемѣщеніе (изъ положенія, соотвѣтствующаго установившемуся движенію) какой нибудь точки тѣла B или A (маятника), а черезъ ξ — соотвѣтствующее этому x перемѣщеніе какой нибудь точки парораспредѣлительнаго органа C , напримѣръ, отсѣчнаго ребра золотника, то для регулятора

прямого дѣйствія, въ которомъ A и C все время связаны опредѣленнымъ кинематическимъ образомъ, величина ξ будетъ функціей только величины z , опредѣляемой изъ размѣровъ передачи отъ тѣла B къ органу C , такъ что вообще

$$\xi = \varphi(z) \dots \quad (55)$$

Движеніе тѣла B или маятника будетъ происходить подѣйствіемъ измѣняющихся центробѣжныхъ силъ его частицъ, зависящихъ во всякій моментъ отъ угловой скорости машины ω въ этотъ моментъ и подѣйствіемъ натяженій пружинъ, зависящихъ отъ положенія тѣла B , т.-е. отъ z , такъ что дифференціальное уравненіе движенія, взятой нами точки маятника будетъ вообще имѣть видъ :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = F(\omega, z) \dots \quad (56)$$

гдѣ ω сама есть функція времени t .

Величина P движущей силы будетъ, очевидно, функціей ξ , опредѣляемой на основаніи конструкціи парораспредѣленія и закона расширенія пара, такъ что

$$P = \psi(\xi) \dots \quad (57)$$

Замѣтивъ это, разсмотримъ подробнѣе, что будетъ происходить съ нашей машиной.

Моментъ, въ который маятникъ или тѣло B сдвинулся съ мѣста, вообще придется, конечно, не въ тотъ моментъ, когда происходитъ отсѣчка, и пусть онъ пришелся послѣ нея, тогда несмотря на перемѣщеніе тѣла B и органа C , машина будетъ продолжать двигаться съ тѣмъ-же ускореніемъ

$$p = \frac{P - Q'}{I}$$

съ какимъ и начала, ибо паръ уже отсѣченъ и измѣненіе положенія золотника не вліяетъ на машину, которая будетъ двигаться съ прежнимъ ускореніемъ до момента слѣдующей отсѣчки, при новомъ ходѣ поршня. Но, благодаря непрерывному движенію регулятора, золотникъ все время перемѣщается и слѣдовательно произведетъ эту новую отсѣчку уже на другой части хода, чѣмъ то было въ предыдущую отсѣчку. Этой новой отсѣчкой (и соотвѣтствующей ей величиной сжатія, если органы впуска и выпуска не приводятся въ движеніе независимыми эксцентриками), при

нашемъ предположеніи совершеннаго маховика, сразу опредѣлится новая величина *средней* движущей силы, положимъ P_1 , и съ момента этой первой, послѣ измѣненія нагрузки, отсѣчки, машина пойдетъ съ новымъ ускореніемъ p_1 , опредѣляемымъ изъ уравненія:

$$(58) \quad p_1 = \frac{P_1 - Q'}{I} \rho \dots$$

такъ что угловая скорость ея будетъ теперь:

$$(59) \quad \omega_1 = p_1 t_1 + c \dots$$

гдѣ величина c должна быть опредѣлена изъ условія, что въ моментъ первой отсѣчки, т.-е. при $t_1 = 0$, если время t_1 считать съ момента первой отсѣчки, величина ω_1 должна быть равна величинѣ ω , получаемой изъ уравненія (52) при $t = T$, гдѣ T есть время съ момента измѣненія сопротивленія до момента первой отсѣчки, такъ что :

$$c = pT + \omega_0 \dots (60)$$

и

$$(61) \quad \omega_1 = p_1 t_1 + pT + \omega_0 \dots$$

Съ момента первой отсѣчки движеніе машины опять будетъ равномерно-измѣненное, но уже съ инымъ ускореніемъ p_1 и оно будетъ продолжаться съ таковымъ до слѣдующей, второй, отсѣчки, которая опять будетъ иная, ибо регуляторъ все время передвигалъ золотникъ. Такъ будетъ продолжаться дѣло и въ слѣдующія отсѣчки. Но, съ каждой новой отсѣчкой, ускореніе p будетъ (по абсолютной величинѣ) убывать, ибо, при ускоренномъ движеніи машины, регуляторъ уменьшаетъ отсѣчку, а слѣдовательно и величину P , а при замедленномъ — увеличиваетъ P . Наступитъ, наконецъ, поэтому такая отсѣчка, послѣ которой величина p измѣнитъ знакъ. Величины центробѣжныхъ силъ маятника тогда тоже начнутъ измѣняться въ другую сторону и, наконецъ, въ какой-нибудь моментъ маятникъ остановится на мгновеніе и затѣмъ начнетъ двигаться въ обратную сторону, причемъ онъ начнетъ измѣнять притокъ движущей силы въ обратномъ смыслѣ. Такія колебанія могутъ повторяться нѣсколько разъ, пока, наконецъ, постепенно убывая, онѣ не приведутъ маятника и эксцентриковъ въ такое положеніе, что средняя движущая сила будетъ равна новому сопротивленію Q' . Но для того, чтобы колебанія уменьшались, *необходимо позаботиться объ этомъ еще при конструированіи регулятора*; для того же, чтобы изучить законы этихъ колебаній и ихъ вліяніе на машину,

на встрѣчу отсѣчекъ, или уходитъ отъ нея, то продолжительности періодовъ не будутъ равны, а всѣ будутъ разные (хотя разницы будутъ не велики).

Замѣтивъ это, мы можемъ въ уравненіи (62) вмѣсто ω внести величину (63) и получимъ:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = (p^2 t^2 + 2pct + c^2 - \frac{\beta}{m})z + \frac{\beta r - f_d}{m} \quad (68)$$

или положивъ для краткости:

$$c^2 - \frac{\beta}{m} = a \quad (65)$$

и

$$\frac{\beta r - f_d}{m} = b \quad (69)$$

получимъ:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = (a + 2pct + p^2 t^2)z + b = 0 \quad (70)$$

Это дифференціальное уравненіе втораго порядка съ переменными коэффициентами теперь надо интегрировать.

Къ сожалѣнію, средства современнаго анализа недостаточны для этого. Интегралъ уравненія (70) до сихъ поръ не извѣстенъ, несмотря на то, что много труда потрачено математиками на его нахожденіе. (Уравненіе (70) въ аналитической механикѣ носитъ названіе уравненія несвободныхъ колебаній (forced oscillations), ибо силы суть функціи времени, и въ этомъ-то и состоитъ затрудненіе).

Мы не можемъ, слѣдовательно, точно изслѣдовать законъ измѣненія z въ зависимости отъ t , т.-е. слѣдить за движеніемъ маятника регулятора.

Въ виду трудности интегрированія уравненія (70) всѣ прежніе изслѣдователи принуждены были ограничиваться приближеннымъ интегрированіемъ его. На послѣднихъ страницахъ настоящей главы, мы даемъ краткій перечень и разборъ этихъ изслѣдованій, которыя всѣ не могутъ считаться вполне удовлетворительными, такъ что желательно поѣтому новое, болѣе строгое рѣшеніе задачи. Но для того, чтобы дать понятіе хотя о методѣ приближенномъ и показать, какъ можно при помощи его слѣдить за движеніемъ регулятора, мы, съ цѣлями преимущественно педагогиче-

ческими, изложимъ здѣсь приближенное рѣшеніе задачи по методу Kargl-Grashof'a, отступивъ отъ него въ нѣкоторыхъ деталяхъ.

Въ тотъ моментъ, когда маятникъ регулятора только что трогается первый разъ съ мѣста, имѣетъ мѣсто уравненіе равновѣсія:

$$0 = m\omega'_0{}^2 z_0 - \beta(z_0 - r) - f_p \dots \quad (71)$$

гдѣ ω'_0 находится изъ уравненія (53), а f_p есть сопротивление тренія *покоя* всѣхъ частей регулятора. Разсматривая какое нибудь колебаніе маятника, мы имѣли для него уравненіе движенія (65)

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = m\omega^2 z - \beta(z - r) - f_d \dots \quad (72)$$

Вычитая отсюда уравненіе (71) находимъ:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = m\omega^2 z - m\omega'_0{}^2 z_0 - \beta(z - r) - \beta(z_0 - r) - (f_d - f_p) \dots \quad (73)$$

или

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = m\omega^2 z - m\omega'_0{}^2 z_0 - \beta(z - z_0) - (f_d - f_p) \dots \quad (74)$$

Если принять во вниманіе, что размахи маятника и измѣненія угловой скорости *вообще* невелики, то можно разложить выраженіе

$$m\omega^2 z - m\omega'_0{}^2 z_0,$$

представляющее приращеніе функціи:

$$\varphi(\omega, z) = m\omega^2 z$$

при переходѣ z_0 въ z , а ω'_0 въ ω , въ рядъ по формулѣ Тейлора для функціи двухъ переменныхъ, считая за переменныя ω и z (хотя, неявно, онѣ суть функціи одного переменнаго t) и ограничиться *первыми* степенями разностей $\omega - \omega'_0$ и $z - z_0$, такъ что

$$\varphi(\omega, z) = \left(\frac{d\varphi}{d\omega} \right)_0 (\omega - \omega'_0) + \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)_0 (z - z_0)$$

гдѣ производныя берутся частныя.

Имѣемъ поэтому

$$m\omega^2 z - m\omega'_0{}^2 z_0 = 2m\omega'_0 z_0 (\omega - \omega'_0) + m\omega'_0{}^2 (z - z_0) \dots \quad (75)$$

такъ что уравненіе (74) теперь *приближенно* напишется такъ:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 2m\omega'_0 z_0 (\omega - \omega'_0) + m\omega'^0_0 (z - z_0) - \beta(z - z_0) - (f_d - f_p) \dots \quad (76)$$

Для каждаго періода, т.-е. промежутка отъ отсѣчки до отсѣчки, имѣемъ уравненіе вида:

$$\omega = p_k t + \omega_k \dots \quad (77)$$

и подставляя въ (76) имѣемъ, раздѣливъ на m :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 2\omega'_0 z_0 (p_k t + \omega_k - \omega'_0) + \omega'^0_0 (z - z_0) - \frac{\beta}{m} (z - z_0) - \frac{f_d - f_p}{m}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} = & - \frac{\beta - m\omega'^0_0}{m} z + 2\omega'_0 z_0 p_k t + \\ & + \left\{ 2\omega'_0 z_0 (\omega_k - \omega'_0) - \frac{\beta - m\omega'^0_0}{m} z_0 - \frac{f_d - f_p}{m} \right\} \dots \quad (78) \end{aligned}$$

а положивъ

$$\frac{\beta - m\omega'^0_0}{m} = A \dots \quad (79)$$

и

$$2\omega'_0 z_0 p_k = B \dots \quad (80)$$

$$2\omega'_0 z_0 (\omega_k - \omega'_0) - \frac{\beta - m\omega'^0_0}{m} z_0 - \frac{f_d - f_p}{m} = C \dots \quad (81)$$

имѣемъ:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -Az + Bt + C \dots \quad (81 \text{ bis})$$

т.-е. точное уравненіе наше (72) превратилось въ уравненіе съ *постоянными* коэффициентами, что произошло вслѣдствіе исчезновенія произведенія $m\omega^2 z$, представлявшаго членъ съ переменнымъ коэффициентомъ

$$m\omega^2 = m(p_k t + \omega_k)^2.$$

Теперь не трудно уже получить интегралъ уравненія (81), который будетъ, какъ извѣстно, имѣть видъ:

$$z = \frac{Bt + C}{A} + C_1 \cos(t\sqrt{A}) + C_2 \sin(t\sqrt{A}) \dots \quad (82)$$

гдѣ C_1 и C_2 — произвольныя постоянныя.

Первый интеграль уравненія (81) будетъ

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{B}{A} - C_1 \sqrt{A} \sin(t \sqrt{A}) + C_2 \sqrt{A} \cos(t \sqrt{A}) \dots (83)$$

что легко получается дифференцируя уравненіе (82); v — есть скорость шаровъ въ данный моментъ времени.

Уравненія (82) и (83) приложимы къ какому угодно промежутку отъ отсѣчки до отсѣчки, только для каждаго промежутка нужно особо опредѣлять постоянныя C_1 и C_2 , входящія въ эти уравненія и выбрать надлежащимъ образомъ знаки при $\frac{d^2 z}{dt^2}$ и z въ дифференціальномъ уравненіи (72), смотря потому, движется-ли шаръ къ центру или отъ центра.

Чтобы опредѣлить постоянныя C_1 и C_2 необходимо при изслѣдованіи движенія идти послѣдовательно отъ промежутка къ промежутку, начиная съ перваго.

Предположимъ для общности, что измѣненіе нагрузки не совпало съ моментомъ отсѣчки, а произошло спустя время t_0 послѣ нѣкоторой отсѣчки. Тогда съ момента измѣненія нагрузки, машина начнетъ двигаться равномѣрно-ускоренно, съ угловой скоростью ω равной

$$\omega = pt + \omega_0.$$

По истеченіи промежутка времени t'_0 , опредѣляемаго изъ уравненія (54), начнетъ двигаться маятникъ регулятора. Здѣсь можетъ быть два случая.

1) Въ теченіе промежутка времени t'_0 , именно по истеченіи времени t'' (меньшаго t'_0) съ начала его, произошла новая отсѣчка. Такъ какъ маятникъ не двинулся еще, то эта новая отсѣчка произойдетъ еще на той-же части хода какъ предыдущая и будетъ равна ей и, слѣдовательно, величина ускоренія p для наступающаго промежутка отъ этой второй (съ момента измѣненія нагрузки) до новой отсѣчки будетъ та-же, какъ и для предыдущаго, и если маятникъ тронется въ теченіе этого промежутка по истеченіи времени $t'_0 - t''$ послѣ второй отсѣчки, то въ моментъ его троганья, угловая скорость машины будетъ равна :

$$\omega'_0 = \omega_0 + pt'_0$$

и если для движенія маятника начнемъ считать время съ этого

момента, то угловая скорость съ этого момента и до конца этого промежутка будетъ выражаться такъ:

$$\omega = pt + \omega'_0 \dots \quad (84)$$

То же выраженіе ω получится, если маятникъ вслѣдствіе нечувствительности останется неподвижнымъ въ теченіе и нѣсколькихъ ходовъ, что, конечно, нежелательно и чего обыкновенно въ практикѣ не бываетъ, если только число оборотовъ машины не черезъ-чуръ велико, и обыкновенно имѣетъ мѣсто случай

II) Въ теченіе промежутка t' не произошло новой отсѣчки. Угловая скорость въ моментъ троганья маятника выразится и здѣсь черезъ

$$\omega'_0 = \omega_0 + pt'_0$$

и если время въ уравненіи движенія маятника начать считать съ момента его троганья, то угловая скорость съ этого момента и до конца этого промежутка, который теперь будемъ называть нулевымъ, будетъ выражаться черезъ

$$\omega = pt + \omega'_0 \dots \quad (84)$$

Слѣдовательно, если время въ уравненіи движенія маятника для нулевого промежутка начнемъ считать съ момента троганья шара, то угловая скорость ω въ уравненіи движенія должна выражаться всегда формулой (84), которая для нулевого промежутка замѣняетъ уравненіе (77).

Этимъ выводомъ мы исправляемъ неточность метода Kagi Grashof'a, гдѣ нечувствительность совершенно не берется въ расчетъ и гдѣ, поэтому, вмѣсто нашей ω'_0 въ уравненіи (84) стоитъ просто ω_0 .

Приложимъ теперь наши уравненія (82) и (83) къ тому промежутку между двумя отсѣчками, въ теченіе котораго шаръ тронется и который мы назвали нулевымъ промежуткомъ, считая по сказанному время съ момента троганья, и называя теперь нулевой ту отсѣчку, послѣ которой шаръ тронулся, т.-е. отсѣчку, начинающую нулевой промежутокъ.

Чтобы опредѣлить произвольныя постоянныя положимъ:

$$t = 0.$$

Въ этотъ моментъ:

$$z = z_0$$

и

$$v = 0$$

ибо шаръ трогается безъ начальной скорости, такъ что изъ (82) и (83) имѣемъ:

$$z_0 = \frac{C}{A} + C_1$$

$$0 = \frac{B}{A} + C_2 \sqrt{A}$$

откуда

$$C_1 = z_0 - \frac{C}{A} \dots \quad (85)$$

$$C_2 = \frac{-B}{A \sqrt{A}} \dots \quad (86)$$

Такимъ образомъ опредѣлены произвольныя для нулевого промежутка. Подставляя ихъ значенія въ уравненіе (82), мы можемъ теперь находить положенія шара въ разные моменты въ теченіе этого нулевого промежутка, пока не произойдетъ первая отсѣчка при разстояніи z_2 шара отъ центра диска, и теперь намъ необходимо *найти, когда* же наступитъ эта первая отсѣчка, ибо золотникъ уже переставляется регуляторомъ и слѣдующая отсѣчка случится раньше или позже предыдущей.

Разсуждаемъ такимъ образомъ.

Изъ конструкціи парораспредѣленія мы будемъ знать отсѣчку $\varphi^*)$ въ функціи положенія опредѣленной точки золотника или эксцентрика или, все равно, въ функціи положенія шара, опредѣленнаго его разстояніемъ z отъ центра диска, такъ что можемъ написать вообще:

$$\varphi = F(z) \dots \quad (87)$$

гдѣ видъ функціи намъ извѣстенъ. Пусть съ момента троганья шара до первой отсѣчки протекло время t , а кривошипъ за это время повернулся на уголъ α , идя равномерно—ускоренно съ угловою скоростью ω , выражаемой уравненіемъ (84). Очевидно, что вообще для какого нибудь угла α поворота кривошипа отъ положенія его въ моментъ троганья шара имѣемъ:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega = pt + \omega'_0$$

*) Подъ отсѣчкой φ здѣсь понимается отношеніе части хода до момента закрытія впускнаго окна, ко всему ходу.

откуда, интегрируя находимъ уголъ α_1 :

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \int_0^{\alpha_1} d\alpha = \int_0^{\tau} \omega dt = \int_0^{\tau} (pt + \omega'_0) dt = \\ &= \frac{p\tau^2}{2} + \omega'_0\tau \dots\end{aligned}\quad (88)$$

или

$$p\tau + 2\omega'_0\tau - 2\alpha_1 = 0 \dots \quad (89)$$

откуда находимъ:

$$\tau = \frac{-2\omega'_0 + \sqrt{4\omega'^2_0 + 8\alpha_1 p}}{2p} = \frac{-\omega'_0 + \sqrt{\omega'^2_0 + 2\alpha_1 p}}{p} \dots \quad (90)$$

гдѣ взять при корнѣ знакъ *плюс*, ибо τ по смыслу задачи не можетъ быть отрицательно.

