

B.15



СТУДЕНЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА
И. И. С.

06
145

СБОРНИКЪ

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВЪ ПУТЕЙ СООБЩЕНІЯ

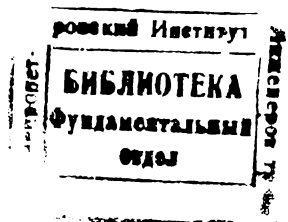
ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I.

ВЫПУСКЪ XV.

ТРУДЫ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И МАТЕРІАЛЫ ДЛЯ ИНСТИТУТСКИХЪ КУРСОВЪ.

Съ атласомъ изъ 14. листовъ чертежей.

ТЕКСТЪ.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія инженера Ю. Н. Фрихъ, Большая Садовая, № 9.

1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

СОДЕРЖАНИЕ.

	СТР.
1. Экстраорд. професс. А. Д. Романовъ. О механическихъ средствахъ для тяги по рельсовымъ путямъ (съ 2 лист. чертеж.).	1— 25
2. Репетиторъ Ѳ. Г. Зброжекъ. Осушеніе и орошеніе земель (съ 3 лист. чертежей)	1— 74
3. Репетиторъ А. А. Брандтъ. Гребной винтъ Торникрофта для мелкосидящихъ пароходовъ (съ 2 лист. чертеж.)	1— 13
4. Репетиторы А. А. Брандтъ и М. А. Ляхницкій. О зависимости сопротивленія и удлиненія листового лятаго желѣза отъ толщины и обработки листовъ (съ 4 лист. чертеж.) . . .	1— 24
5. Репетиторъ Л. В. Ландцертъ. Курсъ практической механики. Передаточные механизмы. Отдѣлъ II. Передаточные механизмы съ непосредственнымъ соприкосновеніемъ (съ 50 рис. въ текстѣ)	59—132
6. Экстраорд. профессоръ Ф. Е. Максименко. Курсъ гидравлики. Выпускъ второй (съ 3 лист. чертеж.).	129—167



О МЕХАНИЧЕСКИХЪ СРЕДСТВАХЪ
ДЛЯ
ТЯГИ ПО РЕЛЬСОВЫМЪ ПУТЯМЪ.

Читано въ Институтѣ Инженеровъ и. с. Императора Александра I 30 ноября 1887 года

А. Д. Ржановымъ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Б. Садовая, № 9.
1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

О МЕХАНИЧЕСКИХЪ СРЕДСТВАХЪ

ДЛЯ

ТЯГИ ПО РЕЛЬСОВЫМЪ ПУТЯМЪ.

Содержаніе.—Различіе между желѣзными дорогами и трамами.—Паровозы прежде и теперь.—Попытки усовершенствовать паровозы: парораспределительные механизмы, паровая рубашка, послѣдовательная работа пара въ нѣсколькихъ цилиндрахъ.—Вліяніе успѣха въ усовершенствованіи морскихъ машинъ на вопросъ объ усовершенствованіи паровозовъ.—Примѣненіе системы компаундъ къ паровозамъ, сдѣланное г. *Mallet*.—Опыты г. Бородина и г. Сандифорда.—Кирпичные своды и стѣнки въ паровозныхъ топкахъ.—Особенности американскихъ паровозовъ.—Топка г. *Wootten*'а.—Паровозъ г. *Strong*'а.—Приспособленія, сдѣланныя инженерами *Ricour* и *Desdouts* въ французскомъ подвижномъ составѣ для уменьшенія сопротивленія поѣздовъ движенію.—Желѣзные дороги съ крутыми подъемами—системы *Fell*'а, *Riggenbach*'а, *Alt*'а и *Agnolo*.—Канатные трамы.—Паровозы для трамвѣвъ, съ конденсаторами.—Локомотивы, работающіе сжатымъ воздухомъ.—Заключенія комисіи, произведшей сравнительную оцѣнку двигателей для трамвѣвъ на международномъ конкурсѣ во время Антверпенской выставки 1885 года.—Электрическіе вагоны съ аккумуляторами.—Паровозы безъ топки—системы *Francq*'а и *Hopmann*'а.

Милостивые государи!

Имѣя въ виду представить Вамъ очеркъ механическихъ средствъ для тяги по рельсовымъ путямъ и того, что сдѣлано замѣчательнаго въ этой области техники за послѣдніе годы, я оставлю совершенно въ сторонѣ поднятыя надъ землей и укрѣпленныя на столбахъ дороги, какова, напр., однорельсовая желѣзная дорога Лартита (*Lartigue*), устроенная въ Алжирѣ; сюда-же могутъ быть отнесены воздушныя линіи проволочно-канатныхъ и электрическихъ (тельфэраджныхъ) дорогъ для перевозки сыпучихъ грузовъ (хлѣба, руды, каменнаго угля, глины и т. п.).

Я останавлиюсь на путяхъ, представляющихъ для повозокъ искусственную колею въ видѣ двухъ параллельныхъ линій рельсовъ, уложенныхъ на подготовленной надлежащимъ образомъ земной поверхности.

Относительно этихъ путей можно замѣтить, что такъ называемая

желѣзныя дороги, вообще говоря, на полостѣ земли, занятой ими, исключаютъ уже возможность передвиженія обыкновенныхъ повозокъ, кромѣ извѣстныхъ мѣстъ—особо для того устраиваемыхъ переѣздовъ. Другого рода рельсовые пути, называемые трамами (голанд. *tram*, англ. *tramway*, нѣм. *Trambahn*), такой помѣхи обыкновеннымъ повозкамъ не представляютъ, и укладываются даже на городскихъ улицахъ въ уровень съ мостовой.

Кромѣ того трамы представляютъ и другія особенности: прибѣгая къ машинному движителю вмѣсто конской тяги, необходимо имѣть въ виду, чтобы не пугались лошади и чтобы вообще не было опасности и неудобствъ для жителей; наружу не должно вылетать ни искръ, ни зола, ни дымъ; движеніе должно производиться съ небольшою скоростью (не болѣе 10—12 километровъ въ часъ) и по возможности безъ шума.

Дороги эти стали распространяться лишь съ конца 50-хъ годовъ, сначала въ Англіи и Сѣверо-Американскихъ штатахъ, а затѣмъ и въ другихъ государствахъ, особенно въ Италіи и Голандіи.

На трамахъ тяга производится теперь очень разнообразными движителями и въ значительныхъ еще размѣрахъ лошадьми.

Не то представляютъ собственно желѣзныя дороги—тутъ для тяги поѣздовъ уже нѣтъ животныхъ, и движеніе производится паровозами.

Въ настоящее время на земномъ шарѣ имѣется всего около 500.000 километровъ желѣзныхъ дорогъ, съ числомъ паровозовъ болѣе 100.000.

Само собою разумѣется, что эти паровозы не одинаковы между собою—и не только въ разныхъ странахъ, гдѣ взгляды и привычки техниковъ, а также условія эксплуатаціи желѣзныхъ дорогъ могутъ быть очень различны, но и на одной и той-же дорогѣ приходится имѣть разные паровозы: для пассажирскаго движенія требуются болѣе значительныя скорости, чѣмъ для товарнаго, а товары, для удешевленія провоза, стараются перевозить въ большихъ массахъ, такъ что товарные поѣзда представляютъ болѣе значительное сопротивленіе перемѣщенію, чѣмъ пассажирскіе. Эти требованія вліяютъ на размѣры частей паровозовъ: такъ, напр., чѣмъ скорость должна быть значительнѣе, при небольшой сравнительно силѣ тяги, тѣмъ движущія колеса паровоза должны быть больше.

Въ общихъ чертахъ однако современные паровозы представляютъ

очень много сходства не только между собою, но и съ прежними паровозами, строившимися 50 лѣтъ тому назадъ.

Здѣсь (черт. 1) Вы видите эскизъ паровоза „*Planet*“, построеннаго въ 1830 году Робертомъ Стефенсономъ. Паровозъ этотъ въ свое время считался образцовымъ, и строители въ теченіе нѣсколькихъ лѣтъ рабски копировали его, не рѣшаясь дѣлать отступленій по отношенію къ общему расположенію и подробностямъ.

Однако уже въ тридцатыхъ годахъ движеніе пассажировъ и грузовъ на Ливерпуль-манчестерской ж. дорогѣ достигло такихъ размѣровъ, что Робертъ Стефенсонъ сталъ строить болѣе сильные паровозы.

Паровозы для обыкновенныхъ жел. дорогъ	<i>Rocket</i>	<i>Planet</i>	<i>Atlas</i>	Паровозъ <i>express</i> системы <i>compound</i> съ двумя цилиндрами Worsdell 1885	Товарный восьми- колесный паровозъ Hessler 1877
	1829	1830	1832		
	Robert Stephenson				
Диаметръ цилиндровъ . . въ м.	0,203	0,279	0,304	0,456 и 0,664	0,500
Ходъ поршней "	0,418	0,406	0,406	0,610	0,650
Диаметръ движущихъ колесъ " "	1,436	1,524	1,524	2,134	1,200
Площадь рѣшетки . . . кв. м.	0,56	1,60	0,85	1,61	1,92
Поверхность нагрѣва топки " "	1,86	3,27	5,30	10,80	9,63
Поверхность нагрѣва трубокъ "	10,94	25,95	20,24	100,20	170,85
Полная поверхк. нагрѣва " "	12,80	29,22	25,54	111,00	181,48
Число жаровыхъ трубокъ . . .	25	94	68	201	212
Вѣсъ паровоза въ рабочемъ состояніи тон.	4,32	9,14	11,58	44,50	45,75
Вѣсъ тендера въ рабочемъ со- стояніи тон.	3,25	4,06	5,59	32,50	27,75
Число колесъ паровоза	4	4	6	8	8
Число движущихъ осей. . . .	1	1	2	2	4
Скорость поѣзда . кл. въ часъ	22	25	15,5	100	25
Давленіе пара въ котлѣ (дѣй- ствительное, т. е. за вычетомъ наружнаго) атм.	3,3	3,3	3,6	11,25	9

Къ числу ихъ относится *Atlas*, размѣры котораго приведены здѣсь въ таблицѣ—онъ могъ уже брать поѣзда въ 193 тонны, не считая собственнаго вѣса и вѣса тендера, между тѣмъ какъ Планета была въ состояніи возить поѣзда вѣсомъ только въ 77 тоннъ.

Съ тѣхъ поръ требованія какъ относительно силы тяги, такъ и скорости, все возрастали, и въ настоящее время паровозы, какъ напр., приведенный въ таблицѣ паровозъ Ворсдела (*Worsdell*), могутъ развивать болѣе 600 индикаторныхъ лошадей, между тѣмъ какъ Атласъ Стефенсона давалъ всего 60 лошадей.

Сравнивая паровозъ *Worsdell*'а для скорыхъ пассажирскихъ поѣздовъ и паровозъ Кеслера (*Kessler*) для тяжелыхъ товарныхъ — (замѣчу здѣсь, что этотъ послѣдній, представляющій одинъ изъ лучшихъ типовъ этого рода паровозовъ, былъ выработанъ заводомъ по указаніямъ покойнаго профессора нашего института Л. А. Еракова) — сравнивая эти паровозы съ паровозами 30-ыхъ годовъ, можно сказать, что у теперешнихъ паровозовъ значительно увеличены размѣры, вѣсъ, давленіе пара въ котлѣ и, вслѣдствіе этого, сила паровозовъ. Притомъ въ подробностяхъ устройства паровозовъ сдѣланы разными усовершенствованіями.

Благодаря этому теперешніе паровозы, при благопріятныхъ условіяхъ, въ состояніи расходовать около 1,5 килограмовъ каменнаго угля на паровую лошадь въ часъ—между тѣмъ какъ прежніе паровозы, еслибъ они отапливались также углемъ, а не коксомъ, сжигали бы вдвое и даже втрое больше.

Нельзя однако сказать, что мы достигли послѣдней степени совершенства паровоза, какъ паровой машины,—еслибъ онъ былъ вполне совершенной машиной, онъ долженъ былъ бы расходовать только 0,5 килограма угля на паровую лошадь въ часъ.

Получить отъ паровоза больше, чѣмъ онъ даетъ,—это очень сложная задача, и въ послѣднее время для этой цѣли дѣлали въ паровозахъ измѣненія, во-первыхъ, устраивая машину паровоза такъ, чтобы паръ давалъ какъ можно больше работы; во-вторыхъ, заставляя топливо стараться какъ можно лучше и доставлять какъ можно больше пару; въ-третьихъ, стараясь уменьшить сопротивленія, преодолеваемые паровозомъ при движеніи поѣзда.

Въ отношенія болѣе выгоднаго употребленія пара сперва пробовали достичь лучшаго, совершенствуя парораспределительные меха-

низмы,—опытъ однако показаль, что кулиса Стефенсона съ простымъ золотникомъ не менѣе другихъ механизмовъ выгодна относительно работы пара, и если мы теперь видимъ, у англійскихъ паровозовъ въ особенности, все болѣе и болѣе распространяющееся примѣненіе кулисы Джоя (*Joy*), то благодаря только тому, что она легче и состоитъ изъ меньшаго числа частей. Теперь пришли окончательно къ заключенію, что для паровозовъ слѣдуетъ отдавать предпочтеніе тѣмъ парораспредѣлительнымъ механизмамъ, которые проще.

Производя опыты надъ паровыми машинами, французскіе изслѣдователи Томъ (*Thomas*—1837) и Комбъ (*Combes*—1843) замѣтили, что во время расширенія пара, послѣ отсѣчки, происходитъ испареніе воды, всегда имѣющейся въ цилиндрахъ вмѣстѣ съ паромъ,—испареніе, конечно, на счетъ теплоты, получаемой отъ того, съ чѣмъ паръ соприкасается, т. е. отъ стѣнокъ цилиндровъ. Безъ теплоты извѣстѣ, какъ извѣстно изъ термодинамики, насыщенный паръ при расширеніи долженъ частью даже обращаться въ воду, конденсироваться. На основаніи своихъ опытовъ *Thomas* и *Combes* пришли къ заключенію, что выгодно окружать стѣнки цилиндровъ паровой оболочкой или рубашкой, а *Combes* совѣтывалъ еще помѣщать паровые цилиндры въ дымовой коробкѣ для того, чтобы стѣнки ихъ нагрѣвались горячими газами, проходящими въ дымовую трубу.

Обстоятельнымъ изученіемъ этого вопроса о взаимодѣйствіи между паромъ и стѣнками цилиндровъ мы обязаны Кларку (*Clark*)—на основаніи многочисленныхъ опытовъ прямо надъ паровозами онъ пришелъ къ заключеніямъ, которыя изложены въ его извѣстномъ трудѣ „*Railway Machinery*“, изданномъ въ началѣ 50-хъ годовъ, и къ этимъ заключеніямъ *Clark*'а по настоящее время прибавлено очень немного *).

Затѣмъ въ половинѣ 50-хъ годовъ началъ свои опыты Гирнъ (*Hirn*) для выясненія пользы паровыхъ рубашекъ и употребленія перегрѣтаго пара.

На основаніи опытовъ и теоретическихъ соображеній можно прійти къ выводу, что паровыя рубашки со свѣжимъ паромъ тѣмъ

*) См. также статью *Clark*'а: On the behaviour of steam in the cylinders of locomotives during expansion (*Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1883, vol. LXXII, p. 275).

болѣе приносятъ выгоды, чѣмъ степень расширенія больше, и наоборотъ, еслибъ паръ работалъ въ цилиндрахъ вовсе безъ расширенія, то паровая рубашка не только не принесла бы пользы, но вызвала бы лишній расходъ теплоты. Паръ для рубашекъ слѣдуетъ употреблять свѣжій, а не отработавшій, и еще лучше пускать въ рубашки цилиндровъ паръ не изъ котла, а какъ это сдѣлалъ недавно итальянскій инженеръ Гуцци (*Guzzi*), изъ особаго прибора съ водой, помѣщеннаго у топки котла и дающаго, подобно системѣ Перкинса (*Perkins*), паръ высокаго давленія; г. *Guzzi* получилъ значительную экономію въ топливѣ, пуская въ рубашки сильно нагрѣтый паръ, — расходъ пара на индикаторную лошадь былъ 8,73 килограмма въ часъ, между тѣмъ какъ при употребленіи пара изъ котла расходъ составлялъ 10,55 килограмма. Заслуживаетъ вниманія замѣчаніе г. *Guzzi*, что во избѣжаніе чрезмѣрныхъ давленій, представляемыхъ водянымъ паромъ, для рубашекъ цилиндровъ можно было бы употреблять другія жидкости, кипящія при болѣе высокихъ температурахъ, напр. ртуть или льняное масло *).

Что касается того, чтобы передъ впускомъ въ цилиндръ рабочій паръ предварительно подвергать перегрѣву, то опыты Лелутра (*Leloutre*) привели къ заключенію, что нагрѣвъ пара даже до 230°C очень мало приноситъ пользы въ этомъ отношеніи, и всегда значительная часть пара, вступающаго въ цилиндры, оказывается обратившейся въ воду, подъ вліяніемъ болѣе холодныхъ стѣнокъ цилиндровъ.

Если эта вода не успѣетъ во время расширенія обратиться въ паръ, то при выпускѣ она вслѣдствіе уменьшенія давленія испарится и при этомъ унесетъ съ собою значительное количество теплоты, отнявъ ее отъ горячихъ еще стѣнокъ цилиндра. Теплота эта будетъ потеряна, а цилиндръ охладится, и при впускѣ свѣжаго пара часть его будетъ обращаться въ воду, осаждаться.

Еслибъ мы вмѣсто выпуска пара въ атмосферу дали бы ему выходъ въ другой цилиндръ, то теплота, унесенная имъ, не пропала бы для работы машины; такое устройство было осуществлено въ машинахъ Вульфа (*Wolf*) съ двумя цилиндрами.

Въ 1854 году эту систему примѣняли къ морскимъ паровымъ

*) Engineer, 1887, October 14, p. 314.

машинамъ Джонъ Элдеръ (*John Elder*) въ *Glasgow* (на тогдѣшнемъ заводѣ *Randolph, Elder & Co*), употребивъ двѣ пары цилиндровъ, т. е. всего четыре цилиндра, поршни которыхъ дѣйствовали на два мотыля, поставленные подъ прямымъ угломъ; въ 1868 году сдѣлано было упрощеніе въ томъ отношеніи, что вмѣсто четырехъ цилиндровъ стали употреблять для морскихъ машинъ два цилиндра, одинъ большой, другой малый, съ мотылями подъ прямымъ угломъ; паръ изъ котла впускается въ малый цилиндръ, на извѣстной части хода отсѣкается, а когда поршень достигнетъ середины хода, паръ выпускается черезъ промежуточный резервуаръ (*receiver*) въ большой цилиндръ, и, уже послѣ работы тамъ, ему дается выходъ вонъ, въ холодильникъ. Въ отличіе отъ системы Вульфа эта система называется компаундъ (*compound*), и введеніе ея на морскихъ пароходахъ дало значительную экономію въ топливѣ—около 25%. Эта экономія еще увеличилась, когда стали употреблять котлы съ болѣе высокимъ давленіемъ пара: въ концѣ 70-хъ годовъ давленіе въ морскихъ котлахъ довели до 6 слишкомъ атмосферъ, и расходъ угля на морскихъ пароходахъ понизился до 0,8 килограмма на индикаторную лошадь въ часъ вмѣсто 1,35 килограмма, какъ то было въ шестидесятыхъ годахъ.

Въ 1874 г. Керкъ (*Alexander Kirk*) въ *Glasgow* (заводъ *Napier & Sons*) пошелъ еще дальше, устроивъ машину съ троекратнымъ расширеніемъ (*triple expansion engine*), т. е. съ послѣдовательнымъ расширеніемъ не въ двухъ, а въ трехъ цилиндрахъ; при давленіи рабочаго пара въ 11 атмосферъ, такія машины представляютъ иногда сравнительно съ компаундъ экономію около 20%, такъ что расходъ угля понижается до 0,65 килограмма на индикаторную лошадь въ часъ. А заводъ *Denny & Co* въ *Dumbarton*’ѣ идетъ еще далѣе и строитъ машины съ четырехкратнымъ расширеніемъ, при давленіи пара 11,5—12,5 атмосферъ. Чтобы судить, насколько приблизились теперь морскія машины къ совершенству, замѣчу, что благодаря употребленію холодильниковъ совершенная машина потребовала-бы здѣсь 0,24 килограмма угля на индикаторную лошадь въ часъ.

Успѣхъ, достигнутый примѣненіемъ послѣдовательной работы пара въ нѣсколькихъ цилиндрахъ на морскихъ пароходахъ, не остался безъ вліянія на вопросъ объ усовершенствованіи паровозовъ, и въ 1877 году г. Малѣ (*Mallet*) примѣнилъ систему *compound* къ нѣ-

сколькимъ паровозамъ, построеннымъ для желѣзной дороги *Bayonne-Biarritz* *).

Вслѣдствіе удовлетворительныхъ результатовъ, полученныхъ на этой дорогѣ отъ примѣненія системы *compound*, Юго-западные ж. дороги перестроили въ 1880 году одинъ изъ своихъ паровозовъ по планамъ г. *Mallet*, и въ то же время другой паровозъ былъ снабженъ цилиндрами съ паровыми рубашками.

Г. Бородинъ, главный инженеръ службы тяги и подвижнаго состава Юго-западныхъ ж. дорогъ, предпринялъ два ряда опытовъ для сравненія работы этихъ паровозовъ съ работой обыкновенныхъ паровозовъ: одинъ рядъ опытовъ былъ произведенъ въ мастерскихъ, гдѣ паровозы работали какъ постоянныя машины, другой — при работѣ паровозовъ въ поѣздахъ.

Въ запискѣ о результатахъ этихъ опытовъ, читанной 17 августа прошлаго (1886) года въ *Institution of Mechanical Engineers* въ Лондонѣ, г. Бородинъ приходитъ къ слѣдующимъ заключеніямъ относительно того, какъ велика выгода, доставляемая паровыми рубашками и системою компаундъ:

— 1) Паровыя рубашки на обыкновенномъ паровозѣ, работавшемъ на первомъ и второмъ зубѣ (т. е. при отсѣчкѣ пара около 20 и 30%) въ мастерскихъ, какъ постоянная машина, дали экономію въ расходѣ пара 16—12%; при опытныхъ же поѣздахъ отъ рубашекъ вообще не получалось удовлетворительныхъ результатовъ, за исключеніемъ того случая, когда паровозъ работалъ на первомъ зубѣ; но этотъ результатъ слѣдуетъ приписать отчасти потерѣ пара на нагреваніе стѣнокъ рубашекъ всякій разъ, какъ открывался регуляторъ, и въ особенности несовершенному удаленію воды изъ рубашекъ.

— 2) Примѣненіе системы *compound* дало несомнѣнно экономію въ парѣ и въ топливѣ; величина этой экономіи замѣтно измѣняется съ условіями, при которыхъ приходится машинѣ работать, и при обыкновенныхъ обстоятельствахъ можетъ быть принимаема отъ 15 до 20%.

— При опытахъ съ паровозомъ *compound* вѣсовая единица дровъ

*) Mémoires et compte-rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils, Paris, 1877, p. 852.

Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, Tome XII, 1885, p. 237.

давала больше пару, но это нельзя съ увѣренностью приписать системѣ *compound*: это могло произойти отъ особенностей котла и кочегара, а также отъ недостаточной точности въ учетѣ расхода дровъ. Тѣмъ не менѣе, въ виду того что паровозъ *compound* для данной работы потребляетъ меньше топлива, онъ будетъ требовать и меньшей тяги воздуха и будетъ рѣже нуждаться въ невыгодномъ подтягиваніи конуса; а потому въ котлѣ машины *compound* можно извлекать болѣе пользы изъ топлива.

— Далѣе, меньшій расходъ пара позволяетъ паровозу *compound* брать болѣе тяжелые поѣзда, если только имѣется избытокъ какъ силы тяги, такъ и сцѣпленія. Это одна изъ важныхъ выгодъ системы *compound*, и ея не слѣдуетъ упускать изъ виду при оцѣнкѣ системы.

— Принимая во вниманіе, что паровозъ *compound*, съ которымъ производились опыты, едва-ли представляетъ какое-нибудь усложненіе сравнительно съ обыкновенными паровозами, и что постройка его стоитъ почти столько же, а между тѣмъ уменьшеніе расхода пара уменьшаетъ стоимость содержанія котла въ исправности, снабженіе его водой и пр., можно заключить, что безъ сомнѣнія выгодно строить паровозы по системѣ компаундъ *).

Таковы заключенія, къ которымъ пришелъ г. Бородинъ на основаніи своихъ опытовъ, произведенныхъ, по собственному его признанію, при условіяхъ, не вполне надлежащихъ, и въ отношеніи паровыхъ рубашекъ съ результатами этихъ опытовъ едва-ли можно согласиться. Что же касается системы *compound*, то выгода ея въ примѣненіи къ паровозамъ доказана въ настоящее время и другими пзслѣдователями.

Передъ обсужденіемъ записки г. Бородина въ томъ же лондонскомъ обществѣ инженеръ-механиковъ была прочитана еще другая записка, относящаяся къ тому же предмету,—г. Сандифорда, завѣдывающаго службой подвижнаго состава на Сѣверо-западной ж. д. рогахъ въ Индіи.

*) *Borodin*. Experiments on the Steam-jacketing and Compounding of locomotives in Russia (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, August 1886, p. 297).

На русскомъ языкѣ въ кievскомъ журналѣ «Инженеръ», 1886, №№ 7—12.

На этой дорогѣ топливо очень дорого—каменный уголь съ доставкой въ Лагорѣ обходится: англійскій около 28 рупій, а бенгальскій около 21,8, т. е. первый около 45, а второй около 35 копѣекъ за пудъ; дрова—8 рупій за тонну, или около 50 руб. кред. за куб. сажень. Въ виду такой дороговизны топлива г. *Sandiford* рѣшилъ попробовать, не будетъ ли экономія въ расходѣ топлива, если вмѣсто обыкновенныхъ паровозовъ обратиться къ системѣ *compound*. При этомъ онъ положилъ перестроить два шестиколесныхъ паровоза, но такъ, чтобы въ случаѣ неудачи опытовъ можно было легко вновь передѣлать ихъ въ обыкновенные. Перестройка касалась главнымъ образомъ цилиндровъ, и въ одномъ изъ паровозовъ, *Вампирѣ* (черт. 2), вмѣвшемъ два цилиндра діаметромъ 15", цилиндры эти были замѣнены другими: однимъ 18-ти дюймовымъ высокаго давленія и другимъ 24-хъ дюймовымъ низкаго давленія, причемъ ходъ поршней былъ оставленъ прежній въ 22" для обоихъ цилиндровъ. На случай остановки поршня малаго цилиндра въ мертвой точкѣ, когда онъ не можетъ уже служить для троганія паровоза съ мѣста, устроенъ особый кранъ С, и посредствомъ него можно впускать паръ прямо изъ котла въ золотниковую коробку большаго цилиндра. Благодаря этому паровозъ всегда трогался съ мѣста безъ малѣйшаго затрудненія. Машина эта, работая съ товарными и смѣшанными поѣздами при скоростяхъ отъ 27 до 33 километровъ въ часъ, легко брала валовой грузъ въ 500 тоннъ (включая и собственный ея вѣсъ) и расходовала на 13 $\frac{1}{2}$ % меньше топлива, чѣмъ обыкновенные такіе же паровозы съ двумя цилиндрами 16-ти дюймаго діаметра и съ ходомъ поршней въ 24", при тѣхъ же почти условіяхъ относительно груза и скорости.

Другая машина, *Вулканъ* (черт. 3), при перестройкѣ въ *compound*, замѣнивъ двухъ 16-ти дюймовыхъ цилиндровъ, получила 4 цилиндра, а именно два наружныхъ съ высокимъ давленіемъ діаметромъ 11 $\frac{3}{4}$ " и два 17" внутреннихъ съ низкимъ давленіемъ; ходъ поршней оставленъ былъ для всѣхъ четырехъ цилиндровъ прежній, 24". Мотыли наружныхъ цилиндровъ расположены прямо противоположно кривошипамъ сосѣднихъ внутреннихъ цилиндровъ, а между собою подъ прямымъ угломъ, такъ что машина во всякомъ положеніи легко трогается съ мѣста. Этотъ паровозъ далъ также около 13 $\frac{1}{2}$ % экономіи въ топливѣ, хотя при тѣхъ же скоростяхъ возилъ

болѣе тяжелые поѣзда (отъ 500 до 550 тоннъ, включая собственный вѣсъ).

Въ этой машинѣ паръ изъ малаго цилиндра сперва отводился прямо въ золотниковую коробку сосѣдняго большаго черезъ прямую короткую трубу, но потомъ попробовали его пускать по изогнутымъ длиннымъ трубамъ, расположеннымъ въ дымовой коробкѣ, не въ сосѣдній, а въ противоположный большой цилиндръ—это было значительное улучшение, такъ какъ паръ, нагрѣваясь горячими газами, выпускаемыми въ дымовую трубу, приходилъ въ цилиндръ низкаго давления болѣе сухимъ, и въ золотниковыхъ коробкахъ этихъ цилиндровъ давление было болѣе постояннымъ *).

Относительно числа цилиндровъ можно замѣтить, что если не требуется особеннаго увеличенія силы тяги, то слѣдуетъ отдать предпочтеніе паровозу *compound* съ двумя цилиндрами, какъ то дѣлають г. *Mallet* во Франціи, г. *Borries* (Боррисъ) въ Германіи и г. *Worsdell* въ Англіи—паровозы эти гораздо проще, чѣмъ трехцилиндровые паровозы г. Вэбба (*Webb*), гдѣ паръ высокаго давления вступаетъ сперва въ два малые цилиндра, а оттуда уже переходитъ въ большой, дѣйствующій на особую ось. Ось эту г. *Webb* не связывалъ съ другой движущей осью и такимъ образомъ избавлялся отъ спаривающихъ шатуновъ, значительно увеличивающихъ сопротивленіе паровоза движенію,—это однако представляетъ большія неудобства при троганіи съ мѣста, когда ось большаго цилиндра не сразу приходитъ во вращеніе вмѣстѣ съ другими осями, а колеса ея только скользятъ по рельсамъ. Въ послѣднее время г. *Webb* перешелъ къ связыванію всѣхъ движущихъ осей между собою, и такимъ образомъ система его потеряла въ значительной степени свой смыслъ.

Для дорогъ съ крутыми кривыми г. *Mallet* предложилъ типъ паровоза съ четырьмя цилиндрами и съ троекратнымъ, а не двукратнымъ расширеніемъ пара, причемъ два большихъ цилиндра располагаются на особой рамѣ, отдѣльно отъ двухъ малыхъ. Паръ изъ котла, укрѣпленнаго наглухо къ рамѣ малыхъ цилиндровъ, поступаетъ сперва въ одинъ изъ нихъ, затѣмъ уже въ другой, и

*) *Sandiford*. On the working of compound locomotives in India (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, August, 1886, p. 355).

наконецъ оттуда по трубѣ, укрѣпленной шарнирно въ трубѣ второй рамы, поступаетъ въ два большихъ цилиндра. Такимъ образомъ достигается способность паровоза легко проходить по кривымъ малого радіуса, и получается вмѣстѣ съ значительной силой тяги очень выгодная работа пара. Здѣсь усложненіе машины находитъ полное свое оправданіе *).

Переходя къ тому, что сдѣлано въ послѣднее время относительно улучшенія самого процесса горѣнія топлива въ паровозныхъ котлахъ, я позволю себѣ обратить Ваше вниманіе на то, что въ топкахъ англійскихъ паровозовъ издавна вошло въ обычай устраивать сводъ пзъ огнеупорнаго кирпича и козырекъ изъ желѣза (черт. 4): такимъ устройствомъ достигается во первыхъ лучшее перемѣшиваніе газовъ въ топкѣ и слѣдовательно болѣе полное сжиганіе топлива; во вторыхъ, холодный воздухъ не имѣетъ возможности вредно дѣйствовать на заднюю трубочную доску и на концы жаровыхъ трубокъ, дающихъ у насъ очень часто течь въ зимнее время; въ-третьихъ, въ топкѣ имѣется масса кирпича, дурно проводящаго теплоту и служащаго благодаря этому аккумуляторомъ теплоты и регуляторомъ температуры въ топкѣ.

Это значеніе кирпичнаго свода вполне оцѣнено г. Уркгардтомъ, начальникомъ службы подвижнаго состава и тяги Грязе-парицкой ж. дороги: въ паровозахъ своей дороги при переходѣ отъ угольнаго отопленія къ нефтяному онъ устроилъ кирпичныя стѣнки, которыя во первыхъ нагреваютъ предварительно воздухъ, притекающій въ топку и проходящій мимо этихъ стѣнокъ и черезъ отверстія, въ нихъ сдѣланныя; во вторыхъ, онѣ предохраняютъ листы топки отъ разрушающаго вліянія того чрезвычайнаго жара, какой развивается при горѣніи выпрыскиваемой нефти **).

Въ американскихъ паровозахъ кирпичи въ топкѣ кладутся не такъ, какъ въ англійскихъ: они не опираются на боковыя стѣнки топки и поддерживаются кипятельными трубками, идущими отъ неба топки къ трубочной доскѣ (черт. 5); дѣлая разныя улучшенія въ

*) Le Génie Civil, T. X, № 8, 25 Décembre 1886, p. 123.

**) Журналъ Министерства Путей Сообщенія „Инженеръ“, 1883, іюнь, стр. 441 (послѣдствіи кирпичная кладка въ топкѣ подвергалась у г. Уркгарда различнымъ измѣненіямъ).

паровозахъ французскихъ казенныхъ ж. дорогъ, г. Рикуръ (*Ricour*), бывшій года два тому назадъ главнымъ инженеромъ службы подвижнаго состава этихъ дорогъ, примѣнилъ и къ французскимъ паровозамъ кирпичную кладку въ топкахъ съ поддерживающими ее трубками, по примѣру американскихъ паровозовъ.

Замѣчу здѣсь, что американскіе паровозы представляютъ во многихъ отношеніяхъ отличіе отъ европейскихъ. Тамъ болѣе однообразія въ типахъ паровозовъ и въ ихъ частяхъ, что въ значительной степени облегчаетъ и удешевляетъ ремонтъ паровозовъ. Затѣмъ, котлы и внутреннія огневые коробки ихъ строятся изъ мягкой стали (литого желѣза), между тѣмъ какъ въ Европѣ паровозные котлы строятъ еще часто изъ сварочнаго желѣза, а огневые коробки преимущественно изъ мѣди; попытки употреблять стальные огневые коробки въ Европѣ, вообще говоря, не увѣнчались успѣхомъ. Далѣе, вмѣсто толстыхъ желѣзныхъ или стальныхъ листовъ, изъ которыхъ вырѣзываются рамы европейскихъ паровозовъ, рамы американскихъ дѣлаются изъ желѣзныхъ брусьевъ, довольно толстыхъ, и представляютъ болѣе упругости, что необходимо, если паровозу приходится проходить по крутымъ кривымъ и по пути, укладка котораго далеко не хороша и очень страдаетъ отъ климатическихъ вліяній. Къ такимъ условіямъ американскіе паровозы оказываются удивительно приспособленными, и англійскія ж. дороги въ Канадѣ, находящіяся въ очень неблагоприятныхъ условіяхъ относительно верхняго строенія пути, приняли американскіе типы паровозовъ *).