Далѣе, если нулевая отсѣчка была ϕ_0 , а первая будетъ ϕ_1 , то, называя вообще черезъ θ уголъ поворота кривошипа отъ мертвой точки до момента отсѣчки, черезъ ξ — соотвѣтствующій путь поршня и черезъ R — радиусъ кривошипа, имѣемъ въ предположеніи безконечно-длиннаго шатуна (фиг. 64):

$$\xi_0 = R(1 - \cos \theta_0)$$

$$\xi_1 = R(1 - \cos \theta_1)$$

$$\phi_0 = \frac{\xi_0}{2R}$$

$$\phi_1 = \frac{\xi_1}{2R}$$

откуда находимъ

$$\cos \theta_0 = 1 - 2\phi_0$$

$$\cos \theta_1 = 1 - 2\phi_1$$

За время t_0 (отъ отсѣчки передъ измѣненіемъ нагрузки до момента измѣненія нагрузки) кривошипъ описалъ уголъ:

$$\alpha_0 = \omega_0 t_0,$$

за время t'_0 (стояніе шара вслѣдствіе нечувствительности) описанъ уголъ:

$$\alpha'_0 = \int_0^{t'_0} (\omega_0 + pt) dt = \omega_0 t'_0 + \frac{pt'^2_0}{2} *)$$

и за время τ описанъ уголъ α_1 , найденный выше.

Весь уголъ α , описанный кривошипомъ за время $t_0 + t'_0 + \tau$, прошедшее отъ отсѣчки ϕ_0 до отсѣчки ϕ_1 , будетъ $\alpha_0 + \alpha'_0 + \alpha_1$, такъ что

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha'_0 + \alpha_1$$

Но очевидно:

$$\theta_0 + \alpha - \theta_1 = \pi$$

или

$$\arccos(1 - 2\phi_0) + \omega_0 t_0 + \omega'_0 t' + \frac{pt'^2_0}{2} + \omega'_0 \tau + \frac{p\tau^2}{2} - \arccos(1 - 2\phi_1) = \pi \dots \quad (91)$$

Изъ уравненія (87) имѣемъ для отсѣчки ϕ_1 :

$$\phi_1 = F(z_1) \dots \quad (92)$$

при чемъ

$$z_1 = \frac{B\tau + C}{A} + C_1 \cos(\tau\sqrt{A}) + C_2 \sin(\tau\sqrt{A}) \dots \quad (93)$$

Исключая теперь изъ системы четырехъ уравненій: (93), (92), (91) и (90) величины: α_1 , τ и z_1 , мы найдемъ величину ϕ_1 .

Дальше дѣло пойдетъ немного проще. величиной отсѣчки ϕ_1 опредѣлится ускореніе p_1 для новаго промежутка отъ отсѣчки ϕ_1 до новой отсѣчки ϕ_2 , ибо по отсѣчкѣ ϕ_1 найдемъ среднее индикаторное давленіе и затѣмъ движущую силу P_1 на кривошипѣ, такъ что

$$p_1 = \frac{P_1 - Q}{I}$$

Величины постоянныхъ C_1 и C_2 для уравненія движенія за этотъ первый промежутокъ найдутся изъ условія, что значенія z и v , полученные при $t = \tau$ въ уравненіяхъ для нулевого проме-

*) Если періодъ стоянія продолжается въ теченіе нѣсколькихъ ходовъ поршня, то уголъ α можетъ быть и больше π , но мы предположимъ, что этого не случится, въ противномъ случаѣ надо въ формулѣ (91) къ величинѣ π прибавить еще столько разъ π , сколько отсѣчекъ случилось за время t'_0 . Но въ практикѣ обыкновенно этого не бываетъ.

жутка, должны быть равны значеніямъ z и v въ моментъ начала перваго промежутка, полученнымъ изъ уравненія для перваго промежутка при соответствующемъ значеніи t . Затѣмъ можемъ изслѣдовать движеніе въ теченіе перваго промежутка и т. д., такъ что ходъ рѣшенія для какого нибудь промежутка по счету, положимъ, i (онъ начинается съ отсѣчки φ_i и продолжается до отсѣчки φ_{i+1} въ теченіе времени τ_i , при чемъ кривошипъ опишетъ уголъ α_i) будетъ такой.

Условимся считать время t начиная съ момента отсѣчки φ_i , т.-е. съ начала промежутка, такъ что для начала его $t = 0$. Поэтому, если положимъ въ уравненіи движенія для предыдущаго промежутка, по счету $i - 1$, время t равнымъ его продолжительности τ_{i-1} , то мы найдемъ величины z и v для конца этого промежутка и онѣ должны быть равны величинамъ z и v , полученнымъ изъ уравненія движенія для промежутка i , если въ немъ положить $t = 0$. Приравнивая эти значенія, получимъ два уравненія, изъ нихъ опредѣлимъ величины постоянныхъ C_1 и C_2 для промежутка i . Далѣе имѣемъ и здѣсь подобно первому промежутку

$$\alpha_i = \int_0^{\tau_i} \omega_i dt = \int_0^{\tau_i} (\omega_{i-1} + p t) dt = \omega_{i-1} \tau_i + p \frac{\tau_i^2}{2} \dots \quad (94)$$

Далѣе:

$$\arccos(1 - 2\varphi_i) + \alpha_i - \arccos(1 - 2\varphi_{i-1}) = \pi \dots \quad (95)$$

$$\varphi_{i+1} = F(x_{i+1}) \quad (96)$$

$$x_{i+1} = \frac{B\tau_i + C}{A} + C_1 \cos(\tau_i \sqrt{A}) + C_2 \sin(\tau_i \sqrt{A}) \dots \quad (97)$$

Исключая α_i , t_i , x_{i+1} , находимъ φ_{i+1} и затѣмъ можемъ изслѣдовать слѣдующій ходъ и т. д.

Такимъ образомъ мы получаемъ возможность для каждаго промежутка вычислять послѣдовательно величины, входящія въ уравненіе маятника и находить его положеніе и угловую скорость машины въ теченіе всего времени, пока маятникъ остановится въ положеніи, соответствующемъ новой нагрузкѣ машины, что даетъ возможность рѣшить, насколько данный регуляторъ пригоденъ и совершененъ. Результатъ вычисленій полезно изобразить графически.

Замѣтимъ, что наибольшія и наименьшія величины ω имѣютъ мѣсто въ моменты отсѣчекъ и находятся прямо, полагая въ выраженіяхъ:

$$\omega_i = \omega_{i-1} + p_i t$$

время t равнымъ t_i ; наибольшія и наименьшія же величины z , соответствующія тѣмъ моментамъ, когда шаръ на мгновение останавливается и измѣняетъ направленіе движенія, не совпадаютъ вообще (и нѣтъ причины совпадать) съ моментами отсѣчекъ и могутъ быть найдены методомъ дифференціального исчисленія полагая:

$$\frac{dz}{dt} = v = 0$$

Полное вычисленіе для всего періода выходитъ очень хлопотливо и продолжительно и все-таки приближенно.

Исслѣдованіе регуляторовъ обычнаго типа съ маятникомъ, качающимся вокругъ оси, выйдетъ еще сложнее. Въ виду этого за отсутствіемъ пока точной теоріи весьма полезно изучать движеніе регулятора не математически въ кабинетѣ, а практически въ мастерской, изслѣдуя движеніе его, когда онъ уже смонтированъ вполне на паровой машинѣ.

Скажемъ объ этомъ нѣсколько словъ.

Плоскій регуляторъ, благодаря своимъ конструктивнымъ особенностямъ, весьма удобенъ для непосредственнаго наблюденія движеній его частей въ періодъ регулированія, ибо движенія всѣхъ этихъ частей происходятъ параллельно плоскости вращенія ихъ, такъ что, если въ какой нибудь точкѣ маятника или эксцентрика укрѣпить карандашъ, перпендикулярно къ плоскости вращенія и поставить передъ нимъ листъ бумаги, то, очевидно, карандашъ будетъ чертить на ней траекторію абсолютнаго движенія взятой нами точки, въ которой онъ прикрѣпленъ. Понятно, что за все время установившагося движенія, карандашъ будетъ описывать одинъ и тотъ же кругъ на томъ же мѣстѣ бумаги; во время же перехода машины отъ одной угловой скорости къ другой, когда регуляторъ регулируетъ и его маятники движутся относительно его диска переставляя эксцентрикъ, карандашъ будетъ чертить спиралеобразныя кривыя, представляющія законъ абсолютнаго движенія взятой точки, слагающагося изъ относительнаго движенія взятой точки, т.-е. изъ ея приближенія или удаленія отъ центра диска и изъ ея вращенія вмѣстѣ съ дискомъ вокругъ оси его.

По виду этихъ кривыхъ не трудно уже судить о правильности работы регулятора и вывести изъ анализа этихъ кривыхъ законъ *относительнаго* движенія маятника.

Къ сожалѣнiю подобныя изслѣдованiя, насколько мнѣ извѣстно, почти не производятся или по крайней мѣрѣ не публикуются въ технической литературѣ, несмотря на ихъ громадную важность, какъ для контроля правильности дѣйствiя регулятора уже готовой машины передъ выпускомъ ея съ завода, такъ и для теорiи плоскихъ регуляторовъ, ибо только подобныя изслѣдованiя могутъ рѣшить, достаточно-ли для практики приближенной теорiи (напримѣръ Kargl-Grashof'a) и если нѣтъ, то изученiе движенiя маятника при помощи диаграммъ можетъ оказать помощь при интегрированiи уравненiя движенiя, ибо, можетъ быть, изъ разсмотрѣнiя этихъ диаграммъ окажется возможнымъ намѣтить видъ интегральнаго уравненiя движенiя. Производство подобныхъ изслѣдованiй могло-бы послужить превосходнымъ матеріаломъ для практическихъ занятiй студентовъ высшихъ техническихъ школъ, показывая имъ громадную важность сравнительнаго метода, т.-е. совмѣстнаго пользованiя теорiей и опытомъ при изученiи прикладной механики, играющаго уже теперь такую важную роль въ современной прикладной механикѣ, давшаго уже такiе важные результаты какъ теорiя паровыхъ машинъ, основанная на ихъ калориметрическомъ изслѣдованiи, выясненiе условiй сопротивляемости и прочности пластинокъ и плоскихъ стѣнокъ котловъ и прогарныхъ трубъ, изученiе законовъ тренiя и проч. и объщающаго въ будущемъ разрѣшить задачи машиностроенiя, считавшiяся до сихъ поръ неразрѣшимыми.

Обращаясь къ тому, что сдѣлано до сихъ поръ, мы можемъ привести лишь одинъ примѣръ изслѣдованiя, произведеннаго въ Америкѣ (American Machinist, 1894 г. № 2).

Опыты производились съ 50-ти сильной паровой машиной съ плоскимъ регуляторомъ системы Ball, описаннымъ выше, который является особенно удобнымъ для подобныхъ опытовъ, такъ какъ эксцентрикъ сидитъ на концѣ вала машины.

Къ пальцу *E* этого эксцентрика (полит. 1) укрѣпленъ былъ карандашъ, составлявшiй его продолженiе, такъ что острие его находилось на продолженiи оси пальца, а передъ нимъ была укрѣплена неподвижно рамка съ листомъ бумаги.

Машина работала съ полной нагрузкой, которая затѣмъ внезапно снималась, такъ что машина начинала вращаться порожнемъ и слѣдовательно маятники и эксцентрикъ должны были перейти изъ одного крайняго положенiя въ другое. Индикаторныя

діаграммы ея при полной нагрузкѣ и по снятіи ея приведены на фигурѣ 65 и 66.

Во время перехода машины изъ одного состоянія къ другому карандашъ чертилъ на бумагѣ спирали, видъ которыхъ зависѣлъ отъ того, какъ измѣняли установку регулятора.

На фигурѣ (67) показана спираль, начерченная карандашомъ при сказанномъ переходѣ эксцентрика, когда катарактъ былъ выведенъ изъ дѣйствія и не работалъ, а начальное натяженіе пружины было установлено такое, что регуляторъ былъ слегка неустойчивъ.

На фигурѣ (68) показана спираль, начерченная тоже при бездѣйствіи катаракта, но начальное натяженіе пружинъ здѣсь установлено такъ, что регуляторъ устойчивъ, статическій и съ довольно значительной степенью неравномѣрности.

На фигурѣ (69) показана спираль, начерченная въ присутствіи катаракта, пружины же подтянуты такъ, что регуляторъ находится въ состояніи астатичности, т.-е. въ тѣхъ условіяхъ, въ какихъ и работаетъ регуляторъ Ball'a въ дѣйствительности, какъ упоминалось выше при его описаніи. На всѣхъ трехъ діаграммахъ внутренний и наружный круги начерчены: первый при установившемся ходѣ машины подъ полной нагрузкой, а второй при установившемся ходѣ послѣ снятія нагрузки.

Такъ какъ эксцентрикъ сидитъ прямо на валу машины, то число завитковъ спирали прямо показываетъ въ теченіе сколькихъ оборотовъ эксцентрикъ перешелъ изъ одного крайняго положенія въ другое, такъ что имъ можно измѣрить быстроту дѣйствія регулятора.

Изъ разсмотрѣнія діаграммъ выводятся нѣкоторые интересныя слѣдствія.

Какъ видно, благодаря присутствію катаракта, быстрота дѣйствія уменьшается больше чѣмъ вдвое, ибо безъ него переходъ совершается въ теченіе, примѣрно, *трехъ* оборотовъ, а съ нимъ—въ теченіе *семи*. Обстоятельство это, весьма важное и интересное, теоріей до сихъ поръ не указывалось. Далѣе изъ сравненія фигуръ (67) и (68) видно то любопытное слѣдствіе, что быстрота дѣйствія почти совершенно не зависитъ отъ того—устойчивъ регуляторъ или нѣтъ.

Такъ какъ оказывается, что машины съ регуляторомъ Ball въ присутствіи катаракта работаютъ на электрическихъ станціяхъ вполне хорошо, такъ что и въ присутствіи катаракта, несмотря на замедленіе, причиняемое имъ въ быстротѣ регулированію, не замѣчается вредныхъ колебаній напряженія тока, то изъ этого

можно заключить, что совершенно бесполезно увеличивать быстроту дѣйствія, т.-е. уничтожать катарактъ.

Тѣмъ болѣе бесполезнымъ будетъ увеличивать быстроту дѣйствія выше той, которая получается безъ катаракта. Поэтому Ball считаетъ употребленіе описанныхъ нами раньше особыхъ грузовъ и маховичковъ для утилизаціи касательной силы инерціи въ пользу быстроты регулированія совершенно бесполезнымъ.

Болѣе подробные опыты должны окончательно разрѣшить этотъ вопросъ.

Описанный нами опытъ имѣлъ цѣлью главнымъ образомъ изучить *быстроту* дѣйствія регулятора. Для изслѣдованія *законовъ движенія* маятника этотъ опытъ не годится, ибо въ немъ маятники должны были пройти весь свой размахъ и остановиться въ крайнемъ положеніи, ударившись въ буферки.

Для изученія законовъ его колебаній надо снимать не всю нагрузку, а лишь часть ея, чтобы маятникъ свободно (не ударяясь въ буферки) могъ колебаться вокругъ новаго положенія равновѣсія, какое онъ займетъ подъ конецъ, и изслѣдовать спирали, чертимыя карандашемъ. Будемъ надѣяться, что подобныя изслѣдованія позволятъ, наконецъ, создать полную динамическую теорію регуляторовъ, полезную для практики.

Изложивши теперь сущность спеціальнаго вопроса объ изслѣдованіи вліянія *плоскаго* регулятора на ходъ машины, мы сдѣлаемъ въ заключеніе краткій критическій разборъ тѣхъ немногихъ сочиненій, которыя посвящены вопросу о вліяніи на ходъ машины регуляторовъ вообще (не спеціально плоскихъ).

Первый, кто обратилъ вниманіе на этотъ важный вопросъ, былъ I. Lüders. Въ 1865 г. въ Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (s. 402) появилась его статья „Ueber Regulatoren“. Здѣсь Lüders въ первый разъ *опредѣленно* и *ясно* поставилъ задачу и указалъ путь, по которому нужно слѣдовать для ея рѣшенія. Онъ получилъ въ самомъ общемъ, впрочемъ, видѣ дифференціальное уравненіе движенія муфты регулятора и указалъ на то, что при изслѣдованіи нужно различать, прямого дѣйствія регуляторъ или не прямого, ибо отъ этого зависитъ и ходъ рѣшенія задачи.

Для регулятора непрямого дѣйствія положеніе муфты есть прямо функція лишь *пути*, проходимаго какой нибудь точкой *машины*, во второмъ случаѣ оно выражается въ дифференціальномъ видѣ черезъ *скорость* машины.

Кромѣ изслѣдованія дифференціальнаго уравненія движенія муфты, Людерсъ далъ и графическое представленіе хода машины

подъ влияніемъ регулятора. Хотя Людерсъ и не дошелъ до *практическихъ* результатовъ, т.-е. не далъ *окончательныхъ* выраженій, которыя позволили-бы слѣдить за движеніемъ муфты регулятора и видѣть, какъ колеблется угловая скорость машины во время перехода отъ стараго состоянія установившагося движенія къ новому, тѣмъ не менѣе заслуга Lüders'a въ нашемъ вопросѣ весьма велика, ибо онъ первый и поставилъ задачу вполне опредѣленно и намѣтилъ ходъ рѣшенія.

Еще заслуживаетъ вниманія то обстоятельство, что Людерсъ 30 лѣтъ тому назадъ обратилъ серьезное вниманіе *на связь* между маховикомъ и регуляторомъ и поставилъ на видъ, что при изученіи нашего вопроса слѣдовало бы обращать вниманіе какъ на измѣненія скорости машины, зависящія отъ несовершенства маховика, который не можетъ давать вполне постоянной скорости, такъ и на измѣненія скорости, зависящія отъ движенія регулятора, *чтобы* не сдѣлать маховика чрезчуръ легкимъ. Такъ напримѣръ, по Людерсу маховикъ двойной паровой машины съ кривошипамъ подъ угломъ въ 90° никакъ не долженъ быть легче маховика, который потребовался-бы для каждой изъ этихъ машинъ въ отдѣльности, т.-е. маховикъ двойной машины можетъ быть *maximum* вдвое легче маховика простой; между тѣмъ еще и до сихъ поръ всѣ справочныя книжки и курсы машиностроенія только повторяютъ (по Morin'у) таблицы коэффициентовъ въ формулѣ вѣса маховика, не касаясь вовсе вопроса о связи между маховикомъ и регуляторомъ. Вопросъ этотъ вновь поднять въ самое послѣднее время Begtrup'омъ, и къ нему вернемся далѣе.

Слѣдующимъ, послѣ Людерса, дѣятелемъ является въ нашемъ вопросѣ L. Kargl. Въ журналѣ *Civilingenieur* за 1871 годъ помѣщено большое изслѣдованіе Kargl'a подъ названіемъ „Zur Lösung der Regulatorfrage“. Kargl, принявъ нѣсколько своеобразное дѣленіе регуляторовъ, рассматриваетъ сперва статическіе центробѣжныя регуляторы (подразумѣвается прямого дѣйствія). Онъ старается здѣсь найти дифференціальное уравненіе движенія муфты регулятора, состоящаго изъ двухъ шаровъ, центры которыхъ движутся по нѣкоторой кривой, соединенныхъ съ муфтой, движущейся вертикально.

Рѣшеніе Kargl'a неточно по тремъ причинамъ.

Во-первыхъ для упрощенія дифференціального уравненія, онъ въ *одномъ изъ членовъ* уравненія принимаетъ, вслѣдствіе малости размаховъ, кривую за прямую, полагая котангенсъ угла касательной съ осью, т.-е.

$$\frac{dy}{dz} = \text{const} = a,$$

и слѣдовательно

$$y = az$$

и кромѣ того вездѣ

$$dz = adx;$$

въ другихъ же членахъ онъ, конечно, оставляетъ величину dy , иначе исчезъ бы и смыслъ уравненія, такъ какъ прямо имѣли бы:

$$y = abx.$$

Во вторыхъ, вліяніе вредныхъ сопротивленій на движеніе муфты у Kargl'a совершенно осталось въ тѣни и, повидимому, онъ ихъ принялъ въ расчетъ не совсѣмъ правильно, ибо онъ страннымъ образомъ исчезаютъ *явно* изъ дифференціальнаго уравненія движенія (входя, впрочемъ, неявно въ видѣ ω_g). Зависитъ это отъ того, что Kargl принимаетъ (безъ оговорки) треніе покоя и треніе движенія равными, что не вѣрно. Кромѣ того, совершенно не принята въ расчетъ нечувствительность регулятора. Въ третьихъ, примѣняя выведенное имъ общее дифференціальное уравненіе движенія муфты къ регулятору Портера, Kargl, чтобы избѣжать уравненія съ переменными коэффициентами, содержащаго членъ вида :

$$(a + bt + ct^2)x,$$

(который былъ и въ нашемъ изслѣдованіи регулятора плоскаго), приводитъ правую часть уравненія къ виду:

$$F(x, \omega) - F(x_0, \omega_0)$$

гдѣ x и ω суть сами функціи t , а x_0 и ω_0 — постоянныя значенія ихъ въ началѣ періода, и разлагаетъ эту разность по формулѣ Тейлора для функціи двухъ переменныхъ и ограничивается членами съ первыми степенями разностей

$$\omega - \omega_0 \text{ и } x - x_0$$

по *малости* размаховъ $x - x_0$. Тогда уравненіе превращается въ уравненіе съ постоянными коэффициентами и съ послѣднимъ членомъ, именно въ уравненіе вида:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -Ax + Bt + C,$$

которое, конечно, легко интегрируется и даетъ интегралъ:

$$x = \frac{Bt + C}{A} + C_1 \cos (t\sqrt{A}) + C_2 \sin t\sqrt{A} \text{ *)},$$

купленный цѣною сказанныхъ трехъ приближеній.

Пользуясь этимъ интеграломъ, Kargl рѣшаетъ весьма полно и обстоятельно нѣсколько примѣровъ, слѣдя отъ хода къ ходу (для паровой машины) за движеніемъ муфты регулятора и за скоростью машины. Здѣсь у Kargl'a есть еще одна, не знаю, ошибка или умышленная, но неоговоренная неточность—онъ считаетъ, какъ продолжительность отдѣльныхъ ходовъ, такъ и промежутки времени отъ отсѣчки до отсѣчки *равными* все время, тогда какъ, вслѣдствіе движенія муфты регулятора, эти времена мѣняются отъ хода къ ходу. Впрочемъ, эта ошибка имѣетъ очень небольшое вліяніе на результатъ.

Постановка задачи и путь рѣшенія ея Kargl'емъ не оставляли бы желать ничего лучшаго, если бы только возможно было *всегда* примириться съ допущеніемъ малости размаховъ. Но, именно, въ примѣрахъ самаго Kargl'a есть случаи, когда его уравненіе примѣнить нельзя. Это тамъ, гдѣ онъ, изслѣдуя регуляторъ, находитъ его негоднымъ, такъ какъ уже за первый же оборотъ машины муфта уйдетъ чуть не въ крайнее положеніе, пробѣжавъ путь въ 40 $\frac{m}{m}$. Это уже не весьма малый размахъ.

Кромѣ того является вопросъ о томъ, насколько переменна типа дифференціального уравненія, полученная вслѣдствіе отбрасыванія даже и малыхъ членовъ, вліяетъ, какъ на *функциональную зависимость*, такъ и на *числовую величину* результата? **).

Во всякомъ случаѣ, изслѣдованіе Kargl'a останется исходнымъ пунктомъ для всякаго новаго изслѣдователя, ибо постановка имъ задачи для паровой машины въ томъ смыслѣ, чтобы слѣдить за движеніемъ изъ хода въ ходъ, мѣняя начальныя постоянныя въ интегралѣ, вполне правильна и сообразна съ дѣйствительностью.

Во второй части своего сочиненія Kargl разсматриваетъ регуляторы не прямого дѣйствія, пользуясь исключительно графическими представленіями. Эта часть для насъ мало интересна.

*) Такимъ приемомъ рѣшили задачу о движеніи плоскаго регулятора и мы въ началѣ главы.

**) Сказать правду, упрекъ этотъ приложимъ ко множеству и другихъ изслѣдованій по механикѣ и физикѣ, гдѣ довольствуются первыми членами ряда и потомъ интегрируютъ, часто не заботясь изслѣдовать, насколько полученное соотвѣтствуетъ дѣйствительности.

Слѣдующей работой является изслѣдованіе профессора Вышнеградскаго о регуляторахъ прямого дѣйствія. Мнѣ оно извѣстно лишь на нѣмецкомъ языкѣ, напечатанное въ „Civilingenieur“ за 1877 годъ, подъ заглавіемъ „Ueber direktwirkende Regulatoren“.

Сочиненіе это получило наибольшую извѣстность въ техническомъ мірѣ и даже теперь цитируется американцами (Thurston), вообще мало знакомыми съ европейской литературой. Впрочемъ цѣль и характеръ изслѣдованій Вышнеградскаго отличается сильно отъ характера изслѣдованій Lüders'a и Kargl'a. Тогда какъ Kargl ставитъ себѣ цѣль *смѣдить* постоянно за движеніемъ регулятора, получивши *интегральное* уравненіе движенія муфты, Вышнеградскій изслѣдуетъ *дифференціальное* уравненіе движенія муфты и по виду уравненія и значеніямъ коэффициентовъ старается, не интегрируя уравненія, опредѣлить свойства интеграла. Принимая для общности, что регуляторъ снабженъ катарактомъ, Вышнеградскій изслѣдуетъ при какихъ условіяхъ интегралъ не будетъ содержать періодическихъ функцій, т.-е. синуса и косинуса времени, а лишь члены вида Ce^{at} ; т.-е. находитъ, когда движеніе регулятора при переходѣ изъ одного положенія въ другое будетъ совершаться безъ колебаній и прыжковъ.

Съ математической стороны изслѣдованіе Вышнеградскаго весьма изящно и приводитъ между прочимъ къ слѣдующему извѣстному его положенію.

Какъ астатическіе, такъ и статическіе регуляторы безъ катаракта не годятся для регулированія машинъ, ибо при этомъ въ интегралѣ будутъ періодическія функціи.

Вопроса-же о самомъ движеніи регулятора въ подробности, Вышнеградскій почти не касается.

Несмотря на остроумные и изящные приемы, изслѣдованіе Вышнеградскаго непримѣнимо къ паровымъ машинамъ, ибо въ немъ воздѣйствіе регулятора на величину движущей силы считается *непрерывнымъ* и притокъ движущей силы въ машину считается непрерывнымъ, такъ что измѣненіе движущей силы полагается $\therefore$ перемѣщенію муфты (считаемому малымъ). Такое допущеніе можетъ быть сдѣлано, напримѣръ, для шита гидравлическаго двигателя, но для машины съ отсѣчкой, особенно на такой части хода, оно невозможно. Движеніе паровой машины, равномерно-ускоренное отъ отсѣчки до отсѣчки, выражалось бы, при предположеніи Вышнеградскаго что

$$\frac{dw}{dt} = A + Bx,$$

закономъ :

$$\omega = \int (A + Bx) dt$$

гдѣ величина x есть сама интеграль дифференціального уравненія, имѣющій видъ

$$x = a + be^t + e^{at} \{ D \cos \beta t + E \sin \beta t \},$$

тогда какъ въ дѣйствительности оно выражается закономъ

$$\omega = pt + C + C'$$

что касается вообще всего изслѣдованія, то въ немъ дѣлается масса допущеній, основанныхъ на малости размаха муфты, первой степени котораго принимаются пропорціональными *почти все факторы*, вліяющіе на движеніе регулятора. Въ результатѣ Вышнеградскій получаетъ дифференціальное уравненіе третьяго порядка, но съ постоянными коэффициентами. Поэтому, въ примѣненіи къ паровой машинѣ съ отсѣчкой (при регулированіи дроссельнымъ клапаномъ и маломъ расширеніи, предположенія Вышнеградскаго довольно близки къ истинѣ) интеграль по Вышнеградскому также не вполне соотвѣтствуетъ дѣйствительности.

Grashof во 2-мъ томѣ своего классическаго курса „Theoretische Maschinenlehre“, носящемъ названіе „Theorie des Getriebes etc“, даетъ весьма подробное изложеніе теоріи регуляторовъ и удѣляетъ не мало мѣста и вопросу о вліяніи регулятора на ходъ машины. Изслѣдованія Grashof'a представляютъ, впрочемъ, ничто иное, какъ болѣе точное изложеніе изслѣдованій Kargl'a. Разница въ томъ, что Grashof принимаетъ во вниманіе неодинаковую продолжительность временъ отъ отсѣчки до отсѣчки и неодинаковую продолжительность ходовъ, а вслѣдствіе этого у Grashof'a мѣняется отъ хода къ ходу и величина коэффициента A при x въ дифференціальномъ уравненіи.

Впрочемъ измѣненія этихъ величинъ неособенно значительны. Но, къ сожалѣнію, Grashof *совершенно пренебрегаетъ* вредными сопротивленіями регулятора, тогда какъ слѣдовало бы заняться этимъ важнымъ факторомъ, играющимъ такую большую роль при движеніи регулятора.

Изъ сказаннаго слѣдуетъ, что изслѣдованія Grashof'a *существенно* не прибавляютъ ничего новаго къ методу Kargl'a, отличаясь лишь большей научностью и точностью изложенія, составляющими отличительную черту всѣхъ сочиненій Grashof'a.

Послѣ выхода въ свѣтъ (1883 г.) сочиненія Grashof'a, въ теченіе 10 лѣтъ ничего не было написано по этому вопросу. Кажется, никто изъ нѣмецкихъ ученыхъ не рѣшался братья за него послѣ того, какъ и Grashof не рѣшился приняться за болѣе точное рѣшеніе задачи.

Послѣдній голосъ, призывающій вновь вниманіе къ этому важному вопросу раздался изъ за океана, изъ Америки. Въ журналѣ „American Machinist“ за 1893 и 1894 годъ появилась большая статья Begtrup'a имѣющая цѣлью изслѣдовать вліяніе регулятора на ходъ машины, и специально *плоскаго* регулятора. Это весьма знаменательное явленіе, ибо ужъ если въ Америкѣ, странѣ опыта, попытокъ и оцупи, при помощи которыхъ плоскіе регуляторы были доведены тамъ до высокаго совершенства, явился интересъ и потребность въ теоретическомъ изслѣдованіи вопроса, то это показываетъ еще разъ всю его важность для инженера-практика, которому приходится конструировать эти регуляторы.

Статья Begtrup'a представляетъ интересъ во многихъ отношеніяхъ и заслуживаетъ вниманія не по результатамъ своимъ, которыхъ почти нѣтъ, исключая лишь формулы вѣса маховика, о чемъ скажемъ ниже, а по своему оригинальному методу и *задачамъ*, которыя въ ней намѣчены. Въ виду того, что мы при изложеніи сущности вопроса придерживались метода Kargl-Grashof'a, разборъ ихъ сочиненій былъ приведенъ нами вкратцѣ. Относительно же изслѣдованія Begtrup'a мы войдемъ въ большія подробности.

Формуль у Begtrup'a совсѣмъ нѣтъ. Онъ пользуется исключительно графическимъ представленіемъ и при помощи его старается *уяснить сущность явленія*, не входя въ вычисленія числовыхъ результатовъ.

Сначала Begtrup разсматриваетъ колебанія шара регулятора, который вращался равномерно со скоростью ω и внезапно сталъ вращаться съ новой угловой скоростью ω' , т.-е. первую задачу, рѣшенную нами аналитически въ этой главѣ, и, конечно, безъ труда находить, что въ отсутствіи тренія шаръ вѣчно будетъ качаться по закону простого гармоническаго колебанія, а въ присутствіи постояннаго тренія амплитуда будетъ постоянно уменьшаться; постоянство же періода не можетъ быть доказано его приѣмомъ и принимается на вѣру. Сущность представленій Begtrup'a сводится къ слѣдующему.

Если (фиг. 70) Ab_1 представляетъ законъ распредѣленія по радіусу качанія шара Ab центробѣжныхъ силъ при скорости ω' , а

точка O — новое положеніе равновѣсія шара, находящагося въ моментъ измѣненія скорости въ точкѣ a , а прямая ed представляетъ законъ измѣненія силы пружины, при чемъ въ старомъ положеніи равновѣсія a величина центробѣжной силы была равна ah , то очевидно, сила, движущая шаръ въ какомъ нибудь положеніи его, напримѣръ, въ точкѣ p , выразится длиной отрѣзка pk , такъ что движущія силы измѣняются симметрично по обѣ стороны точки O , и можно представить ихъ измѣненіе съ помощью не косоугольныхъ, а прямоугольныхъ треугольниковъ, если на томъ же основаніи ab (фиг. 70) построить наклонную $a'b'$ такъ что :

$$a'a = a_1h = gb_1 = b'b$$

Здѣсь движущая сила изображается ординатами, считающимися отъ основанія ab до линіи $a'b'$, и не трудно заключить, что движеніе шара будетъ вѣчное колебаніе между a и b .

Если будетъ треніе, то нужно движущую силу въ каждой точкѣ уменьшить на постоянную величину, т.-е. провести $f_1 f f_0 \parallel ab$, причемъ $f_1 a = f_0 s$ есть сила тренія. Шаръ изъ a дойдетъ лишь до s , такъ что амплитуда уменьшается. Постоянство періода не доказывается. Задача эта тоже рѣшена нами аналитически.

Послѣ этихъ замѣчаній Begtrup переходитъ къ разсмотрѣнію вопроса о движеніи шара плоскаго регулятора паровой машины, при чемъ для упрощенія задачи и онъ, подобно Вышнеградскому принимаетъ дѣйствіе регулятора и притокъ движущей силы *непрерывнымъ*, такъ что всякое измѣненіе положенія шара *сейчасъ-же* отзывается на скорости машины. Сдѣлавъ такое предположеніе, Begtrup далѣе ведетъ разсужденіе очень оригинально и остроумно.

Шаръ можетъ или сразу перейти въ новое положеніе, или колебаться вокругъ него нѣкоторое время. Во всякомъ случаѣ, тронувшись изъ прежняго положенія равновѣсія, онъ, пройдя извѣстный путь или остановится совсѣмъ безъ колебаній въ новомъ положеніи равновѣсія, или остановится на мгновеніе, перейдя за него, т.-е. совершивъ полукосило. Но онъ непременно остановится, если регуляторъ дѣйствуетъ исправно.

Замѣтивъ это и выражаясь языкомъ аналитической механики, мы сказали бы, что можно приложить къ этому перемѣщенію шара (одному размаху) уравненіе живыхъ силъ, и такъ какъ начальная и конечная скорости равны нулю, то и правая часть уравненія живыхъ силъ равна нулю, такъ что сумма работъ всѣхъ силъ должна быть, для сказаннаго перехода, равна нулю.

Begtrup почему-то не упоминаетъ объ интегралѣ живыхъ силъ, но все дальнѣйшее его разсужденіе есть именно указанное примѣненіе теоремы живыхъ силъ.

Разсужденіе его вкратцѣ таково. Вслѣдствіе движенія шара *непрерывно* измѣняется движущая сила, а слѣдовательно *непрерывно* мѣняется и угловая скорость вала машины, вслѣдствіе чего мѣняется и центробѣжная сила шара, такъ что, кромѣ измѣненія центробѣжной силы вслѣдствіе перемѣны разстоянія шара отъ центра, слѣдовательно какъ функціи непосредственно этого разстоянія, она мѣняется еще и вслѣдствіе измѣненія угловой скорости машины, слѣдовательно, какъ функція времени. [Примѣнительно къ нашимъ изслѣдованіямъ это выразилось бы дифференціальнымъ уравненіемъ.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = xF(t) + C,$$

гдѣ видъ функціи F зависитъ отъ закона измѣненія движущей силы съ положеніемъ шара и закона измѣненія угловой скорости машины при измѣненіи движущей силы. При работѣ съ отсѣчкой, когда за одинъ ходъ машина идетъ равномерно-ускоренно, функція F была у насъ алгебраическая функція второй степени].

Такимъ образомъ шаръ движется какъ бы подѣ влияніемъ четырехъ силъ:

1) Силы пружины.

2) Центробѣжной силы, соотвѣтствующей данному радіусу при *неизмѣнной* новой угловой скорости, къ которой стремится теперь машина, такъ что эта сила есть функція лишь x .

Разность этихъ двухъ силъ предстаетъ ординатами линіи $a'b'$ (фиг. 70).