Здѣсь (черт. 6, 7, 8) Вы видите три господствующіе типа такихъ паровозовъ:

1) *American*—съ двумя спаренными осями, для пассажирскихъ поѣздовъ; 2) *Mogul*—съ тремя спаренными осями, для легкихъ сравнительно товарныхъ поѣздовъ; 3) *Consolidation*—съ четырьмя спаренными осями, для тяжелыхъ товарныхъ поѣздовъ (последніе два типа служатъ иногда и для пассажирскихъ поѣздовъ, въ зимнее время).

У всѣхъ этихъ паровозовъ характеристической особенностью является то, что передняя часть паровоза опирается не на движущую ось, а на вольную, и эта ось или даже двѣ, соединенныя въ

*) *Brown*. On the construction of Canadian locomotives (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, May, 1887. p. 186).

одну телѣжку или, какъ ее называютъ, *bogie*, устроена вращающейся около вертикальной оси, что значительно облегчаетъ и дѣлаетъ безопаснымъ движеніе паровоза по кривымъ, даже при большихъ скоростяхъ (замѣчу, что въ Америкѣ скорость движенія доходитъ иногда до 130 километровъ въ часъ).

По поводу чертежа 8 позволю себѣ обратить Ваше вниманіе на длинную топку, устроенную для отопленія антрацитомъ; топка эта была видоизмѣнена г. Вуттенемъ (*Wootten*), для мелкаго антрацита такимъ образомъ, что рѣшетка приподнята выше колесъ и сдѣлана очень широкой, задняя трубчатая доска отодвинута впередъ, а гдѣ она была прежде, устроенъ кирпичный порогъ; такимъ образомъ огневая коробка подраздѣлена г. *Wootten*'омъ на двѣ части: одна— собственно топка, гдѣ на рѣшеткѣ помѣщается топливо, другая— такъ называемая сожигательная камера (*combustion chamber*) служить для лучшаго перемѣшиванія продуктовъ горѣнія съ цѣлью достигъ болѣе полного сожиганія топлива. Эти топки дали очень хорошіе результаты.

Чтобы покончить съ топками, позвольте представить Вамъ еще одинъ американскій паровозъ системы Стронга (*Strong*), построенный недавно для желѣзной дороги *Lehigh Valley* и снабженный по примѣру морскихъ котловъ двумя топками, сдѣланными изъ сморщенныхъ (волнистыхъ) стальныхъ трубъ (черт. 9); топки эти соединяются затѣмъ въ одну трубу— сожигательную камеру, отдѣленную порогомъ. Сморщенные трубы, безъ продольнаго заклепочнаго шва, введены въ употребленіе г. Фоксомъ (*Fox*), и отличаются очень значительнымъ сопротивленіемъ внѣшнему давленію сравнительно съ трубами изъ гладкихъ листовъ. Благодаря такому свойству сморщенныхъ трубъ въ паровозѣ г. *Strong*'а не было надобности прибѣгать къ связямъ между внутренней огневой коробкой и наружными стѣнками котла, и внутреннія огневые коробки имѣютъ возможность свободно расширяться и укорачиваться, независимо отъ наружныхъ стѣнокъ котла. Не мѣшаетъ однако замѣтить, что волнистость поверхности, вѣроятно, будетъ очень способствовать отложенію накипи и затруднять надлежащую очистку котла *).

*) *Revue générale des chemins de fer*, Octobre 1887, p. 248.

Надъ уменьшеніемъ сопротивленія движенію поѣздовъ работали въ послѣдніе годы французскіе инженеры *Ricour* и *Desdovits* (Дедуи) и путемъ опыта опредѣлили, что клиновая поверхность съ наклономъ боковъ къ направленію движенія въ 3:4, представляетъ наименьшее сопротивленіе перемѣщенію въ воздухѣ (вдвое менѣе, чѣмъ плоская стѣнка, перпендикулярная къ направленію движенія).

На основаніи этого г. *Ricour* и *Desdovits* сдѣлали слѣдующія измѣненія въ паровозахъ, назначенныхъ для скорыхъ пассажирскихъ поѣздовъ, сопротивленіе которыхъ возрастаетъ очень значительно съ увеличеніемъ скорости. Спереди паровоза и будки машиниста (черт. 10) стѣнки сдѣланы изъ двухъ плоскостей, наклоненныхъ къ вертикальной продольной плоскости подъ уклономъ 3:4, и кромѣ того, чтобы воздухъ встрѣчалъ какъ можно меньше поверхностей, паровой куполь и дымовая труба съ боковъ прикрыты листовымъ желѣзомъ, такъ что воздухъ не можетъ уже вступать въ промежутокъ между трубой и куполомъ; съ той же цѣлью промежутки между спицами колесъ за-
дѣланы, а вагоны снабжены особыми полотнищами для прикрытія между ними промежутковъ—извѣстно, что сильный боковой вѣтеръ, дѣйствуя черезъ эти промежутки на лобовыя стѣнки вагоновъ, можетъ даже останавливать движеніе поѣзда *).

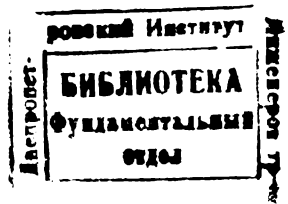
Оставляя въ сторонѣ другія измѣненія, сдѣланныя г. *Ricour*’омъ въ паровозахъ, я перейду къ дорогамъ съ крутыми подъемами, на которыхъ паровозъ, являющійся незамѣнимымъ двигателемъ на дорогахъ почти горизонтальныхъ, оказывается непригоднымъ, если не прибѣгнуть къ вспомогательнымъ средствамъ для увеличенія сцепленія движущихъ колесъ.

На обыкновенныхъ желѣзныхъ дорогахъ и притомъ на небольшихъ протяженіяхъ съ этой цѣлью, какъ извѣстно, пользуются подбрасываніемъ песку подъ колеса, или, какъ это дѣлается на Центральной швейцарской ж. дорогѣ, поверхность рельсовъ передъ колесами очищается струей горячей воды, пускаемой по трубчкѣ изъ котла.

Для дорогъ съ крутыми подъемами (иногда до $\frac{1}{3}$) предложено было нѣсколько системъ съ искусственнымъ сцепленіемъ, но успѣхъ,

*) Статьи г. *Ricour*’а о различныхъ измѣненіяхъ въ подвижномъ составѣ (*Annales des ponts et chaussées*, Avril 1884, p. 345 et Septembre 1885, p. 510).

Объ опытахъ надъ такимъ подвижнымъ составомъ въ статьѣ г. *Desdovits* (*Annales des mines*, 1885, Tome VIII, p. 481).



правда различный, имѣли главнымъ образомъ системы *Fell*'я, *Riggenbach*'а и *Agudio*.

Въ системѣ Фелля (*Fell*), примѣненной на участкѣ дороги черезъ Монъ-Сенисъ, кромѣ обыкновенныхъ движущихъ колесъ, опирающихся на колейные рельсы, паровозъ былъ снабженъ еще горизонтальными колесами, и эти колеса машинистомъ, посредствомъ винтовой передачи, съ извѣстной силой могли прижиматься съ обѣихъ сторонъ къ особому третьему рельсу, уложенному между двумя колейними. Сложность механизма, невозможность предохранить поверхности рельсовъ отъ капающей на нихъ смазки и неблагопріятныя климатическія условія въ значительной степени отозвались вредно на удачномъ примѣненіи этой системы *).

Въ системѣ Риггенбаха (*Riggenbach*), имѣвшей значительный успѣхъ особенно въ Швейцаріи, для искусственнаго сдѣлання укладывается между рельсами особая зубчатка изъ двухъ вертикальных полосъ, въ которыхъ укрѣплены поперечные брусочки; за эти брусочки зацѣпляется зубчатое колесо, устроенное на паровозѣ и получающее движеніе отъ паровыхъ цилиндровъ. Можно устроить и такъ, что паровые цилиндры будутъ дѣйствовать кромѣ того и на колеса паровоза, идущія по рельсамъ,—это будетъ смѣшанная система—съ обыкновеннымъ сдѣланиемъ и съ зубчаткой **).

Видоизмѣненіе этой системы представляетъ система Абта (*Abt*), примѣненная въ 1885 году на Гарцѣ для желѣзной дороги *Blankenburg-Tanne* и, какъ показала 1½-годовой опытъ, съ полнымъ успѣхомъ ***).

Особенность этой системы составляетъ главнымъ образомъ во-первыхъ зубчатка, сдѣланная здѣсь составною изъ трехъ зубчатыхъ полосъ, съ которыми сдѣпляются два зубчатыхъ колеса, имѣющихъ соответственно по три ряда зубцовъ на ободѣ, съ цѣлью обезпечить плавность зацѣпленія, и во-вторыхъ то, что зубчатые колеса укрѣплены не въ рамѣ паровоза, какъ у *Riggenbach*'а, а въ особой рамѣ, опирающейся на оси паровозныхъ колесъ, идущихъ по колейнимъ

*) *Couche*. Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer. Tome II, 1873, (p. 705).

**) *Heusinger von Waldegg*. Handbuch für specielle Eisenbahntechnik. V Band. Bau und Betrieb der Secundär-und Tertiärbahnen. 1878 (s. 398).

***) *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*. 1887, V Heft (s. 189).

рельсамъ (черт. 11); благодаря этому игра ресоръ не имѣетъ вліянія на зубчатые колеса, и разстояніе ихъ отъ зубчатки не измѣняется.

Въ системѣ Агудіо (*Agudio*) движитель собственно постоянный, не перемѣщающійся, и передаетъ движущую силу посредствомъ проволочнаго безконечнаго каната шкивамъ, укрѣпленнымъ въ особой рамѣ на колесахъ, движущейся вмѣстѣ съ вагонами по обыкновенному рельсовому пути; движеніе отъ шкивовъ передается особому среднему шкиву, вращающемуся съ меньшей скоростью и, вмѣсто того, чтобы заставить этотъ шкивъ зацѣпляться за зубчатку, укладываемую въ другихъ системахъ по срединѣ пути, *Agudio* накидываетъ на этотъ шкивъ достаточное число оборотовъ особаго каната, неподвижно укрѣпленнаго на одномъ концѣ и натянутого надлежащимъ усиліемъ на другомъ. Этотъ канатъ своимъ треніемъ и доставляетъ необходимое сцѣпленіе съ среднимъ шкивомъ, служащимъ исключительно только для сцѣпленія. Система эта, примѣненная въ видѣ опыта на Турино-генуэзской ж. дорогѣ и затѣмъ въ 1876 году на Монъ-Сенисской, по заключенію специалистовъ вполне способна къ практическому примѣненію, особенно въ тѣхъ случаяхъ, когда въ распоряженіи имѣется достаточной силы водяной движитель *).

Въ простѣйшемъ своемъ видѣ (какъ это представлено на черт. 12 и 13) канатная тяга нашла за послѣдніе пятнадцать лѣтъ удачное примѣненіе къ движенію по уличнымъ трамамъ, особенно въ американскихъ городахъ (Санъ-Франциско, Чикаго, Нью-Йоркъ) и въ послѣднее время стала входить въ употребленіе въ Англіи. Для вагоновъ укладываются два параллельныхъ рельсовыхъ пути, а по срединѣ каждаго устраивается на всемъ ихъ протяженіи канава, гдѣ и помѣщается безконечный проволочный канатъ съ поддерживающими его шкивами. Канатъ находится постоянно въ движеніи, благодаря вращенію одного изъ крайнихъ большихъ шкивовъ, получающему движущую силу отъ вала постоянной машины. Существенную часть устройства составляетъ цапка, рама которой прикрѣплена къ вагону; челюсти цапки могутъ сближаться между собою или удаляться другъ отъ друга посредствомъ рычага или винта, находящагося подъ рукой у кучера-кондуктора, такъ что тотъ каждую минуту можетъ прервать

*) *Couche. Voie, matériel roulant, etc. T. II, 1873 (p. 765); T. III, 1876 (p. 911).*

сцѣпление съ движущимъ канатомъ, и вагонъ остановится (для быстрой остановки имѣется еще тормазъ) *).

Въ настоящее время имѣется нѣсколько трамвѣвъ, гдѣ отъ постоянной машины движущая сила передается посредствомъ электрическаго тока: движитель дѣйствуетъ на стоящую рядомъ первичную динамомашину, откуда токъ по проводамъ достигаетъ вагона, имѣющаго вторичную подобную динамомашину, и здѣсь вращеніе вала динамомашинны передается затѣмъ колесамъ вагона, что касается проводовъ для тока, то для этого пользуются или самими рельсами дороги, принявъ мѣры для ихъ изолировки, или же устраиваютъ особые подвѣсные или подземные провода, послѣдніе укладываются въ канавахъ со щелью наверху, подобныхъ канавамъ для канатныхъ дорогъ.

Но движеніе по трамваѣмъ производится кромѣ того и паровозами. Паровозы эти отличаются отъ обыкновенныхъ меньшими размѣрами, и въ виду особыхъ условій, предъявляемыхъ къ трамваѣмъ, отапливаются обыкновенно коксомъ, не дающимъ дыму, а чтобы избѣжать шуму отъ выпуска отработавшаго пара и по возможности даже вовсе не выпускать его наружу, снабжаются особыми конденсаторами, различнаго устройства,—по большей части изъ ряда тонкихъ трубокъ, охлаждаемыхъ наружнымъ воздухомъ. Такъ, въ паровозѣ г. Бэррела (*Burrell*), построенномъ по системѣ *compound* и испытывавшемся на Бермингемскомъ трамвѣ, конденсаторъ состоитъ изъ 18 большихъ трубъ изъ тонкой латуни, расположенныхъ вдоль на крышѣ паровоза; внутри этихъ трубъ помѣщены другіе, діаметромъ на 12 миллиметровъ меньше, и отработавшій паръ направляется въ промежутки между стѣнками наружныхъ и внутреннихъ трубъ, а поверхности трубъ—большихъ снаружи, малыхъ изнутри—охлаждаются воздухомъ, движущимся тѣмъ скорѣе мимо этихъ поверхностей, чѣмъ быстрѣе идетъ паровозъ. Опыты съ этимъ паровозомъ, произведенные въ настоящемъ (1887) году, дали очень хорошіе результаты **).

Требованіе избавиться отъ выпуска наружу дыму и пару на

*) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1887, № 9 (s. 182), № 10 (s. 211).
Engineer 1887, October & November, p.p. 351, 369, 389, 390.
Engineering, 1886, June 18, p. 588.

**) Engineer, 1887, October 28, p. 347.

трамахъ можетъ быть вполне удовлетворено еще слѣдующими способами:

- а) локомотивами, работающими сжатымъ воздухомъ;
- б) электрическими вагонами съ аккумуляторами;
- в) паровозами безъ топки.

Локомотивы съ сжатымъ воздухомъ требуютъ особаго устройства съ постоянной машиной, компрессоромъ и резервуарами для запасовъ сжатого воздуха, которымъ наполняются котлы локомотивовъ. Если сжатый воздухъ выпускать затѣмъ изъ этихъ котловъ въ цилиндры, а отсюда въ атмосферу, то онъ расширяется и при этомъ сильно охлаждается; вслѣдствіе этого пары воды, всегда имѣющіеся въ воздухѣ, обращаются въ снѣгъ и ледъ, такъ что выпускныя отверстія могутъ заполниться, и машина не будетъ въ состояніи дѣйствовать. Чтобы предупредить это, въ системѣ Мекарскаго сжатый воздухъ изъ котла локомотива идетъ не прямо къ цилиндрамъ, а проходитъ сперва черезъ маленькій резервуаръ изъ котельнаго желѣза, наполненный горячей водой, нагрѣвается здѣсь и затѣмъ уже поступаетъ въ цилиндры для работы *).

Относительно подобныхъ локомотивовъ, а также электрическихъ вагоновъ, гдѣ динамомашина, дѣйствующая на колеса, получаетъ токъ изъ аккумуляторовъ, помѣщенныхъ въ особыхъ ящикахъ подъ сидѣньями, я позволю себѣ привести заключеніе комисіи, производившей сравнительныя наблюденія надъ движителями для трамвовъ на международномъ конкурсѣ во время Антверпенской выставки 1885 года.

Къ конкурсу были допущены 7 паровозовъ, 1 вагонъ съ паровымъ движителемъ, 1 вагонъ съ воздушнымъ движителемъ и 1 электрическій вагонъ. Комисія раздѣлила эти движители на двѣ группы: одни, пригодные для городскихъ улицъ, другіе—только для пригородныхъ дорогъ.

Програма условій, которымъ должны удовлетворять эти движители, касалась:

1) безопасности и удобствъ публики, 2) содержанія движителей и общаго устройства, и 3) экономіи въ расходованіи топлива и смазки.

*) Engineering. 1882, September 15, p. 258.

Комисія пришла къ заключенію, что изъ двигателей первой группы первенство слѣдуетъ отдать электрическому вагону Общества „l'Electrique“, въ Брюселѣ; двигатель со сжатымъ воздухомъ, полковника *Beaumont'a*, изъ Лондона, занялъ послѣднее мѣсто, именно потому, что расходъ топлива былъ для него значительно больше, чѣмъ для другихъ (11,27 килограма угля на километръ проходимаго пути, между тѣмъ какъ для электрическаго вагона расходъ этотъ составлялъ 1,73 килогр. угля *).

Слѣдуетъ однако замѣтить, что локомотивы Мекарскаго, работающіе въ Нантѣ, дали, напротивъ, довольно выгодные результаты **).

Электрическіе вагоны съ аккумуляторами системы Жюльена (*Julien*), Общества „l'Electrique“, примѣнены теперь еще въ Гамбургѣ, и опыты Губера (*Huber*) съ такимъ вагономъ показали, что вагоны подобнаго устройства представляются дѣйствительно чрезвычайно удобными и выгодными для городскихъ трамвѣвъ. При 96 аккумуляторахъ, размѣщенныхъ въ ящикахъ и раздѣленныхъ на 4 группы, вагонъ можетъ дѣлать до новаго заряженія аккумуляторовъ до 50 километровъ, зарядженіе требуетъ 8 часовъ времени, а самая перемѣна аккумуляторовъ при надлежащемъ устройствѣ можетъ производиться въ теченіе около 5 минутъ ***).

Переходя къ паровозамъ безъ топки, изобрѣтеннымъ въ 1873 г. Лямомъ (*Lamm*) въ Новомъ Орлеанѣ, а въ Европѣ введеннымъ въ употребленіе Франкомъ (*Francq*), замѣчу, что паръ высокаго давленія (около 15 атмосферъ) готовится постоянными котлами, и въ нихъ это можетъ дѣлаться гораздо экономичнѣе, чѣмъ въ паровозныхъ котлахъ, особенно малыхъ размѣровъ. Помощью приготовленнаго пара, пропускаемаго затѣмъ въ котель паровоза по особой трубѣ, вода въ котлѣ нагрѣвается, а пространство надъ водой наполняется паромъ высокаго давленія (черт. 14). При работѣ паровоза паръ пускается въ цилиндры черезъ особый приборъ, названный расширителемъ; этотъ расширитель автоматически открываетъ и закрываетъ проходъ для пара. На практикѣ оказалось, что 1 килограммъ горячей воды при обращеніи въ паръ въ состояніи дать

*) Revue générale des chemins de fer, Juin 1886, p. 414.

**) Le Génie Civil, T. 3, 1882—83, p. 175.

***) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1887, № 16, s. 332.

около 1.500—1.800 килограмметровъ работы (между тѣмъ какъ въ обыкновенныхъ паровозахъ, благодаря огню въ топкѣ, 1 килограмъ пара упругости въ 10 атмосферъ даетъ до 22.500 килограмметровъ).

Котель паровоза безъ топки дѣлается изъ стальныхъ листовъ, снабженныхъ дурно проводящей тепло оболочкой изъ дерева, пробки и тонкаго листового желѣза, а между этой оболочкой и стѣнками котла оставляется слой воздуха, для предупрежденія потерь теплоты наружу.

Паровозы такой системы, построенные заводомъ общества *Nohenzollern*, близъ Дюсельдорфа, для трамвѣвъ въ Батавіи, работаютъ тамъ очень удовлетворительно.

Но для того, чтобы котель къ концу срока для работы имѣлъ еще достаточное давленіе для работы въ цилиндрахъ, необходимо брать воду очень высокой начальной температуры, а это сопряжено въ опасность какъ для котловъ паровозовъ, такъ и для постоянныхъ, которые приготавливаютъ паръ требуемаго высокаго давленія.

Но есть средства, не смотря на расходъ пара изъ котла, поддерживать температуру и давленіе постоянными, именно такими, какія намъ желательны для пара, работающаго въ цилиндрахъ. Подобное средство примѣнено въ котлахъ Гонихмана (*Honigmann*)—это именно ѣдкій натръ.

Ѣдкій натръ обладаетъ свойствомъ поглощать водяной паръ, развивая при этомъ теплоту, и потому его можно употребить для конденсаціи отработавшаго пара, а развивающуюся при этомъ теплоту для нагрѣванія котла и полученія новаго пара для машины.

Растворъ ѣдкаго натра будетъ поглощать водяной паръ до тѣхъ поръ, пока при извѣстной степени разбавленія не достигнетъ точки кипѣнія, и эта точка тѣмъ выше, чѣмъ крѣпость раствора больше; такъ что разбавленный растворъ, который при данной температурѣ уже не можетъ больше поглощать водянаго пару, будетъ въ состояніи поглотить новыя количества воды, если температура понизится.

Наоборотъ, чтобы изъ даннаго раствора получить болѣе крѣпкій, надо прибѣгнуть къ нагрѣванію его, къ выпариванію.

Представленный на черт. 15 паровозъ *Honigmann*'а имѣетъ котель, состоящій изъ трехъ отдѣленій: въ крайнихъ находится вода, нагрѣтая до желаемой температуры пропусканіемъ въ нее пара изъ постоянного котла, а въ среднемъ растворъ ѣдкаго натра. Крайнія

отдѣленія соединены между собою рядомъ трубокъ, и такимъ образомъ получена большая поверхность, омываемая съ одной стороны водою, а съ другой—ѣдкимъ натромъ. Отработавшій паръ изъ цилиндровъ машины не выпускается вонъ, а идетъ въ натровое пространство и тамъ поглощается, причемъ развивается теплота, температура раствора повышается, и часть теплоты переходитъ черезъ стѣнки къ водѣ, пока температура не сдѣлается одинаковою во всѣхъ отдѣленіяхъ котла. При надлежащемъ отношеніи между количествами натра и воды, можно достичь того, что температура воды будетъ оставаться постоянной, несмотря на расходъ пара машиною. Опыты, произведенные съ паровозами *Honigmann*'а на Ахенъ-юлихской ж. дорогѣ и на уличномъ трамвѣ въ Ахенѣ, вполне это подтверждаютъ.

Когда натровый растворъ сильно разбавится и больше уже не будетъ въ состояніи поглощать пару, его подвергаютъ выпариванію въ особыхъ котлахъ, причемъ можно воспользоваться также для этой цѣли паромъ, получающимся изъ самого раствора.

Въ простѣйшемъ видѣ сущность этого процесса заключается въ слѣдующемъ.

Натровое и водяное пространства посредствомъ трубъ приводятся въ сообщеніе съ компрессоромъ, двигателемъ для котораго пусть служить водяное колесо (черт. 15). Движущая сила водянаго колеса заставляетъ компрессоръ производить разрѣженіе въ натровомъ пространствѣ, вслѣдствіе чего изъ раствора выдѣляется часть воды въ видѣ пара и переходитъ къ компрессору; тамъ паръ подвергается сжатію, отчего давленіе его увеличивается и онъ нагрѣвается; отсюда этотъ нагрѣтый водяной паръ по трубѣ идетъ въ водяное пространство котла, увеличиваетъ тамъ температуру и производитъ затѣмъ нагрѣваніе натроваго раствора, отчего тотъ выдѣляетъ часть воды въ видѣ пара; паръ этотъ идетъ въ компрессоръ, и процессъ такимъ образомъ продолжается до тѣхъ поръ, пока не достигнута будетъ требуемая крѣпость раствора.

Главныя опасенія возбуждалъ котель относительно быстрого разрушенія стѣнокъ его ѣдкимъ натромъ, и дѣйствительно котлы изъ желѣзныхъ листовъ быстро приходили въ негодность. Въ настоящее время котлы *Honigmann*'а дѣлаются изъ мѣди, на которую ѣдкій натръ не оказываетъ вреднаго дѣйствія.

Въ прошломъ году (1886) заводъ Балдина (*Baldwin*) въ Фила-

дельфин построилъ 4 нагрѣвыхъ паровоза для желѣзной дороги *Minneapolis-Lyndale & Minnetoka*. Въ котлѣ такого паровоза помещается 5 тоннъ ѣдкаго натра, который черезъ 6 часовъ работы насыщается, и затѣмъ растворъ подвергаютъ пропариванію посредствомъ сильно нагрѣтаго пара изъ постоянного котла, послѣ чего паровозъ опять готовъ къ службѣ. *)

Этимъ, мм. гг., я и закончу очеркъ механическихъ двигателей для желѣзныхъ дорогъ и трамвѣвъ.

А. Романовъ.

30 ноября 1887.



*) Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, 1887, IV Heft, s. 168.

Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1883, Heft 11, s. 729 (статья г. *Riedler'a*); 1884, №№ 4—6, и 1885, №№ 6, 43 (статья г. *Gutermuth'a*); 1885, №№ 3, 11, 23.

ОСУШЕНІЕ И ОРОШЕНІЕ ЗЕМЕЛЬ.

СОСТАВИЛЪ

Ө. Г. Зброжекъ,

ИНЖЕНЕРЪ ПУТЕЙ СООБЩЕНІЯ.

ВЫПУСКЪ I.

Съ 3 листами чертежей.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія инженера Ю. Н. Эрлихъ, Б. Садовая, 9.
1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

О Г Л А В Л Е Н І Е.

В в е д е н і е.

Задача и предметъ курса осушенія и орошенія	стр. 1
---	--------

О Т Д Ъ Л Ъ I.

Предварительныя свѣдѣнія.

Г л а в а 1.

§ 1. Предъявляемыя къ землямъ требованія относительно обводненія .	2
§ 2. Естественныя виды земель	7
§ 3. Почвы и грунты	10
§ 4. Свойства земель по отношенію къ водѣ	11
Пористость глины и песку	11
Водопропускная способность глины и песку	13
Волосность глины и песку	16
Способности глины и песку испарять воду	17
Способности глины и песку поглощать воду и примѣси къ ней .	17
Свойства смѣшанныхъ земель по отношенію къ водѣ	18
§ 5. Послѣдствія свойствъ земель по отношенію къ водѣ	19

Г л а в а 2.

§ 1. Круговоротъ воды въ природѣ.	20
§ 2. Количество атмосферныхъ осадковъ	21
§ 3. Испареніе воды	22
§ 4. Вода просачивающаяся въ землю и стекающая по земной поверхности	23

О Т Д Ъ Л Ъ II.

Осушение земель.

Глава 1.

	стр.
§ 1. Общее экономическое значеніе землеосушительныхъ работъ . .	27
§ 2. Необходимыя изслѣдованія при осушеніи земель	29

Глава 2.

Осушительныя средства.

§ 1. Разведеніе растений	36
§ 2. Открытыя канавы	37
§ 3. Проведеніе воды черезъ возвышенности	53
§ 4. Закрытыя Канавы.	57
§ 5. Колодцы и вертикальный дренажъ.	60

Глава 3.

Отведеніе наземныхъ водъ съ земледѣльческими, санитарными и строительными цѣлями.

§ 1. Постороннія и собственныя воды участка; нагорныя канавы . .	64
§ 2. Отведеніе съ поля его собственныхъ наземныхъ водъ	71
§ 3. Ассенизація поля	72

ОСУШЕНИЕ И ОРОШЕНИЕ ЗЕМЕЛЬ.

Инженера пут. сообщ. Э. Г. Зброжека.

ВВЕДЕНИЕ.

Задача и предметъ курса осушенія и орошенія земель.

Для всѣхъ видовъ пользованія землею степень и качество влажности земли имѣютъ существенно важное значеніе.

Природа сама не только не удовлетворяетъ требованіямъ въ этомъ отношеніи вообще, но нерѣдко случается, что болѣе или менѣе значительные участки земли, вслѣдствіе временнаго или постояннаго затопленія водою, дѣлаются неудобными и даже совершенно недоступными для пользованія.

Изъ этого вытекаетъ необходимость существованія особаго отдѣла инженерныхъ знаній, который бы имѣлъ предметомъ своимъ осушеніе и орошеніе земель.

Основные техническіе приемы, ведущіе къ цѣлямъ осушенія и орошенія земель, извѣстны съ глубокой древности и по существу своему такъ просты, что не требуютъ сложныхъ соображеній съ точки зрѣнія строительнаго искусства; тѣмъ не менѣе для рациональнаго примѣненія ихъ необходимо знать:

во 1-хъ, гидротехническое значеніе тѣхъ общихъ требованій, которыя предъявляются къ землямъ,

во 2-хъ, причины тѣхъ явленій, съ которыми приходится бороться для удовлетворенія данныхъ требованій,

и въ 3-хъ,—тѣ результаты, которые могутъ быть достигнуты въ разныхъ случаяхъ извѣстными мѣрами. Поэтому, изученію техническихъ приемовъ осушенія и орошенія земель должно предшествовать

выясненіе предъявляемыхъ къ землямъ требованій и изученіе свойствъ естественныхъ видовъ встрѣчающихся въ природѣ земель по отношенію къ водѣ, послѣдствій этихъ свойствъ и водныхъ явленій въ земляхъ въ связи съ круговоротомъ воды въ природѣ.

Такое изученіе приѣмовъ осушенія земель необходимо потому, что въ окружающей насъ практической жизни мы можемъ найти массу неудачныхъ попытокъ осушенія земель и легко можемъ убѣдиться, что во всѣхъ случаяхъ причины неудачъ заключались въ игнорированіи основныхъ принциповъ рациональнаго примѣненія извѣстныхъ способовъ осушенія и въ незнаніи дѣйствительныхъ причинъ избытка влажности осушаемой массы земли.

ОТДѢЛЪ I.

Предварительныя свѣдѣнія.

ГЛАВА I-я.

§ 1. Предъявляемыя къ землямъ требованія относительно обводненія.

Всѣ предъявляемыя къ землямъ требованія могутъ быть отнесены къ тремъ категоріямъ: земледѣльской, санитарной и строительной.

Въ земледѣльскомъ отношеніи отъ поверхностнаго слоя земли, называемаго почвою, требуется, чтобы онъ обладалъ извѣстною способностью растительной производительности, извѣстною степенью плодородія, при данныхъ мѣрахъ обработки и удобренія.

Подробное изученіе культурныхъ свойствъ различныхъ почвъ въ связи съ способами обработки ихъ и удобренія составляетъ задачу курсовъ агрономіи (земледѣлія); для насъ же представляется необходимымъ выяснить лишь тѣ *основныя* культурныя свойства почвъ, въ сферѣ которыхъ инженеръ-гидротехникъ можетъ придти на помощь земледѣлію.

Свойства эти выясняются слѣдующимъ образомъ.

Какъ извѣстно растенія содержатъ въ составѣ своемъ:

	По вѣсу.
Воды, теряемой при высушиваніи, приблизительно.	отъ 75% до 90%
Сухой массы	„ 25% „ 10%
<i>и въ единицахъ сухой массы:</i>	
Органическихъ веществъ безъазотистыхъ (изъ кислорода, водорода и углерода).	„ 70% „ 90%

По вѣсу.

Азотистыхъ (изъ углерода, водорода, кислорода и азота) отъ 24% до 8%

Золы, состоящей изъ кали, натра, извести, магнезін, окиси желѣза, фосфорной, сѣрной, кремневой кислотъ и хлора „ 6% „ 2%

Всѣ эти вещества, входящія въ составъ растеній, за исключеніемъ той части ихъ, которая уже содержится посѣянными въ почвѣ сѣменами, получаютъ растеніями изъ атмосферы и изъ почвы.

Необходимыми для растеній питательными веществами современная агрономія признаетъ всѣ вышеперечисленные вещества, входящія въ ихъ составъ, за исключеніемъ *натра*, *кремнезема* и *хлора* и потребности питанія растеній формулируются такъ: растенія нуждаются въ четырехъ кислотахъ: угольной, азотной, сѣрной и фосфорной; въ четырехъ окислахъ:—калія, кальція, магнія и желѣза и въ среднемъ тѣлѣ—водѣ; изъ нихъ, за исключеніемъ углекислоты, которая получается растеніями изъ атмосферы, почва должна давать *остъ*.

Вода при этомъ является не только необходимымъ питательнымъ веществомъ, дающимъ потребный для растеній водородъ и входящимъ въ составъ ихъ тканей, но и проводникомъ, посредникомъ всѣхъ другихъ питательныхъ веществъ; ибо они воспринимаются растеніями не иначе, какъ изъ растворовъ. Въ тоже время, наряду съ водою, весьма важнымъ факторомъ жизни растеній является воздухъ, присутствіе котораго въ почвѣ необходимо для тѣхъ химическихъ процессововъ, при коихъ питательныя вещества переходятъ въ соединенія, воспринимаемыя растеніями.

Поэтому всякая почва, въ силу физическихъ и химическихъ свойствъ своихъ, способная удерживать необходимыя для растеній питательныя вещества, независимо отъ тѣхъ питательныхъ веществъ, которыя въ ней содержатся и которыя, въ случаѣ надобности, могутъ быть введены въ нее путемъ удобренія, представляется культурною лишь въ томъ случаѣ, если въ ней возможна послѣдовательная циркуляція воды и воздуха въ такой степени, какая необходима и достаточна для правильнаго питанія растеній. Циркулируя въ почвѣ, вода служитъ проводникомъ воздуха въ нее и можетъ или приносить ей или уносить изъ нея питательныя вещества; застан-

ваясь-же на поверхности и въ массѣ почвы, вода препятствуетъ притоку воздуха въ нее и естественному ходу тѣхъ химическихъ процессовъ въ ней, которые необходимы для питанія растений и безъ которыхъ растенія не могутъ воспользоваться самыми богатыми запасами питательныхъ веществъ.

Отсюда слѣдуетъ:

1) что водныя явленія въ почвахъ и свойства почвъ по отношенію къ водѣ имѣютъ основное значеніе въ культурномъ отношеніи и представляютъ собою именно сферу тѣхъ почвенныхъ условій, которыя подлежатъ изученію гидротехника.

2) что задача осушенія земель съ земледѣльческими цѣлями заключается собственно въ *урегулированіи сбводненія почвы*, т. е. въ такомъ удаленіи съ поверхности и изъ массы почвы застоевъ и излишка воды, при которомъ установилась бы циркуляція воды въ почвѣ сверху внизъ въ такой степени, какая необходима для правильнаго питанія растений.

и 3) что, при недостаткѣ естественной влаги въ почвѣ, для цѣлей земледѣльческихъ можетъ требоваться искусственное ея орошеніе, имѣющее также въ результатѣ своемъ установленіе циркуляціи воды въ почвѣ сверху внизъ въ такой степени, какая необходима для правильнаго питанія растений.