3) Добавочной или избыточной центробѣжной силы (положительной или отрицательной) зависящей отъ того, что при движеніи шара измѣняется и притокъ движущей силы въ машину, такъ что эта послѣдняя идетъ ускоренно или замедленно, и это ускореніе опять отзывается на движеніи шара, такъ что эта сила есть функція времени t .

4) Постояннаго тренія.

Изъ разсмотрѣнія діаграммы легко выводится заключеніе, что такъ какъ при нахожденіи шара въ новомъ положеніи равновѣсія, золотникъ впускаетъ количество пара какъ разъ достаточное для равномернаго хода машины, то величина избыточной центробѣжной силы, если бы она, передвигая шаръ, не вліяла бы опять

на притокъ движущей силы въ слѣдующій моментъ, должна, возрастая отъ нуля до извѣстнаго *maximum'a*, имѣющаго мѣсто при прохожденіи шаромъ новаго положенія равновѣсія, потомъ опять убывать, доходя до нуля при достиженіи шаромъ крайняго положенія, такъ что величины этой силы y_1 въ сказанномъ положеніи изобразятся ординатами нѣкоторой кривой *aib*, видъ которой подобенъ показанному на фиг. (70).

Въ дѣйствительности же добавочное передвиженіе шара отъ этой силы мѣняетъ притокъ движущей силы и величину добавочной центробѣжной силы для слѣдующаго момента, такъ что въ дѣйствительности измѣненіе величины силы y_1 изобразится не эллипсомъ, а нѣкоторой болѣе сложной кривой. Но нахожденія дѣйствительной кривой Begtrup пока не касается, замѣчая, безъ явнаго упоминанія о теоремѣ живыхъ силъ, что для того, чтобы добавочная сила (3) не унесла шаръ изъ предѣловъ извѣстнаго размаха *ab* за точку *b* (фиг. 70), вся ея работа на пути *ab* должна поглотиться работой силы тренія, и кромѣ того еще и часть работы силъ (1) и (2) должна тоже поглотиться силой тренія, если хотимъ, чтобы размахи шара уменьшались, что и необходимо для постепеннаго его приближенія къ положенію равновѣсія. Изъ этого соображенія (т.-е. изъ уравненія живыхъ силъ) и можно опредѣлить *наименьшую* возможную для работы регулятора величину силы тренія.

Если сила тренія будетъ меньше, то размахи регулятора не будутъ уменьшаться и онъ будетъ все время плясать вокругъ положенія равновѣсія.

Соображеніе о томъ, что треніе должно поглотить работу избыточной силы вполне правильно и заслуживаетъ вниманія, но, къ сожалѣнію, ясности и важности идей Begtrup'a, повидимому, не соответствуетъ глубина его теоретическихъ познаній. Такъ онъ дѣлаетъ первую ошибку, утверждая (бездоказательно), что кривая *aib* есть *полуэллипсъ* (the curve must be a half ellipse). Я не знаю, можетъ быть у американцевъ принято словомъ ellipse называть вообще то, что мы называемъ *оваломъ*, но если Begtrup разумѣетъ настоящій эллипсъ, какъ кривую втораго порядка, то это совершенно произвольно.

Теперь Begtrup переходитъ къ самому существенному вопросу, который составляетъ ядро его изслѣдованія: къ связи регулятора съ маховикомъ. [До сихъ поръ всѣ курсы и книжки ограничиваются лишь замѣчаніемъ, что степень нечувствительности регулятора должна быть больше степени неравномѣрности маховика,

иначе регуляторъ будетъ вмѣшиваться въ область дѣйствія маховика].

Begtrup прежде всего доказываетъ, что треніе можетъ поглотить лишь *вполнѣ определенное* количество работы добавочной силы, такъ что, если при данныхъ условіяхъ тренія не достаточно для ея поглощенія, то и никакимъ увеличеніемъ тренія мы не достигнемъ этого, ибо отъ этого увеличенія тренія увеличивается и степень нечувствительности регулятора и насколько прибавится работа тренія, *ровно* настолько же прибавится и работа добавочной силы y_1 , такъ что мы ничего не выиграемъ *).

Предложеніе это весьма важно и слѣдствіемъ его является то, что необходимо величину работы силы y_1 подгонять такъ, чтобы она была меньше работы такой силы тренія, которую возможно имѣть безъ особаго вреда для чувствительности регулятора. Единственное средство уменьшить величину этой работы—это уменьшить величину самой силы y_1 , зависящей отъ ускореннаго или замедленнаго хода машины въ періодъ регулированія, и для этого необходимо имѣть достаточно тяжелый маховикъ.

Если вѣсъ маховика будетъ меньше нѣкотораго предѣла, то движеніе шара регулятора не будетъ устойчивымъ, ибо онъ не возвратится въ среднее положеніе, хотя регуляторъ будетъ статическимъ.

Послѣ нѣкоторыхъ разсужденій о дѣйствіи катаракта и инерціи массъ, менѣе интересныхъ для нашей цѣли, Begtrup переходитъ, наконецъ къ самому важному выводу *формулы*, дающей минимальный вѣсъ маховика, необходимый для устойчивости регулятора.

Къ сожалѣнію „за недостаткомъ мѣста“ (such matter will take up more space than desirable) Begtrup не приводитъ подробностей вывода, а указываетъ лишь путь рѣшенія и приводитъ самую формулу. И то и другое не можетъ, къ сожалѣнію, считаться удовлетворительнымъ.

Для полученія искомаго минимальнаго вѣса нужно составить уравненіе, выражающее условіе устойчивости, именно, что работа F силы тренія болѣе работы L избыточной центробѣжной силы. Величина работы этой послѣдней силы, какъ и величина самой силы, зависитъ отъ углового ускоренія машины, а слѣдовательно, отъ момента инерціи маховика.

*) Обстоятельство это осталось незамѣченнымъ прежними изслѣдователями, да и не могло быть замѣчено, ибо они вовсе пренебрегли степенью нечувствительности.

Begtrup полагаетъ, совершенно произвольно, что работа дѣйствительной избыточной центробѣжной силы *пропорціональна* работѣ избыточно гипотетической силы $\bar{y}_1$, изображаемой площадью A полуэллипса aib и равной слѣдовательно $k.A$, и пишетъ затѣмъ уравненіе

$$L = k.A \leq F$$

Замѣчая, что величины, входящія въ A , входятъ также въ уравненіе движенія шара, которое будетъ уравненіемъ 3-го порядка съ постоянными коэффициентами, Begtrup упоминаетъ лишь, что изъ него найдено:

$$k = 1,75$$

и потомъ даетъ такія величины безъ всякаго вывода

$$A = \frac{12.q.8.60.P.s.f.l.\sqrt{50l}}{16\pi D^2.W.N\sqrt{agf}}$$

$$F = \frac{q.fl}{100}$$

и отсюда

$$\frac{WD^2N}{P.S} \times q \sqrt{\frac{agf}{l}} > 4524000$$

гдѣ

W — вѣсъ обода маховика въ фунтахъ.

D — діаметръ маховика въ дюймахъ.

N — число оборотовъ его въ минуту.

P — наибольшее среднее эффективное давленіе на весь поршень.

s — ходъ поршня въ дюймахъ.

q — наибольшее измѣненіе скорости машины при переходѣ отъ наибольшей къ наименьшей работѣ, въ % средней скорости.

a — ускореніе въ дюймахъ въ секунду шара регулятора подѣйствіемъ силы въ 1 фунтъ, дѣйствующей по направленію движенія.

f — средняя центробѣжная сила шара.

l — разстояніе между крайними положеніями шара, соотвѣтствующими измѣненію q скорости.

Несмотря на громадную важность и желательность подобной формулы, къ формулѣ Begtrup'a нельзя отнести съ полнымъ довѣріемъ, ибо выводу ея повидимому, не достаетъ научной строгости, особенно въ виду того, что самый выводъ не приведенъ авторомъ, а это и было-бы наиболѣе цѣнно.

Прежде всего предположеніе о пропорціональности работъ истинной и гипотетической добавочной сялы произвольно, и мы не видимъ никакихъ указаній на вѣроятность такой пропорціональности.

Далѣе уравненіе движенія шара будетъ въ дѣйствительности, какъ мы знаемъ, уравненіемъ 2-го порядка съ переменными коэффициентами, а не уравненіемъ 3-го порядка съ постоянными коэффициентами.

Возможно, что Begtrup знакомъ съ упомянутымъ сочиненіемъ Вышнеградскаго и слѣдѣя его методу получилъ для движенія шара уравненіе третьяго порядка съ постоянными коэффициентами. Повторяемъ, что безъ болѣе подробныхъ указаній относительно вывода формулы, ей нельзя довѣряться. Но весьма большая заслуга Begtrup'а состоитъ въ томъ, что онъ поднялъ этотъ весьма важный вопросъ и въ виду этого мы сочли полезнымъ остановиться подробнѣе на разборѣ его изслѣдованія *), и обратить вниманіе специалистовъ на этотъ важный вопросъ. Нѣтъ сомнѣнія, что задача представляетъ весьма серьезныя трудности съ аналитической стороны, ибо рѣчь идетъ объ изслѣдованіи устойчивости относительнаго движенія, при чемъ неизвѣстны даже функциональныя зависимости переменныхъ, входящихъ въ задачу.

Какъ мы уже сказали, въ изслѣдованіи Begtrup'а предполагается непрерывный притокъ движущей силы въ машину и непрерывное дѣйствіе на него регулятора. Для изслѣдованія паровой машины съ регулированиемъ отсѣчки необходимо поставить задачу въ формѣ Kargl'а, т.-е. разсматривать движеніе отъ отсѣчки до отсѣчки, такъ что изслѣдованіе усложнится, ибо одно полуколебаніе шара можетъ продолжаться въ теченіе нѣсколькихъ промежутковъ отъ отсѣчки до отсѣчки, и для каждаго такого промежутка будетъ измѣняться величина углового ускоренія машины, вслѣдствіе чего вмѣсто „эллипса“ Begtrup'а получится ломаная кривая съ точками заостренія въ моментахъ начала каждой новой отсѣчки.

Предлагая эту задачу вниманію математиковъ мы надѣемся, что въ виду важности для практики результатовъ этой задачи, не замедлятъ появиться и попытки ея рѣшенія.

Читатель, вѣроятно, не вполне удовлетворенъ настоящей, послѣдней главой нашего сочиненія, ибо теоріямъ, изложеннымъ въ

*) Изслѣдованіе Begtrup'а появится вскорѣ на русскомъ языкѣ въ одномъ изъ нашихъ техническихъ журналовъ.

ней не достасть законченности. Но таково теперешнее положеніе дѣла и наша цѣль была лишь призвать вниманіе къ этому важному вопросу, за рѣшеніе котораго мы сами не рѣшаемся брать-ся, представляя это дѣло специалистамъ по теоретической механикѣ и испытательнымъ станціямъ, которыя должны когда нибудь возникнуть и у насъ въ Россіи.

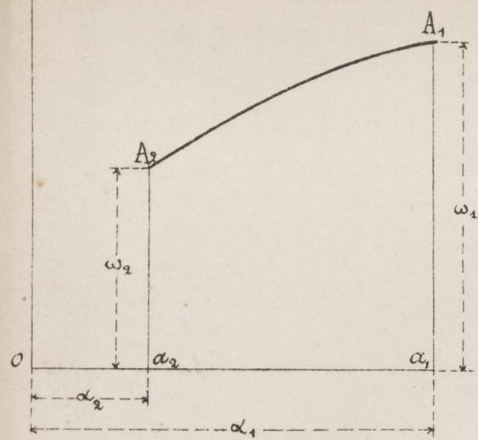
ОПЕЧАТКИ.

Стран.	Строка.	Напечатано:	Должно быть:
3	19 сверху	которые	которыя
4	8 сверху	Кертинга	Круппа
14	6 сверху	$\omega_1 \left(2 + \frac{\epsilon_1}{2} \right)$	$\omega_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{2} \right)$
14	11 сверху	$\left(1 - \frac{\epsilon^2}{2} \right)$	$\left(1 - \frac{\epsilon_2}{2} \right)$
29	5 снизу	$p,$	p_1
53	12 сверху	CP	C_oP
57	7 снизу	$z_1 - z$	$z_1 + z$
61	14 снизу	инерціи	силы инерціи
62	3 сверху	Что	что
65	5 снизу	ou	OU
68	10 и 14 сверху	M_k	MK
72	17 снизу	фиг.	фиг. 47
72	7 снизу	стрѣлкѣ I	стрѣлкѣ 1
75	8 снизу	пружины	пружина
75	9 снизу	точкѣ	точкѣ
78	13 сверху	ρ_z	ρ^2
79	8 снизу	W, A, слѣдовательно	W, а, слѣдовательно
80	16 снизу	на соотвѣтствующемъ чертежѣ вмѣсто фиг. 39 ошибочно поставлена фиг. 43	
81	11 снизу	пѣликомъ	цѣликомъ
83	13 сверху	въ крайнихъ	при крайнихъ
84	4 сверху	пружины	пружины,
84	14 снизу	$Q = 0.79 \text{ kg}$	$Q = 0.79 \text{ kg.}$
84	4 снизу	Для вѣса Q	Для вѣса Q''
89	1 сверху	$z' ^q$	z''
92	14 сверху	размѣры,	размѣры;
94	8 снизу	$\frac{M_2}{\omega_2^2 Du_2}$	$\frac{M_2 g}{\omega_2^2 Du_2}$
98	13 снизу	и 41).	и 41)
98	12 снизу	Находимъ	находимъ
100	1 сверху	центробежная	центробѣжная
107	15 сверху	$\int_0^{r_1} dF$	$\int_0^{\eta_1} dF$
107	18 сверху	$\int_0^{r_2} dF$	$\int_0^{\eta_2} dF$
108	3 сверху	ϵ_n	$\epsilon_n = \frac{\Delta}{2}$

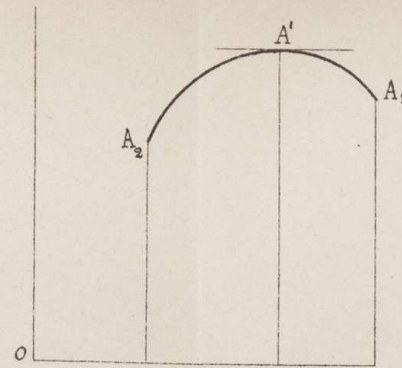
Стран.	Строка.	Напечатано:	Должно быть:
109	10 и 11 сверху	$\frac{\Delta}{4}$	$\frac{\Delta}{2}$
113	12 снизу	передвигаются	передвигается
116	20 снизу	его	ихъ
116	16 сверху	на чертежѣ 47 буква <i>l</i>	пропущена
117	17 сверху	<i>c</i>	<i>l</i>
118	18 сверху	ролики <i>gg</i>	ролики <i>GG</i>
119	3 сверху	51-й,	51-й
120	15 снизу	французскихъ	французскихъ и швей- царскихъ
121	11 снизу	на чертежѣ 54 буквы <i>DD</i>	пропущены.
122	22 сверху	на фиг. 55,	на фиг. 55 равно поло- винѣ разстоянія <i>OV</i> на- фиг. 54,
124	18 снизу	слова „(фиг. 60)“	вычеркнуть.
126	14 сверху	этотъ	этотъ
127	8 сверху	въ точкѣ <i>M'</i> ихъ пере- сѣченія	въ точкѣ <i>M'</i> , соответ- ствующей точкѣ <i>M'</i> , ихъ пересѣченія
127	16 сверху	въ <i>M''</i> , точка пересѣ- ченія	въ точкѣ <i>M''</i> , соответ- ствующей <i>M''</i> , — точкѣ пересѣченія
127	12 снизу	шаръ, въ равновѣсін	шаръ, бывшій въ равно- вѣсін
128	12 сверху	$-\frac{\beta r}{\Delta}xr$	$-\frac{\beta r}{\Delta}x$
130	2 сверху	$= A(\Delta - R)^2 = A\xi^2$	$= A(\Delta - R)^2 - A\xi^2$
138	5 снизу	$y = \Delta \cdot R$	$y = \Delta - R$
152	8 сверху	произвольныя	произвольныя постоянныя
153	5 сверху	p^{τ}	p^{τ^2}
154	10 и 11 сверху	<i>arcos</i>	<i>arccos</i>
154	9 снизу	$P_1 - Q$	$P_1 - Q'$
157	14 снизу	произведенно	произведеннаго
159	9 снизу	прямаго	непрямаго
159	8 снизу	непрямаго	прямаго
161	5 сверху	$dz = adx$	$dz = bdx$
163	18 снизу	положенію.	положенію:
163	5 снизу	такой	малой
164	8 сверху	что	Что
166	6 сверху	p_k	$p_1 k$
167	13 снизу	фиг. 70	фиг. 71
168	7 сверху	фиг. 70	фиг. 71
170	3 сверху	избыточно	избыточной
170	20 снизу	$\frac{WD^2 N}{P \cdot S}$	$\frac{WD^2 N}{P_s}$