Въ санитарномъ отношеніи земля представляетъ собою естественный дезинфекторъ всѣхъ остатковъ и выдѣленій растительнаго и животнаго царства.

Остатки и выдѣленія эти или прямо попадаютъ на поверхность и въ массу земли въ твердомъ и жидкомъ состояніи и въ этомъ послѣднемъ частью всасываются въ нее, или-же уносятся въ атмосферу въ состояніи пыли, газовъ и паровъ и вновь возвращаются изъ нея въ землю вмѣстѣ съ атмосферными осадками.

Продукты разложенія органическихъ веществъ дѣлаются безвредными для жизни человѣка, животныхъ и растений въ томъ случаѣ, если производящіе ихъ органическіе остатки и выдѣленія не остаются и не разлагаются на поверхности земли, а вмѣстѣ съ водою проникаютъ въ массу ея на болѣе или менѣе значительную глубину и, встрѣчая тамъ нѣкоторый запасъ кислорода воздуха разлагаются на элементы, входящіе въ составъ образованій земли и въ составъ пищи растений.

По этому хорошими землями въ санитарномъ отношеніи, очевидно, могутъ быть земли лишь непокрытыя застоями воды съ поверхности и ненасыщенные водою въ массѣ и при томъ обладающія достаточною водопроницаемостью и, на болѣе или менѣе значительную глубину отъ поверхности, лишенные воды и содержація въ массѣ своей воздухъ.

Изъ этого слѣдуетъ:

1) что задача осушенія земель съ санитарными цѣлями заключается въ предотвращеніи застоевъ воды на поверхности земли и въ достиженіи возможно скорого ея стеканія, а также въ устраненіи насыщенія массы земли водою на возможно большую глубину отъ поверхности.

и 2) что водныя явленія въ земляхъ и свойства земель по отношенію къ водѣ, подлежащія изученію гидротехника, имѣютъ важное значеніе и въ санитарномъ отношеніи.

Въ строительномъ отношеніи земли служатъ или какъ основанія сооружений, или какъ матерьялы, входящіе въ составъ сооружений и въ обонхъ этихъ случаяхъ имѣютъ существенное значеніе: свойства устойчивости земель въ массѣ, т. е. способности ихъ сохранять равновѣсіе при извѣстныхъ условіяхъ, способности земель сопротивляться механическому давленію и главнымъ образомъ постоянство, неизмѣняемость этихъ способностей.

Способности земель относительно устойчивости массы и сопротивленія давленію зависятъ отъ механическаго строенія земель, ихъ массовыхъ и частичныхъ физическихъ свойствъ, а также отъ степени насыщенія ихъ водою.

Съ увеличеніемъ степени насыщенія водою и, въ особенности, при періодическомъ замерзаніи и оттаиваніи, нѣкоторыя земли не только измѣняютъ, но даже совершенно утрачиваютъ, присущія имъ, при другихъ условіяхъ, способности устойчивости массы и сопротивленія давленію.

Поэтому, изученіе свойствъ земель по отношенію къ водѣ получаетъ особенно важное значеніе въ строительномъ отношеніи и безъ дальнѣйшихъ разсужденій дѣлается совершенно понятнымъ, что задача осушенія земель съ строительными цѣлями должна вообще заключаться въ возможномъ уменьшеніи насыщенія массы земли водою и въ *предотвращеніи измѣненій допускаемаго ея насыщенія*, дру-

гими словами, въ *отведеніи* отъ осушаемой массы не только существующихъ застоевъ и скопленій, но и, по возможности, всѣхъ притоковъ воды снизу, съ боковъ и сверху.

Установивъ такимъ образомъ гидротехническое значеніе основныхъ требованій осушенія земель съ земледѣльческими, санитарными и строительными цѣлями, мы видимъ что спускъ застоевъ воды, существующихъ и образующихся на поверхности земли, а также устраненіе избытка насыщенія массы ея водою составляютъ какъ бы общую потребность всѣхъ возможныхъ случаевъ осушенія земель; но что, тѣмъ не менѣе, техническія задачи осушенія въ полномъ ихъ объемѣ и деталяхъ тѣсно связаны съ цѣлями осушенія и, при разныхъ цѣляхъ,—существенно разнятся между собою.

Такъ, осушеніе массы земли, произведенное соотвѣтственно цѣлямъ земледѣльческимъ, для увеличенія растительной ея производительности, очевидно, можетъ вообще не удовлетворять требованіямъ строительнымъ; а осушенія, произведенныя соотвѣтственно цѣлямъ исключительно санитарнымъ, или же строительнымъ,—могутъ убить въ почвѣ растительную производительность; приемы осушенія, при которыхъ въ осушаемой массѣ земли устанавливается циркуляція воды сверху внизъ,—желательны и рациональны для цѣлей земледѣльческихъ, могутъ быть допускаемы и съ цѣлями санитарными, но представляются вредными при осушеніяхъ съ цѣлями строительными; приемы же осушенія, при которыхъ по возможности преграждается всякій доступъ воды къ осушаемой массѣ земли, рациональны для цѣлей строительныхъ, могутъ быть допускаемы въ цѣляхъ санитарныхъ, но положительно вредны въ земледѣльскомъ отношеніи.

§ 2. Естественные виды земель.

Земныя напластованія, подразумѣваемые подъ обыденнымъ названіемъ *земли*, какъ извѣстно состоятъ изъ водныхъ осадковъ, образовавшихся изъ продуктовъ разложенія горныхъ породъ и изъ продуктовъ разложенія остатковъ растеній и животныхъ. Образуюсь и постепенно видоизмѣняясь съ отдаленнѣйшихъ временъ, подъ вліяніемъ однихъ и тѣхъ же дѣятелей: воды, атмосферныхъ газовъ, животныхъ, растеній и силы тяжести, земныя напластованія представляютъ собою самыя разнообразныя сочетанія матерьяловъ минераль-

наго и органическаго происхожденія; но преобладающее значеніе и наибольшее распространеніе въ нихъ имѣютъ, все-таки, матерьялы минеральнаго происхожденія.

Главнѣйшими минеральными матерьялами земли служатъ:

1) *Глина*—водный кремнекислый глиноземъ въ чистомъ видѣ или въ связи съ соединеніями углекислой, сѣрно-кислой и фосфорно-кислой извести, углекислой магнезій, хлористаго, углекислаго и сѣрно-кислаго кали и натра, а также окисей желѣза и марганца, при чемъ окисъ эти окрашиваютъ глину: первыя въ желтый и красный цвѣта, вторыя—въ сѣровато-бурые цвѣта.

2) *Песокъ*—мелкія частицы кварца (кремневой кислоты) въ чистомъ видѣ или окрашенныя окисями металловъ и съ примѣсами такихъ же мелкихъ частицъ еще не разложившихся минераловъ.

Глина получается въ природѣ, какъ продуктъ *химическаго* разложенія минеральныхъ породъ, въ видѣ тончайшаго порошка, зерна котораго легко поднимаются водою и держатся въ ней долго въ взвѣшенномъ состояніи образуя *мутъ*; муть эта называется *глинистымъ иломъ*.

Песокъ получается, какъ продуктъ разрушенія минеральныхъ породъ, въ видѣ болѣе или менѣе крупныхъ зеренъ кристаллическаго кварца (нерастворимаго въ водѣ) и осколковъ минераловъ, еще не успѣвшихъ разложиться. Эти зерна кварца и минераловъ измельчаются путемъ механическимъ и только весьма большою работою воды приводятся въ сравнительно не большомъ количествѣ въ мелкое *млеобразное* состояніе. Песчаная пыль также держится въ водѣ въ видѣ муты и встрѣчается въ качествѣ примѣси въ *глинистомъ илѣ* и въ *зернистомъ пескѣ*.

Второстепенными минеральными матерьялами земли служатъ:

1) мелкія частицы горныхъ породъ: дресва и хряцъ (крупный песокъ);

2) болѣе крупныя частицы горныхъ породъ (камешки): чура и гравій;

3) скругленные обломки горныхъ породъ: галька, булыжникъ и валуны.

Земными матерьялами *органическаго* происхожденія бываютъ:

1) Углекислая, фосфорно-кислая и сѣрно-кислая извести въ на-

пластованіяхъ, образовавшихся отъ химическаго разложенія костей и твердыхъ покрововъ животныхъ.

2) *Перегной* (черноземъ, растительная земля), состоящій изъ смѣси органическихъ кислотъ и полукислотъ (гумина, гуминной кислоты, геина, геинной кислоты и т. п.) съ обуглившимися растительными тканями, растительною золою и землею и образующійся на поверхности земли, какъ продуктъ медленнаго химическаго разложенія (тлѣнія) растительныхъ остатковъ, при недостаточномъ доступѣ кислорода воздуха, слабomъ обводненіи и подъ небольшимъ механическимъ давленіемъ.

и 3) *Торфъ*, состоящій изъ смѣси обуглившихся растительныхъ волоконъ съ растительными смолами и землею и образующійся, какъ продуктъ тлѣнія растительныхъ тканей подъ прикрытіемъ слоя воды и землестыхъ осадковъ. Производителями торфа преимущественно бываютъ нѣкоторыя породы мховъ (*Sphagnum* и *Hypnum*), обладающія способностью разрастаться вершинами въ то время, какъ нижнія части ихъ отмираютъ, при чемъ наростаніе торфяника идетъ непрерывно.

Изъ всѣхъ перечисленныхъ матерьяловъ *глинистый илъ* играетъ самую выдающуюся роль въ образованіи разныхъ видовъ земныхъ напластованій. Вслѣдствіе крайней мелкости зеренъ онъ обладаетъ способностями:

1) Проходить съ водою громадныя разстоянія, проникать съ нею въ промежутки между частицами песчаныхъ, гравелистыхъ, каменныхъ и др. напластованій и образовывать въ нихъ цементирующее, связующее вещество.

и 2) Осаждаясь изъ воды пластами въ чистомъ видѣ или съ примѣсями другихъ веществъ, — достигать подъ вліяніемъ высыханія и механическихъ давленій, самыхъ разнообразныхъ степеней сплотненія, начиная отъ слабой земли и кончая камнемъ (сланцемъ). Вслѣдствіе этихъ свойствъ глинистаго ила наибольшее число видовъ земель обязано ему своимъ происхожденіемъ.

Главнѣйшіе виды встрѣчающихся въ природѣ земель суть слѣдующіе:

1) *Илъ* — осѣвша изъ воды и высохшая глинистая или песчано-глинистая муть, иногда съ примѣсями солей извести и другихъ минеральныхъ и органическихъ веществъ.

2) *Глина*—высохшіе и сплотненные осадки глинистаго ила съ примѣсами до 14% песку по вѣсу и незначительныхъ количествъ солей извести, магнеія, калия, натрія, желѣза, марганца и др. веществъ.

Химическій составъ чистой глины по вѣсу:

Чистаго глинозема (Al_2O_3) отъ 30% до 40%

Кремневой кислоты (SiO_2) отъ 50% до 60%

Воды . . . (H_2O) около 10%

По степенямъ сплотненія (плотности) различаются: иловатыя, плотныя и сланцеватыя глины.

3) *Песчано-глинистыя земли* самая разнообразная смѣсь глины съ пескомъ (до 40% песку).

4) *Хрящеватыя и каменистыя глины*—глины съ значительными примѣсами хряща, гравія и камней.

5) *Известковыя земли*:

а) *лесъ*—смѣсь глины съ известью.

б) *мергель*—разнообразная смѣсь глины съ углекислой известью, углекислой магнезіею и пескомъ (до 60% глины).

6) *Песчаныя земли*, между которыми по примѣсамъ различаются: чистые, иловатыя, глинистыя, хрящеватыя и каменистые пески.

7) *Иловато-хрящеватыя и иловато-каменистыя земли*—скопленія хряща съ камнями, цементированныя глинистымъ иломъ.

8) *Торфяныя земли*—слои торфа, насыщенные землистыми осадками.

и 9) *Черноземныя земли*—смѣси перегной съ пескомъ, глинистымъ иломъ, мергелемъ и другими землями.

§ 3. Почвы и грунты.

Верхній слой земныхъ напластованій, способный къ растительной производительности, называется *почвою*, слой подъ нимъ лежащій называется *грунтами*.

Грунтами бываютъ для горныя породы или вышеописанныя землистыя напластованія, за исключеніемъ чернозема, который обыкновенно встрѣчается въ верхнемъ слое т. е. въ почвѣ. Главнѣйшіе виды почвъ суть слѣдующіе:

1) *Почвы глинистыя*, состоящія изъ глины съ болѣе или менѣе значительными примѣсями песку.

2) *Почвы песчаныя*, состоящія изъ песку (замѣтной крупности) съ примѣсями глинистаго ила. При чрезвычайно мелкихъ зернахъ песку, почвы эти называются *подзолистыми*.

Между глинистыми и песчаными почвами есть весьма много почвъ переходныхъ, приближающихся то къ глинистымъ, то къ песчанымъ почвамъ и носящихъ названія *суглинковъ* и *супесковъ*.

3) *Почвы известковыя*—всѣ предъидущіе виды почвъ съ замѣтнымъ содержаніемъ углекислой извести (не менѣе 3%).

Между ними различаются: почвы мѣловыя, содержащія известь въ видѣ мѣла (свыше 20%); почвы известковыя, содержащія известь въ видѣ зеренъ известняка (свыше 20%).

Почвы, содержащія менѣе 15—20% углекислой извести, называются мергельными.

4) *Почвы черноземныя*—всѣ предъидущіе виды почвъ, содержащія въ себѣ примѣси чернозема (въ количествѣ отъ 2 до 15%).

и 5) *Почвы торфяныя*—смѣси торфа съ землистыми веществами.

§ 4. Свойства земель по отношенію къ водѣ.

Свойства земель, т. е. землистыхъ грунтовъ и почвъ по отношенію къ водѣ опредѣляются свойствами главнѣйшихъ матерьяловъ, входящихъ въ ихъ составъ: глины и песку.

Пористость глины и песку.

Частицы глинозема, какъ извѣстно, чрезвычайно мелки и обладаютъ чувствительною силою сдѣвленія, прилипанія; частицы же песку вообще гораздо крупнѣе и вовсе не обнаруживаютъ проявленія этой силы; поэтому, въ физическомъ отношеніи, глина представляетъ собою тѣло твердое, мелкозернистое; песокъ же представляетъ собою тѣло сыпучее, состоящее изъ болѣе или менѣе крупныхъ зеренъ, прямо лежащихъ другъ на другѣ.

Промежутки между частицами глины, вслѣдствіе малости самыхъ частицъ, крайне многочисленны и окружены чрезвычайно тонкими стѣнками, которыя подъ вліяніемъ давленія на массу глины легко

сдвигаются и сминаются, а потому глина обладает способностью болѣе или менѣе сплотняться подѣ вліяніемъ давленія.

Промежутки между лежащими другъ на другѣ и упирающимися другъ въ друга зернами песку гораздо крупнѣе и подѣ вліяніемъ давленія, не превосходящаго сопротивленія зеренъ песка раздробленію, не могутъ уменьшаться; по этому масса песку, достигшая подѣ вліяніемъ сотрясеній и подѣ дѣйствіемъ просачивающейся черезъ нее воды или при постепенномъ осажденіи изъ воды нѣкотораго предѣльнаго сплотненія, т. е. возможно плотнаго расположенія зеренъ, уже не обладаетъ способностью дальнѣйшаго сплотненія подѣ вліяніемъ механическаго давленія.

Пористость, т. е. общій объемъ пустотъ въ единицѣ объема массы, гораздо меньше въ глинѣ, чѣмъ въ пескѣ. Это представляется прямымъ слѣдствіемъ мелкозернистаго сложенія глины и можетъ быть доказано какъ простымъ сравненіемъ удѣльныхъ вѣсовъ частицъ глины и песку и плотностей массъ глины и песку, такъ и непосредственнымъ сравнительнымъ вычисленіемъ пористостей глины и песку.

Удѣльный вѣсъ частицъ:

Глины приблизительно	$\delta = 2,6$
Песку „	$\delta' = 2,75$

Между тѣмъ *всѣ 1 куб. с.:*

Песку крупнаго сухаго составляетъ.	815 нудовъ.
„ мелкаго влажнаго	1150 „
Жидкаго ила (въ видѣ грязн) . .	725 „
Обсохшаго, слежавшагося ила . . .	970 „
Иловато-песчаной глины	1000—1150 „
Плотнаго песчано-глинистаго грунта	1600 „

Изъ этихъ цифръ видно, что вѣсъ единицы объема плотныхъ глинистыхъ земель несравненно больше вѣса единицы объема самыхъ плотныхъ песчаныхъ земель не смотря на то, что удѣльный вѣсъ частицъ глины меньше удѣльнаго вѣса частицъ песку, а отсюда слѣдуетъ, что объемъ пустотъ въ единицѣ объема массы плотныхъ глинистыхъ земель т. е. пористость плотныхъ глинистыхъ земель значительно меньше пористости песчаныхъ земель.

Для сравнительнаго вычисленія пористостей можетъ служить весьма просто выводимая формула пористости.

$$C = 1 - \frac{g}{\delta p} = \frac{\delta p - g}{\delta p}$$

гдѣ C —пористость, т. е. объемъ пустотъ въ единицѣ объема массы.

g —вѣсъ единицы объема массы.

δ —удѣльный вѣсъ частицъ массы.

p —вѣсъ единицы объема воды, удѣльнаго вѣса=1.

Беря по Дебову:

для глины, содержащей 10% песку

$$\left. \begin{array}{l} \delta p = 2600 \\ g = 1600 \end{array} \right\} \text{ килогр. въ 1 куб. метрѣ.}$$

и для песку

$$\left. \begin{array}{l} \delta p = 2750 \\ g = 1400 \end{array} \right\} \text{ килогр. въ 1 куб. метрѣ.}$$

получимъ пористость

$$\text{глины } C = \frac{2600 - 1600}{2600} = \text{около } 0,4$$

$$\text{песку } C_1 = \frac{2750 - 1400}{2750} = \text{около } 0,5$$

т. е. что пористость глины составляетъ $\frac{4}{5}$ пористости песку.

Такъ какъ число поръ въ единицѣ объема глины гораздо больше, чѣмъ число поръ въ такой же единицѣ объема песку, и пористость глины значительно меньше пористости песка, то поры глины имѣютъ значительно меньшіе діаметры, чѣмъ поры песка.

Это обстоятельство, какъ мы увидимъ ниже, влечетъ за собою существенныя различія въ нѣкоторыхъ свойствахъ глины и песку по отношенію къ водѣ.

Водопропускная способность глины и песку.

Поры тѣлъ, какъ извѣстно, представляютъ собою нѣкотораго рода волосные сосуды, а потому къ уясненію вопросовъ движенія воды въ пористыхъ тѣлахъ, другими словами, для выясненія водопропуск-

ныхъ способностей пористыхъ тѣлъ, можетъ быть примѣнена слѣдующая, данная Гагеномъ и подтвержденная многими физическими опытами, формула движенія воды въ волосныхъ сосудахъ:

$$Q = K \frac{h}{l} d^4$$

гдѣ Q — расходъ воды въ 1'',

h — гидростатическое давленіе, напоръ,

l — длина

d — діаметръ

{ волоснаго сосуда

K — нѣкоторый сложный коэффициентъ, зависящій отъ сопротивленія движенію и температуры воды.

Изъ этой формулы мы прямо видимъ, что водопрopusкная способность глины, сравнительно съ пескомъ, вслѣдствіе значительно меньшаго діаметра поръ глины, должна быть значительно меньше; и дѣйствительно, она на столько мала, что въ практикѣ глина считается совершенно водонепроницаемою для напорной воды.

Для изслѣдованія водопрopusкной способности песку извѣстный французскій инженеръ Дарси примѣнилъ формулу Гагена, измѣненную въ слѣдующемъ видѣ:

$$Q = K \frac{h}{l}$$

гдѣ Q — расходъ воды въ 1'' на единицу площади водопрopusкаго песчанаго слоя.

K — коэффициентъ расхода (водопрopusкной способности) зависящій отъ пористости песку и температуры воды.

h — напоръ воды или высота ея надъ слоемъ песку.

l — толщина слоя.

Изъ опытовъ Дарси оказывается, что для метрическихъ мѣръ и песку, имѣющаго пористость $C = 0,38$, при обыкновенныхъ среднихъ температурахъ воды

$$K = 0,0003.$$

По Дюпон, при тѣхъ-же обстоятельствахъ, для песку, имѣющаго пористость $C = 0,3$.

$K = 0,000052$ т. е. почти въ 6 разъ меньше.

Эти данныя наглядно доказываютъ, какое чувствительное вліяніе имѣетъ пористость на водопропускную способность песка и еще болѣе выясняютъ, почему глина, сравнительно съ пескомъ, непроницаема для напорной воды.

Въ природѣ глинистые пласты представляются пластами водонепроницаемыми, водупорными; пласты-же песчаные — пластами водопрускающими, водоносными, т. е. такими, въ которыхъ вода движется силою тяжести въ направленіи напора или уклона.

Чтобы выяснить себѣ нѣсколько законы движенія воды въ водоносныхъ песчаныхъ слояхъ воспользуемся формулою Дарси въ слѣдующемъ видѣ

$$Q = k \times a \times b \times \frac{h}{l} = k \times a \times b \times i$$

гдѣ h — напоръ, паденіе слоя.

l — длина слоя

и $i = \frac{h}{l}$ — уклонъ слоя.

k — коефіціентъ водопрпускнуѣ способности.

a — толщина слоя, занятая движущеюся водою.

b — ширина его въ направленіи нормальномъ уклону (по горизонталѣ).

при $b = 1$

$$Q = k \times a \times i.$$

Изъ этого уравненія мы видимъ:

1) что, при одной и той-же водопрпускнуѣ способности, въ одной и той-же толщинѣ водоноснаго слоя можетъ проходить въ 1 времени тѣмъ больше воды, чѣмъ больше уклонъ.

и 2) что, чѣмъ больше водопрпуская способность и чѣмъ больше уклонъ слоя, тѣмъ меньше будетъ толщина слоя занятая водою при одномъ и томъ-же количествѣ проходящей по слою воды, другими словами, что высокое стояніе почвенныхъ и грунтовыхъ водъ въ водоносныхъ слояхъ зависитъ или отъ слабой ихъ водопрпускнуѣ способности, или отъ слабого ихъ уклона, или въ нѣкоторой степени отъ той и другой причины вмѣстѣ и вообще отъ того, что количество проходящей по слою воды велико сравнительно съ водопрпусковыми способностями слоя.

Волосность глины и песку.

Изъ физики намъ извѣстно, что волосность проявляется тѣмъ съ большею силою, чѣмъ діаметръ сосуда меньше. По этому въ глиня, обладающей, сравнительно съ пескомъ, порами значительно меньшаго діаметра, волосность проявляется съ значительно большею силою, чѣмъ въ песокѣ. Служащая мѣрою силы волосности, высота поднятія воды въ порахъ глинистыхъ и песчаныхъ земель выражается слѣдующими цифрами:

въ земляхъ песчаныхъ, въ зависимости отъ примѣси	
глины.	отъ $\frac{1}{3}$ до 1 фута.
въ земляхъ песчано-глинистыхъ	„ 1,5 „
въ глинахъ	„ 2,5 „

Такъ какъ глина въ физическомъ отношеніи представляетъ собою тѣло твердое, то вода, просачивающаяся въ нее силою волосности, производитъ въ ней, какъ и въ другихъ твердыхъ тѣлахъ значительное сжатіе, находящагося въ порахъ, воздуха, причемъ силою давленія сжатого воздуха частицы глины раздвигаются — глина *разбухаетъ* (увеличивается въ объемѣ) и разбуханіе это можетъ имѣть предѣломъ своимъ полное разъединеніе, разжиженіе массы глины до состоянія жидкаго ила въ видѣ грязи.

Такимъ образомъ, глина, непроницаемая для напорной воды, т. е. не пропускающая воду подѣ давленіемъ, пропускаетъ и впитываетъ ее подѣ вліяніемъ силы волосности; но чтобы вода проходила въ глину силою волосности необходимо, чтобы поверхность глины не смачивалась обильно водою, а тѣмъ болѣе не была подѣ напоромъ воды. При обильномъ смачиваніи водою поверхность глины покрывается жидкою илистою грязью (отъ растворенія поверхностнаго слоя), которая препятствуетъ проявленію силы волосности и дальнѣйшему проникновенію воды въ массу глины.

Кромѣ сего, поры глины представляютъ собою, по всей вѣроятности, волосные сосуды съ мѣстными суженіями и расшпреніями, т. е. обладаютъ такъ называемою раздробленною волосностью, въ силу которой глина, смоченная съ поверхности водою, не пропускаетъ чрезъ себя воздуха и газовъ вообще подѣ самыми большими давленіями.

Вслѣдствіе описанныхъ волосныхъ свойствъ глины, сильныя дожди, падающіе на ея поверхность, растворяютъ и смываютъ лишь поверхностный тонкій слой ея; мелкіе же, упорные, продолжительные дожди, падая на поверхность глины, впитываются въ нее и насыщаютъ массу глины водою на болѣе или менѣе значительную глубину.

Способности глины и песку испарять воду.

Способность земель испарять содержащуюся въ ихъ массѣ воду прямо и непосредственно связана съ присущими имъ свойствами волосности: вода, испаряющаяся съ ихъ поверхности, возобновляется притокомъ изнутри массы, который происходитъ силою волосности.

Поэтому глина, обладающая (сравнительно съ пескомъ) наибольшею силою волосности, обладаетъ въ тоже время и наибольшею способностью испаренія, содержащейся ею воды, т. е. способностью высыхания на значительную глубину, причемъ съ потерей воды уменьшается въ объемѣ; песокъ же, обладающій слабою силою волосности, обладаетъ и слабою способностью испаренія.

Способности глины и песку поглощать воду и примѣси къ ней.

Каждое тѣло, пропускающее въ себя воду силою тяжести или силою волосности обладаетъ способностью отчасти удерживать въ себѣ какъ воду, такъ и содержащіяся ею примѣси; способность эта называется способностью *поглощенія* и проявляется тѣмъ сильнѣе, чѣмъ поры тѣла мельче, т. е. чѣмъ больше отношеніе периметра поръ къ ихъ живому сѣченію, а слѣд. чѣмъ медленнѣе происходитъ циркуляція воды и чѣмъ сильнѣе проявляются частичныя силы притяженія между веществомъ тѣла и водою.

Глина поэтому обладаетъ наибольшею поглощательною способностью; песокъ же наименьшею. Такъ, глина задерживаетъ почти всю массу проникающей въ нее воды и отнимаетъ отъ циркулирующей черезъ нее воды не только тончайшія механическія примѣси, но даже микроорганизмы и вещества, растворенныя въ водѣ; песокъ же почти вовсе не удерживаетъ проникшей въ него воды, вмѣстѣ съ водою пропускаетъ чрезъ себя такія тѣла, какъ разбухшія зерна крахмала, глинистую муть и отнимаетъ отъ циркулирующей

чрезъ него воды лишь болѣе или менѣе крупныя, механическія примѣси.

Впрочемъ; способность поглощенія зависитъ еще отъ частичныхъ силъ притяженія присущихъ самому веществу тѣла; это особенно ярко обнаруживается въ значительной поглощательной способности угольного порошка, чернозема, торфа и нѣкоторыхъ другихъ веществъ.

По этому нельзя отрицать, что чувствительная разница въ поглощательныхъ способностяхъ глины и песку обусловливается не только механическими особенностями ихъ строенія, но и различными частичными свойствами зеренъ глинозема и песку.

Кромѣ сего поглощательныя способности земель зависятъ отъ толщины ихъ слоя, фильтрующаго воду; чѣмъ больше толщина фильтрующаго слоя, тѣмъ поглощательныя свойства его больше.

Свойства смѣшанныхъ земель по отношенію къ водѣ.

Всѣ описанныя свойства глины и песку по отношенію къ водѣ, въ крайнихъ своихъ предѣлахъ, принадлежать чистой плотной глинѣ и чистому крупнозернистому песку, въ земляхъ-же смѣшанныхъ онѣ умѣряются и видоизмѣняются:

во 1) въ зависимости отъ пропорцій, въ которой смѣшаны эти два главныхъ матерьяла;

во 2) въ зависимости отъ большей или меньшей крупности зеренъ песку и большаго или меньшаго сплотненія глинистыхъ частицъ;

и въ 3) подъ вліяніемъ примѣсей извести, чернозема и торфа.

Изъ вышевыясненной зависимости свойствъ глины и песку отъ ихъ механическаго строенія дѣлается совершенно понятнымъ, какое вліяніе можетъ оказать на свойства глины примѣсь песку и наоборотъ, какое вліяніе на свойства песка можетъ имѣть большая или меньшая крупность его зеренъ и какое вліяніе можетъ имѣть на свойства глины большая или меньшая степень ея сплотненія; а потому намъ остается только пояснить значеніе въ этомъ отношеніи примѣсей извести, чернозема и торфа.

Известковыя примѣси, смотря по составу своему, могутъ играть роль или примѣсей аналогичныхъ съ пескомъ—если онѣ представляютъ собою нерастворимыя въ водѣ зерна; или же примѣсей це-

ментирующихъ, аналогичныхъ съ глинистымъ яломъ, если онѣ представляютъ собою соединенія растворимыя въ водѣ.

Черноземъ и торфъ, какъ вещества рыхлыя, изобилующія растительнымъ углемъ, съ одной стороны имѣютъ значеніе примѣсей разрыхляющихъ, увеличивающихъ водопроницающую способность; съ другой—значеніе примѣсей, увеличивающихъ поглощательную способность.

§ 5. Послѣдствія свойствъ земель по отношенію къ водѣ.

Выясненные нами свойства земель по отношенію къ водѣ имѣютъ слѣдующія послѣдствія:

Ни чистая глина, ни чистый песокъ не могутъ быть культурными землями; требованіямъ культуры могутъ удовлетворять лишь нѣкоторыя среднія смѣси глины, песку и другихъ примѣсей; при чемъ мѣропріятія по регулированію обводненія съ культурными цѣлями въ глинистыхъ земляхъ должны по возможности способствовать ихъ разрыхленію: въ земляхъ же песчаныхъ, напротивъ, должны по возможности не оказывать этого вліянія.

Въ санитарномъ отношеніи при благопріятномъ обводненіи наилучшими землями представляются глубокія песчаныя земли, наименѣе — глинистыя.

Песокъ, вслѣдствіе отсутствія сцепленія между частицами, обладаетъ слабою устойчивостью массы, но, при извѣстныхъ условіяхъ, прекрасно сопротивляется механическому давленію и, будучи огражденъ только отъ размывающаго дѣйствія воды, т. е. отъ перемѣщенія частицъ силою теченія воды, обладаетъ почти абсолютною неизмѣняемостью присущихъ ему свойствъ устойчивости массы и сопротивленія давленію, а потому представляется землею весьма хорошею въ строительномъ отношеніи.

Глина и глинистыя земли, содержація въ себѣ лишь гигроскопическую воду, обладаютъ свойствомъ значительной устойчивости массы и весьма хорошо сопротивляются механическому давленію, но подъ вліяніемъ воды, проникающей въ нихъ силою капиллярности, т. е. подъ такимъ вліяніемъ, которое во многихъ случаяхъ не можетъ быть предотвращено совершенно, измѣняютъ свои свойства устойчивости и сопротивленія давленію. Измѣняемость этихъ свойствъ глины и глинистыхъ земель прямо зависитъ отъ нами выясненной способности

глины впитывать въ себя силою волосности значительное количество воды, разбухать и растворяться.

Послѣдствія этихъ свойствъ глины, вредныя въ строительномъ отношеніи, еще болѣе усиливаются подѣ влияніемъ періодическаго ея промерзанія и оттаянія. При промерзаніи, глина, содержащая въ себѣ воду, еще болѣе разбухаетъ (пучится), а при послѣдующемъ оттаяніи еще болѣе впитываетъ въ себя воду и еще болѣе разжижается и растворяется.

Эти свойства глины называются въ строительной практикѣ „*пучистыми свойствами*“ и проявляются тѣмъ съ большею силою, чѣмъ глина слабѣе, иловатѣе. Примѣси песку, хряща и другихъ веществъ не уменьшаютъ пучистыхъ свойствъ глины; напротивъ, примѣсь иловатой глины ко всѣмъ другимъ землямъ дѣлаетъ эти земли пучистыми.

Неблагопріятныя свойства глинистыхъ земель въ строительной практикѣ выражаются слѣдующими явленіями:

- а) образованіемъ пучинъ въ полотнѣ дорогъ;
- б) сплывами и сползаніемъ (сдвигами) земляныхъ откосовъ;
- в) выпираниемъ вверхъ изъ земли легкихъ сооружений, не глубоко заложенныхъ основаніями;
- и г) опрокидываніемъ и сдвигами подпорныхъ стѣнокъ.

Со всѣми этими явленіями приходится бороться разными мѣрами и въ томъ числѣ мѣрами осушенія.

ГЛАВА 2-я.

§ 1. Круговоротъ воды въ природѣ.

Моря и большія озера занимаютъ около $\frac{3}{4}$ всей поверхности земнаго шара и представляютъ собою, такъ сказать, запасной водоемъ земной воды, исходный и конечный пунктъ круговорота ея въ природѣ.

Вода, испаряющаяся съ ихъ поверхности въ атмосферу, въ ней сгущается, ниспадаетъ на землю въ видѣ разныхъ атмосферныхъ осадковъ и къ нимъ же вновь возвращается частью потоками по поверхности земли, частью подземными путями. Явленія круговорота воды въ природѣ составляютъ собственно предметъ гидрологіи, но наука эта еще находится въ періодѣ зарожденія.

§ 2. Количество атмосферных осадковъ.

Количество атмосферныхъ осадковъ, выпадающихъ въ разныхъ мѣстностяхъ и въ разныя времена года зависитъ отъ условій климатическихъ, топографическихъ и гидрографическихъ.

Годовое количество выпадающей влаги при одинаковыхъ условіяхъ больше:

- 1) въ странахъ жаркихъ, чѣмъ въ холодныхъ;
- 2) въ странахъ приморскихъ (въ особенности при существованіи теплыхъ морскихъ вѣтровъ и теченій), — чѣмъ въ континентальныхъ;
- и 3) въ странахъ гористыхъ (въ особенности на скатахъ горъ) — чѣмъ въ мѣстностяхъ ровныхъ.

Количество дождя, выпадающее въ наиболѣе дождливый мѣсяцъ — больше въ тѣхъ мѣстностяхъ, гдѣ общее годовое количество выпадающей влаги больше.

Ливни бываютъ сильнѣе и продолжительнѣе вообще въ странахъ, отличающихся изобиліемъ выпадающей влаги, случаются во время жаровъ и чаще бываютъ въ странахъ жаркихъ.

Количество выпадающей влаги измѣряется высотой слоя воды, образующагося изъ атмосферныхъ осадковъ въ особомъ приборѣ, называемомъ *плювиометромъ* (дождемѣромъ).

При осушеніи и орошеніи земель бываетъ необходимо знать:

- 1) Слой годоваго количества выпадающей влаги въ данной мѣстности.
- 2) Слой выпадающей влаги въ ней въ самый дождливый въ году мѣсяцъ.
- 3) Наибольшій слой воды, даваемый въ 1 секунду самымъ сильнымъ ливнемъ, возможнымъ въ данной мѣстности.
- 4) Наибольшій слой воды, даваемый въ 1 секунду обыкновеннымъ самымъ большимъ дождемъ въ данной мѣстности.

Во всѣхъ цивилизованныхъ странахъ міра въ настоящее время производятся метеорологическія наблюденія въ болѣе или менѣе широкихъ размѣрахъ и издаются свѣдѣнія объ атмосферныхъ осадкахъ; но свѣдѣнія эти, удовлетворяющія общимъ научнымъ задачамъ, не всегда бываютъ достаточны для мѣстныхъ практическихъ цѣлей и ихъ приходится дополнять мѣстными спеціальными наблюденіями.

Какимъ образомъ слѣдуетъ пользоваться метеорологическими дан-

ными для практических цѣлей будетъ объяснено ниже, здѣсь же мы приведемъ лишь нѣкоторыя метеорологическія свѣдѣнія для общей характеристики явленія атмосферныхъ осадковъ.

Примѣромъ мѣстности крайняго изобилія атмосферныхъ осадковъ могутъ служить южные склоны Гималайскихъ горъ, гдѣ высота выпадающаго слоя воды въ годъ составляетъ 12,5 метровъ (41 футъ), а примѣромъ крайней бѣдности атмосферными осадками могутъ служить: Сахара, Нубія и Верхній Египетъ, гдѣ иногда 5—6 лѣтъ сряду проходятъ безъ дождя.

Высота годового слоя выпадающей влаги составляетъ:

въ степяхъ Средней Азіи.	0,19 метр.
въ Европ. Россіи около	0,5 м. (20 д.).

Слой воды, выпадающій въ 1 самый дождливый мѣсяцъ въ Европейской Россіи составляетъ въ среднемъ около . 0,06 м. (2¹/₂ д.).

Самый большой изъ извѣстныхъ ливней былъ въ 1822 г. въ Генуѣ и въ 24 часа далъ слой воды въ 0,84 м.

Самый сильный изъ извѣстныхъ ливней въ Россіи былъ въ 1882 г. (30 іюня) въ Тульской губ.; ливень этотъ далъ въ теченіи 16 часовъ слой воды въ 0,1455 метр. (около 5,8 д.) и наибольшую интенсивность (силу) имѣлъ въ теченіи 4 часовъ, давая слой воды около 0,000008 метр. въ 1".

Самый сильный ливень въ Парижѣ, по Кестлингу, продолжался всего 10 мин. и давалъ слой въ 0,000016 мет. воды въ 1 сек.

Обыкновенные самые большіе дожди Европейской Россіи въ теченіи 24 час. даютъ слой воды:

Въ Центральныхъ губ. не болѣе.	0,04 м. (1 ¹ / ₂ д.)
у береговъ Балтійскаго м. не болѣе.	0,07 м. (2 ³ / ₄ д.)
и въ среднемъ около	0,02 м. (3 ¹ / ₄ д.).

§ 3. Испареніе воды.

Высота слоя воды, испаряющагося въ извѣстный промежутокъ времени зависитъ отъ температуры и, главнѣйшимъ образомъ, отъ влажности воздуха въ которомъ происходитъ испареніе.

По наблюденіямъ во Франціи годовоі слой испаренія съ поверхности воды составляетъ максимумъ—2,5 мет. (въ Марсели) и минимумъ—0,6 мет. (на Бургонскомъ каналѣ).

По временамъ года испареніе съ поверхности воды измѣняется слѣдующимъ образомъ: наибольшее испареніе бываетъ весною и лѣтомъ (съ Апрѣля по Сентябрь) и составляетъ отъ $\frac{2}{3}$ до $\frac{3}{4}$ всего годового слоя, а наименьшее—осенью и зимою (съ Октября по Мартъ) и составляетъ отъ $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{4}$ годового слоя.

Испареніе воды съ поверхности земель, непокрытыхъ растеніями, зависитъ отъ водопропускной способности земель, ихъ волосныхъ и поглощательныхъ свойствъ, но еще въ большей степени—отъ температуры и влажности воздуха, въ которомъ происходитъ испареніе.

Такъ, по опытамъ въ Англіи оказывается, что одніѣ и тѣ-же дренированныя земли изъ поступающаго на увлажненіе ихъ слоя воды въ Январѣ—впитываютъ 60%, испаряютъ 40%; въ Іюлѣ-же впитываютъ 2% и испаряютъ 98%.

Почвы, покрытыя растительностью, находятся совершенно въ другихъ условіяхъ испаренія, а именно: части ихъ, не занятая растеніями, находясь подъ защитою растеній отъ лучей солнца и токовъ сухаго воздуха, испаряютъ воды меньше, чѣмъ почвы открытыя; части же ихъ, занятая растеніями, даютъ растеніямъ воду, необходимую не только для ихъ питанія, но и для испаренія съ поверхности ихъ стволовъ, вѣтвей и листьевъ, т. е. отдаютъ воду въ большемъ количествѣ, чѣмъ части не занятая растеніями.

Выяснить отдѣльно, какое количество воды испаряется собственно почвою, какое растеніями и какое идетъ собственно на питаніе растеній, не представляется еще возможнымъ; но общій расходъ воды изъ почвъ, покрытыхъ растеніями, по французскимъ даннымъ, приблизительно выражается слѣдующими цифрами:

Почвы расходуютъ въ 1 сутки:

подъ луговыми травами	слой воды отъ	3	„	7 м.м.
„ хлѣбными растеніями	„ „ „	2,8	„	5 м.м.
„ виноградомъ	„ „ „	0,9	„	1,3 м.м.
„ лѣсомъ хвойнымъ и дубовымъ	„ „ „	0,5	до 1,1	м.м.

§ 4. Вода, просачивающаяся въ землю и стекающая по земной поверхности.

Въ общемъ круговоротѣ воды на земномъ шарѣ изъ выпадающаго на землю слоя атмосферныхъ осадковъ— $\frac{1}{3}$ испаряется, $\frac{1}{3}$ просачи-

вается въ землю и $\frac{1}{3}$ стекаетъ по земной поверхности, но эта общая средняя пропорція распредѣленія воды между испареніемъ, просачиваніемъ въ землю и стокомъ въ различныхъ мѣстностяхъ и въ разные времена года далеко не сохраняется уже по одной той причинѣ, что испареніе воды съ поверхности земли бываетъ, въ зависимости отъ мѣстныхъ условій, весьма разнообразно.

Просачиваніе воды въ землю происходитъ или силою тяжести, или силою волосности и вообще идетъ весьма медленно, сравнительно со скоростью движенія воды по земной поверхности, и тѣмъ медленнѣе, чѣмъ водопроницаемость земли меньше.

Поэтому, изъ выпавшаго на землю слоя воды тѣмъ меньшая часть успѣваетъ просочиться въ землю, чѣмъ скорѣе вода удаляется съ ея поверхности стокомъ и испареніемъ и чѣмъ меньше водопроницаемость верхняго слоя земли, почвы.

Просочившаяся въ почву вода спускается далѣе въ нижележащіе грунтовые слои тѣмъ въ меньшемъ количествѣ, чѣмъ водопроницаемость этихъ слоевъ меньше и чѣмъ скорѣе почва расходуетъ воду испареніемъ и на питаніе растеній.

Растенія вообще замедляютъ стокъ воды и непосредственное испареніе ея съ поверхности земли, а потому способствуютъ просачиванію воды въ почву; но въ тоже время, отнимая отъ почвы воду для собственнаго питанія и испаренія, они иногда уменьшаютъ просачиваніе воды изъ почвы въ грунтовые слои.

Если увеличеніе влаги въ почвѣ, вызываемое растеніями, равняется потребностямъ ихъ питанія и испаренія, то растенія не оказываютъ никакого вліянія на количество воды, просачивающейся въ грунтъ; если увеличеніе влаги въ почвѣ, вызываемое растеніями, превосходитъ потребности ихъ питанія и испаренія, то растенія являются дѣятелями, увеличивающими количество просачивающейся воды въ грунтъ; если-же, наоборотъ, увеличеніе влаги въ почвѣ, вызываемое растеніями, меньше потребностей ихъ питанія и испаренія, то растенія оказываютъ осушающее вліяніе какъ на почву, такъ и на ниже ея лежащіе грунтовые слои.

Итакъ, растенія оказываютъ опредѣленное вліяніе лишь на количество стекающей воды съ земной поверхности: уменьшаютъ его; на влажность же почвы и на количество воды просачивающейся подъ почву, въ грунтъ, оказываютъ самыя разнообразныя вліянія,

что зависеть какъ отъ породы и свойствъ самыхъ растеній, такъ и отъ мѣстныхъ условій.

Вода, просачивающаяся подъ почву, въ грунтовые слои, имѣетъ весьма важное значеніе въ томъ отношеніи, что спускаясь постепенно внизъ до слоевъ водоупорныхъ, водонепроницаемыхъ, она насыщаетъ собою лежащіе на нихъ водоносные слои и, двигаясь въ направленіи ихъ уклоновъ достигаетъ пониженныхъ точекъ земной поверхности, въ которыхъ и выбивается внаружу въ видѣ подземныхъ источниковъ, ключей, питающихъ водою озера, болота и рѣки.

Изъ всего сказаннаго мы видимъ, что количество воды, просачивающейся въ землю въ каждой мѣстности, зависитъ отъ водопроницаемости почвъ и грунтовъ ея, отъ крутизны поверхностныхъ ея скатовъ, отъ качества, количества и распредѣленія въ ней растительности и вообще отъ столькихъ сложныхъ и разнообразныхъ условій, что установить какія нибудь рациональныя начала для опредѣленія его не представляется возможности.

По земной поверхности стекаетъ лишь та часть атмосферныхъ осадковъ, которая не успѣваетъ просочиться въ землю и испариться, а потому размѣръ этой части въ каждой мѣстности зависитъ отъ тѣхъ-же сложныхъ и разнообразныхъ условій, отъ которыхъ зависятъ испареніе воды и просачиваніе ея въ почву; тѣмъ не менѣе количество атмосферныхъ осадковъ, стекающее въ разныхъ мѣстностяхъ по земной поверхности, поддается нѣкоторымъ общимъ наблюденіямъ и измѣреніямъ.

Зная количество воды, протекающей въ 1 секунду, т. е. расходъ воды, въ главной рѣкѣ или въ главномъ ручѣ данной мѣстности при отсутствіи атмосферныхъ осадковъ, мы можемъ опредѣлить то приращеніе расхода воды въ нихъ, которое происходитъ при выпаденіи въ ихъ бассейнахъ извѣстнаго слоя атмосферныхъ осадковъ; это приращеніе даетъ намъ цифру количества атмосферныхъ осадковъ, стекающего по поверхности бассейна къ данному его пункту.

Раздѣливъ это количество на площадь бассейна, питающую данный пунктъ, мы получимъ высоту той части выпавшаго слоя атмосферныхъ осадковъ, которая во время наблюденія стекала по поверхности бассейна, а слѣдовательно можемъ опредѣлять какая часть выпадающаго въ данномъ бассейнѣ слоя въ извѣстное время стекаетъ по поверхности бассейна къ питаемому имъ конечному пункту

Такого рода наблюденіями, произведенными въ нѣкоторыхъ мѣстностяхъ, выяснено, что величина слоя воды, стекающаго по поверхности бассейновъ къ питаемымъ ими конечнымъ пунктамъ, зависятъ не только отъ водопроницаемости и влажности почвъ и грунтовъ бассейновъ, крутизны ихъ скатовъ, влажности воздуха, количества, качества и распредѣленія въ нихъ растительности, но и отъ площади бассейна.

Чѣмъ площадь бассейна больше, т. е. чѣмъ длиннѣе путь прохожденія воды, тѣмъ количество воды, достигающее конечнаго пункта бассейна меньше, потому что тѣмъ большее количество воды по пути теченія теряется испареніемъ и просачиваніемъ въ почву.

Для небольшихъ бассейновъ площадью до 1 квадратной версты можно принимать, что количество воды, стекающей съ ихъ поверхности къ питаемымъ ими конечнымъ пунктамъ, находится между предѣлами отъ $\frac{1}{3}$ до $\frac{2}{3}$ высоты выпадающаго на нихъ слоя дождя.

Въ большихъ же бассейнахъ замѣчается, что при слабыхъ поверхностныхъ скатахъ и большомъ протяженіи бассейна, время, потребное для прохожденія отъ самыхъ отдаленныхъ пунктовъ его къ конечному, бываетъ больше времени продолжительности ливней (дождей), дающихъ наибольшее количество воды, и что по сему наибольшій расходъ воды въ конечномъ пунктѣ бассейна бываетъ меньше полнаго количества той части воды ливня, которая стекаетъ въ 1' со всей площади бассейна.

На основаніи наблюденій, это доказывающихъ, можно принимать, что наибольшіе расходы воды отъ ливней въ питаемыхъ большими бассейнами конечныхъ пунктахъ, при площадяхъ бассейновъ отъ 1 до 5 □ верстъ, въ мѣстностяхъ ровныхъ, холмистыхъ и гористыхъ относятся между собою какъ 1 : 3 : 4 и что при площадяхъ бассейновъ отъ 5 до 10 кв. верстъ они уменьшаются въ пропорціи.

$$\begin{array}{ll} \text{для мѣстностей ровныхъ} & = \frac{2}{3} : 1 \\ \text{„ „ холмистыхъ} & = \frac{2}{3} : 1 \\ \text{„ „ гористыхъ} & = \frac{3}{4} : 1 \end{array}$$

Полагая при этомъ, что въ гористой мѣстности, во время наименьшей потери воды просачиваніемъ въ почву и испареніемъ, наибольшій расходъ воды въ 1" въ конечномъ пунктѣ бассейна площадью отъ 1 до 5 кв. верстъ можетъ быть равенъ половинѣ слоя воды,

даваемого ливнемъ въ 1" на всю площадь бассейна и обозначая: площадь бассейна чрезъ A и всю высоту слоя даваемого ливнемъ въ 1" чрезъ h , получимъ слѣдующія выраженія для наибольшихъ расходовъ поверхностной воды въ 1" въ конечныхъ пунктахъ бассейна.

при площадяхъ бассейновъ отъ 1—5 кв. в.

въ мѣстностяхъ ровныхъ	$q_1 = \frac{1}{4} \times \frac{1}{2} \times h \times A = \frac{1}{8} h A$
" " холмистыхъ	$q_2 = \frac{3}{4} \times \frac{1}{2} \times h \times A = \frac{3}{8} h A$
" " гористыхъ	$q_3 = \frac{1}{2} \times h A$

при площадяхъ бассейновъ 5—10 кв. в.

въ мѣстностяхъ ровныхъ	$q_1' = \frac{3}{5} q_1 \frac{3}{40} h A$
" " холмистыхъ	$q_2'' = \frac{2}{3} q_2 \frac{1}{4} h A$
" " гористыхъ	$q_3''' = \frac{3}{4} q_3 \frac{3}{8} h A$

ОТДѢЛЪ II.

Осушеніе земель.

ГЛАВА 1.

§ 1. Общее экономическое значеніе землеосушительныхъ работъ.

Землеосушительными работами достигается или улучшеніе земледѣльческихъ, санитарныхъ и строительныхъ условій земли или увеличеніе полезной, производительной ея площади; поэтому можно сказать, что землеосушительныя работы вообще способствуютъ увеличенію богатствъ и производительныхъ силъ страны; но съ другой стороны работами этими нарушается естественный ходъ круговорота воды въ природѣ и, въ этомъ отношеніи, они могутъ имѣть нежелательныя послѣдствія.

Рѣки, какъ извѣстно, представляютъ собою неизбѣжныя звѣнья того пути, по которому совершается круговоротъ воды въ природѣ: принимая воду атмосферныхъ осадковъ путями наземными и подземными, онѣ возвращаютъ ее морямъ и большимъ озерамъ, служащимъ источниками всѣхъ атмосферныхъ осадковъ и запасными водоемами всей земной воды.

То состояніе рѣкъ, въ которомъ онѣ питаются лишь водами подземныхъ источниковъ (ключей) называется *меженнымъ*; состояніе же ихъ, въ которомъ онѣ получаютъ не только воду подземную, но и воду атмосферныхъ осадковъ, стекающую по земной поверхности, называется состояніемъ *паводковъ*, *половодья*.

Общее количество водъ, поступающихъ въ каждую рѣку въ теченіи года, зависитъ отъ площади ея бассейна и свойственныхъ ему метеорологическихъ условій; распредѣленіе же этого количества, между меженнымъ и половоднымъ состояніями рѣки, зависитъ отъ климатическихъ, топографическихъ и грунтовыхъ условій бассейна: тѣмъ меньше водопропускная способность и водоемкость почвъ и грунтовъ бассейна, тѣмъ круче скаты и тальвеги его, тѣмъ меньше влажность атмосферы его, тѣмъ меньшая часть атмосферныхъ осадковъ проникаетъ въ нѣдра земли бассейна; тѣмъ слабѣе подземные источники, питающіе рѣку и тѣмъ большая часть атмосферныхъ осадковъ стекаетъ въ рѣку по поверхности земли, а слѣдовательно тѣмъ бѣднѣе рѣка водою въ межень и тѣмъ сильнѣе въ ней паводки и наоборотъ.

Отношенія тѣхъ частей атмосферныхъ осадковъ, которые идутъ въ рѣки наземными и подземными путями, между собою и къ общему ихъ количеству въ бассейнѣ, отношенія общаго количества атмосферныхъ осадковъ и его частей, идущихъ разными путями въ рѣки, къ тѣмъ элементамъ, отъ которыхъ они по видимому зависятъ, составляютъ предметъ изученія зарождающейся науки, гидрологіи, и до сего времени въ точности не выяснены и не формулированы; тѣмъ не менѣе представляется совершенно понятнымъ, что нѣкоторыя осушительныя работы должны оказывать вообще серьезное вліяніе на характеръ естественнаго питанія рѣкъ водою, потому что онѣ имѣютъ иногда послѣдствіемъ своимъ ускореніе наземнаго стока водъ къ рѣкамъ и уменьшаютъ количество атмосферныхъ осадковъ, просачивающееся въ нѣдра земли, а слѣд. уменьшаютъ силу ключей, питающихъ рѣки въ межень и увеличиваютъ количество наземныхъ водъ, образующихъ паводки въ рѣкахъ.

Сохраненіе нормальной разницы между расходами воды въ рѣкахъ въ межень и во время паводковъ желательно, какъ для удовлетворенія судоходныхъ потребностей, такъ и для того, чтобы рѣки по возможности менѣе вредили и угрожали опасностью странѣ павод-

ками и наводнениями; поэтому, съ точки зрѣнія государственной экономіи, необходимо не упускать изъ виду возможныхъ вредныхъ послѣдствій осушительныхъ работъ.

Относительно вреднаго значенія, осушительныя работы могутъ быть подраздѣлены на двѣ категоріи: работъ частичныхъ и работъ большихъ. Частичныя осушительныя работы, производящіяся по мѣрѣ нарождающейся въ нихъ потребности съ развитіемъ земледѣлія, при оздоровленіи городовъ и небольшихъ участковъ земель, при устройствѣ дорогъ и т. п., каждая въ отдѣльности не могутъ оказывать какого-либо замѣтнаго неблагопріятнаго вліянія на обводненіе рѣкъ и въ этомъ отношеніи не могутъ быть регулируемы государствомъ; тѣмъ не менѣе, по истеченіи значительныхъ промежутковъ времени, въ общей своей массѣ онѣ оказываютъ существенное вліяніе на обводненіе рѣкъ и, съ увѣренностью, можно сказать, что причину обмеленія европейскихъ рѣкъ въ межень и усиленія наводненій отъ нихъ, на которыя, въ настоящее время, раздаются жалобы, слѣдуетъ искать главнымъ образомъ въ массѣ частичныхъ осушительныхъ работъ, произведенныхъ въ Европѣ въ теченіи текущаго столѣтія.

Большія осушительныя работы, предпринимаемыя сразу на значительныхъ участкахъ земли съ санитарными и культурными цѣлями, какъ напр. осушеніе значительныхъ участковъ болотистыхъ земель и значительныхъ котловинныхъ болотъ, неминуемо могутъ оказывать рѣзкое неблагопріятное вліяніе на обводненіе рѣкъ, получающихъ чрезъ нихъ воду.

Поэтому, задаваясь такими значительными работами, всегда необходимо предварительно выяснить:

1) представляется-ли необходимымъ и желательнымъ съ точки зрѣнія Государственной экономіи достигнуть полного осушенія намѣченной мѣстности, во что бы то ни стало, жертвуя для этого даже существующимъ обводненіемъ прилегающихъ рѣкъ.

и 2) въ какой степени и какимъ способомъ можетъ быть достигнуто осушеніе намѣченной мѣстности, безъ вреда прилегающимъ рѣкамъ.

§ 2. Необходимыя изслѣдованія при осушеніи земель.

При всякомъ осушеніи какой либо мѣстности прежде всего представляется необходимымъ имѣть точныя свѣдѣнія о ея топографиче-

скихъ и гидрографическихъ условіяхъ т. е. свѣдѣнія о горизонтальныхъ и вертикальныхъ очертаніяхъ находящихся въ ней и прилегающихъ къ ней бассейновъ, поверхностныхъ водныхъ скопленій и потоковъ; а если этихъ свѣдѣній не имѣется, то онѣ должны быть добыты изысканіями.

Бассейномъ, какъ извѣстно, называется пространство земли, окруженное непрерывною линіею возвышеній водораздѣла со всѣхъ сторонъ, за исключеніемъ того мѣста, гдѣ поверхностныя воды бассейна имѣютъ свой исходъ. Главный бассейнъ иногда дѣлится второстепенными водораздѣлами на нѣсколько меньшихъ бассейновъ, имѣющихъ каждый свой тальвегъ (водостокъ), доставляющій поверхностную его воду въ главный тальвегъ т. е. тальвегъ главнаго бассейна.

Особенно важно точное изслѣдованіе бассейновъ, водныхъ скопленій и потоковъ, находящихся въ предѣлахъ осушаемой мѣстности; изслѣдованіе это производится съемкою плана, поперечною и продольною нивелировкой мѣстности, причемъ опредѣляется также положеніе низкихъ, среднихъ и высокихъ горизонтовъ воды въ потокахъ и водныхъ скопленіяхъ осушаемой мѣстности и всѣ результаты изслѣдованій выражаются на планѣ мѣстности горизонталями въ томъ масштабѣ, который представляется наиболѣе удобнымъ для проектированія осушительныхъ работъ.

За предѣлами осушаемой мѣстности представляется необходимымъ изслѣдовать главнымъ образомъ тѣ бассейны съ ихъ водными скопленіями и потоками, которые нижними частями своими входятъ въ составъ осушаемой мѣстности или направляютъ истоки свои въ нее; при чемъ изслѣдованіе бассейновъ, за предѣлами осушаемой мѣстности, ограничивается изслѣдованіями ихъ въ планѣ съ приближительнымъ опредѣленіемъ ихъ топографическихъ особенностей.

Имѣя такія свѣдѣнія о топографическихъ и гидрографическихъ условіяхъ мѣстности, подлежащей осушенію, представляется возможнымъ рѣшить вопросы:

Не можетъ ли происходить и не происходитъ-ли затопленіе мѣстности поверхностными водами и отчего затопленіе это происходитъ: отъ находящихся въ мѣстности потоковъ во время ихъ половодья или отъ поверхностныхъ атмосферныхъ водъ выпележащихъ бассейновъ, т. е. вообще отъ водъ постороннихъ? или же отъ собственныхъ

атмосферныхъ водъ мѣстности т. е. отъ того, что выпадающіе въ ней атмосферные осадки не имѣютъ надлежащихъ стоковъ?

Вслѣдъ за топографическими изслѣдованіями мѣстности, подлежащей осушенію, должны идти изслѣдованія почвенныхъ и грунтовыхъ ея условій.

Изслѣдованія эти по своему назначенію и подробностямъ можно подраздѣлять на двѣ категоріи: изслѣдованій пробныхъ, предварительныхъ и изслѣдованій полныхъ, окончательныхъ. Изслѣдованія пробныя, предварительныя, имѣютъ цѣлью дать общее понятіе о качествахъ и о свойствахъ грунтовъ и почвъ мѣстности, о степени ихъ насыщенія водою и выяснить, не происходитъ-ли избытокъ влажности въ осушаемой мѣстности отъ сильнаго притока грунтовыхъ водъ изъ бассейновъ, лежащихъ внѣ данной мѣстности.

Изслѣдованія эти производятся при помощи скважинъ (земляными буравами) или ямъ глубиною до 1 саж., прорываемыхъ прежде всего у границъ подлежащаго осушенію участка въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ онъ не покрытъ водою. Если въ прорытыхъ ямахъ или скважинахъ не обнаруживается признаковъ присутствія подъ почвою напорной грунтовой воды стремящейся выбиться внаружу, а въ низменныхъ точкахъ участка не замѣчается ключей (выбывающихъ изъ земли источниковъ воды); то можно полагать, что избытокъ влажности даннаго участка и застой на немъ воды питаются исключительно поверхностными водами. Въ этомъ случаѣ дальнѣйшія изслѣдованія возвращаются къ изученію поверхностныхъ водъ, затопляющихъ или подтопляющихъ данный участокъ; изслѣдованіе же почвъ и грунтовъ участка посредствомъ прорытія пробныхъ ямъ продолжается настолько, насколько это необходимо для уясненія распредѣленія грунтовъ и почвъ разныхъ качествъ по участку.

Если-же прорытіемъ пробныхъ ямъ или скважинъ обнаруживается присутствіе подъ почвою напорной грунтовой воды и на это указываютъ существующіе ключи, то представляется необходимымъ начать подробныя грунтовыя изслѣдованія.

Изслѣдованія эти прежде всего имѣютъ цѣлью опредѣлить, откуда происходитъ притокъ грунтовыхъ водъ, т. е. въ какомъ направленіи и по какой границѣ участка.

Иногда это можетъ быть выяснено при помощи пробныхъ ямъ; иногда же представляется невозможнымъ опредѣлить откуда и въ ка-

комъ направленіи притекаетъ грунтовая вода въ пробныя ямы. Тогда бываетъ необходимо приступить къ изслѣдованію водоноснаго слоя на всю его толщину, до лежащаго подъ нимъ водонепроницаемаго слоя; этимъ уклономъ и опредѣлится какъ направленіе притока грунтовой воды такъ и тѣ границы участка къ которымъ притекаетъ грунтовая вода извнѣ. Опредѣленіе направленія наибольшаго уклона водонепроницаемаго слоя, лежащаго подъ водоноснымъ, дѣлается при помощи буренія.

Иногда бываетъ необходимымъ опредѣлить не только направленіе притока грунтовыхъ водъ, но и ихъ бассейны.

Опредѣленіе бассейна грунтовыхъ водъ производится также при помощи буренія до водонепроницаемаго слоя; при чемъ буровыя скважины дѣлаются въ нѣкоторомъ болѣе или менѣе значительномъ — одна отъ другой — разстояніи (около 100 с.) вверхъ по направленію линій наибольшихъ уклоновъ водонепроницаемаго слоя до тѣхъ поръ пока не обнаружится склоненіе водонепроницаемаго слоя въ обратную сторону; опредѣленная такимъ образомъ линія перелома уклона водонепроницаемаго слоя въ обратную сторону представить собою водораздѣлъ, верхнюю границу, подземнаго воднаго бассейна.

На ряду съ выясненіемъ общихъ причинъ затопленія или избытка влажности даннаго участка земли представляется необходимымъ опредѣлять количество водъ, подлежащихъ отведенію.

Воды эти могутъ быть или водами существующихъ потоковъ: рѣкъ, ручьевъ и т. п. или водами атмосферныхъ осадковъ.

Количество водъ существующихъ небольшихъ потоковъ опредѣляется при помощи устройства водосливовъ и исчисляется по формулѣ:

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2gh} = \mu \cdot a \cdot h \sqrt{2gh}$$

гдѣ a — ширина водослива.

h — высота сливающегося слоя.

μ — коэффициентъ расхода.

и Q — расходъ воды въ 1 секунду.

при чемъ водосливъ устраивается, по возможности, съ острыми ребрами, съ полнымъ и совершеннымъ сжатіемъ струи и коэффициентъ μ берется по таблицѣ Понселе и Лебро.

Если же такого водослива почему либо примѣнить нельзя, и во-

досливъ устраивается съ неполнымъ или несовершеннымъ сжатіемъ, то въ коэффициентъ μ вводятся поправки, относительно неполнаго и несовершеннаго сжатія, по извѣстнымъ формуламъ гидравлики.

Въ болѣе значительныхъ потокахъ расходъ воды исчисляется при помощи опредѣленія среднихъ скоростей и живыхъ сѣченій по формулѣ:

$$Q = \omega \cdot v$$

гдѣ Q —расходъ.

ω —площадь живаго сѣченія.

v —средняя скорость.

Количество водъ атмосферныхъ осадковъ опредѣляется при помощи плевометрическихъ наблюденій.

Наблюденіями этими должно быть опредѣлено:

Среднее годовое количество, выпадающей влаги.

Среднее количество воды, выпадающей въ самый дождливый въ году мѣсяць.

Среднее и наибольшее количество воды, даваемое самыми большими обыкновенными дождями и ихъ средняя продолжительность.

Наибольшее возможное количество воды отъ одного ливня и средняя продолжительность его.

Опытъ показываетъ, что, для полученія полныхъ и точныхъ данныхъ, наблюденія должны дѣлаться по крайней мѣрѣ 20 лѣтъ сряду.

Но рѣдко случается, чтобы столь продолжительныя наблюденія были уже дѣланы въ той мѣстности, которая подлежитъ осушенію.

При отсутствіи необходимыхъ плевометрическихъ данныхъ слѣдуетъ поступать такъ:

1) Должно добыть наблюденія, производившіяся въ теченіи многихъ лѣтъ на какомъ либо пунктѣ, близкомъ къ той мѣстности, которая подлежитъ осушенію, и изъ этихъ наблюденій вывести выше-намѣченныя данныя, для сего пункта, принимаемаго за основной.

2) На мѣстности, подлежащей осушенію, должно установить дождемѣры въ нѣсколькихъ пунктахъ и поручить наблюденія надъ ними людямъ благонадежнымъ; производимыя на этихъ пунктахъ (станціяхъ) наблюденія должны продолжаться не менѣе года и сравниваться съ наблюденіями, производящимися въ тоже время на основномъ пунктѣ.

3) Изъ сравненія, полученныхъ по наблюденіямъ цифръ, опредѣляются отношенія количествъ дождя въ основномъ пунктѣ и на станціяхъ, и по этимъ отношеніямъ и даннымъ основнаго пункта можно вычислить необходимыя данныя для изслѣдуемой мѣстности.

Выборъ мѣстъ для дождевыхъ станцій много зависитъ отъ практической возможности дѣлать въ нихъ ежедневныя наблюденія; онѣ должны быть распределены по возможности равномерно по всему пространству изслѣдуемаго бассейна, а если бассейнъ состоитъ изъ нѣсколькихъ второстепенныхъ бассейновъ, то въ каждомъ второстепенномъ бассейнѣ нужно поставить, по крайней мѣрѣ, по одному дождемѣру; если мѣстность окружена или перерѣзана высокими холмами, то дождемѣры располагаются на вершинахъ холмовъ и у подножья ихъ. Каждый дождемѣръ долженъ стоять на открытомъ мѣстѣ и незаграждаться какими нибудь предметами, и отверстіе его должно быть мало возвышено отъ земли.

На черт. № 1 показанъ дождемѣръ простой конструкціи. Онъ состоитъ изъ металлической круглой воронки *A*, плотно вкладывающейся въ металлическое же круглое ведро *B*. Ведро это имѣетъ на нѣкоторой высотѣ отъ дна перегородку *сс* (съ небольшимъ круглымъ отверстіемъ), ниже которой въ стѣнку его вставлена стеклянная водомѣрная трубка *d*.

Изъ ведра вплоть до перегородки предъ наблюденіями заполняется водою, при чемъ горизонтъ воды въ этотъ моментъ стоитъ на нулѣ водомѣрной трубки, а перегородка, прикрывая собою поверхность налитой воды, ослабляетъ ея испареніе. Воронка дѣлается по возможности тщательно, съ верхнимъ ребромъ, имѣющимъ точную форму круга діаметромъ около 0,7 фута (20 миллим.); при чемъ площадь пріемнаго верхняго отверстія воронки точно измѣряется и исчисляется; водомѣрная же трубка тарируется въ миллиметрахъ или въ возможно мелкихъ доляхъ дюйма соотвѣтственно площади воронки слѣдующимъ образомъ.

Если діаметръ воронки *d* дюймовъ, и пріемная площадь ея $= \frac{\pi d^2}{4}$ дюймовъ, то взявъ объемъ воды въ $\frac{\pi d^2}{4}$ куб. дюймовъ, вливаютъ его въ ведро *B*, наполненное уже водою до перегородки *сс* или до нуля водомѣрной трубки, и высоту стоянія воды въ трубкѣ, сверхъ нуля, означаютъ чертою 1 дюймъ, затѣмъ приливаютъ въ ведро еще

такой же объемъ воды $\frac{\pi d^2}{4}$ куб. д. и высоту стоянія воды въ трубкѣ означаютъ чертою 2 д. и т. д., получивъ же дѣленія трубки въ цѣлыхъ дюймахъ, дѣлятъ эти дѣленія на доли.

Если, такимъ образомъ приготовленный и залитый водою до нуля мѣрной трубки, дождемѣрь будетъ поставленъ подъ дождь, и по прошествіи дождя окажется, что вода въ мѣрной трубкѣ стоитъ на высотѣ 0,8 дюйма, то это будетъ значить, что толщина слоя выпавшаго дождя = 0,8 д.

На чертежѣ № 2 показанъ усовершенствованный дождемѣрь Мантона. Онъ состоитъ изъ тщательно сдѣланной водопріемной воронки *a*, мѣрной трубки *b* и контрольнаго резервуара *c*, сообщающихся между собою посредствомъ шеекъ съ кранами *d* и *e*; снизу контрольный аппаратъ запирается особымъ краномъ *f*, ключъ отъ котораго находится у контролера.

Площадь поперечнаго сѣченія мѣрной трубки дѣлается въ 5 — 10 разъ меньше пріемной площади воронки, вслѣдствіе чего высота слоя выпадающаго дождя можетъ быть съ удобствомъ измѣряема въ сотыхъ доляхъ дюйма и въ десятихъ доляхъ миллиметра. Наблюденія дѣлаются при закрытомъ кранѣ *e* и послѣ каждого наблюденія вода изъ мѣрной трубки спускается въ контрольный резервуаръ, изъ котораго можетъ быть выпущена лишь контролеромъ для провѣрки измѣренія.

Кромѣ описанныхъ изслѣдованій и наблюденій, имѣющихъ главною цѣлью опредѣленіе причинъ затопленія или избытка влажности даннаго участка земли и количества воды, подлежащей отведенію, необходимо бываетъ производить еще нѣкоторыя изслѣдованія съ цѣлью изысканія того мѣста, куда воды, подлежащія отведенію, могутъ быть наилучшимъ образомъ отведены. Эти изслѣдованія находятся въ тѣсной связи съ примѣняемыми къ осушенію земель техническими приспособленіями и будутъ выяснены при описаніи этихъ приспособленій.