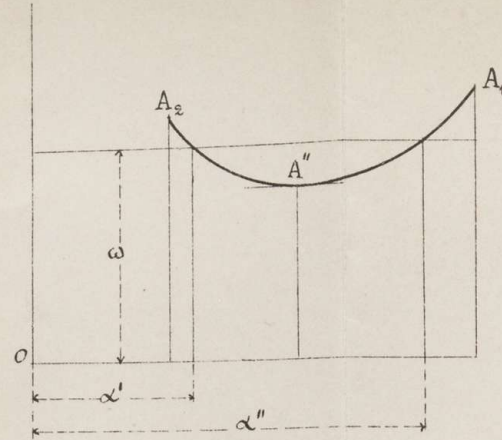
Фиг. 1



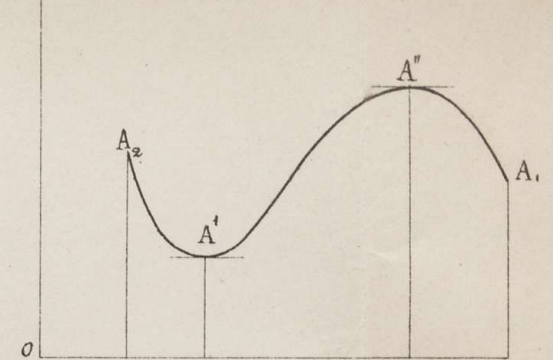
Фиг. 2



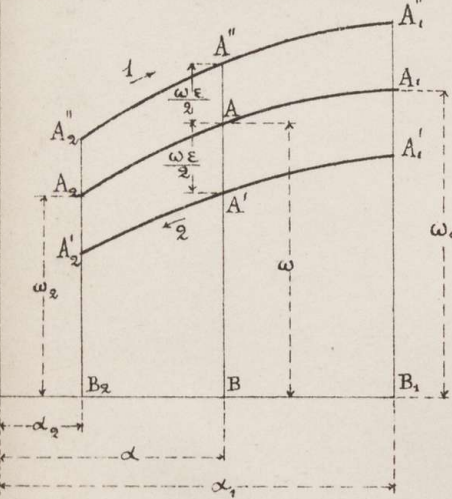
Фиг. 3



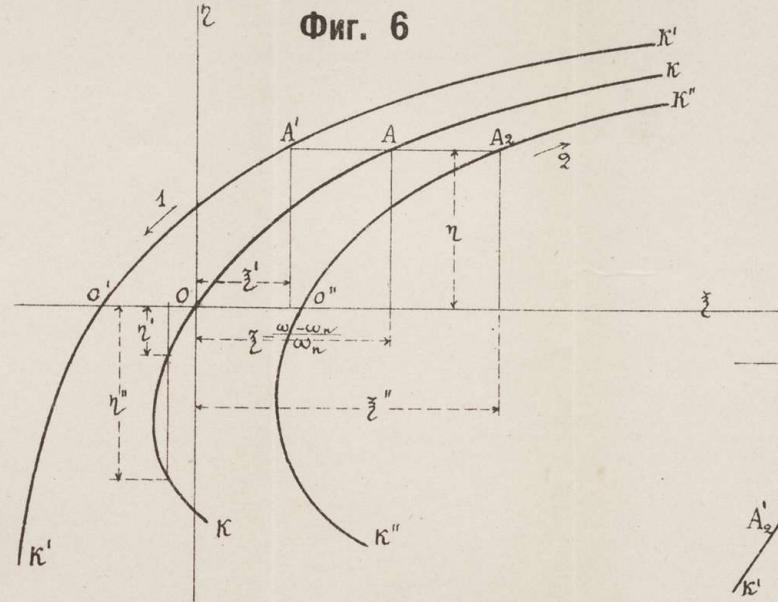
Фиг. 4



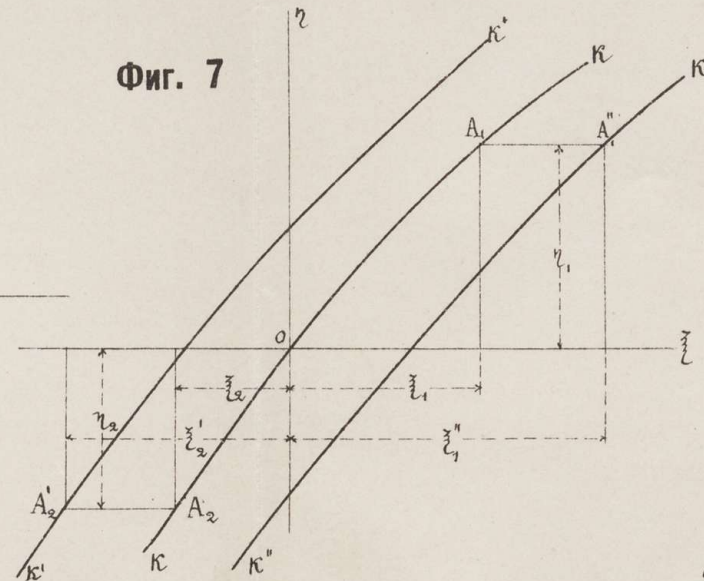
Фиг. 5



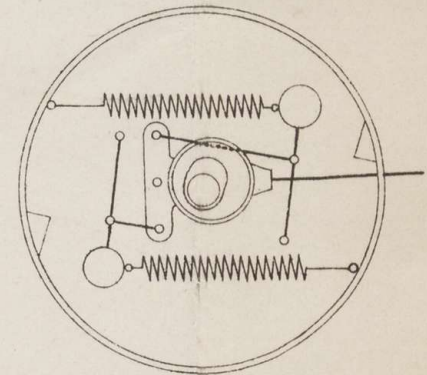
Фиг. 6



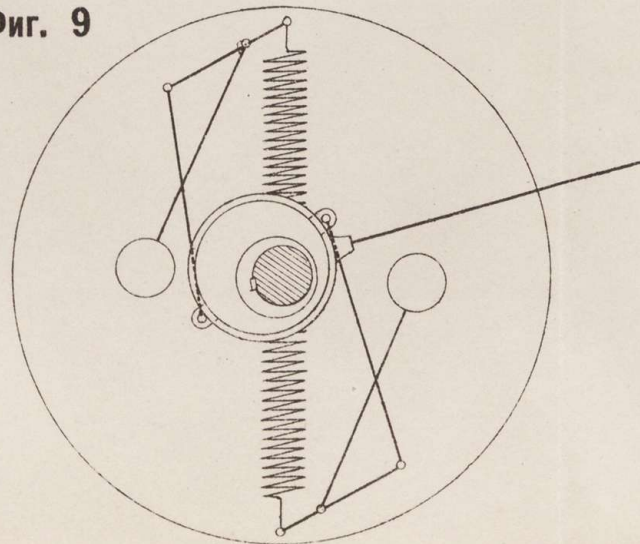
Фиг. 7



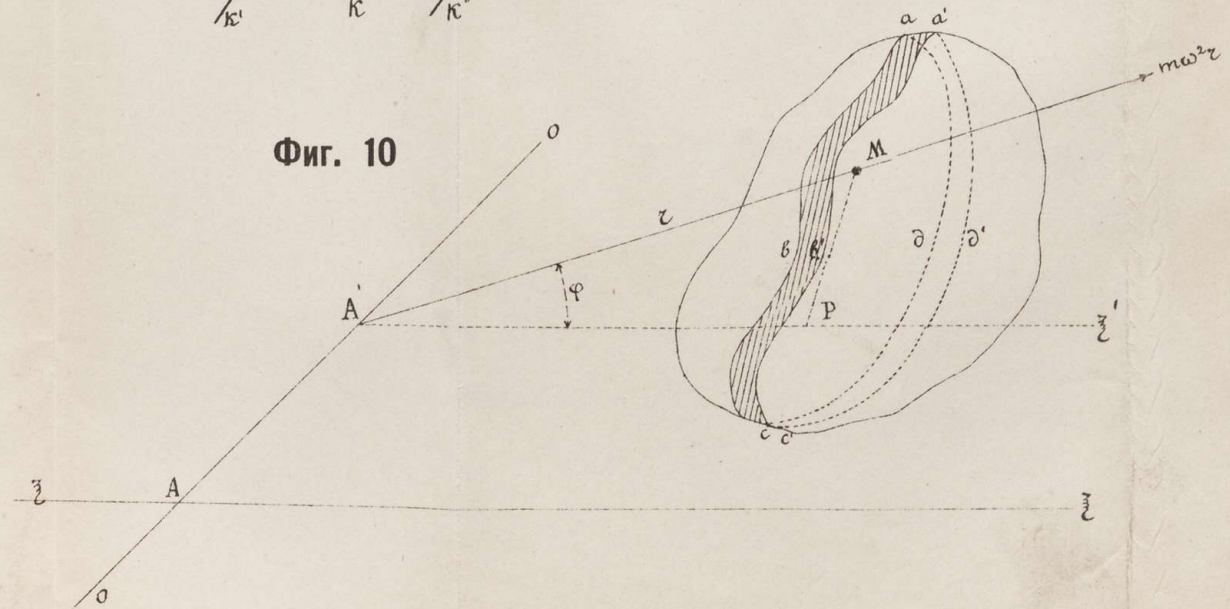
Фиг. 8

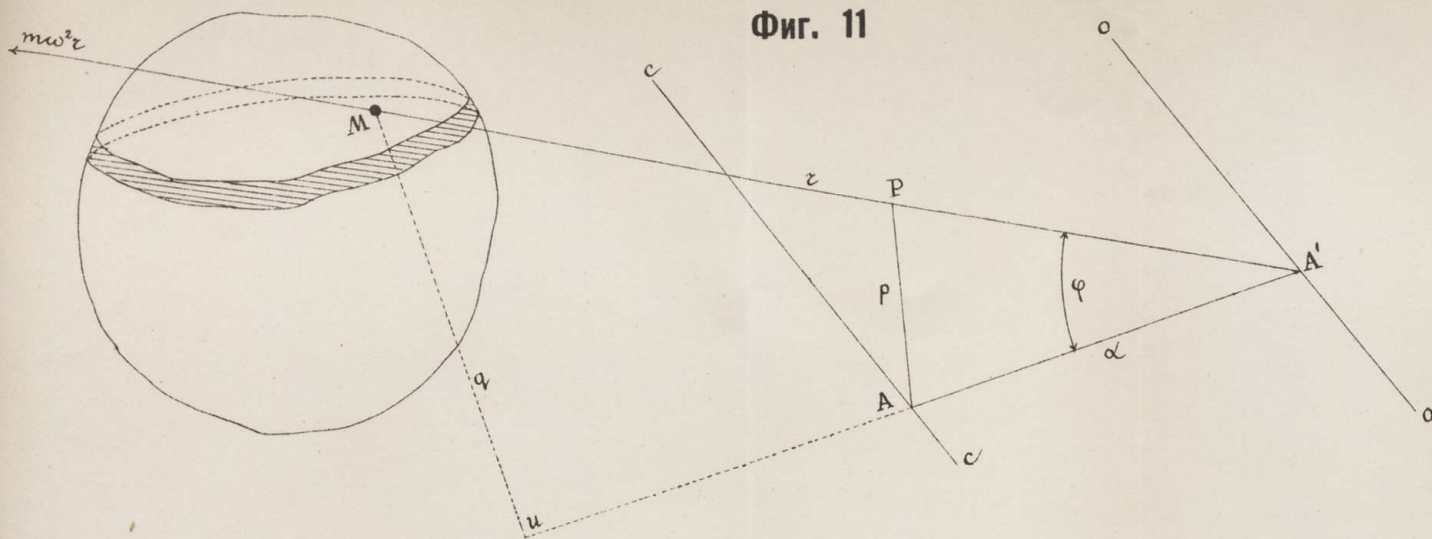


Фиг. 9



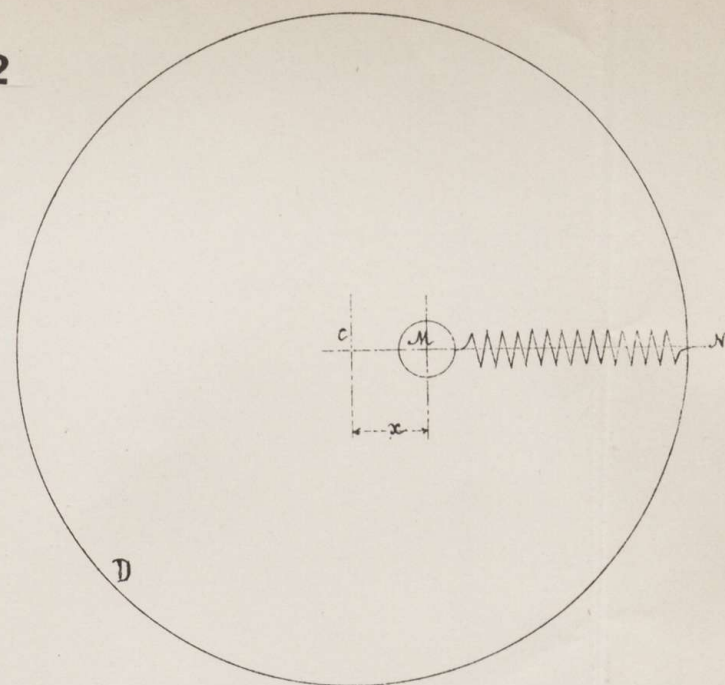
Фиг. 10



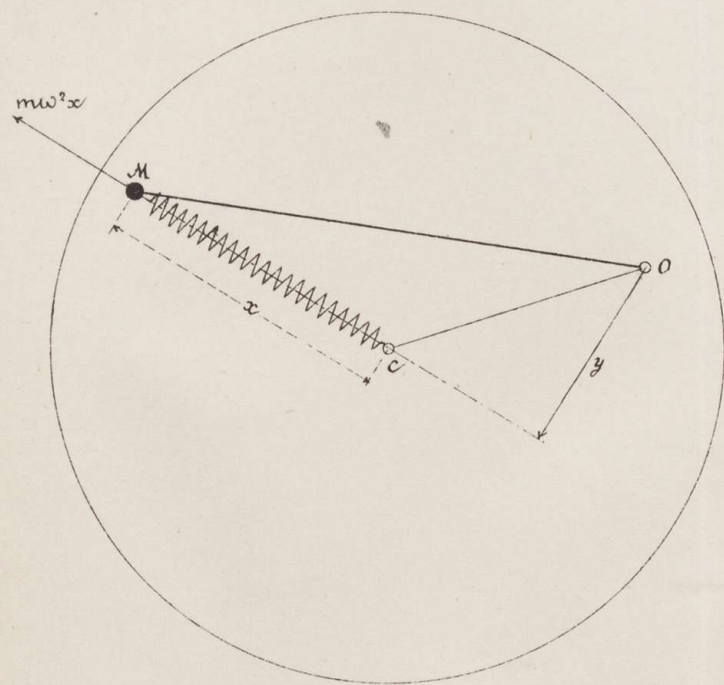


Фиг. 11

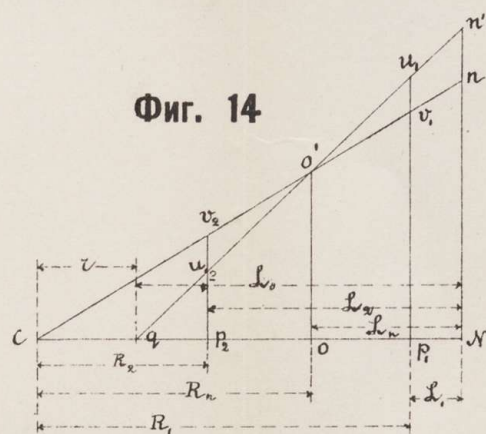
Фиг. 12



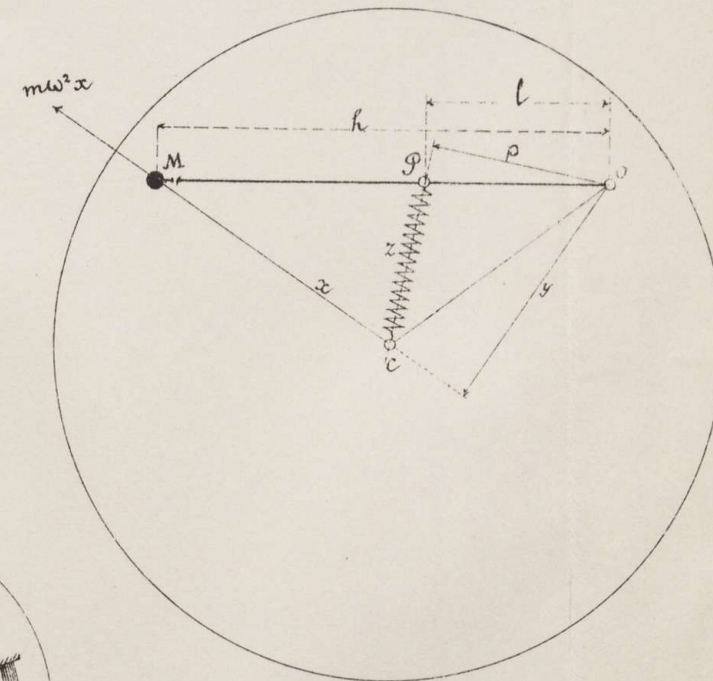
Фиг. 16



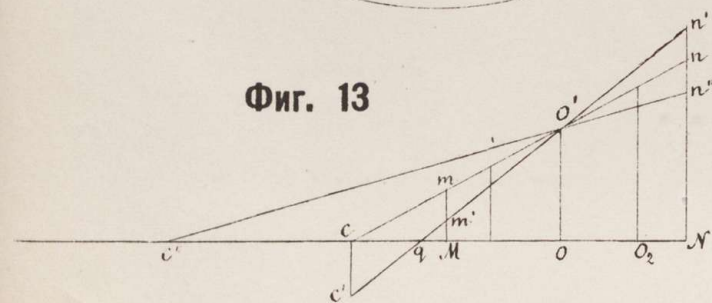
Фиг. 14



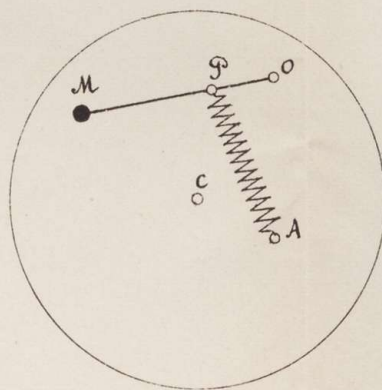
Фиг. 17



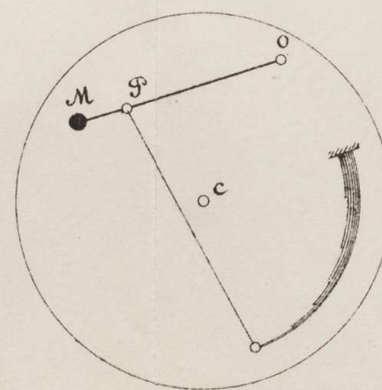
Фиг. 13



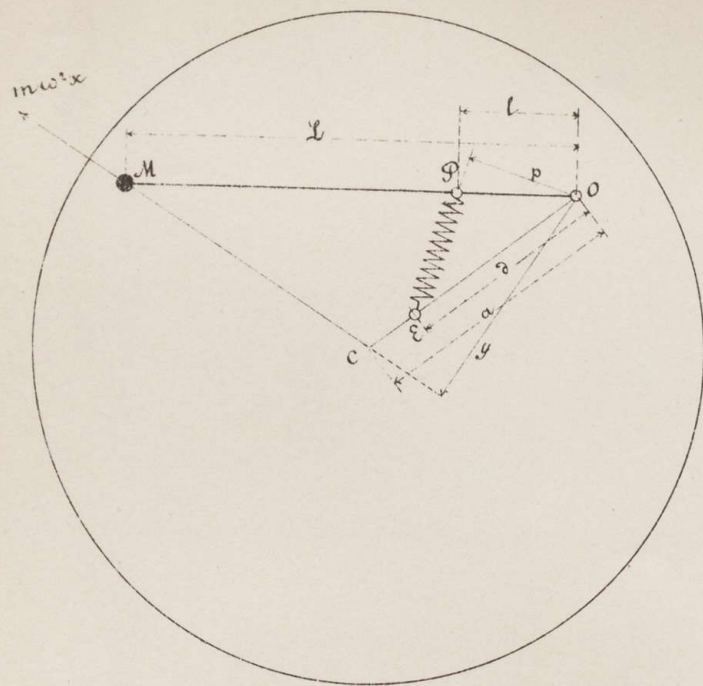
Фиг. 14 bis.



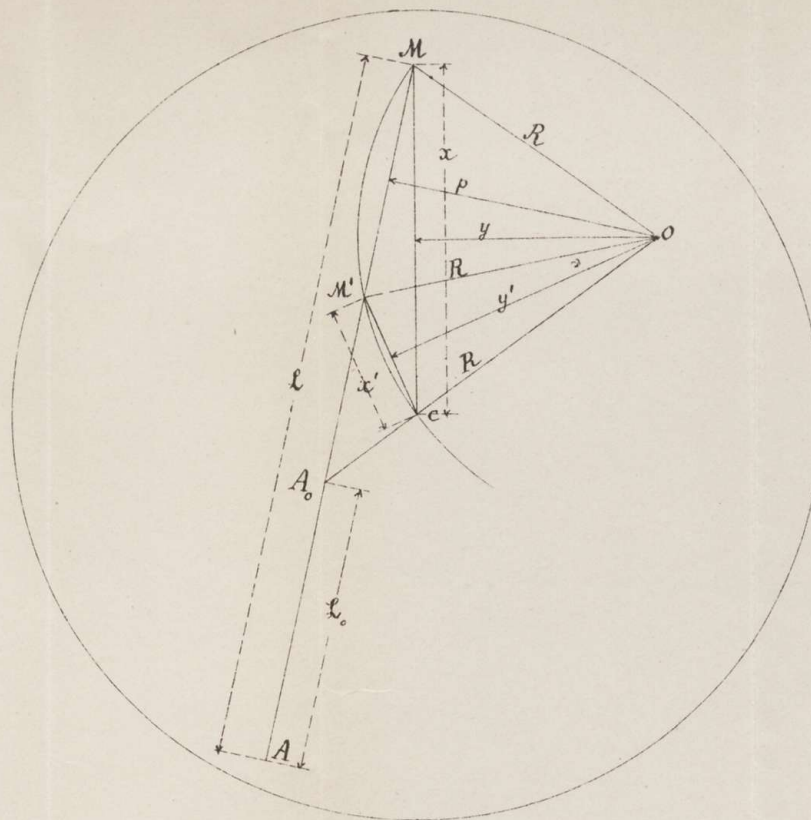
Фиг. 15



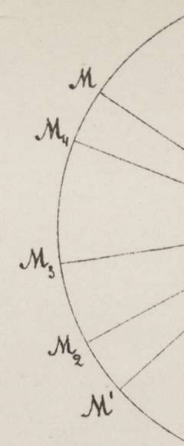
Фиг. 18



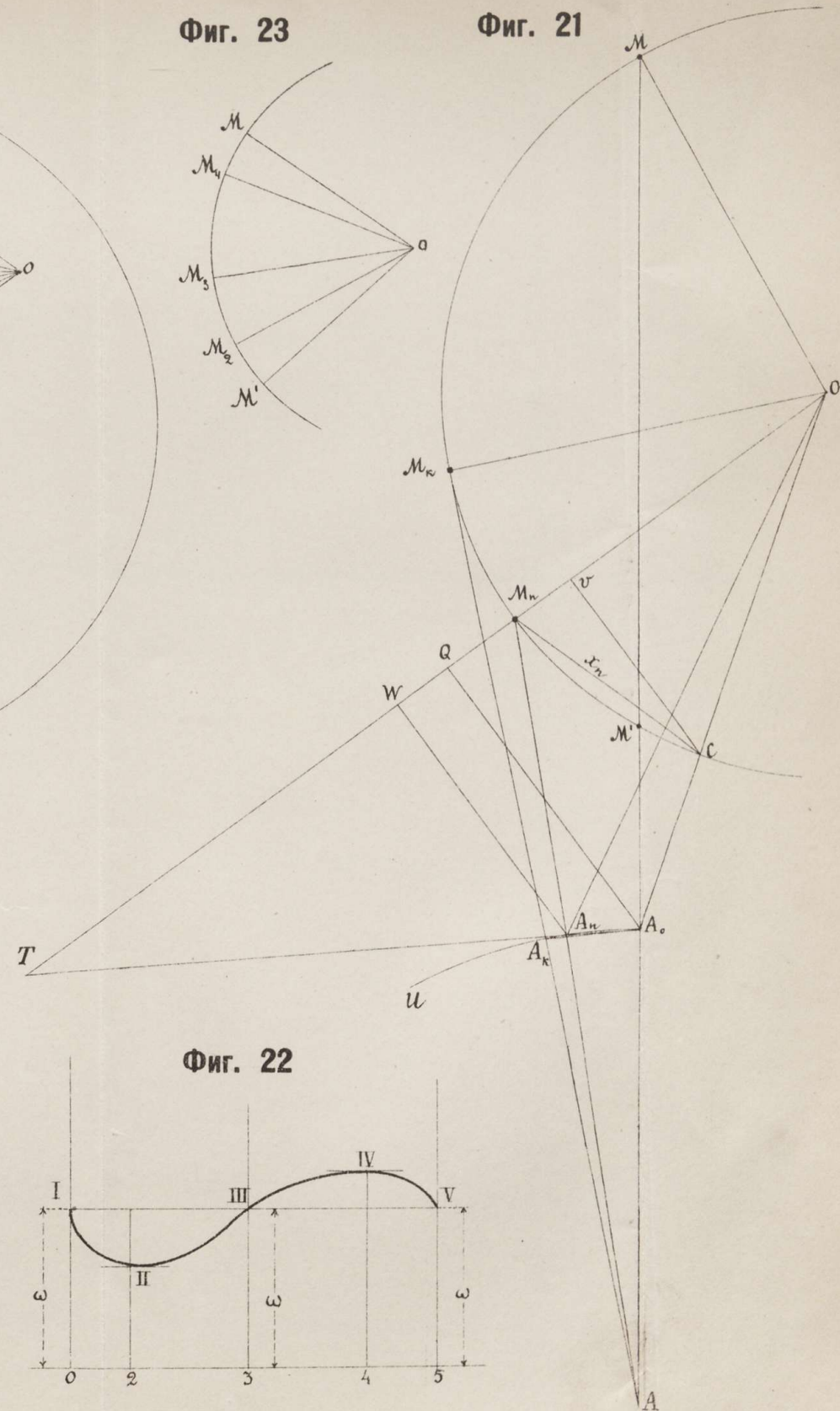
Фиг. 20



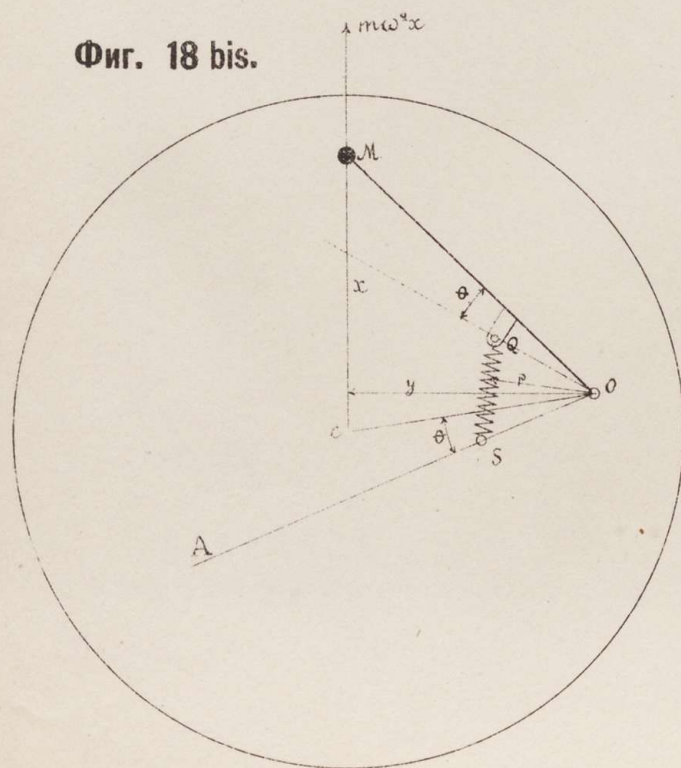
Фиг. 23



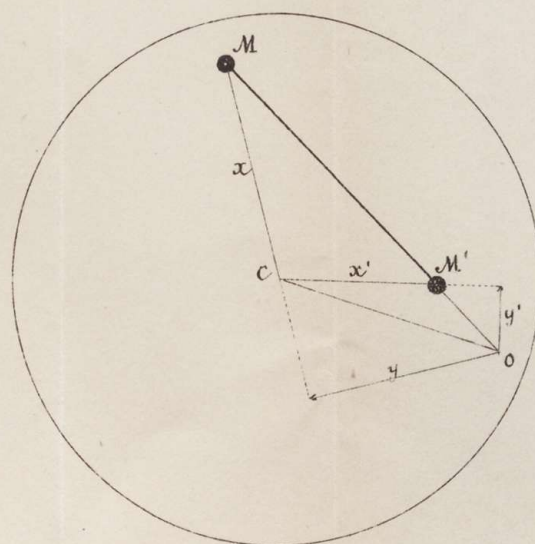
Фиг. 21



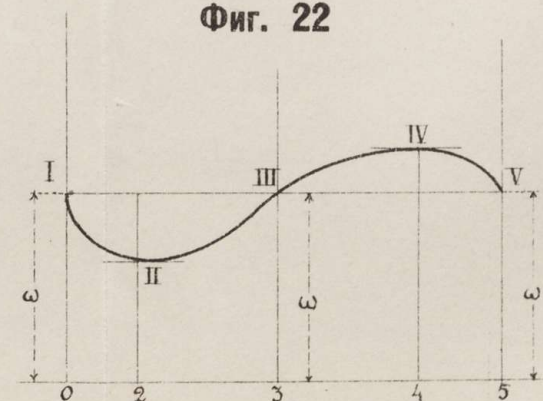
Фиг. 18 bis.