ГЛАВА 2-я.

Осушительныя средства.

§ 1. Разведение растений.

Мы уже знаемъ, что растенія, способствуя просачиванію поверхностныхъ водъ въ занимаемую ими почву и, въ тоже время, расходуя изъ почвы довольно значительное количество воды для своего питанія и испаренія, могутъ оказывать на нее осушительное вліяніе въ томъ случаѣ, когда вызываемое ими увеличеніе почвенной влаги меньше ихъ потребностей питанія и испаренія.

Землеосушительное вліяніе нѣкоторыхъ растеній при извѣстныхъ обстоятельствахъ легко выясняется цифровыми выводами.

Такъ, въ каждые сутки роста и созрѣванія—растенія хлѣбныя расходуютъ слой воды среднимъ числомъ отъ 2,8 до 5 миллим., а луговые травы отъ 5 до 7 миллим., между тѣмъ средней суточный слой выпадающаго дождя въ самые дождливые мѣсяцы напр. въ Европейской Россіи не превосходитъ 2 миллим.; отсюда слѣдуетъ, что въ нѣкоторыхъ мѣстностяхъ хлѣбныя растенія и въ особенности луговые травы требуютъ для своего питанія количество воды, гораздо большее того, которое во время ихъ жизни выпадаетъ въ видѣ дождя на занятую ими поверхность почвы, и должны для своего питанія извлекать воду изъ почвенныхъ ея запасовъ.

Поэтому въ тѣхъ случаяхъ, когда почва увлажняется лишь непосредственно выпадающими на нее атмосферными осадками и постороннихъ поверхностныхъ водъ (нагорныхъ, стекающихъ съ выше лежащихъ мѣстъ) вовсе не получаетъ или получаетъ мало (что бываетъ въ мѣстностяхъ ровныхъ и въ верхнихъ частяхъ крутыхъ склоновъ), хлѣбныя и луговые травы обыкновенно оказываютъ осушительное вліяніе на почву.

Изъ породъ древесныхъ землеосушительную способностью обладаютъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ породы хвойныя, что, хотя не можетъ быть выяснено цифровыми выводами, но доказывается практическими опытами.

Такъ, по Клаве, во Франціи разведение сосновыхъ плантацій имѣло результатомъ своимъ въ Солоньи (въ Департаментахъ Луаре-

ты, Шеръ и Луаръ-Шеръ) осушеніе болотныхъ мѣстъ, а въ Гасконскихъ дюнахъ—исчезновеніе застоевъ воды въ лощинахъ; замѣною листовыхъ породъ соснами, въ лѣсу С-ть Амандъ (на сѣверѣ Франціи), по заявленію того-же автора, достигнуто осушеніе болотъ и исчезновеніе ключей, выбивавшихся въ лѣсу.

Само собою разумѣется, что разведеніе растительности представляется такимъ землеосушительнымъ средствомъ, къ которому можно прибѣгать не всегда, а лишь въ тѣхъ случаяхъ, когда почва, не страдающая чрезмѣрнымъ избыткомъ влаги, вреднымъ для развитія растительности, требуетъ еще болѣе сильнаго осушенія въ видахъ санитарныхъ или строительныхъ.

Универсальными же осушительными средствами, т. е. такими, которыя могутъ быть примѣняемы во всѣхъ случаяхъ, служатъ приспособленія водособирательныя и водоотводныя и въ числѣ ихъ основнымъ приспособленіемъ представляется канава.

§ 2. Открытыя каналы.

Открытыя каналы обыкновенно имѣютъ поперечныя сѣченія: въ земляхъ—трапециoidalное, въ грунтахъ скалистыхъ—прямоугольное и оказываютъ двоякое дѣйствіе. Будучи прорыты въ землѣ, насыщенной водою, т. е. содержащей въ порахъ своихъ воду подъ нѣкоторымъ гидростатическимъ давленіемъ, онѣ принимаютъ изъ массы земли нѣкоторую часть воды, и это ихъ дѣйствіе называется *дренажнымъ* дѣйствіемъ; имѣя же извѣстное поперечное сѣченіе и уклонъ дна, онѣ служатъ для отведенія поступающихъ въ нихъ грунтовыхъ и поверхностныхъ водъ въ пониженныя точки мѣстности, и это ихъ дѣйствіе называется *водосточнымъ*, *водопроводнымъ* дѣйствіемъ.

Дренажное дѣйствіе канавъ объясняется и выражается математически слѣдующимъ образомъ.

Въ массѣ земли, насыщенной водою, частицы воды подвержены нѣкоторому равномерному гидростатическому давленію со всѣхъ сторонъ и нѣкоторому гидродинамическому давленію, стремящемуся ихъ перемѣщать въ направленіи наибольшаго уклона массы.

Если въ массѣ земли, насыщенной водою, будетъ прорыта канава, въ направленіи наибольшаго уклона AB (черт. № 3), то, находящаяся на нѣкоторой горизонтали CD , частица воды o , кромѣ

гидродинамическаго давленія oa , дѣйствующаго въ сторону уклона, подвергнется еще нѣкоторой разности давленій ob въ сторону канавы и подъ вліяніемъ равнодѣйствующей этихъ двухъ давленій oc , получить стремленіе просочиться въ канаву.

Тоже произойдетъ со всѣми прилежащими къ канавѣ частицами воды, по обѣ ея стороны, и въ вертикальномъ разрѣзѣ массы земли по горизонталі CD (черт. № 4) мы получимъ, что, если горизонтъ грунтовой воды до прорытія канавы былъ на прямой aa' , то послѣ прорытія канавы, по прошествіи нѣкотораго времени, онъ понизится у канавы до нѣкоторыхъ кривыхъ af , $a'f'$.

Чтобы выяснитъ возможный видъ этихъ кривыхъ, зависимость ихъ отъ водопроницаемости грунта и количества просачивающейся въ канаву грунтовой воды, обратимся къ извѣстной уже намъ формулѣ движенія воды въ водоносномъ слое:

$$q = k. a. b. \frac{h}{l} = k. a. b. i.$$

гдѣ q — расходъ воды въ 1".

k — коэффициентъ водопроницаемости.

a — толщина
 b — ширина
 l — длина

} слоя.

h — напоръ соотвѣтствующій длинѣ l .

и $\frac{h}{l} = i$ — уклонъ горизонта воды въ слое.

Пусть въ массѣ грунта до прорытія канавы горизонтъ воды находится на линіи OO (черт. № 5); послѣ прорытія канавы глубиною до линіи xx и по прошествіи нѣкотораго времени t_1 , онъ опустится до линіи n_1n , если нижняя часть канавы до n на высоту h занята водою; по прошествіи времени t_2 — онъ опустится до линіи n_2n и т. д.; дойдя же до нѣкоторой линіи Nn , онъ можетъ на ней остановиться. По прошествіи времени t_2 въ нѣкоторомъ сѣченіи водоноснаго слоя, находящемся на разстояніе x отъ урѣза воды въ канавѣ и имѣющемъ высоту занятую водою y , расходъ воды изъ грунта на погонную единицу длины канавы (съ одной ея стороны) будетъ:

$$q = k. y. 1. \frac{dy}{dx}$$

Расходъ этотъ въ теченіи безконечно малаго промежутка времени будетъ сохранять постоянную величину и будетъ одинъ и тотъ-же для любого сѣченія водоноснаго слоя y отъ n до n_2 .

Интегрируя уравненіе этого расхода по x въ предѣлахъ отъ нуля до x и по y въ предѣлахъ отъ h до y получимъ:

$$qx = \frac{k \cdot (y^2 - h^2)}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

откуда при $x = R_2$ и $y = H$.

$$qR_2 = \frac{k \cdot (H^2 - h^2)}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

раздѣляя уравненіе 1-е на 2-е получимъ:

$$\frac{x}{R_2} = \frac{(y^2 - h^2)}{(H^2 - h^2)}$$

что даетъ намъ простое уравненіе кривой пониженія горизонта воды

$$x = R_2 \left(\frac{y^2 - h^2}{H^2 - h^2} \right) \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

Изъ уравненія 2-го мы видимъ:

1) Что по прошествіи нѣкотораго времени (t_2) отъ начала дѣйствія канавы, соотвѣтствующій безконечно малому элементу времени dt , расходъ воды зависитъ отъ величины R_2 , соотвѣтствующей времени t_2 .

2) Что между величинами R и высотой горизонта воды въ грунтѣ надъ горизонтомъ воды въ канавѣ существуетъ нѣкоторая параболическая зависимость, т. е. что кривыя nn_1 , nn_2 и т. д. представляютъ собою дуги параболъ.

и 3) что по мѣрѣ осушенія грунта, т. е. увеличенія величины R , расходъ воды изъ грунта уменьшается и при нѣкоторой весьма большой величинѣ R сравнительно съ $(H-h)$ можетъ сдѣлаться настолько малъ, что будетъ практически совершенно неизмѣримъ, незамѣтенъ.

Величины отношеній $\frac{H-h}{R}$, соотвѣтствующія моментамъ видимаго прекращенія движенія воды, въ разныхъ грунтахъ различны и выражаются слѣдующими цифрами:

Для грунтовъ

песчаныхъ и мѣловыхъ	отъ 0,003 до 0,015
для растительныхъ земель	„ 0,025 „ 0,04
для глины желтой	„ 0,09 „ 0,12
„ „ синей	„ 0,13 „ 0,15.

Если убыль воды изъ грунта постоянно вознаграждается притокомъ, то пониженіе горизонта грунтовыхъ водъ у канавы, не доходя до предѣла, остановится на нѣкоторой кривой m_3 когда расходъ воды изъ грунта сдѣлается равнымъ притоку Q . Тогда будемъ имѣть:

$$q_3 = \frac{k(H^2 - h^2)}{2R_3} = Q \quad (4)$$

откуда

$$R_3 = \frac{k(H^2 - h^2)}{2Q} \quad (5)$$

Если канава прорѣзываетъ слой грунта, насыщеннаго водою, не въ направленіи наибольшаго его уклона, а въ направленіи перпендикулярномъ къ нему, т. е. по горизонтали, то явленіе притока грунтовой воды въ канаву, подобное описанному, будетъ происходить лишь съ верховой стороны канавы, съ низовой же стороны въ канаву можетъ вытечь изъ грунта самая ничтожная призма воды.

Сточное дѣйствіе канавъ, т. е. способность ихъ проводить вступившую въ нихъ воду въ направленіи уклона дна, выражается ниже-слѣдующими формулами гидравлики.

Расходъ воды въ канавѣ, т. е. объемъ воды, проходящій въ 1 секунду чрезъ нѣкоторое живое (занятое водою) сѣченіе канавы выражается формулой:

$$Q = u.w \quad (6)$$

гдѣ Q —расходъ

u —средняя скорость движенія воды
и w —площадь живаго сѣченія.

Расходъ воды Q можетъ имѣть постоянную одну и ту-же величину во всѣхъ сѣченіяхъ изслѣдуемаго участка канавы; тогда, при равномерномъ движеніи воды въ канавѣ, т. е. при постоянной одной и той-же величинѣ средней ея скорости u , площади живыхъ сѣченій канавы будутъ равны между собой на всемъ протяженіи изслѣ-

дуемаго участка, т. е. будетъ

$$w_0 = w_1 = w_2 \dots = \text{постоянной величины}.$$

Если по длинѣ изслѣдуемаго участка канавы количество воды, протекающей въ ней, постепенно увеличивается притокомъ извнѣ или постепенно уменьшается истокомъ въ стороны, то расходъ воды въ нѣкоторомъ сѣченіи канавы, удаленномъ на разстояніи x отъ начального ея сѣченія, будетъ:

$$Q_x = Q_0 \pm qx \dots \dots \dots (7)$$

гдѣ Q_0 —расходъ въ начальномъ сѣченіи канавы и q —прибыль или убыль воды на 1 длины канавы.

Если прибыль или убыль воды въ канавѣ пропорціональна длинѣ ея, т. е. если q —величина постоянная, причемъ въ нѣкоторомъ сѣченіи канавы, удаленномъ на разстояніи S отъ начального, расходъ воды есть Q_1 ; то

$$q = \pm \frac{Q_1 - Q_0}{S} \dots \dots \dots (8)$$

Чтобы, при постепенно возрастающемъ или убывающемъ расходѣ воды въ канавѣ, движеніе ея было равномернo т. е. чтобы и сохраняло постоянную величину, площади живыхъ сѣченій канавы должны увеличиваться или уменьшаться пропорціонально расходу т. е. должно быть:

$$w_0 = \frac{Q_0}{u}, \quad w_1 = \frac{Q_1}{u} \text{ и вообще } w_x = \frac{Q_x}{u}.$$

Для нѣкотораго трапецевидальнаго сѣченія канавы (чер. № 6), занятаго водою на высоту h , имѣемъ:
площадь живаго сѣченія

$$w = (a + nh)h \dots \dots \dots (9)$$

подводный периметръ

$$p = a + 2h\sqrt{1 + n^2} \dots \dots \dots (10)$$

и подводный радіусъ

$$R = \frac{w}{p} = \frac{(a + nh)h}{a + 2h\sqrt{1 + n^2}} \dots \dots \dots (11)$$

Зависимость средней скорости u отъ уклона поверхности воды въ

канавѣ выражается слѣдующимъ дифференціальнымъ уравненіемъ, съ коэффициентами Базена:

$$dy = k \cdot \frac{u du}{g} + A \frac{u^2}{R} \cdot dS \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

гдѣ S —длина изслѣдуемаго участка канавы и dS —дифференціалъ ея.

u —паденіе поверхности воды на длину канавы S и dy —дифференціалъ его.

g —ускореніе силы тяжести.

u —средняя скорость
 R —подводный радіусъ } нѣкотораго сѣченія.

A —коэффициентъ сопротивленія движенію, имѣющій видъ $A = \alpha + \frac{\beta}{R}$ и слѣдующія значенія, при всѣхъ измѣреніяхъ въ футахъ:—

Если русло канавы обдѣлано:

1) гладко цементомъ или выстроганнымъ деревомъ:

$$A = 0,0000457 + \frac{0,0000045}{R},$$

2) кирпичемъ или нестроганнымъ деревомъ

$$A = 0,0000579 + \frac{0,0000133}{R},$$

3) каменною мостовою или грубою бутовою кладкою

$$A = 0,0000731 + \frac{0,00006}{R},$$

и если русло канавы земляное:

$$A = 0,0000853 + \frac{0,00035}{R}.$$

и k —коэффициентъ поправки; при всѣхъ измѣреніяхъ въ футахъ приблизительно— $k = (1 + 640A)$.

При равномерномъ движеніи воды $du = 0$ и уравненіе 12-е даетъ:

$$dy = A \frac{u^2}{R} \cdot dS \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

откуда

$$u^2 = \frac{R}{A} \cdot \frac{dy}{dS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Выраженіе это, въ связи съ уравненіемъ 6-мъ, показываетъ, что въ любомъ сѣченіи канавы средняя скорость, а слѣдовательно, и расходъ воды будутъ, при прочихъ одинаковыхъ обстоятельствахъ, тѣмъ больше, чѣмъ больше R ; другими словами, что наивыгоднѣйшее живое сѣченіе канавы есть такое, въ которомъ при данной площади w — подводный радіусъ R имѣетъ наибольшую величину.

Размѣры наивыгоднѣйшаго трапецидальнаго живаго сѣченія канавы поэтому могутъ быть опредѣлены слѣдующимъ образомъ.

Изъ уравненій 9-го, 10-го и 11-го имѣемъ:

$$R = \frac{wh}{w + h^2(2\sqrt{1+n^2}-n)} \cdot \cdot \cdot \cdot (15)$$

Беря первую производную R по h и приравнивая нулю получимъ:

$$\frac{dR}{dh} = \frac{w[w + h^2(2\sqrt{1+n^2}-n)] - 2wh^2(2\sqrt{1+n^2}-n)}{w + h^2(2\sqrt{1+n^2}-n)} = 0$$

откуда

$$w = h^2(2\sqrt{1+n^2}-n); \cdot \cdot \cdot \cdot (16)$$

$$h = \sqrt{\frac{w}{2\sqrt{1+n^2}-n}}; \cdot \cdot \cdot \cdot (17)$$

и

$$R_{max} = h \cdot \frac{w}{w + w} = \frac{h}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{w}{2\sqrt{1+n^2}-n}} \cdot \cdot \cdot (18)$$

Наконецъ изъ уравненій 9-го и 16-го

$$\alpha = 2h(\sqrt{1+n^2}-n) \cdot \cdot \cdot \cdot (19)$$

Если R есть постоянная величина, то уравненіе 13-ое послѣ интегрированія даетъ

$$y = \frac{A}{R} u^2 S.$$

откуда

$$\frac{Y}{S} = I = \frac{Au^2}{R}$$

или

$$RI = Au^2 \cdot \cdot \cdot \cdot (20)$$

Уравненіе это показываетъ, что, при постоянной скорости u и постоянномъ подводномъ радіусѣ R , поверхность воды имѣетъ постоянный прямолинейный уклонъ I .

Такъ какъ въ трапецидальномъ руслѣ, съ нѣкоторымъ постояннымъ уклономъ боковыхъ стѣнокъ n , подводный радіусъ R можетъ сохранять постоянную величину лишь при постоянныхъ площадяхъ живыхъ сѣченій, постоянныхъ ихъ ширинахъ a и высотахъ h , то уравненіе 20-ое служить для опредѣленія средней скорости равномернаго движенія воды въ канавахъ однообразнаго поперечнаго сѣченія съ постояннымъ расходомъ воды и однообразнымъ прямолинейнымъ уклономъ дна; причемъ уклонъ поверхности воды въ такихъ условіяхъ, очевидно, равенъ уклону дна канавы.

Наибольшій расходъ воды въ канавѣ однообразнаго поперечнаго сѣченія съ уклономъ дна $= I$ на основаніи уравненій 6-го, 16-го, 18-го и 20-го выражается формулою

$$Q_{max} = w.n = \frac{h}{2} (2 \sqrt{1+n^2} - n) \sqrt{\frac{2I}{\alpha h + 2\beta}} \quad . \quad (21)$$

причемъ ширина канавы по дну должна быть:

$$a = 2h(\sqrt{1+n^2} - n).$$

Для опредѣленія средней скорости равномернаго движенія воды съ расходомъ постепенно возрастающимъ отъ верховаго къ низовому концу канавы, пропорціонально ея длинѣ, могутъ служить слѣдующія формулы.

Изъ уравненія 7-го имѣемъ

$$Q = Q_0 + qx$$

и

$$dQ = qdx = qdS$$

откуда

$$dS = \frac{dQ}{q}$$

а слѣдовательно уравненіе 13-ое даетъ

$$dy = \frac{An^2}{R} \cdot \frac{dQ}{q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

Если канава имѣетъ трапециoidalное сѣченіе и постоянную ширину по дну a ;

$$\text{то } dQ = d(u \cdot w) = u \cdot dw = u \cdot d[(a + nh)h] = u(a + 2nh)dh$$

и

$$R = \frac{(a + nh)h}{a + 2h\sqrt{1 + n^2}}$$

а слѣдовательно изъ ур. 22-го имѣемъ

$$dy = \frac{Au^3(a + 2nh)(a + 2h\sqrt{1 + n^2})dh}{q(a + nh)h}$$

Обозначая высоты живыхъ сѣченій канавы: въ началѣ изслѣдуемаго участка S чрезъ h_0 и въ концѣ его—чрезъ h_1 будемъ имѣть:

$$y = \frac{u^3}{q} \int_{h_0}^{h_1} \frac{A(a + 2nh)(a + 2h\sqrt{1 + n^2})}{(a + nh)h} dh$$

Беря же для упрощенія интегрированія вмѣсто A среднее его значеніе M въ предѣлахъ между низовымъ и верховымъ сѣченіями или приблизительно

$$M = \frac{A_0 + A_1}{2}$$

получимъ

$$y = \frac{u^3(A_0 + A_1)}{2q} \int_{h_0}^{h_1} \frac{(a + 2nh)(a + 2h\sqrt{1 + n^2})}{(a + nh)h} dh$$

откуда

$$y = \frac{u^3(A_0 + A_1)}{2q} \left[a \left(\log_N \frac{h_1}{h_0} - \frac{2\sqrt{1 + n^2}}{n} \log_N \frac{a + nh_1}{a + nh_0} \right) + \right. \\ \left. + 4\sqrt{1 + n^2}(h_1 - h_0) \right] \dots \dots \dots (23)$$

Затѣмъ такъ какъ (по уравненіямъ 6-му, 9-му и 8-му)

$$\frac{a + nh_1}{a + nh_0} = \frac{Q_1 h_0}{Q_0 h_1} \text{ и } q = \frac{Q_1 - Q_0}{S}$$

то

$$y = \frac{Su^3 (A_0 + A_1)}{2 (Q_1 - Q_0)} \left[a \left(\frac{2\sqrt{1+n^2}}{n} \log_{\frac{1}{n}} \frac{h_1}{h_0} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2\sqrt{1+n^2}-n}{n} \log_{\frac{1}{n}} \frac{Q_1}{Q_0} \right) + 4\sqrt{1+n^2} (h_1 - h_0) \right] . . . (24)$$

Уравнение это есть уравнение кривой продольного уклона поверхности воды, равномерно движущейся въ некоторомъ участкѣ S трапециoidalной канавы однообразнаго поперечнаго сѣченія (шириною по дну— a); причемъ y выражаетъ вертикальное разстояніе двухъ точекъ этой кривой, соотвѣствующихъ двумъ живымъ сѣченіямъ, удаленнымъ другъ отъ друга на разстояніе S , имѣющимъ высоты h_0 и h_1 и пропускающимъ съ среднею скоростью u количества воды Q_0 и Q_1 , въ зависимости отъ коихъ h_0 и h_1 имѣютъ слѣдующія величины:

$$h_0 = \sqrt{\frac{a^2}{4n^2} + \frac{Q_0}{u \cdot n}} - \frac{a}{2n} (25)$$

$$h_1 = \sqrt{\frac{a^2}{4n^2} + \frac{Q_1}{u \cdot n}} - \frac{a}{2n} (26)$$

Подводные радіусы сихъ живыхъ сѣченій выражаются величинами:

$$R_0 = \frac{Q_0 h_0}{Q_0 + u h_0^2 (2\sqrt{1+n^2} - n)} (27)$$

и

$$R_1 = \frac{Q_1 h_1}{Q_1 + u h_1^2 (2\sqrt{1+n^2} - n)} (28)$$

а коэффициенты сопротивленія движенію въ сихъ сѣченіяхъ выражаются величинами:

$$A_0 = \alpha + \frac{\beta}{R_0} (29)$$

и

$$A_1 = \alpha + \frac{\beta}{R_1} (30)$$

Если Q_1 мало разнится отъ Q_0 , то кривая поверхности воды

между сѣченіями, пропускающими эти количества воды, будетъ весьма мало разниться отъ прямой, имѣющей уклонъ $\frac{y}{S} = I$ и соотвѣтствующій сему прямолинейный уклонъ дна канавы на участкѣ S опредѣлится слѣдующимъ образомъ.

Пусть паденіе дна канавы на участкѣ S есть y_1 ; тогда искомый прямолинейный уклонъ дна канавы будетъ $i = \frac{y_1}{S}$.

и

$$h_0 + y_1 = h_1 + y$$

откуда

$$y_1 = y + (h_1 - h_0)$$

и

$$i = \frac{y_1}{S} = I + \frac{h_1 - h_0}{S} (31)$$

Если, при постепенно возрастающемъ расходѣ и равномерномъ движеніи воды, канава имѣетъ поперечныя сѣченія неоднобразныя, но такія трапециoidalныя, съ постоянными уклонами боковъ, что живыя сѣченія въ нихъ измѣняются пропорціонально расходамъ воды, имѣя при томъ наибольшія значенія R т. е. подводныхъ радіусовъ; то изъ уравненій 16-го и 6-го, 18-го и 19-го

$$Q_1 = u . w = u . h^2 (2\sqrt{1 + n^2} - n)$$

$$R = \frac{h}{2}$$

и

$$a = 2h(\sqrt{1 + n^2} - n)$$

Слѣдовательно

$$A = a + \frac{\beta}{R} = \frac{\alpha h + 2\beta}{h}$$

и

$$dQ = 2u(2\sqrt{1 + n^2} - n)h . dh .$$

и изъ уравненія 22-го:

$$dy = \frac{4(2\sqrt{1 + n^2} - n) . u^3}{q} . \frac{(\alpha h + 2\beta) dh}{h} .$$

откуда

$$y = \frac{4(2\sqrt{1+n^2}-n)}{q} \cdot u^3 \int_{h_0}^{h_1} \frac{(\alpha h + 2\beta) dh}{h}$$

или

$$y = \frac{S \cdot 4(2\sqrt{1+n^2}-n)u^3}{Q_1 - Q_0} \left\{ \alpha(h_1 - h_0) + 2\beta \log_{\frac{h_1}{h_0}} \right\} \dots (32)$$

Уравнение это есть уравнение кривой продольнаго уклона воды, равноѣрно движущейся въ нѣкоторомъ участкѣ S трапецидальной канавы, съ поперечными сѣченіями, увеличивающимися пропорціо-нально расходамъ воды такъ, что подводные радіусы ихъ имѣють вездѣ наибольшія величины.

Поперечные размѣры такой канавы въ зависимости отъ расхо-довъ воды опредѣляются слѣдующими выраженіями:

$$h_0 = \sqrt{\frac{Q_0}{u(2\sqrt{1+n^2}-n)}} \dots (33)$$

$$h_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{u(2\sqrt{1+n^2}-n)}} \dots (34)$$

$$\alpha_0 = 2h_0(\sqrt{1+n^2}-n) \dots (35)$$

$$\alpha_1 = 2h_1(\sqrt{1+n^2}-n) \dots (36)$$

Если между расходами Q_1 и Q_0 разность не велика то кривая уклона поверхности воды на участкѣ канавы S , опредѣляемая урав-неніемъ 32-мъ, можетъ быть принята за прямую линію, имѣющую уклонъ $I = \frac{y}{S}$; причемъ прямолинейный уклонъ дна канавы на участкѣ S опредѣлится по уравненію 31-му.

Иногда размѣры и уклоны канавъ приходится опредѣлять соот-вѣтственно тому, чтобы средняя скорость движущейся въ нихъ воды, при данныхъ расходахъ Q и коэффициентахъ α , β и n , была не болѣе или не менѣе извѣстнаго предѣла. Предѣльные значенія средней скорости u при выраженіи всѣхъ величинъ въ футахъ опредѣляются по слѣдующей формулѣ Дарси-Базена.

$$u = \frac{v}{1 - 18,113 \sqrt{A}} \cdot \cdot \cdot \cdot (37)$$

гдѣ v —наибольшая скорость по дну

$$\text{и } A = \alpha + \frac{\beta}{R}.$$

Чтобы земляныя русла канавъ не размывались, скорость воды по дну ихъ не должна превосходить:

въ иловатыхъ земляхъ.	0,25 фута.
въ пескѣ	0,50 "
въ крупномъ пескѣ и гравіи—величиною съ горошину	0,70 "
въ гравіи діаметромъ $\frac{1}{4}$ дюйма	1,00 "
" " " 1 дюймъ	2,25 "
" " " $1\frac{1}{2}$ дюйма	3,33 "
въ крупномъ хрящѣ	4 "

Чтобы перечисленные земляные матеріалы, если они содержатся въ водѣ въ взвѣшенномъ состояніи, не складывались въ руслахъ канавъ въ видѣ наносовъ, скорость воды по дну (v) должна быть не менѣе тѣхъ же вышеприведенныхъ предѣловъ.

Чтобы укрѣпленные русла канавъ не размывались, скорость воды по ихъ дну не должна превосходить:

на каменной мостовой	3 футъ
по каменной кладкѣ или деревянной обдѣлкѣ	4 футъ.

Если канава однообразнаго поперечнаго сѣченія и даннаго уклона предназначается для равномернаго движенія воды съ постояннымъ расходомъ, то изъ уравненій 20 и 37 имѣемъ:

$$(v + 18,113 \sqrt{RI})^2 = \frac{R^2 I}{\alpha R + \beta} \cdot \cdot \cdot \cdot (38)$$

Беря значеніе для v , соответствующее даннымъ условіямъ, мы можемъ вычислить изъ уравненія 38-го величину R и затѣмъ изъ уравненія 37-го величину u ; зная же R , u и Q можемъ опредѣлить всѣ потребныя размѣры канавы по вышевыведеннымъ формуламъ.

Если-бы требовалось опредѣлить такой уклонъ дна канавы, при условіи равномернаго движенія и постояннаго во всѣхъ ея сѣченіяхъ расхода воды Q , чтобы при наивыгоднѣйшемъ поперечномъ

сѣченіи канавы скорость воды по дну ея не превосходила извѣстнаго предѣла v ; то для сего имѣемъ:

$$R = \frac{h}{2} \dots \dots \dots (39)$$

$$\alpha = 2h(\sqrt{1+n^2}-n) \dots \dots \dots (40)$$

$$w = h^2(2\sqrt{1+n^2}-n) \dots \dots \dots (41)$$

$$A = \alpha + \frac{2\beta}{h} = \frac{\alpha h + 2\beta}{h} \dots \dots \dots (42)$$

$$n = \frac{v}{1 - 18,113 \sqrt{\frac{\alpha h + 2\beta}{h}}} \dots \dots \dots (43)$$

$$\text{и } Q = n \cdot w = \frac{h^2(2\sqrt{1+n^2}-n) \cdot v}{1 - 18,113 \sqrt{\frac{\alpha h + 2\beta}{h}}} \dots \dots (44)$$

Изъ этого уравненія путемъ послѣдовательныхъ приближеній можемъ вычислить h , а зная h можемъ опредѣлить по приведеннымъ формуламъ всѣ размѣры канавы и потребный уклонъ ея дна изъ уравненія

$$I = \frac{Au^2}{R}.$$

Если канава предназначается для равномернаго движенія воды, но съ расходами ея не постоянными, а постепенно возрастающими къ низовому концу, причемъ соотвѣтственно даннымъ расходамъ Q_0 и Q_1 требуется опредѣлить такіе ея поперечные размѣры и уклонъ дна, при коихъ скорость воды по дну не превосходила-бы извѣстнаго предѣла v , то пользуясь уравненіямъ 39, 40, 41, 42, 43 и 44 можемъ опредѣлить потребную высоту верховаго ея сѣченія h_0 соотвѣтствующую расходу Q_0 , а также коэффициентъ A_0 , среднюю скорость u и ширину по дну a .

Задаваясь затѣмъ желаніемъ, чтобы канава имѣла постоянную ширину по дну a , опредѣлимъ потребную для расхода Q_1 высоту низоваго ея сѣченія h_1 по уравненію 26-му и коэффициентъ A_1 по уравненіямъ 28-му и 30-му; по извѣстнымъ же Q_0 , Q_1 , h_0 , h_1 , A_0 , A_1 ,

и проч. можемъ опредѣлить изъ уравненія 24-го— γ и по уравненію 31-му потребный уклонъ дна канавы i .

Если же желательно придать канавѣ такія поперечныя сѣченія, увеличивающіяся пропорціонально расходамъ, при коихъ подводный радіусъ имѣлъ бы вездѣ наибольшую величину, то пользуясь уравненіями 39, 40, 41, 42, 43 и 44 можемъ вычислить соотвѣтствующія расходамъ Q_0 и Q_1 наивыгоднѣйшія высоты живыхъ сѣченій h_0 и h_1 , ихъ ширины по дну a_0 и a_1 и среднюю скорость воды u ; затѣмъ по уравненію 32-му можемъ опредѣлить γ , и по уравненію 31-му потребный уклонъ дна.

Уклоны дна канавъ вообще дѣлаются соотвѣтствующими поверхностнымъ уклонамъ мѣстности и на возможно большую длину однообразные. Въ мѣстностяхъ ровныхъ съ слабыми уклонами, при небольшихъ расходахъ воды, дну канавъ придаются уклоны по возможности не менѣе 0,0005.

Если канавѣ по расчету приходится придать уклонъ дна меньшій уклона мѣстности, то канава дѣлается уступами; причемъ уступы укрѣпляются деревянными или каменными перемычками и рисбермами. Откосы канавы въ предѣлахъ рисбермы также укрѣпляются деревянною, каменною или фашинною обдѣлкою. На чертежахъ № 7 и № 7а показано въ продольномъ разрѣзѣ ортогональномъ и перспективномъ устройство каменнаго уступа. Кладка подобныхъ уступовъ въ рисбермѣ (а), въ перемычкѣ (b) и въ откосныхъ стѣнкахъ (с) дѣлается изъ мѣстнаго крупнаго камня (булыжнаго или ломанаго и колотаго) на сухо на мху или-же на глинѣ мятой съ пескомъ, причемъ плотно разщепливается, въ особенности въ наружныхъ поверхностяхъ. За концемъ откосныхъ стѣнокъ въ предѣлахъ рисбермы, а также выше откосныхъ стѣнокъ и перемычки, въ предѣлахъ дѣйствія воды, откосы канавы укрѣпляются каменною мостовою.

На черт. № 8 и № 8а показано устройство деревяннаго уступа съ укрѣпленіемъ откоса канавы за концемъ откосныхъ стѣнокъ хвостною кладкою. Перемычка и откосныя стѣнки въ подобныхъ уступахъ рубятся изъ шпунтованныхъ обтесанныхъ брусьевъ ряжевою рубкою; концы откосныхъ стѣнокъ впускаются въ пазы стоекъ, соединенныхъ вверху распорками, а нижними концами закрѣпленныхъ въ парный лежень посредствомъ болтовъ. Перемычку и откосныя стѣнки въ видахъ удешевленія можно устраивать также изъ

круглыхъ бревенъ нешпунтованныхъ, а только припазованныхъ; но такое устройство ослабляетъ ихъ устойчивость и дѣлаетъ легко возможнымъ поднятіе отдѣльныхъ вѣнцовъ, выпучивающагося при замерзаніи землею.

Хворостное укрѣпленіе откосовъ въ предѣлахъ рисбермы за концемъ откосныхъ стѣнокъ устраивается изъ ивоваго хвороста причемъ хворостъ въ сдѣланной выемкѣ укладывается слоями толщиною около 1 фута, вершинами внаружу, такъ чтобы могъ удобно проростать, и каждый слой его прибивается прутяными канатами и кольями и засыпается землею съ плотною утрамбовкою.

Деревянная рисберма устраивается въ видѣ досчатаго пола на лежняхъ, концы коихъ, въ предотвращеніе поднятія, запущены въ землю подъ подошвы откосовъ канавы.

Иногда въ предѣлахъ откосныхъ стѣнокъ, какъ деревянныхъ, такъ и каменныхъ, устраивается колодезь, глубиною около 1 аршина отъ поверхности рисбермы, съ дномъ укрѣпленнымъ камнемъ или деревяннымъ поломъ; вода заполняющая этотъ колодезь принимаетъ и смягчаетъ ударъ воды, падающей съ уступа.

Въ поперечной профили откосамъ открытыхъ канавъ въ землястыхъ грунтахъ вообще придаются уклоны, соотвѣтствующіе одиночному, полуторному или двойному заложенію, т. е. соотвѣтствующіе $n = 1$, $n = 1\frac{1}{2}$ или $n = 2$. Одиночное заложеніе откосамъ канавъ дается лишь въ грунтахъ прочныхъ, устойчивыхъ и при небольшой глубинѣ канавъ: менѣе 1 саж.

Въ песчаныхъ и неплотныхъ песчано-глинистыхъ грунтахъ откосамъ канавъ дается обыкновенно заложеніе полуторное, а въ грунтахъ слабыхъ и плавучихъ — двойное. При значительныхъ глубинахъ (болѣе 2 саж.) откосы канавъ раздѣляются бермами.

При большихъ землеосушительныхъ работахъ въ особенности съ земледѣльческими и санитарными цѣлями, въ видахъ сокращенія первоначальныхъ расходовъ, укрѣпленіе дна и откосовъ канавъ одеждами по возможности избѣгается; для чего канавамъ придаются соотвѣтственные продольные уклоны и поперечные размѣры; въ грунтахъ слабыхъ и плавучихъ ширина канавъ по дну дѣлается даже нѣсколько болѣе расчетной на случай сползанія откосовъ.

Въ канавахъ же, постоянно исправное состояніе коихъ необходимо, при слабыхъ грунтахъ и неизбѣжно крутыхъ уклонахъ, дно и

откосы укрѣпляются одеждами. Обыкновенною одеждою дна и откосовъ канавъ по подводному периметру служить каменная мостовая, которая устраивается: или прямо по грунту дна и откосовъ, если онъ песчаный и легко можетъ быть съ поверхности разрыхленъ на нѣкоторую глубину для удобства правильной укладки и утрамбовки камня или по подсыпанному слою мѣстной песчаной земли или же на основаніяхъ изъ слоя крупнозернистаго песку или мха.

Песокъ и мохъ употребляются въ основанія подъ каменную мостовую съ цѣлью приданія ей большей устойчивости на слабыхъ грунтахъ и съ цѣлью предохраненія грунта между камнями отъ размыва. Выборъ того или другаго матерьяла подъ основаніе мостовой зависитъ вообще отъ соображеній экономическихъ, но при грунтахъ насыщенныхъ водою, топкихъ, слѣдуетъ употреблять мохъ; при грунтахъ же сухихъ и въ особенности при періодическомъ протокѣ воды, когда канава по временамъ обсыхаетъ, слѣдуетъ предпочитать песокъ.

Въ видахъ ослабленія заростанія травою сухихъ мощеныхъ ключевовъ канавъ слѣдуетъ употреблять подъ мостовую чистый, крупнозернистый песокъ.

Откосы канавъ выше урѣза воды укрѣпляются: каменною мостовою или дерновою выстилкою, причемъ дерновая выстилка дѣлается или сплошь или же лентами въ клѣтку съ засѣвомъ клѣтокъ травою. Выборъ того или другаго способа укрѣпленія верхнихъ частей откосовъ канавъ зависитъ отъ соображеній экономическихъ, но при условіяхъ препятствующихъ развитію растительности слѣдуетъ предпочитать мостовую.

При слабыхъ ползучихъ грунтахъ и большой глубинѣ канавъ, подошвы откосовъ ихъ иногда укрѣпляются подпорными стѣнками изъ пластинъ или досокъ забранныхъ за сваи; при этомъ дно канавъ, смотря по скорости теченія воды или вымачивается камнемъ, или закрывается досчатымъ поломъ на лежняхъ или же оставляется безъ укрѣпленій. (Чер. № 9).

§ 5. Проведеніе воды чрезъ возвышенности.

Если отводъ воды встрѣчаетъ на пути своемъ возвышеніе, высокой переваль, въ коемъ требуется рыть канаву глубиною болѣе

3 саж.; то, вмѣсто столь глубокой открытой канавы, въ перевалѣ можетъ быть съ выгодой устроена для проведенія воды штольня съ деревяннымъ крѣпленіемъ, показанная на чер. № 10.

Штольни такія устраиваются шириною 5 ф. высотой 7 ф.; обшивка потолка ихъ дѣлается изъ сосновыхъ досокъ толщиною 3 дюйма, а обшивка стѣнъ изъ сосновыхъ досокъ толщ. $2\frac{1}{2}$ д.; поддерживающія досчатую обшивку потолка и стѣнъ рамы дѣлаются въ разстояніи не болѣе 0,50 саж. одна отъ другой, изъ обтесанныхъ съ 2-хъ сторонъ 6—7 вершковыхъ сосновыхъ бревень. При сильномъ напорѣ плывучихъ грунтовъ рамы устанавливаются чаще.

При употребленіи лѣса не соснового, а другихъ породъ, толщина досокъ и брусевъ измѣняется пропорціонально прочному сопротивленію употребляемаго матерьяла; при увеличеніи же размѣровъ штольни въ ширину толщина брусевъ увеличивается пропорціонально квадрату увеличенія ширины.

Въ головахъ, т. е. въ нижнемъ и верхнемъ концахъ, штольня обдѣлывается каменными или деревянными землеудержительными стѣнками.

Водопроводная способность штольни опредѣляется по формулѣ:

$$Q = w \cdot R \cdot \sqrt{\frac{I}{\alpha R + \beta}}$$

гдѣ

$$w = a \cdot h$$

$$R = \frac{ah}{\alpha + 2h}$$

$$\text{и } R_{max} = \frac{h}{2} \text{ при } \alpha = h.$$

Для проведенія очень значительныхъ количествъ воды чрезъ перевалы большой высоты и малаго протяженія, въ перевалахъ устраиваются тоннели съ каменною обдѣлкою. Наивыгоднѣйшею формою поперечнаго сѣченія такой водопроводной каменной тоннели относительно сопротивленія давленію земли представляется форма полного эллипса съ вертикальною большою и горизонтальною малою осями, отношеніе коихъ выражается такъ:

$$a = b \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}$$

гдѣ

a — малая полуось.

b — большая полуось.

φ — уголъ покоя земли.

Наибольшее давленіе въ такомъ эллиптическомъ сводѣ будетъ со-
отвѣтствовать плоскости шва его по малой оси и опредѣлится при-
близительно слѣдующею формулою:

$$q = \frac{p [x(a+t) - 0,8 \cdot a \cdot b]}{t}$$

гдѣ

q — давленіе на 1 кв. ф. шва.

p — вѣсъ куб. фута земли.

t — толщина шва

a — малая полуось

b — большая полуось

x — глубина заложенія шва отъ поверхности земли.

Въ футахъ.

Чтобы сводъ былъ проченъ толщина его стѣнки должна быть
такова, чтобы

q = прочному сопротивленію матерьяла R . на 1 кв. футъ, а слѣд.

$$\frac{Rt}{p} = xa + xt - 0,8a \cdot b.$$

откуда толщина свода:

$$t = \frac{(x - 0,8b) ap}{R - px}$$

Весьма важно, чтобы тоннель не засорялась осадками, а для сего
необходимо, чтобы при переменныхъ расходахъ воды, среднія ско-
рости теченія сохраняли приблизительно постоянную величину, не
менѣ известнаго предѣла; такому условію удовлетворяетъ форма
тоннели овоидальная, показанная на чер. № 11, близкая къ формѣ
эллиптической. Форма эта очерчивается дугами круговъ, радіусы ко-
ихъ имѣютъ обыкновенно означенныя на чертежѣ отношенія. Водо-
проводная способность тоннелей опредѣляется также формулой:

$$Q = w R \sqrt{\frac{I}{\alpha R + \beta}}$$

Поперечное сѣченіе тоннели придается такое, чтобы w —площадь сѣченія занятая водою—была всегда менѣ площади всего поперечнаго сѣченія тоннеля, т. е. чтобы вода никогда не доходила до ключа свода тоннели.

При очень большомъ протяженіи перевала и сравнительно небольшой его высотѣ, можетъ оказаться болѣе выгоднымъ, вмѣсто устройства въ немъ штольни или тоннеля, подымать воду на верхъ перевала мапинами (насосами) и затѣмъ спускать съ перевала открытыми канавами.

Потребная работа водоподъемныхъ машинъ въ такомъ случаѣ опредѣляется слѣдующимъ образомъ. Если потребная высота подъема воды H футъ, высота соотвѣтствующая сопротивленію движенію воды въ нагнетательныхъ и всасывающихъ трубахъ— h футъ, коэффициентъ полезнаго дѣйствія машины— μ , количество воды подлежащее подъему въ 1 секунду— Q куб. футъ и вѣсь 1 куб. ф. воды 1,73 пуда; то дѣйствительная индикаторная работа паровой водоподъемной машины въ 1 секунду будетъ

$$W = \frac{(H + h) \cdot Q \cdot 1,73}{\mu} \text{ пудо-футъ или}$$

$$N = \frac{(H + h) \cdot Q \cdot 1,73}{\mu \cdot 15} \text{ паровыхъ лошадей.}$$

Зная потребную работу машинъ, можно составить ихъ подробный проэктъ и проэктъ всѣхъ связанныхъ съ ними приспособленій, а также опредѣлить стоимость ихъ содержанія и ремонта. Изъ сравненія ежегодныхъ расходовъ, потребныхъ на погашеніе затрачиваемыхъ капиталовъ, а также на ремонтъ и содержаніе всѣхъ приспособленій, какъ въ случаѣ примѣненія механическаго водоподъема, такъ и въ случаѣ устройства тоннеля или штольни для проведенія воды самотекомъ, можно выяснитъ выгодность того или другаго способа рѣшенія данной задачи проведенія воды черезъ переваль.

§ 4. Закрытыя канавы.

Если канава служить не для приёма поверхностной воды по длинѣ ея, а для собиранія и отведенія грунтовой воды, то она можетъ быть сверху закрыта засыпкою землею съ нижеслѣдующими приспособленіями:

а) съ заполненіемъ нижней части канавы (на потребную высоту) легководопроницаемыми матерьялами напр. камнемъ (чер. № 12) или фашинами (чер. № 13).

б) съ обдѣлкою нижней части канавы въ видѣ трубы: камнемъ (чер. № 14), кирпичемъ-желѣзнякомъ (чер. № 15) или черепицею (чер. № 16).

в) съ устройствомъ въ нижней части канавы деревянной трубы изъ досокъ (чер. № 17) или пластинъ (чер. № 18).

и г) съ прокладкою по дну канавы готовыхъ гончарныхъ трубъ (чер. № 19).

Всѣ перечисленные способы закрытія канавъ, предназначаемыхъ для грунтовыхъ водъ (дренажа), ясно показаны на чертежахъ и не требуютъ особыхъ объясненій. Необходимо только замѣтить: 1) что при устройствѣ трубъ съ цѣлью приёма воды (всасыванія) изъ грунта, стѣнки ихъ дѣлаются водопроницаемыми, при устройствѣ же трубъ съ цѣлью лишь отвода собранной грунтовой воды, стѣнки ихъ дѣлаются плотными, по возможности, непроницаемыми для воды. 2) что въ деревянныхъ трубахъ проницаемость стѣнокъ достигается оставленіемъ щелей въ швахъ пластинъ (чер. № 18) или просверленіемъ небольшихъ отверстій въ доскахъ (чер. № 17-а); непроницаемость же достигается плотнымъ соединеніемъ досокъ и пластинъ въ (закрой) четверть. (Чер. № 20 и чер. № 20-а). и 3) что гончарныя трубы съ цѣлью дренажа употребляются обыкновенно неглазурованныя, діаметромъ отъ $1\frac{1}{4}$ до 10 дюймовъ, длиною отъ 1 до $1\frac{1}{4}$ фута со стѣнками толщиною въ тѣлѣ отъ 0,4 до 1 дюйма, причемъ для просачиванія воды въ стыкахъ трубъ оставляются промежутки около $\frac{1}{4}$ дюйма и стыки прикрываются или берестой или гончарными муфтами длиною отъ 3 до 4 дюймовъ, внутренній діаметръ коихъ на $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{4}$ дюйма больше наружнаго діаметра трубъ (чер. № 19-а).

Дренажная способность канавъ, закрытыхъ всѣми описанными способами опредѣляется тѣми же выраженіями какъ и для канавъ открытыхъ. Водопроводная способность закрытыхъ канавъ съ обдѣлкою въ видѣ трехъугольных и прямоугольных трубъ, опредѣляется вышеприведенными формулами для канавъ открытыхъ за постановкою въ нихъ соотвѣтственныхъ выраженій R и w . Водопроводная же способность канавъ, заполненныхъ водопроницаемымъ матерьяломъ (камнемъ, фашинами), можетъ быть опредѣлена по формулѣ для водоноснаго слоя:

$$q = k. a. b. i = k. w. i$$

гдѣ q — расходъ

w — площадь заполненнаго водою поперечнаго сѣченія (живаго сѣченія) канавы.

i — уклонъ, k — коэффициентъ расхода.

Опытъ показываетъ, что въ такихъ канавахъ вода движется живымъ сѣченіемъ равной высоты т. е. имѣетъ поверхностный уклонъ параллельный уклону дна канавы лишь при уклонахъ дна не менѣе 0,006.

Для опредѣленія возможнаго расхода воды въ такихъ канавахъ необходимо каждый разъ путемъ опытовъ опредѣлить коэффициентъ k для даннаго заполняющаго матерьяла; кромѣ того расходъ воды въ нихъ можетъ съ теченіемъ времени значительно уменьшиться вслѣдствіе засоренія осадками промежутковъ въ заполняющемъ матерьялѣ; а потому такого рода канавы обыкновенно употребляются преимущественно для собиранія грунтовой воды, а не для отведенія ея.

Водопроводная способность гончарныхъ дренажныхъ (круглыхъ) трубъ лучше всего опредѣляется приблизительно формулою Дарси:

$$d i = 2 b_1 w^2.$$

гдѣ d — діаметръ трубы

i — уклонъ.

w — средняя скорость.

и b_1 — коэффициентъ, значенія котораго слѣдующія при всѣхъ величинахъ въ метрахъ:

$$b_1 = 0,001014 + \frac{0,000026}{d}.$$

и при всѣхъ величинахъ въ футахъ:

$$b_1 = 0,000309 + \frac{0,000026}{d}.$$

Французскій профессоръ Мангонъ совѣтуетъ употреблять для расчета дренажныхъ гончарныхъ трубъ слѣдующую сокращенную формулу:

$$di = 0,004 u^2 \text{ въ метрахъ, что въ футахъ } di = 0,00121916 u^2.$$

Предлагаемая Мангономъ формула испытана на практикѣ и выведена изъ формулы Дарси, принимая коэффициентъ сопротивленія движению воды въ трубахъ всѣхъ діаметровъ (b_1) равнымъ наибольшему его значенію, соотвѣтствующему трубамъ наименьшаго діаметра въ 0,025 метра. Это предположеніе, приводящее къ удобной, простой формулѣ, весьма практично въ томъ отношеніи, что обезпечиваетъ нѣкоторымъ запасомъ пачисленіе размѣровъ трубъ большаго діаметра, имѣющихъ самое важное значеніе въ дренажныхъ системахъ. Дренажнымъ гончарнымъ трубамъ придаются вообще такіе уклоны, чтобы скорости движенія воды въ нихъ были не менѣе $\frac{1}{2}$ фута и не болѣе 3 футъ; трубамъ-же малаго діаметра придаются уклоны не менѣе 0,0015.

Канавы, предназначаемыя исключительно для собиранія и отведенія грунтовыхъ водъ (дренажа), представляется вообще полезнымъ и удобнымъ закрывать сверху—потому, что этимъ устраняются какъ возможныя засоренія и поврежденія ихъ наземными водами, такъ и препятствія къ свободному пользованію дренированнымъ участкомъ земли; но иногда бываетъ необходимо дѣлать сверху закрытыми и такія канавы, которыя предназначаются исключительно для приѣма и отведенія поверхностныхъ наземныхъ водъ. Необходимость эта встрѣчается въ городахъ и вообще въ населенныхъ мѣстахъ, гдѣ открытыя канавы безобразятъ мѣстность, затрудняютъ сообщенія и могутъ своими грязными водами заражать воздухъ и почву. Въ такихъ случаяхъ вмѣсто открытыхъ канавъ устраиваются съ особыми водоприѣмными приспособленіями плотныя подземныя трубы: деревянныя, цементныя, гончарныя, бетонныя, каменные и чугунныя. Устройство этихъ трубъ спеціально изучается въ курсѣ городскихъ водосточковъ.

§ 5. Колодцы и вертикальный дренажъ.

Кромѣ канавъ и горизонтально уклонныхъ трубъ, имѣющихъ назначеніе собирать и отводить собранную воду въ пониженныя мѣста плана, въ землеосушительной практикѣ еще употребляются приспособленія для собиранія и проведенія воды въ вертикальномъ направленіи; приспособленія эти называются колодцами и вертикальными трубами. Колодцы и вертикальныя трубы могутъ служить:

1) Для спуска собранной наземной воды внизъ въ сточныя горизонтальныя трубы.

2) Для спуска собранной наземной воды внизъ въ водопоглощающіе земные пласты.

3) Для приѣма (всасыванія) воды изъ водоноснаго слоя.

и 4) Для собиранія (всасыванія) воды изъ грунта и проведенія ея внизъ къ водопоглощающимъ земнымъ пластамъ.

Соотвѣтственно назначенію своему колодцы и вертикальныя трубы называются: въ 1-мъ случаѣ—сточными, во 2-мъ—водопоглощающими, въ 3-мъ—водовсасывающими, и въ 4-мъ—дренажными колодцами или вертикальнымъ дренажемъ.

Дренажное дѣйствіе колодцевъ и вертикальныхъ трубъ можно выразить слѣдующимъ образомъ. Если въ грунтѣ, насыщенномъ водою до уровня AB черт. № 20b будетъ вырытъ цилиндрическій колодезь, діаметромъ D и глубиною H отъ сего уровня, и вода изъ него будетъ откачиваться или отводиться трубою, то по прошествіи нѣкотораго времени t уровень воды въ колодезѣ будетъ находиться на нѣкоторой высотѣ h отъ его дна, а вокругъ колодца, въ грунтѣ,—на нѣкоторой поверхности вращенія, имѣющей производящую кривую nB .

Расходъ воды изъ грунта въ этотъ моментъ по нѣкоторой цилиндрической поверхности, имѣющей радіусъ x , будетъ:

$$q = k \cdot 2 \pi x \cdot y' \frac{dy}{dx}.$$

Интегрируя это уравненіе по x въ предѣлахъ отъ $\frac{D}{2}$ до x и по y въ предѣлахъ отъ h до y будемъ имѣть:

$$q \log_n \left(\frac{2x}{D} \right) = \pi k (y^2 - h^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

и если при

$$x = R + \frac{D}{2}, y = H;$$

то

$$q \log_N \frac{(2R + D)}{D} = \pi k (H^2 - h^2) \dots \dots \dots (2)$$

раздѣляя уравненіе 1-е на уравненіе 2-е получимъ:

$$\log_N 2x - \log_N (2R + D) = \frac{y^2 - h^2}{H^2 - h^2}$$

откуда

$$\log_N 2x = \log_N (2R + D) + \frac{y^2 - h^2}{H^2 - h^2} \dots \dots \dots (4)$$

Уравненіе это даетъ возможность опредѣтить очертаніе кривой пониженія горизонта воды у колодца по даннымъ величинамъ R , D , H и h .

Изъ уравненія 2-го имѣемъ:

$$q = \frac{\pi R (H^2 - h^2)}{\log_N (2R + D) - \log_N D}$$

Выраженіе это показываетъ зависимость расхода воды изъ грунта отъ глубины и діаметра колодца, отъ высоты стоянія въ немъ воды и района дѣйствія колодца (R).

Водопроводное дѣйствіе колодцевъ и вертикальныхъ трубъ на столько велико, что поперечные размѣры, придаваемые имъ по соображеніямъ конструктивнымъ, т. е. по соображенію съ возможностью удобнаго исполненія и содержанія въ исправности, бываютъ болѣе чѣмъ достаточны для потребнаго проведенія воды, а потому въ исчисленіи водопроводной способности колодцевъ и вертикальныхъ трубъ не встрѣчается надобности.

Колодцы сточные устраиваются для проведенія поверхностной воды въ подземныя сточныя трубы и конструкція ихъ сообразуется съ конструкціею и условіями дѣйствія сихъ трубъ, составляющихъ, какъ выше сказано, предметъ особаго курса: „городскихъ водостокъ“; поэтому мы не будемъ ихъ описывать.

Водопоглощающіе колодцы устраиваются различнымъ образомъ въ зависимости отъ глубины залеганія того земнаго пласта, который обладаетъ потребной способностью поглощенія.

Для спуска небольшихъ количествъ воды на глубину не превосходящую 1 саж. и притомъ чрезъ грунты плотные и вязкіе, не содержащіе въ себѣ камней, могутъ служить (пробитые сваей или пробуренные обыкновеннымъ землянымъ буравомъ до поглощающаго слоя) скважины, заполненныя, какъ показано на чертежѣ № 21 пучкомъ связаннаго хвороста.

Для спуска значительныхъ количествъ воды, въ неглубоко залегающіе, но сильно поглощающіе воду пласты, устраиваются обыкновенные колодцы, обдѣлываемые въ стѣнкахъ деревянными срубами (изъ бревенъ или пластинъ) или каменною кладкою какъ показано на чер. № 22 и чер. № 23. Колодцамъ этимъ придается такое поперечное сѣченіе (шириною не менѣе $1\frac{1}{2}$ ар.) при коемъ они могутъ быть удобно устраиваемы и затѣмъ очищаемы отъ осадковъ.

При глубинѣ болѣе 1 саж. и при грунтахъ слабыхъ, такіе колодцы устраиваются по способу каменныхъ опускаемыхъ колодцевъ или по способу деревянныхъ шахтъ (чер. № 24 и чер. № 25).

При очень значительной глубинѣ залеганія поглощающаго слоя и при необходимости пройти до него слою грунтовъ, насыщенныхъ водою, колодцы обыкновенными способами устраиваются лишь на глубину 1 саж., а далѣе до водоноснаго слоя продолжаются буровыми скважинами укрѣпляемыми желѣзными обсадными трубами (чер. № 26).

Отверстія буровыхъ скважинъ въ такихъ колодцахъ въ видахъ предотвращенія засореній закрываются фильтрующими матерьялами: камнемъ или хворостомъ, а иногда вода въ такіе колодцы пускается чрезъ особые осадочные колодцы.

Колодцы всасывающіе устраиваются на подобіе колодцевъ поглощающихъ съ тою лишь разницею, что, сверху, въ предотвращеніе притока наземныхъ водъ, они закрываются, а стѣнки ихъ, въ предѣлахъ водоноснаго слоя, изъ котораго извлекается вода, дѣлаются водопроницаемыми; въ предѣлахъ же слоевъ, не дающихъ воды или способныхъ поглощать ее, по возможности плотныя, непроницаемыя. Вода изъ всасывающихъ колодцевъ обыкновенно отводится горизонтально-уклонными трубами.

На чер. № 27 показано устройство всасывающаго колодца безъ обдѣлки стѣнокъ, но съ заполненіемъ водопроницаемымъ матерьяламъ: камнемъ; такіе колодцы могутъ быть съ удобствомъ устраиваемы на небольшую глубину и въ грунтахъ устойчивыхъ, не требующихъ большихъ крѣпленій во время выемки. Въ грунтахъ слабыхъ, требующихъ крѣпленій, колодцы небольшой глубины могутъ быть съ удобствомъ устраиваемы съ обдѣлкою стѣнъ деревянными срубами, какъ показано на чертежѣ № 28; на большія же глубины въ такихъ условіяхъ колодцы устраиваются шахтнымъ способомъ или могутъ быть продолжаемы внизъ буровыми скважинами съ обсадными трубами, имѣющими въ предѣлахъ водоноснаго слоя отверстія въ стѣнкахъ (чер. № 29).

Въ грунтахъ слабыхъ и мягкихъ, легко проникаемыхъ сваею, всасывающіе колодцы небольшой глубины могутъ быть устраиваемы въ видѣ опускаемыхъ колодцевъ изъ гончарныхъ трубъ (чер. № 30) слѣдующимъ образомъ. На дубовый поддонъ, насаженный на желѣзный штырь и заостренный снизу въ видѣ сваи, надѣваются, какъ показано на чертежѣ, гончарныя трубы въ два ряда; затѣмъ, ударами бабы по желѣзному штырю, поддонъ вмѣстѣ съ трубами вгоняется въ грунтъ на потребную глубину, послѣ чего штырь вынимается.

Вертикальный дренажъ представляетъ собою такого рода колодцы или вертикальныя трубы, верхнія части коихъ всасываютъ или вообще принимаютъ грунтовую воду, а нижнія проводятъ ее къ водопоглощающему пласту.

Для осушенія поверхностныхъ пластовъ земли, обладающихъ слабою водопропускною способностью, но насыщенныхъ водою и залегающихъ непосредственно на водопоглощающихъ пластахъ, а также для осушенія всякаго рода водопроницаемыхъ поверхностныхъ пластовъ, насыщенныхъ водою и отдѣленныхъ отъ ниже лежащаго водопоглощающаго пласта тонкою водонепроницаемою прослойкою, — вертикальный дренажъ можетъ быть устраиваемъ въ видѣ скважинъ, заполненныхъ хворостомъ чер. № 21, въ видѣ ямъ или колодцевъ, заполненныхъ камнемъ чер. № 27, въ видѣ колодцевъ, обдѣланныхъ деревянными водопроницаемыми срубами или въ видѣ опускаемыхъ колодцевъ изъ дренажныхъ трубъ (чер. № 28 и чер. № 30); причѣмъ всѣ эти скважины, ямы и колодцы доводятся внизъ до

водопоглощающаго слоя, а сверху для предотвращенія притока въ нихъ поверхностныхъ водъ закрываются.

При очень большомъ разстояніи водопоглощающаго слоя отъ осушаемаго, вода изъ дренажныхъ колодцевъ можетъ быть опускаема водопоглощающими буровыми скважинами (чер. № 29).

ГЛАВА III-я.

Отведеніе наземныхъ водъ съ земледѣльческими, санитарными и строительными цѣлями.

§ 1. Постороннія и собственныя воды участка; нагорныя канавы.

Воды наземныя, т. е. изливающіяся на земную поверхность и по ней стекающія, могутъ быть причиною нежелаемаго избытка влажности верхняго слоя земли, если количество ихъ слишкомъ велико сравнительно съ способностями этого слоя спускать съ себя и впитывать въ себя воду, т. е. если, при значительномъ количествѣ наземныхъ водъ, верхній слой земли имѣетъ слабую водопропускную способность, слабые уклоны поверхности и углубленія въ ней, задерживающія воду.

Наличность такихъ свойствъ верхняго слоя земли, которыя могутъ способствовать насыщенію его наземными водами, при отсутствіи подземныхъ источниковъ, могущихъ питать его водою, всегда прямо указываетъ на то, что нежелаемый избытокъ влажности верхняго слоя земли, если только онъ замѣчается, происходитъ исключительно отъ водъ наземныхъ; но для рациональнаго устраненія такого избытка влажности необходимо еще во 1-хъ имѣть въ виду ту цѣль, для коей устраненіе его желательно и во 2-хъ знать, какого рода наземными водами онъ преимущественно питается.

По значенію своему въ этомъ отношеніи различаются два рода наземныхъ водъ:

- 1) воды *постороннія*, *нагорныя* т. е. стекающія на участокъ съ поверхности, смежныхъ съ нимъ, вышележащихъ участковъ,
- и 2) *собственныя* воды участка, т. е. воды атмосферныхъ осадковъ, непосредственно выпадающихъ на его поверхность.

Воды нагорныя могутъ представлять собою или постоянно текущіе съ вышележащихъ скатовъ и постоянно разливающіеся на поверхности даннаго участка ручьи, или же временные потоки атмосферныхъ осадковъ, выпадающихъ на нагорные скаты. Постоянно разливающіеся нагорные ручьи вредны и неудобны для всякаго пользованія землею, и отведеніе ихъ бываетъ всегда необходимо; атмосферныя же нагорныя воды оказываются вредными не всегда, что зависитъ какъ отъ ихъ количества, такъ и отъ вида пользованія землею. Если осушеніе даннаго участка земли требуется съ цѣлями строительными, то всѣ нагорныя воды должны быть отведены отъ него; если же оно вызывается потребностями земледѣльческими, то сверхъ отведенія постоянныхъ нагорныхъ ручьевъ можетъ быть необходимо отведеніе нагорныхъ атмосферныхъ водъ лишь въ томъ случаѣ, когда вслѣдствіе значительной крутизны уклоновъ и большой площади нагорныхъ скатовъ, количество нагорныхъ атмосферныхъ водъ слишкомъ велико.

Для отведенія отъ осушаемаго участка нагорныхъ водъ служатъ „нагорныя канавы“. Канавы эти располагаются по нагорнымъ границамъ участка такъ, чтобы они могли принимать и отводить нагорныя воды къ ближайшему тальвегу, не допуская ихъ разливаться по осушаемому участку. Если граница участка пересѣкаетъ горизонталь мѣстности подъ нѣкоторымъ угломъ, то нагорная канава у этой границы можетъ быть прорыта въ ея направленіи; если же граница участка параллельна горизонталямъ мѣстности, то нагорная канава можетъ быть прорыта или по ея направленію съ такимъ постепеннымъ углубленіемъ къ низовому концу, при которомъ можетъ быть достигнутъ потребный уклонъ поверхности текущей по ней воды или же по нѣкоторому близкому къ ней направленію, обладающему уклономъ равнымъ потребному уклону поверхности воды въ канавѣ.

Во всякомъ случаѣ выборъ какъ направленія нагорныхъ канавъ, такъ и пунктовъ впаденія ихъ въ тальвеги подчиняется слѣдующимъ условіямъ:

1) чтобы при наибольшемъ расходѣ воды въ канавѣ и при наивысшемъ горизонтѣ воды въ тальвегѣ, принимающемъ изъ нея воду, поверхность воды въ канавѣ имѣла надлежащій для теченія уклонъ и вездѣ была ниже поверхности земли не менѣе какъ на 1 футъ;

2) чтобы при постоянномъ потокѣ воды въ канавѣ (въ случаѣ

отведенія нагорныхъ ручьевъ), поверхность потока, соотвѣтствующая среднему нормальному его расходу, имѣла надлежащій для теченія уклонъ и вездѣ была ниже поверхности земли не менѣе какъ на 3 фута, что необходимо въ видахъ предотвращенія подтопленія земли текущею въ канавѣ водою;

3) чтобы, удовлетворяя первымъ двумъ условіямъ, канава имѣла кратчайшее протяженіе до тальвега, требовала при устройствѣ своемъ возможно меньшаго количества земляныхъ работъ и въ тоже время возможно ближе совпадала съ соотвѣтствующею ей границею участка;

и 4) чтобы оси канавы въ углахъ поворотовъ и при встрѣчѣ съ тальвегомъ, принимающимъ воду, образовали между собою и съ осью тальвега внутренніе углы тупые по возможности не менѣе 120° .

Выборъ направленія нагорныхъ канавъ можетъ быть сдѣланъ непосредственно въ натурѣ, на мѣстѣ, съ помощью пробныхъ нивелировокъ; но удобнѣе всего направленіе нагорныхъ канавъ опредѣляется по плану мѣстности, снятому горизонталями.

На чертежѣ № 31 показанъ схематически планъ участка $ABCD$, подлежащаго осушенію; по границѣ его AD проходятъ тальвеги; границы AB и BC — нагорныя; линіи Bab и BcD обозначаютъ направленія потребныхъ нагорныхъ канавъ.

Потребныя наивыгоднѣйшіе уклоны поверхности воды въ нагорныхъ канавахъ и размѣры ихъ поперечныхъ сѣченій опредѣляются по извѣстнымъ правиламъ устройства канавъ вообще въ зависимости отъ мѣстныхъ условій и количества воды, подлежащаго отведенію по участкамъ; причемъ за точки раздѣла участковъ нагорныхъ канавъ принимаются точки впаденія въ нихъ ручьевъ, углы поворотовъ въ планѣ и тѣ точки, въ конхъ соотвѣтственно уклонамъ мѣстности измѣняются уклоны дна канавъ.

Средній и наибольшій расходы воды въ нагорныхъ ручьяхъ, подлежащихъ отведенію, опредѣляются извѣстными приемами съ помощью водосливовъ или посредствомъ измѣренія живыхъ сѣченій и среднихъ скоростей.

Наибольшій расходъ подлежащихъ отведенію нагорныхъ атмосферныхъ водъ опредѣляется по площади скатовъ, направленныхъ къ нагорной канавѣ и по высотѣ слоя воды, даваемого обыкновеннымъ самымъ большимъ дождемъ. Исключительные ливни въ расчетъ обыкновенно не принимаются, потому что они бываютъ вообще рѣдко, и

временное переполненіе канавъ при нихъ водою не можетъ имѣть вреднаго вліянія на осушеніе мѣстности; точно также не принимаются въ расчетъ снѣговья воды, потому что количество ихъ вообще неопредѣленно и, при обыкновенныхъ условіяхъ (медленнаго) таянія снѣговъ, рѣдко превосходить количество воды, даваемое самыми большими дождями.

Если площадь скатовъ, направленныхъ къ нѣкоторому протяженію канавы S , есть A квадратныхъ верстъ, высота слоя воды, даваемого въ 1 секунду, обыкновеннымъ самымъ большимъ дождемъ, есть h дюймовъ и m есть та доля этого слоя, которая стекаетъ по поверхности скатовъ въ канаву; то расходъ воды въ канавѣ, въ концѣ даннаго ея протяженія, выразится такъ:

$$Q = A \cdot 250000 \cdot m \cdot \frac{h}{12} = 1020833,33 \text{ Ам куб. футъ въ 1 секунду.}$$

По соображенію съ эмпирическими данными для притока наземныхъ водъ къ конечнымъ пунктамъ бассейновъ, можно принимать слѣдующія значенія коэффициента m :

При ровной мѣстности скатовъ, съ слабыми уклонами.

для площадей ихъ до $\frac{1}{2}$ кв. версты.	.	.	.	$m = \frac{1}{3}$
" " " въ 2 " "	.	.	.	$m = \frac{1}{8}$
" " " " 4 " "	.	.	.	$m = \frac{3}{10}$

При холмистой мѣстности скатовъ.

для площадей ихъ до $\frac{1}{2}$ кв. версты	.	.	.	$m = \frac{1}{2}$
" " " въ 2 " "	.	.	.	$m = \frac{3}{8}$
" " " " 4 " "	.	.	.	$m = \frac{1}{4}$

При гористой мѣстности скатовъ:

для площадей ихъ до $\frac{1}{2}$ кв. версты	.	.	.	$m = \frac{2}{3}$
" " " въ 2 " "	.	.	.	$m = \frac{1}{2}$
" " " " 4 " "	.	.	.	$m = \frac{3}{5}$

При приведенныхъ значеніяхъ коэффициента m получаются слѣдующія выраженія расходовъ атмосферныхъ водъ въ конечныхъ сѣченіяхъ участковъ нагорныхъ канавъ:

При мѣстности скатовъ ровной съ слабыми уклонами.

для площадей	до	$\frac{1}{2}$	кв. в. . .	$Q = 340277,77 \text{ } Ah$. куб. ф.
"	въ	$\frac{1}{2}$	" " . .	$Q = 170138,88 \text{ } h$. " "
"	"	2	" " . .	$Q = 255208,33 \text{ } h$. " "
"	"	4	" " . .	$Q = 306250 \text{ } h$. " "
"	"	болѣе 4	" " . .	$Q = 76562,5 \text{ } A.h$. " "

При мѣстности скатовъ холмистой.