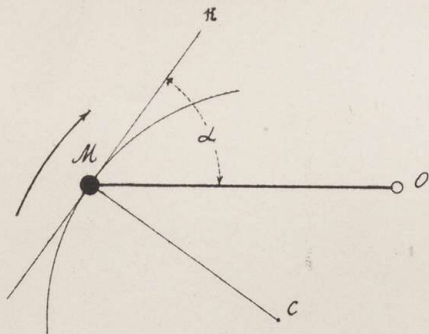
Фиг. 19



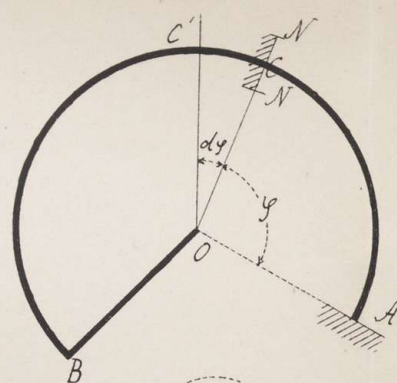
Фиг. 22



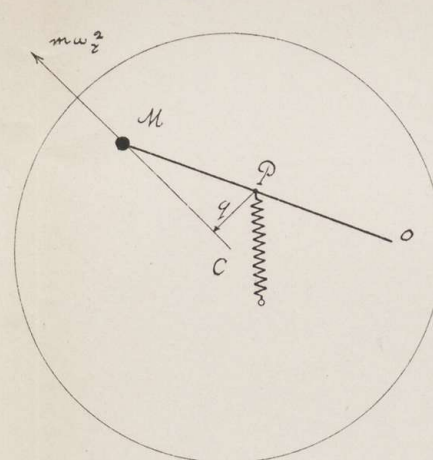
Фиг. 30



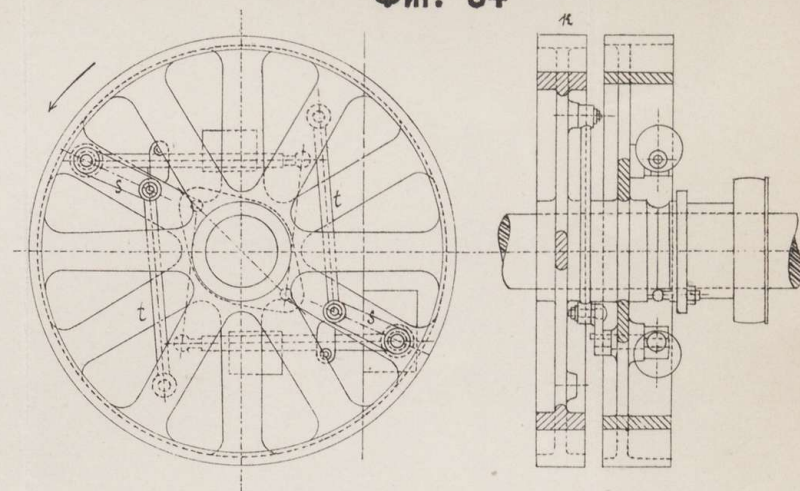
Фиг. 37



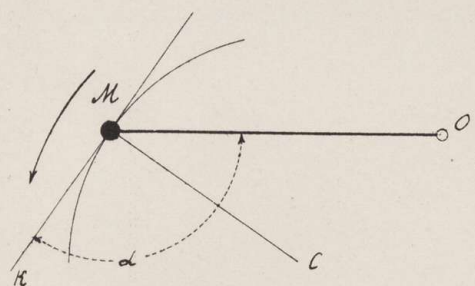
Фиг. 36



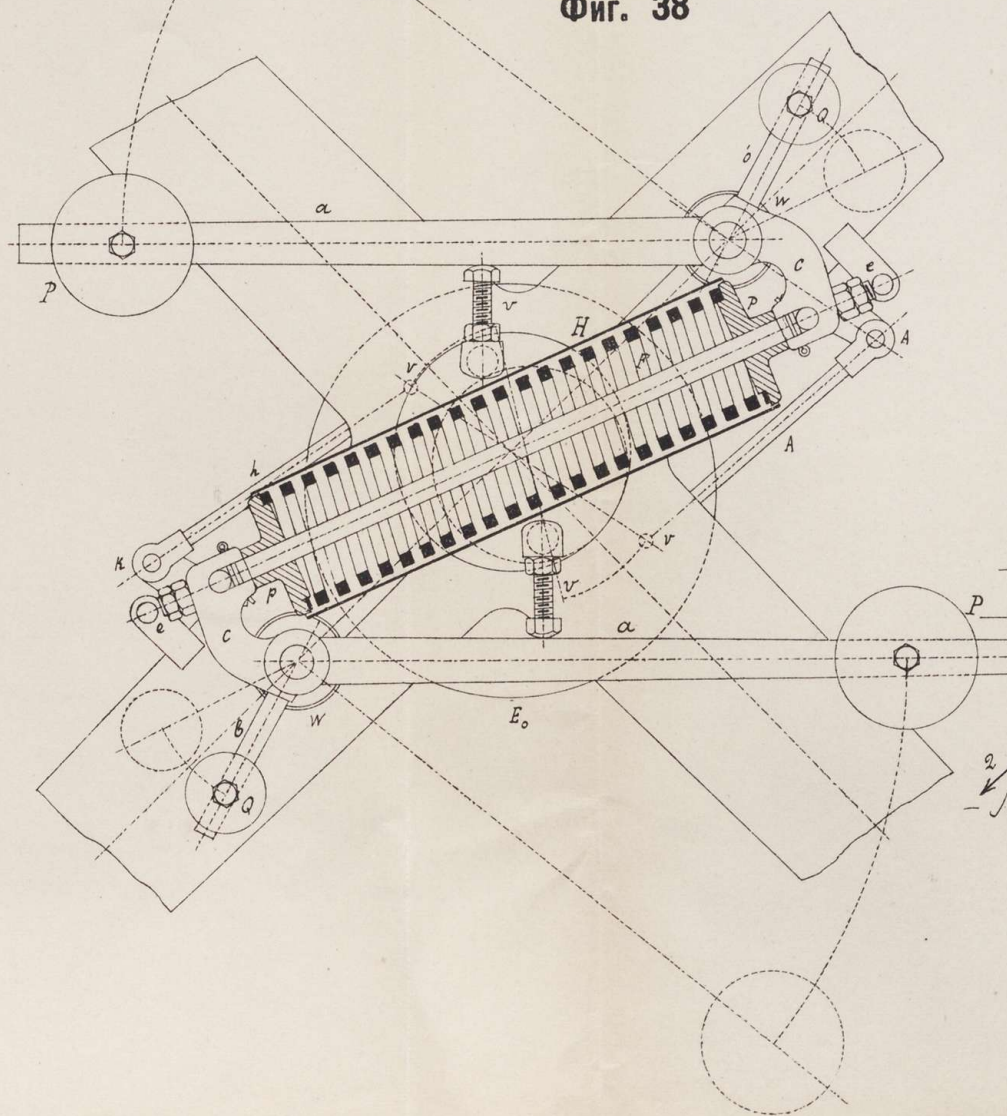
Фиг. 34



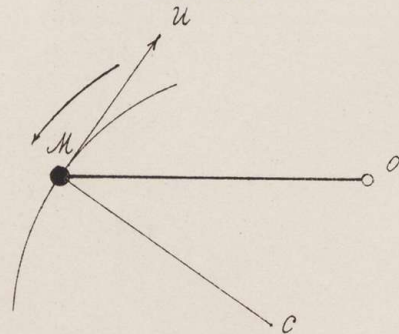
Фиг. 31



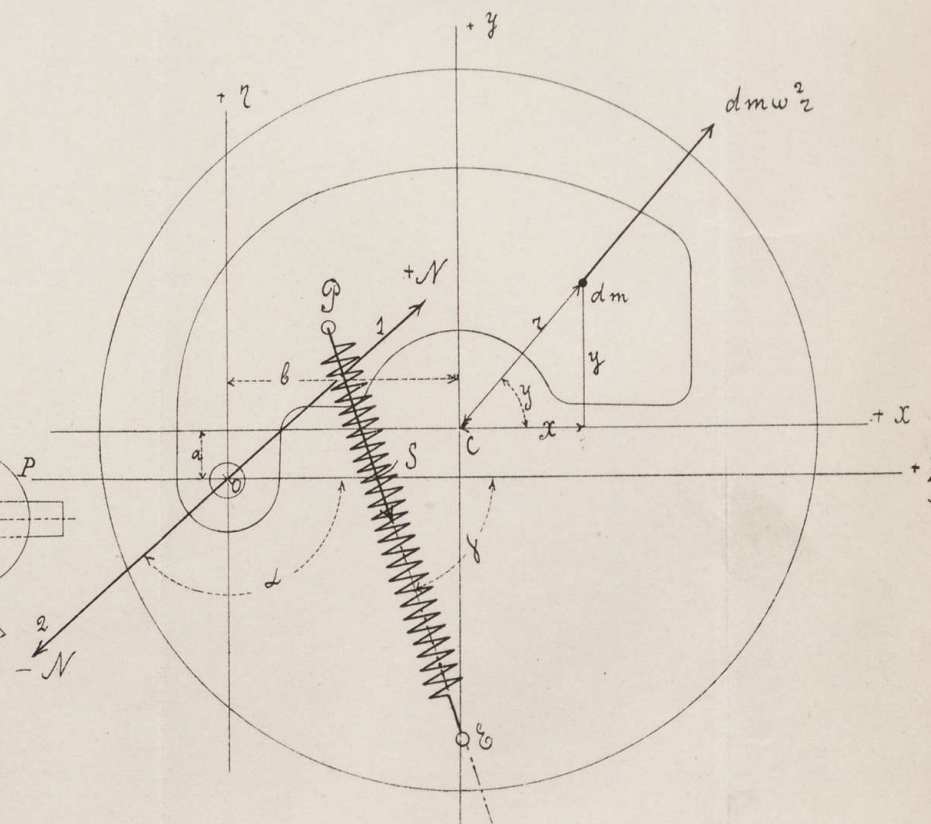
Фиг. 38



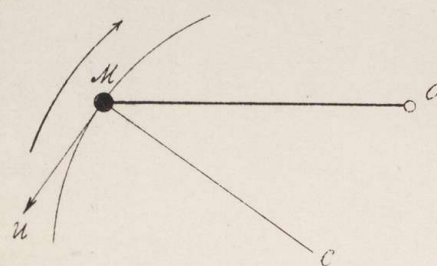
Фиг. 33



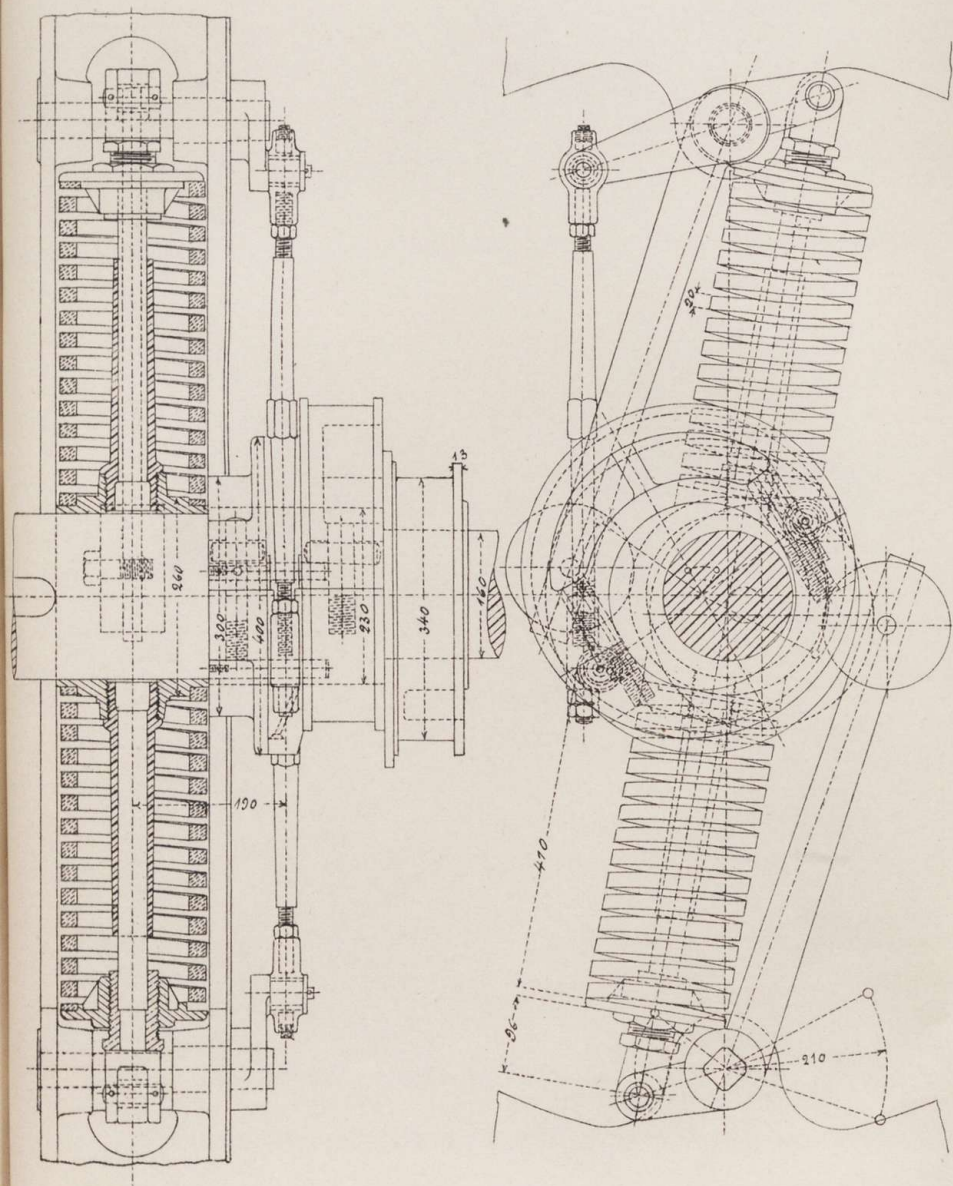
Фиг. 35



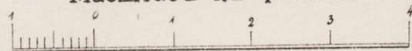
Фиг. 32



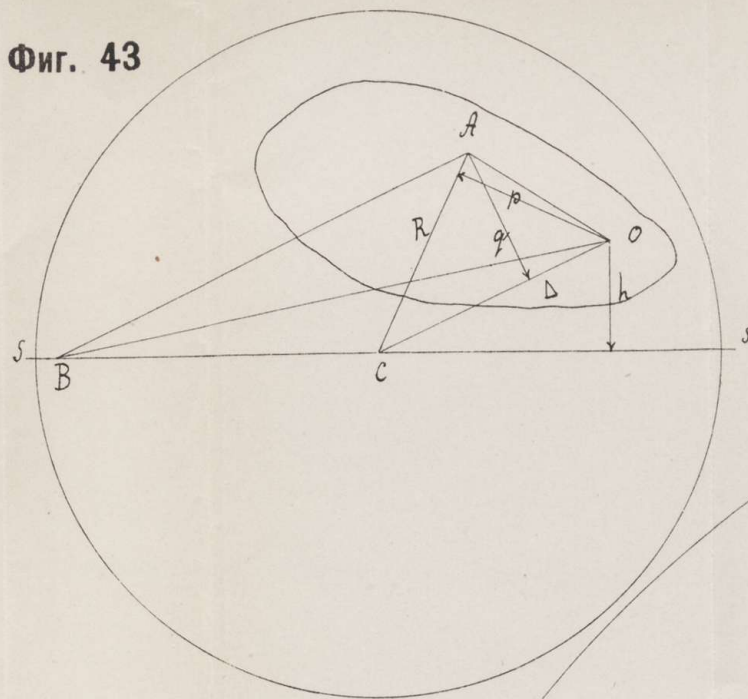
Фиг. 40



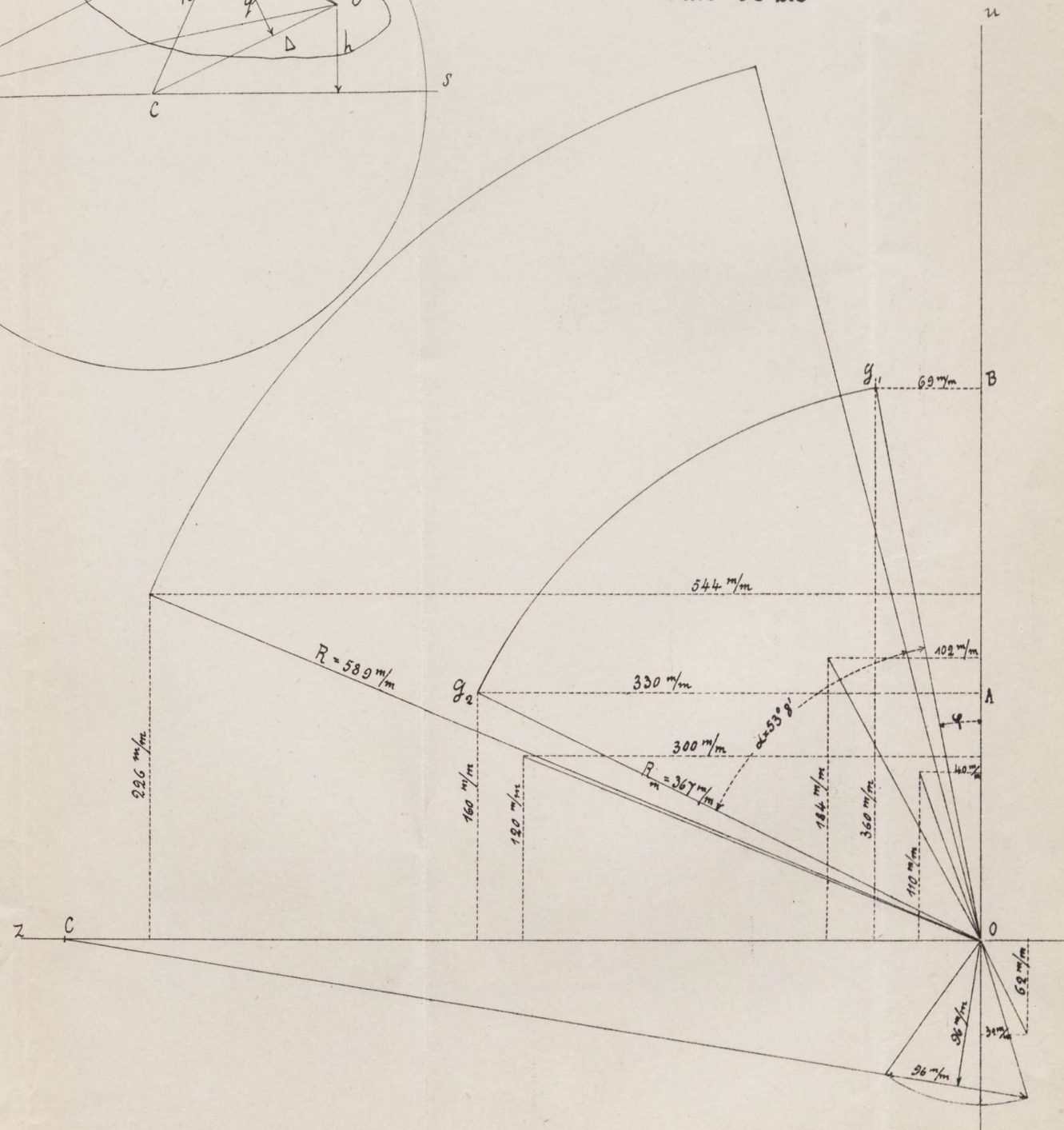
Масштабъ къ фиг. 40.



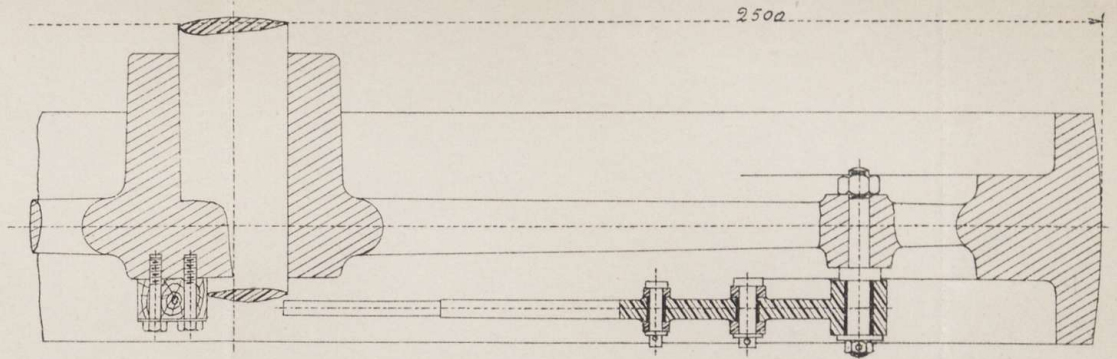
Фиг. 43



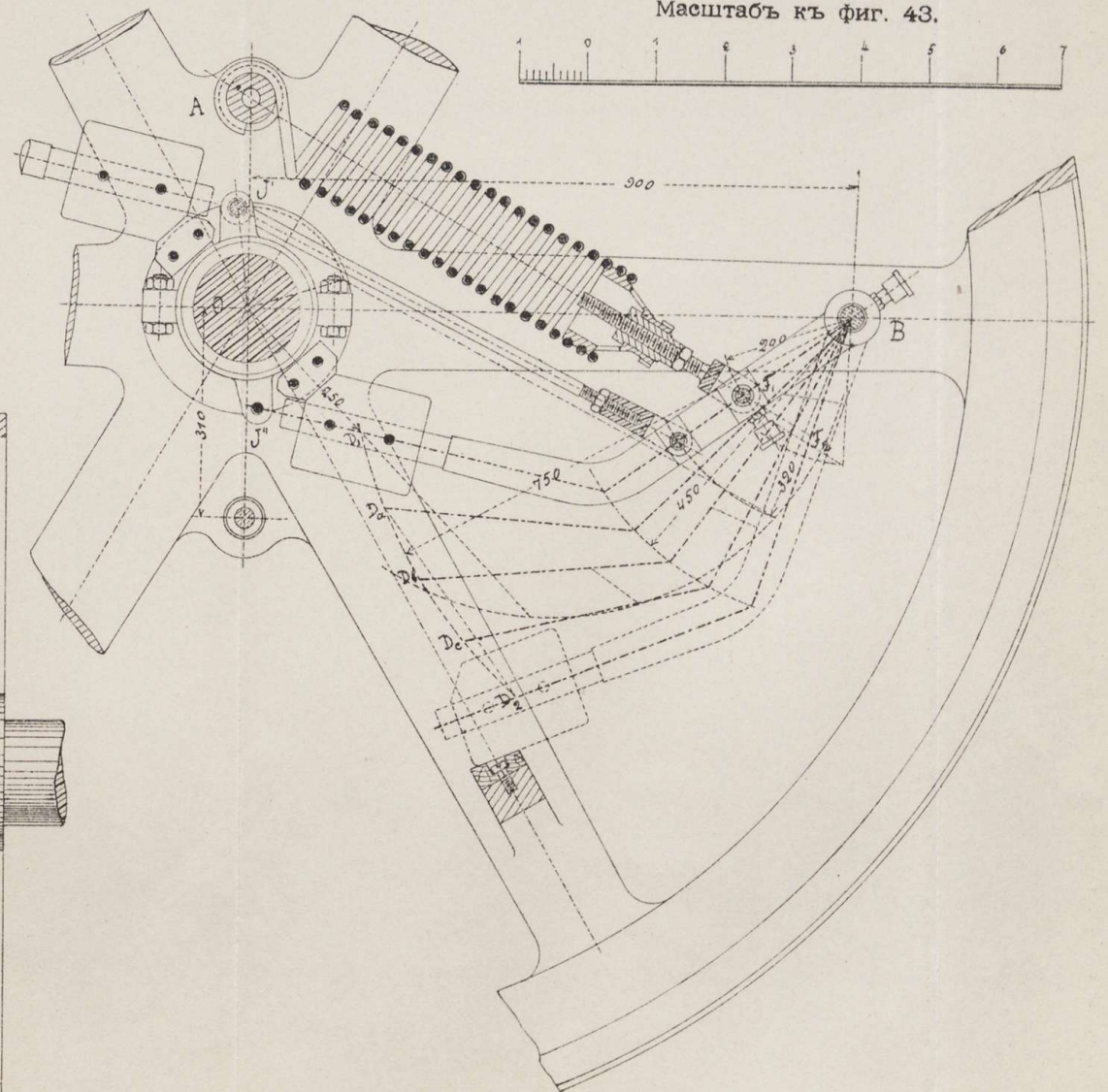
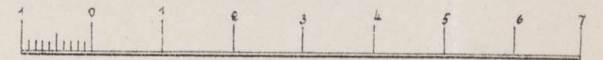
Фиг. 40 bis



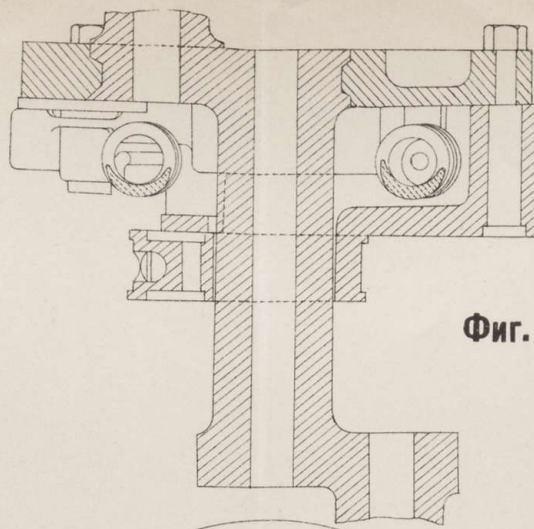
Фиг. 43



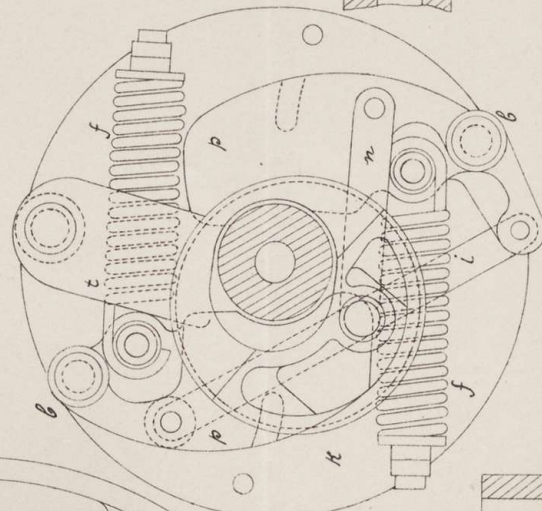
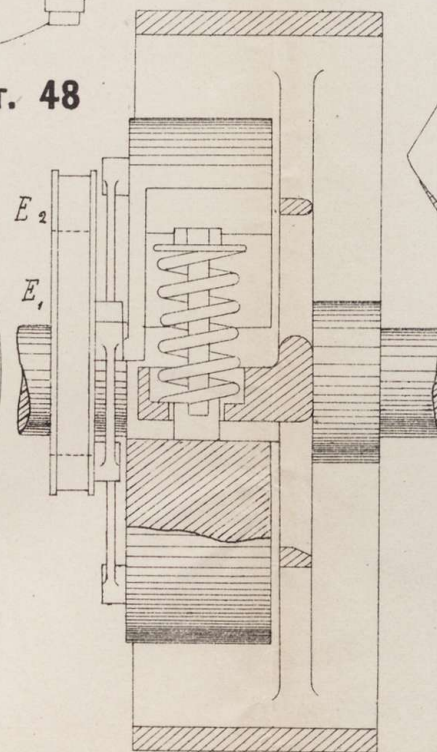
Масштабъ къ фиг. 43.



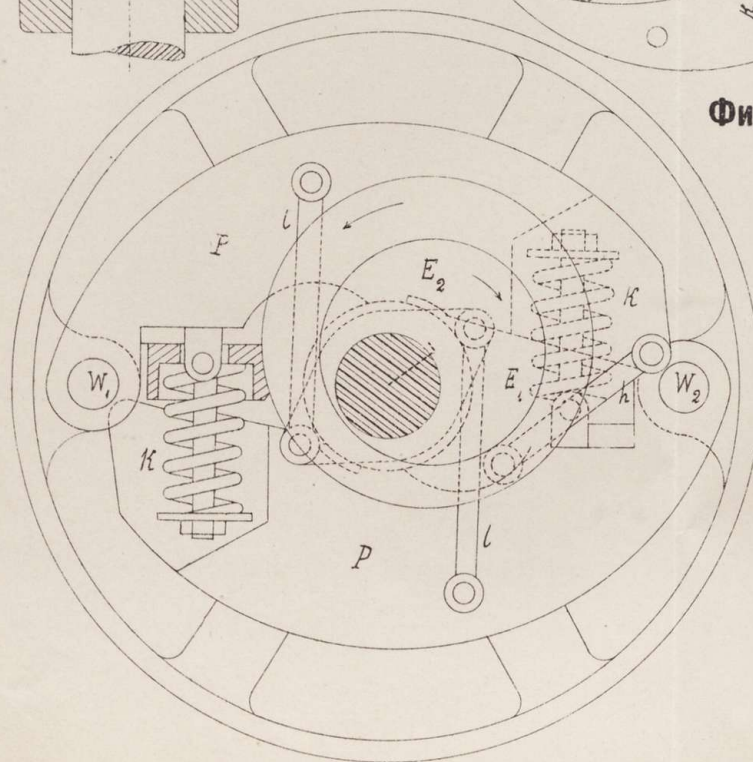
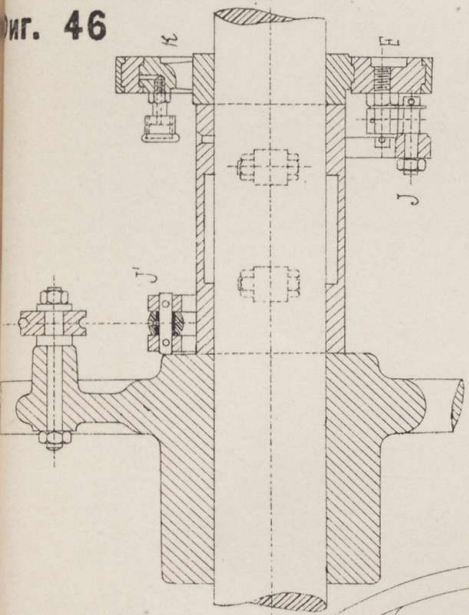
Фиг. 47



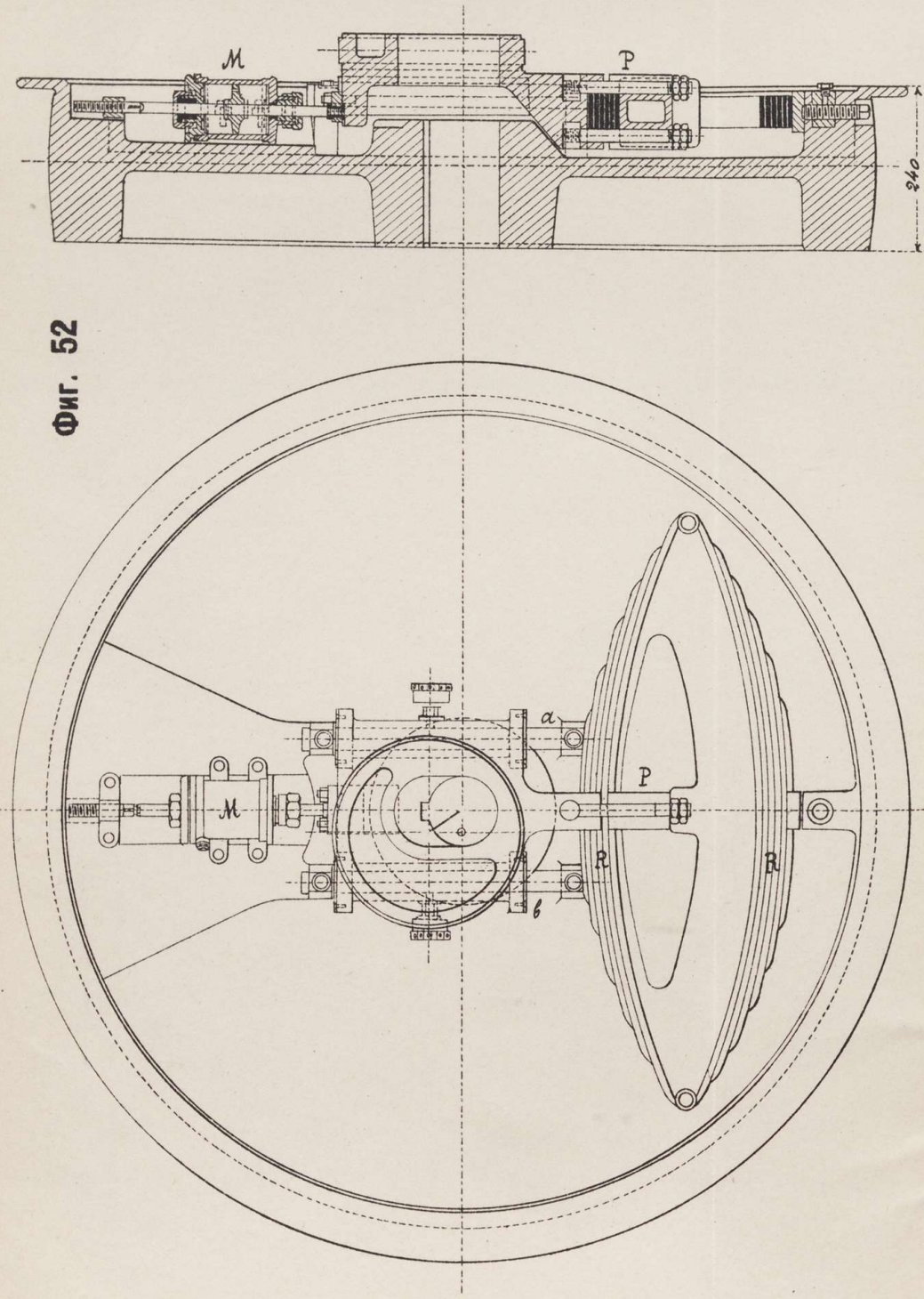
Фиг. 48



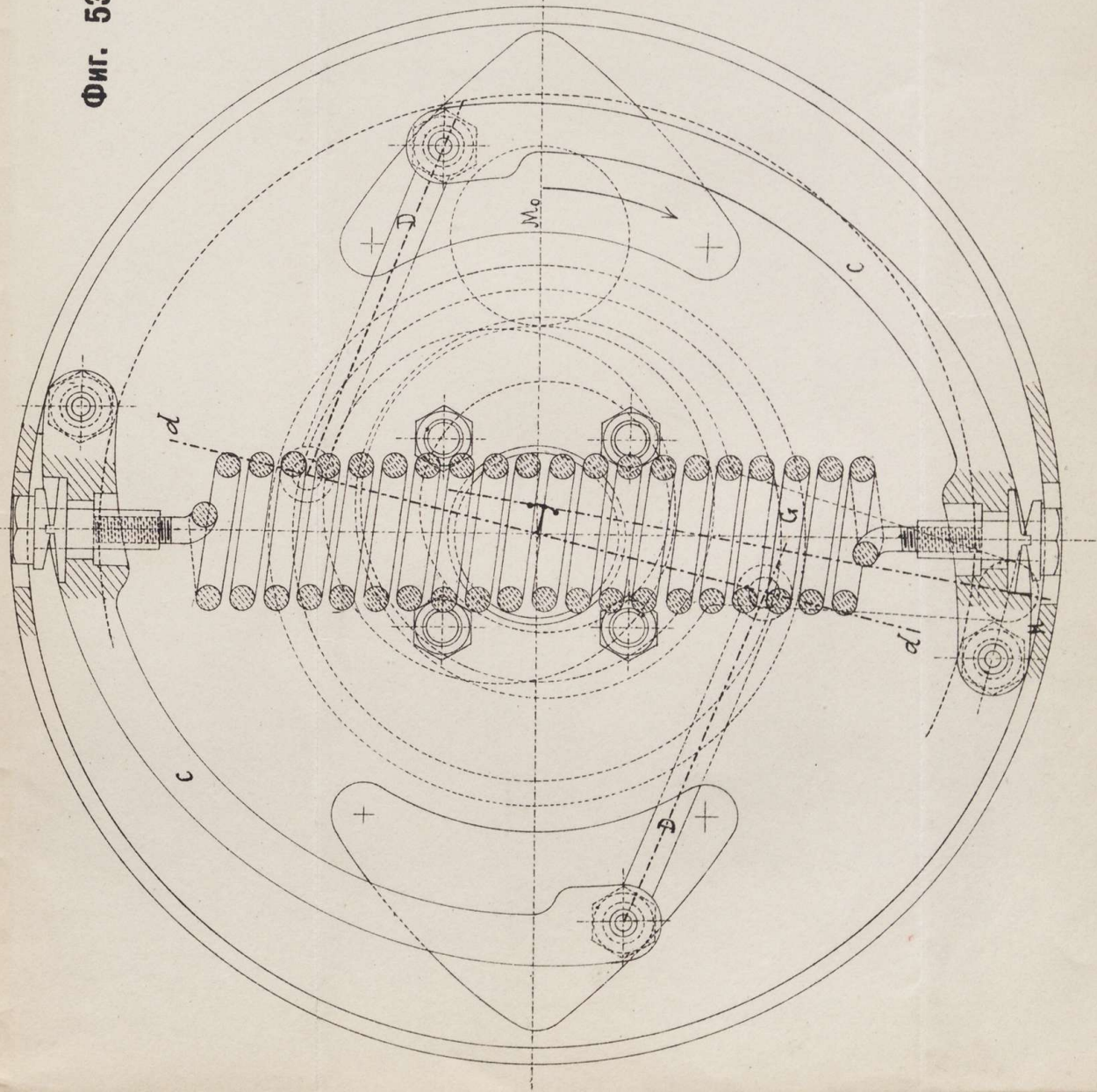
Фиг. 46



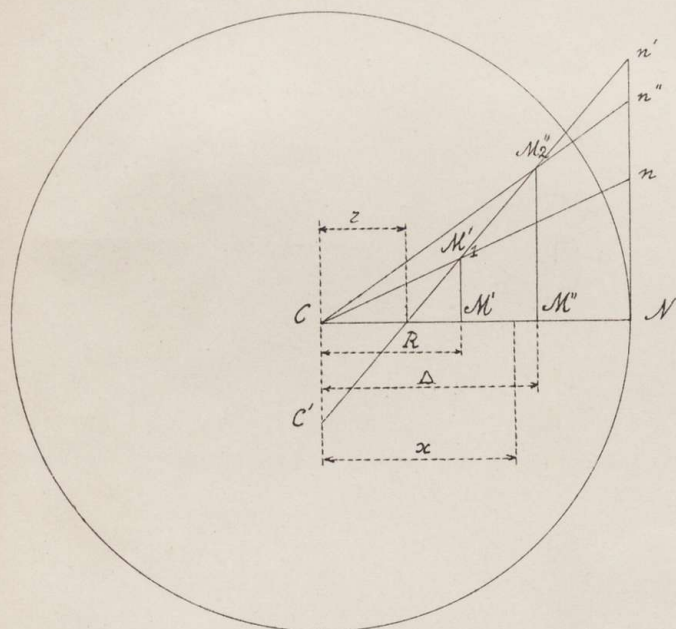
Фиг. 52



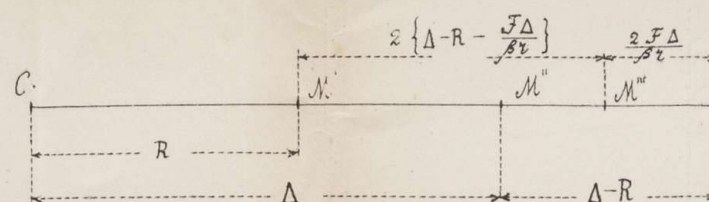
Фиг. 53



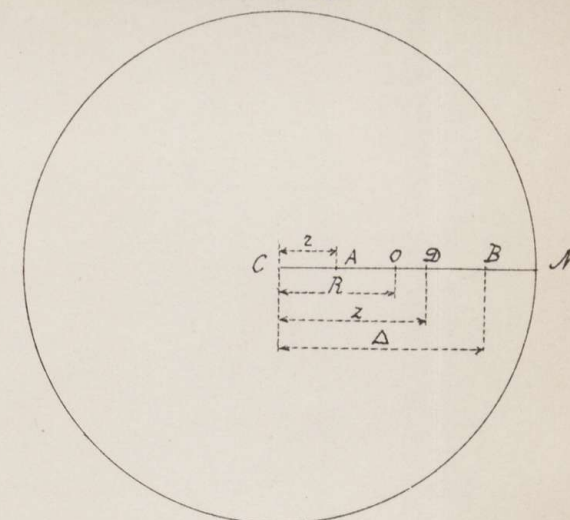
Фиг. 61



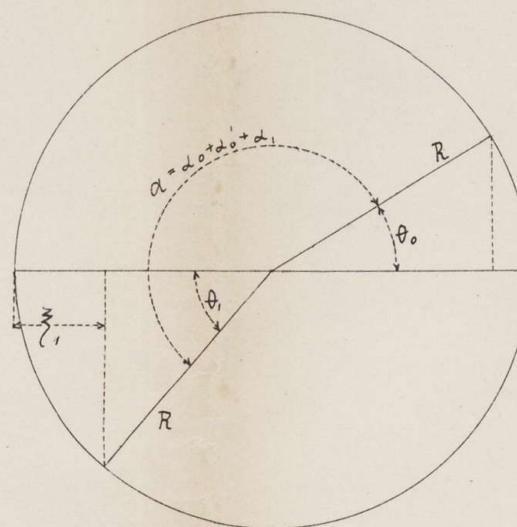
Фиг. 62



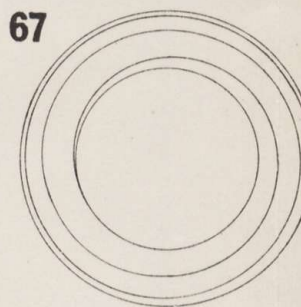
Фиг. 63



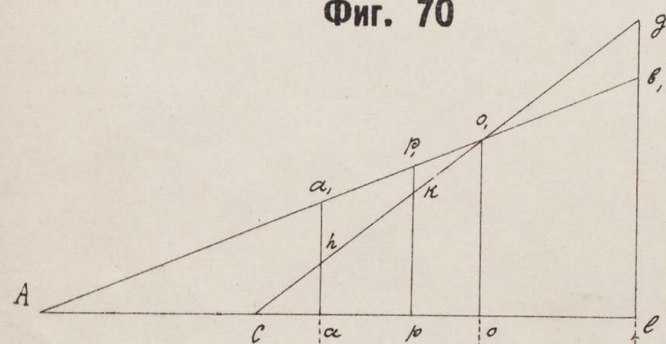
Фиг. 64



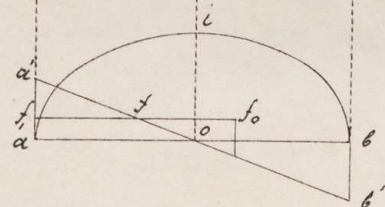
Фиг. 67



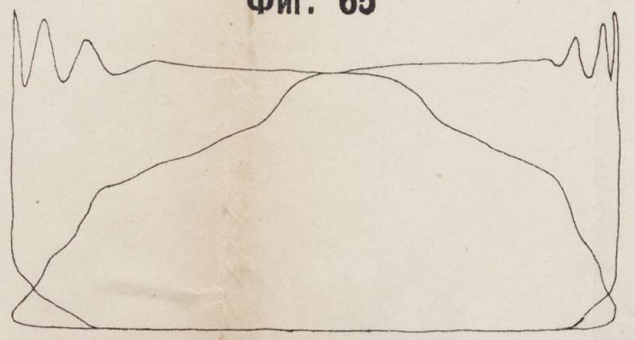
Фиг. 70



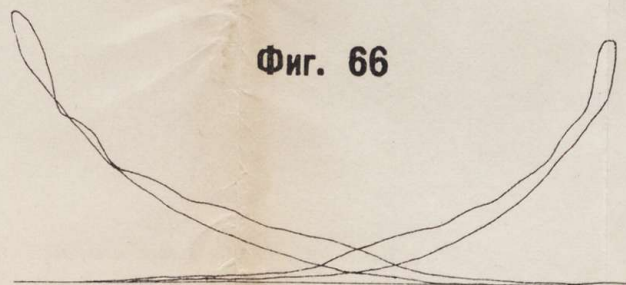
Фиг. 71



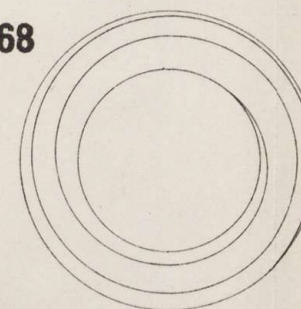
Фиг. 65



Фиг. 66



Фиг. 68



Фиг. 69