для площадей	ихъ до	$\frac{1}{2}$	кв. в. . .	$Q = 510416,66 \text{ } Ah$. куб. ф.
"	въ	$\frac{1}{2}$	" " . .	$Q = 255208,33 \text{ } h$. " "
"	"	2	" " . .	$Q = 762625 \text{ } h$. " "
"	"	4	" " . .	$Q = 1020833,33 \text{ } h$. " "
"	"	болѣе 4	" " . .	$Q = 255208,33 \text{ } Ah$. " "

При мѣстности скатовъ гористой.

для площадей	ихъ до	$\frac{1}{2}$	кв. в. . .	$Q = 680555,55 \text{ } Ah$ куб. ф.
"	въ	$\frac{1}{2}$	" " . .	$Q = 340277,77 \text{ } h$ " "
"	"	2	" " . .	$Q = 1020833,33 \text{ } h$ " "
"	"	4	" " . .	$Q = 1531250 \text{ } h$ " "
"	"	болѣе 4	" " . .	$Q = 382812,5 \text{ } Ah$ " "

Съ помощью этихъ данныхъ расходъ атмосферныхъ водъ по участкамъ нагорныхъ канавъ опредѣляется слѣдующимъ образомъ.

Если площадь скатовъ, направленныхъ къ канавѣ

въ 1-мъ ея участкѣ . . .	$= a_1$
" 2-мъ " " . . .	$= a_2$
" 3-мъ " " . . .	$= a_3$
" 4-мъ " " . . .	$= a_4$

и т. д.

то расходы атмосферныхъ водъ будутъ

въ конечномъ сѣченіи 1-го и начальномъ 2-го участка— q_1 , соответствующее площади a_1 ;

въ конечномъ сѣченіи 2-го и начальномъ 3-го участка— q_2 , соответствующее площади $a_1 + a_2$;

не даютъ конечныхъ и опредѣленныхъ рѣшеній. При этомъ необходимо замѣтить, что участки канавъ небольшого протяженія и съ небольшою разностью въ расходахъ между начальнымъ и концевымъ сѣченіями, въ видахъ упрощенія исчисленій и самаго исполненія работъ по ихъ устройству могутъ быть также рассчитываемы по формуламъ равномернаго движенія воды съ постояннымъ расходомъ, принимая для расчета наибольшіе расходы, соотвѣтствующіе ихъ концевымъ сѣченіямъ.

При проектированіи поперечныхъ размѣровъ нагорныхъ канавъ слѣдуетъ имѣть въ виду, что въ концевомъ сѣченіи, у впаденія въ тальвегъ, дно канавы не должно быть ниже дна тальвега; этимъ условіемъ и наивысшимъ горизонтомъ воды въ тальвегѣ опредѣляется предѣлъ наибольшей высоты живыхъ сѣченій въ нагорной канавѣ.

Въ случаяхъ небольшой глубины тальвега, принимающаго воду, при слабыхъ уклонахъ мѣстности по линіи проектируемой нагорной канавы и при значительномъ количествѣ нагорныхъ водъ, подлежащихъ отведенію, поперечныя сѣченія нагорной канавы должны быть опредѣляемы въ зависимости отъ возможной наибольшей высоты живаго сѣченія ея у впаденія въ тальвегъ. Кромѣ сего при проектированіи поперечныхъ размѣровъ нагорныхъ канавъ слѣдуетъ имѣть въ виду: 1) что съ увеличеніемъ глубины канавъ сверхъ двухъ аршинъ, стоимость 1 куб. с. выемки ихъ значительно увеличивается, а именно: *при увеличеніи на 1 аршинъ*—въ слабыхъ грунтахъ приблизительно на 30%, въ твердыхъ на 15%; *при увеличеніи же на 2 аршина*—въ слабыхъ грунтахъ приблизительно на 60%, въ твердыхъ на 30% и 2) что съ увеличеніемъ глубины канавъ значительно уменьшается устойчивость ихъ откосовъ; поэтому, придавая канавамъ наивыгоднѣйшіе поперечные размѣры, удовлетворяющіе тому требованію, чтобы подводные радіусы живыхъ сѣченій имѣли вслѣду наибольшую величину, ради удовлетворенія только одного этого условія, глубину канавы не слѣдуетъ дѣлать болѣе 1 саж.

Если нагорная канава предназначена для отведенія постоянного потока и значительнаго количества временныхъ нагорныхъ водъ, причемъ между расходами воды постояннымъ и наибольшимъ существуетъ весьма значительная разница; то поперечному сѣченію канавы можетъ быть придана двухъярусная форма, показанная на чер. № 32. Въ сѣченіи этой формы площадь нижней части рассчиты-

вается на нормальный постоянный расходъ, а вся площадь на максимальный расходъ и по Прони такому сѣченію могутъ быть приданы съ удобствомъ слѣдующія пропорціи:

Глубина верхняго и нижняго яруса одинаковая $=e$; средняя ширина сѣченія нижняго яруса $x=6e$ и средняя ширина сѣченія верхняго яруса $y=3,5$ $x=21e$.

§ 2. Отведение съ поля его собственныхъ наземныхъ водъ.

Поле культурное т. е. предназначенное для разведенія травяныхъ, хлѣбныхъ, кустарниковыхъ или древесныхъ растений, будучи обезпечено отъ вреднаго дѣйствія нагорныхъ водъ, можетъ страдать избыткомъ влажности почвы отъ собственныхъ атмосферныхъ водъ, выпадающихъ непосредственно на его поверхность, въ двухъ слѣдующихъ случаяхъ: 1) когда вода, не имѣя надлежащихъ стоковъ, застаивается въ поверхностныхъ углубленіяхъ почвы, въ котловинахъ и ложбинахъ или тальвегахъ мѣстности поля и 2) когда поле представляетъ собою направленный въ одну сторону скатъ весьма слабого уклона и очень большого протяженія, причемъ почва низовой части поля получаетъ избытокъ влажности отъ чрезмѣрнаго орошенія ея водами, стекающими съ вышележащей части поля.

Въ первомъ случаѣ очевидно должны быть устранены застои воды и для этого прежде всего бываетъ необходимо расчистить главный тальвегъ поля или прорыть въ направленіи его канаву, способную безпрепятственно проводить всю, притекающую къ ней съ поля воду; канава эта называется *главною*. Затѣмъ, если мѣстность поля, кроме главнаго тальвега содержитъ въ себѣ тальвеги второстепенные то въ направленіи ихъ бываетъ необходимо также прорыть канавы, способные проводить притекающую къ нимъ воду въ *главный тальвегъ*; канавы эти называются второстепенными или *собирательными*.

Наконецъ, для стока водъ изъ отдѣльныхъ болѣе или менѣе значительныхъ углубленій и котловинъ поля, должны быть прорыты въ направленіяхъ наибольшихъ уклоновъ къ главной или къ собирательнымъ канавамъ—*сточныя канавы* третьяго порядка, называемыя при небольшихъ поперечныхъ размѣрахъ *сточными бороздами*.

На чертежѣ № 33 показанъ планъ поля снятый горизонталями

съ показаніемъ направленій: главной канавы, канавъ собирательныхъ и сточныхъ бороздъ.

Если культивируемыя растенія требуютъ для своего питанія много воды, то въ отвденіи отъ осушаемаго поля нагорныхъ водъ не встрѣчается надобности за исключеніемъ тѣхъ, какъ выше сказано, случаевъ: когда во 1-хъ, количество нагорныхъ водъ слишкомъ велико, причемъ воды эти, устремляясь обильными потоками, могутъ или размывать культурную почву или давать ей ненужный избытокъ влажности; во 2-хъ, когда нагорныя воды представляютъ собою постоянно текущіе и разливающіеся на поверхности поля ручьи.

Если поле представляетъ собою направленный въ одну сторону скатъ слабого уклона и весьма большаго протяженія, причемъ низовая часть его страдаетъ избыткомъ влажности отъ чрезмѣрнаго орошенія водами, стекающими съ верховой его части, то, очевидно, низовая часть поля должна быть отдѣлена отъ верховой поперечною канавою, имѣющею для низовой части поля значеніе нагорной канавы и проектируемою по правиламъ указаннымъ для канавъ нагорныхъ.

Количества атмосферныхъ водъ, подлежащіе отвденію при осушеніи поля главною канавою и канавами собирательными, исчисляются по площадямъ скатовъ направленныхъ къ этимъ канавамъ съ каждой ихъ стороны, на основаніи данныхъ, указанныхъ для канавъ нагорныхъ; причемъ поперечные размѣры всѣхъ осушительныхъ канавъ проектируются въ зависимости отъ расходовъ воды и уклоновъ также, какъ и размѣры канавъ нагорныхъ. Относительно угловъ поворотовъ и угловъ встрѣчи осушительныхъ канавъ соблюдаются по возможности тѣ же правила, которыя въ этомъ отношеніи указаны для канавъ нагорныхъ.

§ 3. Ассенизація поля.

Поле, освобожденное водостоками отъ поверхностныхъ застоевъ воды, все еще можетъ страдать избыткомъ влажности почвы, неблагоприятнымъ въ земледѣльческомъ и санитарномъ отношеніяхъ, причемъ этотъ избытокъ влажности можетъ проявляться или въ верхнемъ слое почвы, если почва обладаетъ слабой водопропускной способностью и задерживаетъ значительное количество воды въ верхнемъ

своемъ слоѣ, не допуская ее просачиваться внизъ, или во всей толщѣ почвы, если почва имѣетъ малую толщину (мощность) и залегаетъ на водоупорномъ пластѣ. Въ томъ и другомъ случаѣ влажная почва представляется нездоровою, т. е. во 1-хъ, неблагоприятною для растительной производительности—вслѣдствіе отсутствія въ ней надлежащей циркуляціи воздуха и вслѣдствіе недостатка теплоты, происходящаго какъ отъ слабой способности ея нагрѣваться подѣ дѣйствіемъ солнечныхъ лучей, такъ и отъ поглощенія тепла испареніями; во 2-хъ, вредною для здоровья животныхъ и человека—вслѣдствіе того, что испаряющаяся изъ нея вода вмѣстѣ съ парами своими выноситъ въ атмосферу продукты гнѣнія и броженія органическихъ веществъ.

Стремиться устранить эти нездоровыя свойства влажной почвы усиленными водоотводными работами т. е. прорытіемъ возможно большого числа осушительныхъ канавъ—было бы нерационально, потому что большое число осушительныхъ канавъ, изрѣзывающихъ почву на малые участки, хотя и могло бы ускорить стокъ воды съ ея поверхности, тѣмъ уменьшить количество воды въ нее просачивающейся и даже извлечь изъ нея нѣкоторое количество уже просочившейся воды; но въ то же время—отняло бы значительную часть полезной ея площади отъ культуры, не устраняя вполнѣ ея недостатковъ. Поэтому для оздоровленія, ассенизаціи, почвы приходится прибѣгать къ другимъ мѣрамъ. Мѣры эти заключаются: во 1-хъ) въ разведеніи такихъ растительныхъ породъ, которыя обладаютъ землеосушительными свойствами; во 2-хъ) въ обыкновенной рациональной культурѣ почвы, соответствующей мѣстнымъ условіямъ и въ 3-хъ) въ извлеченіи излишней влаги изъ почвы дренажемъ, если обыкновенныя культурныя мѣры оказываются недостаточными или неудобопримѣняемыми.

Подробное изученіе приѣмовъ разведенія разныхъ видовъ растений, а также цѣлесообразной обработки и удобренія почвы для нихъ есть дѣло агрономіи; а потому мы ограничимся лишь нѣкоторыми общими указаніями по сему предмету.

Разведеніе растительныхъ породъ обладающихъ землеосушительными свойствами, напр. нѣкоторыхъ хвойныхъ деревьевъ, можетъ быть примѣнимо, какъ мы уже знаемъ, въ томъ случаѣ, если подлежащій устраненію избытокъ влажности почвы не такъ великъ,

чтобы препятствовать ихъ произростанію и если осушеніе почвы требуется лишь съ цѣлями санитарными.

Мѣры обыкновенной раціональной культуры почвы состоятъ: а) въ надлежащемъ разрыхленіи почвы раскопкою или распашкою на такую глубину, которая наилучшимъ образомъ соотвѣтствуетъ природѣ растений, подлежащихъ разведенію и свойствамъ почвы, съ такимъ расположеніемъ раскопныхъ и пахотныхъ бороздъ параллельными рядами по уклонамъ, чтобы вода съ поверхности и изъ рыхлой массы почвы, не размывая ее, могла свободно стекать по нимъ въ канавы съ умѣренной скоростью; б) въ удобреніи почвы, соотвѣтствующемъ потребностямъ ея разрыхленія и улучшенія культурныхъ свойствъ; и в) въ разведеніи такихъ растений, которыя при данныхъ почвенныхъ и климатическихъ условіяхъ могутъ наилучшимъ образомъ произростать.

Если раскопные и пахотные борозды и достигаемое обработкою и удобреніемъ разрыхленіе почвы не въ состояніи устранить вредный избытокъ ея влажности, или же если почва предназначена для такого рода пользованія, при коемъ раскопка и распашка ея не нужны или неудобны какъ напр. для разведенія древесныхъ породъ или же для пастбища; то представляется необходимымъ прибѣгать къ извлеченію вреднаго избытка влажности почвы дренажемъ.

Этотъ способъ осушенія почвы составляетъ предметъ изложенія нижеслѣдующей отдѣльной главы.

ГРЕБНОЙ ВИНТЪ
ТОРНИКРОФТА
ДЛЯ
МЕЛКОСИДЯЩИХЪ ПАРОХОДОВЪ.

Читано въ Собраніи инженеровъ путей сообщенія 11 декабря 1887 г.

А. А. Брандтомъ.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ
Типографія инженера Ю. Н. Эрлихъ, Гольшая Садовая, № 9,
1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

Милостивые Государы!

Въ 1885 году Департаментомъ посейскихъ и водяныхъ сообщеній было предложено построить пароходъ для инспекціонныхъ поѣздовъ высшихъ чиновъ Министерства по воднымъ путямъ Имперіи, соединеннымъ искусственными системами съ С.-Петербургомъ. Этотъ пароходъ, снабженный всѣми удобствами для далекихъ путешествій, долженъ былъ имѣть большую скорость, не менѣе 10 узловъ, проникать въ мелководныя верховья нашихъ рѣкъ, и слѣдовательно, имѣть малую осадку, не болѣе $1\frac{1}{2}$ или 2-хъ фута; — длина-же и ширина парохода опредѣлялись тѣмъ условіемъ, чтобы онъ свободно проходилъ черезъ шлюзы Маріинской системы и канала герцога Александра Виртембергскаго, имѣющіе чистую ширину 28 футовъ и длину 147 футовъ.

Для выбора типа парохода и предварительной разработки проекта была назначена комиссія, въ составъ которой кромѣ меня входили: А. К. Боярскій, К. А. Петровъ и И. В. Жирухинъ.

По требованіямъ, предъявлявшимся къ пароходу относительно площади каютныхъ помѣщеній (920 кв. ф.), корпусъ парохода долженъ былъ имѣть длину около 140 футовъ и ширину около 20 футовъ.

При такихъ условіяхъ выборъ двигателя для парохода представлялъ большія затрудненія. Примѣненіе обыкновеннаго гребнаго винта исключалось требованіемъ малой осадки, а примѣненіе боковыхъ гребныхъ колесъ—шириною шлюзовъ Маріинской системы; оставалось только примѣнить заднее колесо—но и при этомъ нельзя было сохранить длину корпуса парохода въ 140 ф. и приходилось пожертвовать частью каютныхъ помѣщеній.

Тогда я предложилъ комиссіи примѣнить турбинный гребной винтъ Торникрофта, о которомъ въ то время началъ появляться весьма благопріятныя извѣстія въ англійскихъ техническихъ журналахъ, — особенно въ Engineering и Minutes of proceedings англійскаго общества гражданскихъ инженеровъ.

Мое предложеніе было принято комисіею и тогда-же Департаментомъ ш. и в. с. было сдѣлано сношеніе съ заводомъ Торникрофта о заказѣ парохода, который, впрочемъ, не состоялся, какъ ввиду большой цѣны (13.000 фунтовъ стерлинговъ), заявленной заводомъ, такъ и ввиду неассигнованія необходимыхъ средствъ по расходнымъ смѣтамъ Министерства.

Однако, дѣло объ испытаніи винта Торникрофта на нашихъ рѣкахъ на этомъ не остановилось. Директоръ Департамента, П. А. Фадѣевъ, обращающій большое вниманіе на разработку различныхъ типовъ мелкосидящихъ судовъ, пригласилъ заводъ Крейтона въ Або заняться разработкою вопроса о примѣненіи винтового двигателя къ мелкосидящимъ пароходамъ, а затѣмъ К. А. Петрову удалось окончательно убѣдить г. Крейтона построить для опыта, по тѣмъ отрывочнымъ свѣдѣніямъ, какія имѣлись въ англійскихъ техническихъ журналахъ, небольшой пароходъ, снабженный двигателемъ Торникрофта. Надо отдать справедливость заводу, что онъ весьма удачно справился съ этою задачею; въ началѣ 1887 года комисія, свидѣтельствовавшей въ Або буксирный пароходъ „Колыванъ“, построенный г. Крейтономъ для Ревельскаго порта, былъ предъявленъ небольшой пароходъ съ турбиннымъ винтомъ, имѣвшій длину 46 ф., ширину 6 ф., осадку 13 дюймовъ и скорость хода 10 узловъ, т. е., 17³/₄ верстъ въ часъ. Ввиду столь хорошаго результата, г. Министромъ путей сообщенія было испрошено послѣдовавшее 7-го сего ноября **Высочайшее** разрѣшеніе на заказъ заводу Крейтона, безъ конкуренціи, небольшого парохода длиною 65 ф., снабженнаго двигателемъ Торникрофта и предназначеннаго для инспекторской службы на мелководныхъ верховьяхъ Днѣпра и Березины. Этотъ послѣдній пароходъ, раньше отправленія его на мѣсто службы, вѣроятно, временно будетъ въ Петербургѣ, такъ что Вы будете имѣть случай видѣть его здѣсь весною будущаго года.

Раньше чѣмъ перейти къ описанію винта Торникрофта, я

позволю себѣ сдѣлать нѣсколько общихъ замѣчаній о примѣненіи винтового двигателя къ мелкосидящимъ пароходамъ.

Вамъ безъ сомнѣнія извѣстно, что при установившемся движеніи парохода, реакція воды, выбрасываемой назадъ гребнымъ винтомъ или колесами, есть сила движущая пароходъ, какъ разъ равная сопротивленію движенію парохода. Реакція равна произведенію изъ массы воды, выбрасываемой въ секунду, на сообщаемое ей въ то же время ускореніе, или, что то же, на ея абсолютную скорость, и выражается для гребного винта слѣдующимъ образомъ:

$$R = \frac{APV}{g} (V - v) \quad . \quad (1)$$

гдѣ: A площадь сѣченія струи, выбрасываемой винтомъ,
 P вѣсъ кубической единицы воды,
 g ускореніе силы тяжести,
 v скорость парохода въ секунду,
 V скорость (относительно парохода) струи, выбрасываемой винтомъ,
 $V - v$ абсолютная скорость выбрасываемой воды, называемая скольженіемъ (slip).

Работа винта въ секунду:

$$T = \frac{APV}{g} (V - v) v \quad . \quad (2) *$$

Въ мелкосидящихъ пароходахъ діаметръ d винта опредѣляется осадкою и долженъ быть весьма малымъ, слѣдовательно, и $A = \frac{\pi d^2}{4}$ весьма мало; поэтому, для полученія реакціи, достаточной для преодоленія сопротивленія парохода, остается только одно средство — увеличеніе скорости V , съ которою вода выбрасывается изъ винта. Но при этомъ всѣ главнѣйшія потери въ работѣ винта увеличиваются быстрѣе, чѣмъ его работа, опредѣляемая выраженіемъ (2), вслѣдствіе чего полезное дѣйствіе винта быстро понижается.

Главнѣйшія потери работы винта слѣдующія:

*) Тѣ же выраженія (1) и (2), а также выраженія (3) и (4) имѣютъ мѣсто и для гребныхъ колесъ если A — дѣйствующей площади лопастей.

1) Потеря живой силы воды, выбрасываемой винтомъ, равная произведенію изъ половины массы воды, выбрасываемой въ секунду, на квадратъ ея абсолютной скорости, т. е.,

$$\frac{APV}{2g} (V-v)^2. \quad (3)$$

2) Потеря отъ удара, происходящая вслѣдствіе того, что струя воды, подходящая къ винту со скоростью v движенія парохода, внезапно пріобрѣтаетъ въ винтѣ большую скорость V . Эта потеря также равна:

$$\frac{APV}{2g} (V-v)^2. \quad (4)$$

Легко видѣть, что при увеличеніи V , обѣ эти потери возрастаютъ быстрѣе, чѣмъ работа винта, такъ какъ $V-v$ входитъ въ выраженія потерь въ квадратъ, а въ выраженіе работы—въ первой степени.

Кромѣ поименованныхъ двухъ потерь, въ винтахъ происходитъ еще:

3) Потеря живой силы вращательнаго движенія, пріобрѣтеннаго водою въ винтѣ. Эта потеря также возрастаетъ при увеличеніи V .

Дѣйствительно, скорость V струи воды, выбрасываемой винтомъ, равна произведенію изъ числа N оборотовъ винта въ секунду на шагъ h винта (шагомъ называется путь, проходимый винтомъ во время одного оборота при вращеніи въ соотвѣтственно устроенной гайкѣ), т. е.:

$$V = Nh.$$

Изъ этого выраженія легко усмотрѣть, что для увеличенія V приходится увеличивать или число оборотовъ винта или его шагъ или то и другое вмѣстѣ, вслѣдствіе чего возрастаютъ скорость вращательнаго движенія воды и обусловливаемая имъ потеря въ работѣ винта. Впрочемъ, въ винтахъ малаго діаметра, вращательное движеніе воды больше чѣмъ въ винтахъ большаго діаметра даже при одинаковомъ шагѣ и одинаковомъ числѣ оборотовъ. Въ этомъ легко отдать себѣ отчетъ, взглянувъ на черт. 1, представляющій винтовую поверхность, пересѣченную цилиндрическими поверхностями разныхъ діаметровъ. Чѣмъ меньше діаметръ винта при одинаковомъ шагѣ

тѣмъ круче оказывается линія пересѣченія винтовой поверхности съ цилиндрическою и тѣмъ, слѣдовательно, при вращеніи винта, больше, вращательное движеніе, сообщаемое водѣ, притекающей къ винту.

Изъ всего изложеннаго слѣдуетъ, что полезное дѣйствіе винтовъ малаго діаметра гораздо меньше полезнаго дѣйствія винтовъ большаго діаметра, при употребленіи которыхъ, реакція, достаточная для движенія парохода, достигается увеличеніемъ массы воды, выбрасываемой винтомъ, безъ увеличенія ея скорости, при чемъ потери въ работѣ возрастаютъ не быстрѣе работы винта.

Малое полезное дѣйствіе винтовъ малаго діаметра дѣлаетъ гребной винтъ не пригоднымъ для мелкосидящихъ пароходовъ, и заставляетъ примѣнять другой двигатель,—гребныя колеса, боковыя и заднія, въ которыхъ достаточная для движенія парохода реакція можетъ быть получена употребленіемъ большой поверхности лопастей, при малой скорости струи, выбрасываемой изъ колесъ и, слѣдовательно, при маломъ значеніи первой изъ перечисленныхъ выше потерь. Вторая потеря можетъ быть значительно уменьшена употребленіемъ подвижныхъ лопастей.

Однако, при употребленіи быстро вращающагося гребнаго винта, цилиндръ паровой машины и всѣ послѣдней могли-бы быть сдѣланы гораздо меньше, чѣмъ при употребленіи медленно вращающихся колесъ, дѣлающихъ обыкновенно не болѣе 40 оборотовъ въ минуту,—а это есть лучшее средство для облегченія парохода и уменьшенія его осадки. Кромѣ того и самый винтъ вѣситъ гораздо меньше колесъ.

Поэтому устройство гребнаго винта, примѣняемаго на пароходахъ малой осадки, представляло-бы весьма важный шагъ впередъ въ дѣлѣ постройки рѣчныхъ мелкосидящихъ пароходовъ.

Для рѣшенія этой задачи, очевидно, надо стремиться къ такому уменьшенію перечисленныхъ выше потерь въ работѣ винта, чтобы полезное его дѣйствіе сравнялось съ полезнымъ дѣйствіемъ гребныхъ колесъ.

Первая потеря, очевидно, невозвратима и не можетъ быть уменьшена; поэтому остается только найти способы для уничтоженія или уменьшенія второй и третьей потерь. Это и достигнуто въ винтѣ Горникрофта.

Для уменьшенія второй потери винтамъ придаютъ не однообраз-

ный шагъ, а постепенно возрастающій отъ входной, рѣзущей воду, кромки лопастей, къ задней, выходной. Это же средство примѣнено и г. Торникрофтомъ въ его винтѣ, но онъ, кромѣ того, заключилъ винтъ въ цилиндрической кожухъ *c* (см. черт. 3) и придавъ ступицѣ *a* винта коническую форму, вслѣдствіе чего послѣдовательныя сѣченія цилиндра *c* постепенно суживаются, соотвѣтственно возрастанію скорости протекающей воды.

Это устройство, совмѣстно съ постепенно возрастающимъ шагомъ винта, доставляетъ водѣ возможность ускоряться постепенно, безъ удара.

Если бы ступица винта не имѣла конической формы, то вода притекала бы во входное сѣченіе цилиндра *c* и къ винту съ тою же скоростью, съ которою она вытекаетъ изъ цилиндра, т. е., должна бы была во входномъ сѣченіи почти внезапно измѣнить свою скорость *v*, равную скорости движенія парохода, на скорость *V*, съ которою она выбрасывается изъ винта. Слѣдовательно, въ этомъ случаѣ мы не избѣгли бы удара, не смотря на постепенно возрастающій шагъ винта.

Третья потеря также можетъ быть уничтожена, т. е., живая сила вращающейся воды можетъ быть употреблена полезно, если за винтомъ, какъ на черт. 2, соотвѣтственно расположить кривыя поверхности. На этомъ чертежѣ стрѣлка *b* показываетъ направленіе движенія парохода, кривая *AB* изображаетъ разрѣзъ лопасти винта плоскостію параллельною его оси и находящеюся отъ нея на нѣкоторомъ разстояніи. Вода притекаетъ къ винту со скоростью *cd*, равною и противоположною скорости движенія парохода и получаетъ въ винтѣ вращательное движеніе со скоростью *ce*; эти двѣ скорости слагаются и даютъ составляющую скорость *cf*, съ которою вода и выходитъ изъ винта. Если рядомъ съ винтомъ, лѣвѣе его, расположить нѣсколько кривыхъ поверхностей *BC*, укрѣпленныхъ неподвижно, не вращающихся при вращеніи винта и образующихъ какъ бы турбинку *), то вода будетъ подходить къ нимъ по направленію стрѣлки *K* со скоростью *cf*. Эта скорость, въ свою очередь, разложится на двѣ скорости, одну *cd*, направленную по касательной

*) См. черт. 3, гдѣ *ded* турбинка съ шестью перьями *d*.

къ перу турбинки *CB*, и другую *ch*, которая, толкая перо, а съ нимъ вмѣстѣ и весь пароходъ по направленію его движенія, помогаетъ работѣ гребнаго вѣнта.

Примѣненіе турбинки описаннаго устройства было предложено еще въ 1864 году г. Артуромъ Риггомъ. Затѣмъ въ 1879 г. г. Парсонсъ дѣлалъ опыты надъ примѣненіемъ турбиннаго вѣнта и достигъ довольно хорошихъ результатовъ *).

Однако, изобрѣтеніе Ригга оставалось мало извѣстнымъ до 1880 года, когда г. Торникрофтъ примѣнилъ турбинный вѣнтъ къ миноносцѣ *Lightning* и получилъ слѣдующіе блестящіе результаты **). При обыкновенномъ вѣнтѣ діаметромъ 5 ф. 10 д. скорость миноноски достигала 18,54 узла; при турбинномъ вѣнтѣ почти вдвое меньшаго діаметра (3 ф.) скорость оказалась большею, а именно 19,02 узла. Въ первомъ случаѣ водоизмѣщеніе было 28 тоннъ, машина развивала 400,8 индикаторныхъ силъ, вѣнтъ дѣлалъ 354 оборота въ минуту, отношеніе шага къ діаметру вѣнта измѣнялось отъ 1,05 до 1,21. Во второмъ случаѣ водоизмѣщеніе было 31 тонны, машина развивала 477 индикаторныхъ силъ при 423 оборотахъ въ минуту; отношеніе шага къ діаметру было 1,25—1,44. При другомъ испытаніи та же миноноска съ турбиннымъ вѣнтомъ достигла скорости 17,7 узловъ. При этомъ водоизмѣщеніе было 34 тонны; машина развивала 384 инд. силы при 390 оборотахъ въ минуту.

Такой результатъ, т. е., достиженіе большой скорости при маломъ діаметрѣ вѣнта объясняется, конечно, не только дѣйствіемъ турбинки, но также дѣйствіемъ описанной раньше конической формы ступицы вѣнта. По изслѣдованіямъ г. Торникрофта, его вѣнтъ можетъ выбрасывать струю воды вдвое меньшаго сѣченія, чѣмъ обыкновенный вѣнтъ, со вдвое большею скоростью, и при этомъ достигать того же полезнаго дѣйствія.

Турбинный вѣнтъ миноноски *Lightning* ***) представленъ на черт. 3. Вѣнтъ *A*, имѣющій три лопасти *b* и коническую ступицу *a*, вращается въ цилиндрѣ *c*, прикрѣпленномъ неподвижно къ кормѣ парохода. Къ этому цилиндру, за вѣнтомъ, прикрѣплены 6 кри-

*) *Engineering*, 1879, vol. XXVIII, 21 Nov.

**) *Engineering*, 1883, vol. XXXV, pag. 460.

***) *Engineering*, 1881, vol. XXXII, pag. 651.

выхъ перьевъ *d*, образующихъ турбинку со ступицею *e*, которая составляетъ продолженіе ступицы *a* винта, но имѣетъ въ *hk* глухую стѣнку. Ступица турбинки совершенно независима отъ ступицы винта и служитъ только для того, чтобы струя воды, суженная въ винтѣ его конической ступицею, оставалась суженною и въ турбинкѣ; при вращеніи винта, ступица *e* и перья *d* турбинки, а также цилиндръ *c* не вращаются. Руль *f* помѣщенъ непосредственно за турбиною, входитъ яблокомъ въ ея ступицу и также снабженъ коническимъ утолщеніемъ *g*, такъ что струи воды, вышедшія изъ турбинки, постепенно расширяются безъ образованія водоворотовъ.

Въ засѣданіи англійскаго общества гражданскихъ инженеровъ, въ которомъ г. Торникрофтъ объяснялъ дѣйствіе своего винта *), извѣстный судостроитель г. Ярро высказалъ, что по его мнѣнію форма перьевъ турбинки совершенно безразлична и что они могутъ быть сдѣланы даже прямыми съ поверхностями параллельными оси судна. На это г. Торникрофтъ совершенно вѣрно возразилъ, что поверхностями параллельными движенію судна вообще ни въ какомъ случаѣ нельзя произвести движенія и что турбинка, устроенная по предложенію г. Ярро, была бы совершенно бесполезна. Въстѣ съ тѣмъ замѣчаніе г. Ярро дало г. Торникрофту поводъ привести сдѣланные имъ опыты надъ дѣйствіемъ турбинки. Имъ былъ устроенъ турбинный винтъ такимъ образомъ, что цилиндръ *c* (черт. 3), съ прикрѣпленными къ нему перьями турбинки, могъ свободно перемѣщаться вдоль оси винта, но былъ удерживаемъ отъ вращенія. Оказалось, что когда винтъ вращался, то цилиндръ *c* съ турбиною перемѣщался ближе къ винту и производилъ давленіе на его ступицу. Это давленіе было измѣрено г. Торникрофтомъ (способъ измѣренія имъ не указанъ) и оказалось приблизительно равнымъ одной пятой части полного давленія винта, побѣждающаго сопротивленіе движенію парохода. По свидѣтельству г. Барнаби **) въ другомъ случаѣ давленіе турбинки оказалось равнымъ трети полного давленія винта.

Съ 1882 года г. Торникрофтъ сталъ примѣнять свой двигатель къ мелкосидящимъ судамъ и при этомъ сдѣлалъ еще весьма важное

*) Minutes of proceedings of the institution of Civil Engineers, 1881, vol. LXVI.

**) S. W. Barnaby, Marine propellers, 2 edition, 1887.

и остроумное усовершенствованіе. Для того, чтобы по возможности увеличить діаметръ винта, не увеличивая осадки парохода, онъ помѣстилъ винтъ въ туннель или каналъ, сдѣланномъ въ днищѣ судна и имѣющемъ видъ, показанный на черт. 4 или черт. 5. При такомъ расположеніи только около двухъ третей діаметра винта находится ниже горизонта воды, остальная же треть надъ горизонтомъ, — но тѣмъ не менѣе винтъ работаетъ въ полной струѣ воды, поднимающейся въ туннель во время хода судна. Работа, расходуемая на поднятіе воды, сполна возвращается при ея обратномъ паденіи подъ кормою парохода, которая, для этой цѣли, конечно, должна въ точкахъ *a* (черт. 4 и 5) опускаться ниже горизонта воды.

Въ 1883 году г. Торникрофтомъ былъ построенъ для миссіонерской службы на р. Конго двухвинтовой пароходъ, представленный на черт. 4, имѣвшій длину 70 ф. и осадку 12 д. *). При 480 оборотахъ машины и винта въ минуту, пароходъ имѣлъ скорость 10,5 узловъ. Винтъ былъ двухлопастной съ постепенно возрастающимъ шагомъ и отношеніемъ $\frac{h}{d}$, измѣнявшимся отъ 1,5 до 9. Другой, одновинтовой пароходъ, длиною 57 футъ, построенный въ 1884 г. для гг. Аллена и Андерсона въ Александріи, при осадкѣ на кормѣ 1 ф. 3 д. и діаметрѣ винта 20 д., имѣлъ уже скорость 16 узловъ **). Въ этомъ пароходѣ (черт. 5) замѣчательно образованіе кормовой части, повторенное г. Крейтономъ въ пароходѣ „Новинка“. Наконецъ, въ 1885 г. заводъ Торникрофта построилъ для англійской арміи, дѣйствовавшей въ Суданѣ, пять пароходовъ длиною по 140 футъ при осадкѣ на кормѣ 1 ф. 10½ д. и діаметрѣ винта 32 д. ***). Эти пароходы на пробной милѣ имѣли ходъ 15,1 узловъ.

Главнѣйшіе размѣры мелкосядящихъ винтовыхъ пароходовъ, построенныхъ заводомъ Торникрофта и достигнутые ими результаты показаны въ прилагаемой таблицѣ. Для параллели, въ той же таблицѣ приведены тѣ же величины для парохода Новинка.

*) Engineering, 1883, vol. XXXV, pag. 466.

**) Engineering, 1885, vol. XXXIX, pag. 363.

***) Engineering, 1885, vol. XL.

Назначеніе или названіе парох.	Конго.	Александрія.	Суданъ.	Новинка.
Годъ постройки	1883	1884	1885	1886
Длина	70'	56'8"	140'	47'9"
Ширина	10'6"	7'8"	21'	6'
Глубина интрома	—	—	—	2'9"
Осадка на ровн. клав.	12"	—	—	13"
Осадка носа	—	1'11 $\frac{1}{2}$ "	1'41 $\frac{1}{2}$ "	10"
Осадка кормы	—	1'3"	1'10 $\frac{1}{2}$ "	15"
Водопыщеніе топливъ	—	6,7	73	—
Діаметръ винта	16"	1'8"	2'8"	—
Діаметръ пароваго цилиндра	6 $\frac{1}{4}$ "	6 $\frac{1}{4}$ "	—	—
Ходъ поршня	8"	8"	—	—
Число оборотовъ въ минуту	480	528	277	400
Число гидр. силъ	—	102	390	—
Давленіе пара въ котлѣ фунт.	—	135	134	125
Пов. пар. кв. футъ	—	244	—	—
Скор. хода узл.	10,5	16	15,1	9,8
Число винтовъ	2	1	2	1
Число рулей	1	1	3	1

Позволяю себѣ обратить Ваше вниманіе на скорости, достигнутыя пароходами, построенными г. Торникрофтомъ; онѣ далеко оставляютъ за собою все, что было достигнуто въ этомъ отношеніи мелко сидящими колесными пароходами. Скорость Новинки также значительно меньше скоростей, достигнутыхъ пароходами г. Торникрофта, но надо принять во вниманіе, что этотъ пароходъ былъ первымъ опытомъ завода. Впослѣдствіи, конечно, и г. Крейтономъ будутъ достигнуты лучшіе результаты. Впрочемъ, надо сказать, что и скорость въ 10 узловъ довольно значительна; но настоящее время, въ нашихъ мелкосидящихъ инспекторскихъ пароходахъ, мы не привыкли къ скоростямъ выше семи и восьми узловъ.

Тюрбинный винтъ повидимому имѣетъ большую будущность; во всѣхъ случаяхъ, когда отъ парохода одновременно требуется малая осадка и большая скорость, винтъ Тюринкродта положительно заслуживаетъ предпочтеніе передъ колесами, такъ какъ его примѣненіе, какъ уже выше упомянуто, позволяетъ значительно уменьшить вѣсъ паровой машины и, слѣдовательно, уменьшить осадку парохода.

Въ особыхъ случаяхъ, напр., когда требуется проходить черезъ тѣсныя плюзы, — съ тюрбиннымъ винтомъ можетъ конкурировать только заднее колесо.

Пароходы съ тюрбиннымъ винтомъ, къ сожалѣнію, имѣютъ и недостатки, а именно дурной задній ходъ. Это происходитъ вслѣдствіе того, что при заднемъ ходѣ тюрбинка представляетъ сопротивленіе движенію и неправильно направляетъ струю воды на винтъ; кромѣ того и шагъ винта при обратномъ ходѣ оказывается неправильнымъ, т. е., не въ надлежащую сторону возрастающимъ.

Для улучшенія задняго хода, вѣроятно, окажется возможнымъ слѣлать тюрбинку вольно-вращающеюся на валу, останавливать ее при помощи заклинки на время передняго хода и отпускать на время задняго хода. Надо надѣяться, что со временемъ указанный недостатокъ тюрбиннаго винта будетъ устраненъ тѣмъ или другимъ способомъ.

М. А. ЛЯХНИЦКІЙ и А. А. БРАНДТЪ.

О ЗАВИСИМОСТИ
СОПРОТИВЛЕНІЯ И УДЛИНЕНІЯ

ЛИСТОВАГО ЛИТАГО ЖЕЛѢЗА

ОТЪ ТОЛЩИНЫ И ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЪ.

СЪ 4 ЛИСТАМИ ЧЕРТЕЖЕЙ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія инженера Ю. Н. Эрлихъ, Большая Садовая, № 9.

1888.

О зависимости сопротивленія и удлиненія листового литаго желѣза отъ толщины и обработки листовъ.

(Репетиторовъ М. А. Ляхницкаго и А. А. Брандта).

Въ концѣ 1886 года при департаментѣ шоссейныхъ и водяныхъ сообщеній была образована комиссія для составленія техническихъ правилъ приѣмки литаго желѣза (мягкой стали), какъ матеріала для постройки судовъ, изготовляемыхъ по заказамъ департамента *).

При составленіи правилъ пришлось имѣть въ виду листовое литое желѣзо различной толщины и особенно тонкіе его сорта, начиная отъ толщины $\frac{1}{16}$ дюйма (1,58 мм.), идущіе на обшивку корпусовъ небольшихъ рѣчныхъ судовъ. Въ первыхъ же засѣданіяхъ комиссіи выяснилось, что къ листамъ различной толщины слѣдуетъ предъявлять и различныя требованія относительно временнаго сопротивленія и особенно удлиненія при разрывѣ, но при опредѣленіи этихъ требованій встрѣтилось затрудненіе.

Существующее постановленіе министерства путей сообщенія объ употребленіи литаго желѣза въ мостовыхъ сооруженіяхъ, изданное департаментомъ желѣзныхъ дорогъ 13 іюня 1885 года, не даетъ никакихъ указаній въ этомъ отношеніи, такъ какъ оно имѣетъ въ виду употребленіе лишь толстыхъ сортовъ листового литаго желѣза и потому ставитъ только требованіе, чтобы временное сопротивленіе разрыву, независимо отъ толщины листовъ, было отъ 40 до 47 кило-

*) Комиссія эта состояла подъ предсѣдательствомъ инженера А. П. Стремоухова изъ инженеровъ: П. А. Бѣлелюбскаго, М. А. Ляхницкаго и А. А. Брандта, корабельнаго инженера А. К. Боярскаго и инженеръ-механика К. А. Петрова.

граммовъ на кв. мм., при удлинении не меньше 18% и уменьшении площади поперечнаго сѣченія не меньше 36% , на пробныхъ образцахъ длиною 10 дюймовъ (254 мм.).

Вѣроятно по той же причинѣ столь же мало обращено вниманія на разсматриваемый вопросъ въ техническихъ правилахъ пріема къ судостроенію корабельной и котельной мягкой стали, изданныхъ морскимъ министерствомъ 12 марта 1883 года. Въ этихъ правилахъ указано только, что временное сопротивленіе металла должно быть не менѣе 26 и не болѣе 30 тоннъ на кв. дюймъ (не меньше 40,3 и не больше 46,5 килограммовъ на кв. миллиметръ), а удлиненіе не менѣе 20% при длинѣ испытываемой планки 8 дюймовъ (203,2 мм.).

Вполнѣ ясныя и точныя указанія на зависимость величинъ временнаго сопротивленія и удлиненія отъ толщины литаго листового желѣза заключаются въ инструкціи французскаго морскаго министерства, отъ 9 февраля 1885 г. По этой инструкціи испытываемыя планки должны имѣть длину 200 мм. и ширину: 20 мм., если толщина листа заключается между 4 и 20 мм., и равную толщинѣ листа, если листъ толще 20 мм. Требуемыя величины временнаго сопротивленія и относительнаго удлиненія при разрывѣ листовъ различной толщины, предназначенныхъ для кораблестроенія, опредѣляются слѣдующей таблицей:

Толщина листа:	Временное сопротивленіе.	Относительное удлиненіе.
мм.	кггр. на кв. мм.	%
$1\frac{1}{2}$ до 2	47	10
2 „ 3	46	13
3 „ 4	45	16
4 „ 6	45	18
6 „ 8	43	21
8 „ 20	42	22
20 „ 30	42	24

Инструкція допускаетъ нѣкоторое уменьшеніе временнаго сопротивленія противъ величинъ, данныхъ въ таблицѣ, но не болѣе, чѣмъ

на 2 килограмма, и лишь при условіи соотвѣтственно большаго удлиненія образца, такъ чтобы сумма временнаго сопротивленія и удлиненія отнюдь не была меньше суммы тѣхъ же величинъ, требуемыхъ таблицею.

Комиссіи представлялась возможность воспользоваться для своего дѣла французскою инструкціею и принять ея данныя въ полномъ объемѣ и безъ измѣненія. Но при этомъ являлось сомнѣніе, благо-разумно ли заимствование данныхъ безъ надлежащей повѣрки.

Чтобы устранить это сомнѣніе, комиссіею было рѣшено произвести рядъ испытаній литаго желѣза, взятаго съ нѣсколькихъ русскихъ заводовъ, и по результатамъ этихъ испытаній установить требованія относительно временнаго сопротивленія и удлиненія.

Въ силу такого рѣшенія, нами произведенъ былъ рядъ испытаній въ механической лабораторіи института инженеровъ путей сообщенія.

Для производства испытаній, отъ трехъ заводовъ: Брянскаго, Кулебакскаго и Металлическаго были получены образцы литаго желѣза, вырѣзанные изъ листовъ одной плавки и одинаковой механической обработки, но различной толщины. Заводы изготовили каждый по двѣ серіи образцовъ: Брянскій и Кулебакскій заводы—изъ матеріала собственнаго производства, Металлическій—изъ матеріала производства Александровскаго завода.

Способъ изготовленія образцовъ первой серіи на Кулебакскомъ заводѣ состоялъ въ томъ, что предварительно полученный листъ литаго желѣза, длиною и шириною въ 3,5 фута (1067 мм.), толщиною въ 20 мм., послѣдовательно прокатывался въ болѣе тонкіе листы толщиною отъ 2 до 15 миллиметровъ; затѣмъ изъ этихъ листовъ были вырѣзаны образцы. Образцы второй серіи, имѣвшіе также толщину отъ 2 до 15 мм., были выстроганы изъ желѣза толщиною 20 мм. Способъ приготовленія образцовъ первой серіи на Брянскомъ заводѣ былъ тотъ же, что и на Кулебакскомъ, образцы же второй серіи получены иначе, а именно: образцы толщиною въ 2 мм. получены строганіемъ изъ листовъ толщиною 7,5 мм., образцы толщиною 4 и 5 мм. — изъ листовъ толщиною 10 мм. и т. д. Часть образцовъ первой серіи Кулебакскаго завода была впослѣдствіи предъ испытаніемъ отожжена, составивъ такимъ образомъ особую серію. Металлическій заводъ изготовилъ также двѣ серіи образцовъ: одну изъ

листовъ толщиною отъ 2 до 16 миллиметровъ, полученныхъ тѣмъ же способомъ, какъ для первыхъ серій Брянскаго и Кулебакскаго заводовъ, и другую изъ тѣхъ же листовъ, но подвергнутыхъ отжигу.

Всѣмъ изготовленнымъ образцамъ была придана обыкновенно употребительная форма (фиг. 1), состоящая изъ собственно испытываемой полоски $abcd$, двухъ головокъ $efgh$ и $iklm$ для закладки образца въ растягивающій приборъ и двухъ постепенныхъ расширеній $adef$ и $bcih$, служащихъ для соединенія полоски съ головками и устраненія вліянія послѣднихъ на ея растяженіе. Длина полоски L и ширина ея H приняты были не одинаковыя въ образцахъ, доставленныхъ разными заводами; произошло это отъ того, что время изготовленія образцовъ на заводахъ совпало со временемъ установленія нормальнаго типа образца и свѣдѣнія по этому предмету были у заводовъ разныя. Длина и ширина полоски въ изготовленныхъ образцахъ были таковы:

въ образцахъ	Брянскаго	завода . .	$L = 220$, $H = 30$ мм.
„	„	Кулебакскаго „ . .	$L = 310$, $H = 25$ „
„	„	Металлическаго „ . .	$L = 260$, $H = 40$ „

Испытаніе образцовъ было произведено на машинѣ Вердера. Считаемо не лишнимъ помѣстить здѣсь краткое описаніе главныхъ частей этой машины; сущность ея устройства заключается въ слѣдующемъ (фиг. 2): поршень b гидравлическаго пресса a передаетъ давленіе P , производимое на него водою, короткому плечу колѣнчататаго рычага cef ; къ длинному плечу рычага подвѣшенъ поддонъ m , на который можно накладывать по мѣрѣ необходимости вѣсовыя гири; отъ рычага cef сила P передается тягу gh и затѣмъ испытываемому образцу k , прикрѣпленному однимъ концомъ къ тягу gh , а другимъ концомъ къ неподвижному устою n . Для растяженія образца приводятъ гидравлическій прессъ въ дѣйствіе; постепенно возрастающее давленіе P воды въ прессѣ заставляетъ поршень b и точку c рычага cef двигаться влѣво, вслѣдствіе чего рычагъ долженъ или повернуться около точки g , или передвинуться поступательно влѣво. Стремленіе рычага поворачиваться удерживаются накладываніемъ гирь на поддонъ m , такъ что длинное плечо рычага остается въ горизонтальномъ положеніи, а весь рычагъ, передвигаясь влѣво, увлекаетъ тягу gh и растягиваетъ образецъ k съ силою P .

Длинное плечо рычага въ 500 разъ длиннѣе короткаго и потому, при равновѣсіи рычага, вѣсъ гирь, положенныхъ на поддонъ, въ 500 разъ меньше силы P , растягивающей образецъ. Машина Вердера даетъ возможность постепенно увеличивать эту силу и измѣрять ее въ любой моментъ. Наибольшая величина растягивающей силы опредѣляется прочностью частей машины и равна 100000 килогр.

Передъ закладкой образцовъ въ машину точно измѣрялась ширина и толщина ихъ средней полоски; кромѣ того образцы подвергались предварительной подготовкѣ, служившей для опредѣленія удлиненія образцовъ во время растяженія и для увеличенія точности при измѣреніи удлиненія послѣ разрыва. Подготовка эта состояла въ слѣдующемъ:

На полоскѣ образца по срединѣ ширины намѣчалась рѣзцомъ продольная черта (фиг. 3), на которой затѣмъ отмѣривалась наблюдаемая длина полоски l : въ 200 миллиметровъ для образцовъ Брянскаго завода, въ 250 миллиметровъ для образцовъ Металлическаго завода и въ 300 миллиметровъ для образцовъ Кулебакскаго завода. Отмѣренная длина раздѣлялась на части длиною по 10 миллиметровъ и черезъ всѣ точки дѣленія намѣчались поперечныя черты. Сверхъ образца, вдоль, у самой продольной черты, укладывалась бумажная лента, шириною 12—15 мм., одинъ конецъ которой оставлялся свободнымъ, а другой прикрѣплялся къ одной изъ крайнихъ точекъ отмѣренной длины посредствомъ зажима (фиг. 4). Чтобы зажимъ не переставалъ удерживать конецъ ленты при растяженіи образца и соотвѣтственномъ уменьшеніи толщины полоски, между зажимомъ и полоской помѣщалась пластинка гутаперчи a .

Подготовленные такимъ способомъ образцы закладывались въ машину Вердера такъ, чтобы ось образца точно совпадала съ линіей дѣйствія растягивающаго усилія, и удерживались въ этомъ положеніи посредствомъ стальныхъ клиньевъ tt (фиг. 5) съ продольными бороздками. Послѣ закладки образца, гидравлическій прессъ приводился въ дѣйствіе и образецъ растягивался усиліемъ, постепенно возрастающимъ отъ нуля до разрывающей силы.

При производствѣ испытаній большое вниманіе было обращено на достиженіе возможнаго однообразія въ условіяхъ опытовъ.

Съ этой цѣлью гири ставились на поддонъ машины въ извѣстномъ порядкѣ и по вѣсу соразмѣрялись съ величиною площади попереч-

наго сѣченія образцовъ. Растяженіе образца начиналось постановкой на поддонъ гири вѣса P , дававшей на кв. мм. поперечнаго сѣченія полоски, около 4 килограммовъ, затѣмъ ставились одна за другою гири вѣсомъ $\frac{P}{2}$, а предъ наступленіемъ замѣтнаго удлиненія

образца и нѣсколько далѣе—гири вѣсомъ $\frac{P}{4}$; послѣ этого вѣсъ ставившихся гирь увеличивался до $\frac{P}{2}$, но предъ наступленіемъ мѣстнаго суженія образца снова возвращался къ величинѣ $\frac{P}{4}$ и къ концу опыта уменьшался до $\frac{P}{8}$. При такомъ порядкѣ нагруженія

поддона гилями, принято было за правило не ставить на поддонъ новой гири, пока не прекратится удлиненіе подъ дѣйствіемъ гирь, поставленныхъ раньше.

Продолжительность опытовъ измѣнялась для отдѣльныхъ образцовъ отъ 20 до 30 минутъ въ зависимости отъ размѣровъ образцовъ или, точнѣе говоря, въ зависимости отъ величины работы внутреннихъ силъ, при удлиненіи образцовъ.

Во время производства опытовъ отмѣчалась величина P' растягивающаго усилія, соотвѣтствующая началу замѣтнаго удлиненія образца, а также удлиненія полоски образца, произведенныя дѣйствіемъ постепенно увеличивавшагося усилія. Для отмѣтки этихъ удлиненій служила вышесказанная бумажная лента; съ этой цѣлью, передъ началомъ растяженія образца, на свободномъ концѣ ленты (фиг. 6) дѣлалась карандашомъ отмѣтка противъ крайней точки дѣленій образца. Во время производства опыта, по мѣрѣ нагруженія поддона и удлиненія образца, крайняя точка дѣленій полоски постепенно отходила отъ отмѣтки, сдѣланной на лентѣ; нѣсколько послѣдовательныхъ положеній этой точки также отмѣчались на лентѣ и при каждой отмѣткѣ надписывалась величина растягивающаго усилія, вызвавшая удлиненіе образца до отмѣтки. По окончаніи опыта, удлиненія образца, отмѣченныя на лентѣ, измѣрялись и записывались вмѣстѣ съ соотвѣтственными величинами растягивающаго усилія.

Послѣ разрыва образца записывалась, по числу и вѣсу гирь на поддонѣ, величина разрывающаго усилія P и измѣрялись измѣненныя размѣры образца, съ цѣлью опредѣлить относительное удлиненіе образца и процентное суженіе поперечнаго сѣченія полоски въ мѣстѣ разрыва. Относительное удлиненіе опредѣлялось двумя способами:

1. Измѣрялись длины обѣихъ частей разорванной полоски, затѣмъ длины эти складывались и изъ суммы ихъ вычиталась первоначальная длина полоски; полученная разность, раздѣленная на 100, принималась за удлиненіе образца, выраженное въ процентахъ первоначальной его длины.

2. На болѣе длинной части полоски измѣрялись: длина ab десяти цѣлыхъ дѣленій отъ мѣста разрыва (фиг. 7), длина ac девяти цѣлыхъ дѣленій отъ того же мѣста и разстояніе ad отъ мѣста разрыва до перваго цѣлаго дѣленія; на болѣе короткой части полоски измѣрялось лишь разстояніе ef отъ мѣста разрыва до перваго цѣлаго дѣленія; затѣмъ измѣренныя длины складывались и изъ суммы ихъ вычиталось 200 мм.; полученная разность, раздѣленная на 200 и умноженная на 100, принималась за процентное удлиненіе образца.

Послѣдній способъ опредѣлять удлиненіе, указанный особою комиссіею, бывшею во временномъ управленіи казенныхъ желѣзныхъ дорогъ, основывается на предположеніяхъ, что первоначальная расчетная длина полоски равна 200 мм. и что короткая часть образца растянулась бы такъ же, какъ и длинная, еслибъ она была длиннѣе.

Относительныя удлиненія, измѣренныя по второму способу можно сравнивать, какова бы ни была длина разорванныхъ образцовъ; относительныя удлиненія полученныя по первому способу, на образцахъ различной длины, сравнивать нельзя, такъ какъ положеніе мѣста разрыва и длина образца замѣтно вліяютъ на получаемый результатъ.

Для опредѣленія процентнаго суженія образца измѣрялись размѣры измѣненнаго поперечнаго сѣченія полоски въ мѣстѣ разрыва и по нимъ опредѣлялась измѣненная площадь; разность между первоначальной площадью сѣченія ω и измѣненной площадью ω' , раздѣленная на первоначальную площадь и умноженная на 100, принималась за процентное суженіе.

Наконецъ, вычислялось еще процентное удлиненіе матеріала для мѣста разрыва. Вычисленіе это основано на предложеніи, что объемъ

полоски не измѣняется отъ растяженія и что, слѣдовательно, для мѣста разрыва объемъ $\omega \times l$ единицы длины до растяженія равенъ объему $\omega' \times \left(1 + \frac{s}{100}\right)$ той же длины, получившей процентное удлиненіе s при разрывѣ; изъ равенства этихъ объемовъ получается формула: $s = \left(\frac{\omega}{\omega'} - 1\right) 100\%$, по которой и вычислялось s .

Величины, полученные измѣреніемъ образцовъ предъ испытаніемъ и послѣ разрыва, а также отмѣченные во время производства опытовъ, послужили для составленія прилагаемыхъ таблицъ и эпюръ. Въ таблицахъ помѣщены всѣ окончательные результаты произведенныхъ опытовъ, а кривыя эпюръ изображаютъ постепенный ходъ измѣненія длины образцовъ въ зависимости отъ возрастанія растягивающаго усилія.

Для построенія кривыхъ, на вертикальной оси координатъ откладывались, въ масштабѣ 2,5 кгр. въ 1 сантиметрѣ, величины $r = \frac{p}{\omega}$ растягивающихъ усилій, отнесенныхъ къ единицѣ первоначальной площади сѣченія образца, а на горизонтальной оси координатъ, въ масштабѣ 4 мм. въ 1 сантиметрѣ, величины соответственныхъ удлиненій полоски, полученные измѣреніемъ бумажной ленты и разорваннаго образца. Опредѣляемая этими координатами точки соединялись чертами, образовавшими показанныя на эпюрахъ кривыя. Всего составлено 7 эпюръ; на первой и второй изображены результаты испытаній нестроганныхъ и строганныхъ образцовъ Брянскаго завода, на третьей, четвертой и пятой—результаты испытаній нестроганныхъ, строганныхъ и отоженныхъ образцовъ Кулебакскаго завода, а на шестой и седьмой—результаты испытаній неотожженныхъ и отоженныхъ образцовъ Металлическаго завода. Нумера таблицъ соответствуютъ нумерамъ эпюръ.

Описанный выше способъ измѣренія удлиненій образца, соответствующихъ различнымъ величинамъ растягивающаго усилія, и составленія эпюръ былъ принятъ нами вслѣдствіе того, что въ механической лабораторіи института нѣтъ самопишущаго прибора, чертящаго автоматически, во время самого производства опыта, эпюры, подобныя тѣмъ, которыя мы вычерчивали по обмѣрамъ лентъ и образцовъ. Эпюры эти имѣютъ немалое значеніе для характери-

стики упругихъ свойствъ матеріала; по нимъ нельзя найти *предѣла упругости* (first elastic limit, Elasticitätsgrenze, Proportionalitätsgrenze), но онѣ даютъ возможность опредѣлить *начало замѣтнаго удлиненія* или *второй предѣлъ упругости* (principal elastic limit, Streckgrenze), то есть то напряженіе матеріала при растяженіи, при которомъ онъ начинаетъ замѣтно удлиняться. Опредѣленіе начала замѣтнаго удлиненія весьма важно, такъ какъ оно можетъ быть сдѣлано гораздо легче опредѣленія предѣла упругости, а между тѣмъ по отношенію начала замѣтнаго удлиненія къ временному сопротивленію можно удобно судить о степени вязкости или хрупкости матеріала. Нѣкоторые англійскіе и французскіе изслѣдователи опредѣляютъ только начало замѣтнаго удлиненія и придаютъ ему значеніе и названіе предѣла упругости.

Построенныя нами кривыя вообще не менѣе точны, чѣмъ тѣ, которыя получаются на самопишущихъ приборахъ, но въ двухъ мѣстахъ онѣ представляютъ отклоненіе отъ истины, неустранимыя при принятомъ нами способѣ измѣренія удлиненій и соответственныхъ усилій. Какъ видно изъ рассмотрѣнія эпюръ, получаемыхъ на самопишущихъ приборахъ, сопротивленіе образца при растяженіи уменьшается: 1. непосредственно вслѣдъ за началомъ замѣтнаго удлиненія и 2. передъ разрывомъ образца, при появленіи мѣстнаго суженія полоски. Это значить, что въ эти два періода деформаціи образца можно постепенно немного уменьшить растягивающее усиліе и тѣмъ не менѣе произвести: въ первомъ случаѣ дальнѣйшее удлиненіе образца, а во второмъ случаѣ удлиненіе и разрывъ. При принятомъ нами способѣ испытанія нѣтъ возможности наблюдать первое, весьма незначительное, уменьшеніе сопротивленія образцовъ; поэтому на вычерченныхъ эпюрахъ завѣдомо явились небольшія неувѣрности непосредственно за началомъ замѣтнаго удлиненія.

Уменьшеніе сопротивленія образцовъ послѣ начала мѣстнаго суженія можно наблюдать и при принятомъ нами способѣ испытанія, постепенно снимая гири съ поддона машины. Однако эта операція довольно сложна и даетъ не совсѣмъ точные результаты; она произведена нами только для двухъ образцовъ, № 704 и № 705. На эпюрѣ 7 можно прослѣдить, какъ кривыя этихъ двухъ образцовъ, достигнувъ максимума ординаты при началѣ мѣстнаго суженія (около точекъ А), затѣмъ вновь понижаются къ оси абсциссъ. Для

всѣхъ остальныхъ образцовъ концы кривыхъ точно не получены; по-
этому ординаты крайнихъ ихъ точекъ приняты равными временному
сопротивленію матеріала и самыя эти точки соединены съ преды-
дущими пунктиромъ.

Замѣтимъ еще, что мы чертили кривыя по ординатамъ, пред-
ставляющимъ не дѣйствительное напряженіе матеріала въ данный
моментъ, а растягивающее усиліе, отнесенное къ первоначальному
сѣченію образца и не имѣющее реального значенія. Для полученія
дѣйствительныхъ напряженій матеріала слѣдовало бы относить рас-
тягивающія усилія къ сѣченію образца, уменьшенному вследствие
предшествовавшаго растяженія.

Перейдемъ къ разсмотрѣнію полученныхъ нами результатовъ.

На эпюрахъ 1, 3 и 6 и въ соответствующихъ таблицахъ пред-
ставлены результаты испытанія образцовъ литаго желѣза различныхъ
толщинъ въ томъ видѣ, въ какомъ они получены съ заводовъ, безъ
всякой обработки поверхностей *). При разсмотрѣніи эпюръ и таб-
лицъ легко замѣтить, что чѣмъ меньше толщина желѣза, тѣмъ оно
оказывается жестче, то есть тѣмъ выше его временное сопротивленіе
и начало замѣтнаго удлиненія и тѣмъ меньше его процентныя удли-
неніе и суженіе. Встрѣчающіяся въ таблицахъ отклоненія отъ этого
общаго правила слѣдуетъ приписать случайнымъ причинамъ, какъ
напримѣръ, расположенію мѣста разрыва образца ближе къ срединѣ
или концамъ, существованію случайно слабаго мѣста, несовершенной
однородности матеріала и пр.

Постараемся выяснитъ происхожденіе замѣченныхъ явленій, при-
чемъ сперва рассмотримъ причины, вызывающія увеличеніе времен-
наго сопротивленія и начала замѣтнаго удлиненія при уменьшеніи
толщины листовъ, а затѣмъ перейдемъ къ объясненію уменьшенія
процентныхъ удлиненія и суженія въ зависимости отъ уменьшенія
толщины листовъ. Первое явленіе легко объяснить, припомнивъ про-
цессъ изготовленія тонкихъ листовъ. Для полученія тонкаго листа,
желѣзо приходится пропускать черезъ нѣсколько вальцовъ прокат-
наго стана, постепенно уменьшающихъ его толщину до требуемаго
размѣра. При этомъ температура листа постепенно понижается, такъ

*) Исключеніе составляютъ образцы: № 948 Брянскаго завода и № 954 Куле-
бакскаго завода, для которыхъ кривыя вычерчены прерывающеюся чертою; о нихъ
будетъ сказано дальше.

что через послѣдніе валцы онъ проходитъ, охладившись до темно краснаго каленія или еще болѣе; чѣмъ тоньше листъ, тѣмъ, вообще говоря, сильнѣе это охлажденіе. Такая прокатка, дающая листамъ характерную красноватую окраску, производитъ очевидно такое же дѣйствіе, какъ растяженіе листовъ далѣе начала замѣтныхъ удлинений. Представимъ себѣ образецъ литаго желѣза, растянутый предварительно усиломъ такой величины, что поперечные размѣры его значительно измѣнились. Если подвергнемъ этотъ образецъ вторичному растяженію до разрыва и отнесемъ разрывающее усиліе къ уменьшенному при предварительномъ вытягиваніи сѣченію, то, конечно, получимъ гораздо большее временное сопротивленіе образца, чѣмъ при отнесеніи разрывающаго усилія къ первоначальному, неуменьшему его сѣченію. Образцы изъ листовъ, прокатанныхъ въ охлажденномъ состояніи, представляются какъ бы вытянутыми при самомъ изготовленіи до значительнаго уменьшенія поперечныхъ размѣровъ, чѣмъ и объясняется ихъ высокое временное сопротивленіе. Подобному же вліянію механической обработки слѣдуетъ приписать также высокое временное сопротивленіе стальныхъ и желѣзныхъ проволокъ.

Существуетъ мнѣніе, что въ листахъ любой толщины поверхностные слои металла имѣютъ бѣльшее временное сопротивленіе, чѣмъ средніе, и что въ тонкихъ листахъ поверхностные слои, получая преобладающее вліяніе, опредѣляютъ собою возрастаніе временнаго сопротивленія этихъ листовъ. Такое объясненіе замѣченнаго нами явленія съ самаго начала казалось намъ невѣрнымъ, но, желая устранить всякія сомнѣнія, мы произвели два опыта. Образецъ № 948 Брянскаго завода, имѣвшій первоначально толщину 5,15 миллиметра, былъ обстроганъ съ обѣихъ сторонъ, такъ что толщина его уменьшилась до 3,7 миллиметра. Затѣмъ онъ былъ обыкновеннымъ образомъ испытанъ, причемъ опредѣленные опытомъ временное сопротивленіе и начало замѣтнаго удлиненія оказались совершенно равными тѣмъ же величинамъ образца № 869 Брянскаго завода, толщиной 5 миллиметровъ. Отсюда явствуетъ, что поверхностный слой не оказываетъ замѣтнаго вліянія на временное сопротивленіе матеріала.

Такой же опытъ былъ сдѣланъ съ образцомъ № 954 Кулебакскаго завода, толщиной 4,7 миллиметра, обстроганнымъ съ обѣихъ сторонъ до толщины въ 3,1 миллиметра. Разсматривая таблицу 3

и эпюру 3, въ которыхъ помѣщены результаты испытанія этого образца, легко замѣтить, что обстрогиваніе едва-ли уменьшило его временное сопротивленіе, такъ какъ послѣднее оказывается больше временнаго сопротивленія всѣхъ другихъ образцовъ Кулебакскаго завода.

Повышеніе временнаго сопротивленія, происходящее вслѣдствіе прокатки желѣза въ полуохлажденномъ состояніи, сопровождается и повышеніемъ начала замѣтнаго удлиненія. Легко можетъ быть, что обѣ эти величины, возросши во время процесса прокатки, продолжаютъ еще затѣмъ возрастать съ теченіемъ времени. Къ такому предположенію можно прійти на основаніи опытовъ г. Баушингера, опубликованныхъ имъ въ тринадцатомъ выпускѣ (1886 г.) *Mittheilungen a. d. mech.-techn. Laboratorium d. k. techn. Hochschule zu München*.

Извѣстно, что, если подвергнуть образецъ литаго желѣза усилю T , превосходящему начало замѣтнаго удлиненія и затѣмъ прекратить дѣйствіе усилія, то при повтореніи тотчасъ же опыта, начало замѣтнаго удлиненія окажется поднятымъ до усилія T . Г. Баушингеръ нашелъ, что при повтореніи опыта черезъ день послѣ предварительнаго растяженія начало замѣтнаго удлиненія оказывается выше усилія T и что поднятіе его продолжается съ теченіемъ времени въ продолженіе недѣль и мѣсяцевъ, а, можетъ быть, и годовъ *).

При разсмотрѣніи таблицъ 1, 3 и 6 нельзя не обратить внима-

*) Пами произведенъ былъ одинъ опытъ, давшій результаты, согласные съ этимъ выводомъ. Образецъ № 1459 Кулебакскаго завода (см. таблицу и эпюру 5) былъ подвергнутъ на машинѣ Вердера растягивающему усилию въ 34,32 килограмма на кв. мм. первоначальнаго поперечнаго сѣченія и затѣмъ вынутъ изъ машины. Достигнутое усиліе было значительно больше соответствующаго началу замѣтнаго удлиненія, равнаго въ данномъ случаѣ 20 килограммамъ и вызвало увеличеніе длины образца на 45 мм. Черезъ 6 дней образецъ былъ снова заложенъ въ машину и при постепенномъ увеличеніи растягивающаго усилія до 36,77 кл. на кв. мм. первоначальнаго сѣченія, вытянулся вновь всего на 1,1 миллиметра. Такимъ образомъ, начало замѣтнаго удлиненія оказалось при вторичномъ растяженіи лежащимъ выше 34,32 и даже 36,77 килогр. Разрывъ послѣдовалъ при 37,6 килогр. на кв. мм., причеъ полное удлиненіе достигло 59 мм. Если бы при первоначальномъ растяженіи опытъ былъ доведенъ до разрушающаго усилія, то, судя по пологости кривой эпюры 5, разрывъ послѣдовалъ бы при 35,5 килогр.; слѣдовательно въ теченіе 6 дней временное сопротивленіе образца, повидимому, возросло на 2,1 килограмма.

нія на графу 7, заключающую отношеніе начала замѣтнаго удлиненія къ временному сопротивленію образцовъ. Это отношеніе опредѣляетъ хрупкость металла; чѣмъ оно больше, то есть, чѣмъ ближе начало замѣтнаго удлиненія къ временному сопротивленію, тѣмъ металлъ хрупче и тѣмъ больше опасность излома при случайныхъ толчкахъ и ударахъ. По числамъ графы 7, измѣняющимся отъ 0,90 для самыхъ тонкихъ листовъ до 0,50 и 0,60 для самыхъ толстыхъ, легко замѣтитъ, что съ уменьшеніемъ толщины, хрупкость литаго желѣза замѣтно возрастаетъ.

Обратимся теперь къ изслѣдованію причинъ, вызывающихъ уменьшеніе относительныхъ удлиненій съ уменьшеніемъ толщины образцовъ. Такихъ причинъ двѣ. Первая заключается въ той же особенности механической обработки тонкихъ листовъ, отъ которой зависятъ и бѣльшая жесткость матеріала тонкихъ листовъ сравнительно съ толстыми. Листы, вытянутые въ полуохлажденномъ состояніи въ вальцахъ прокатнаго стана, не могутъ уже, при вторичномъ растяженіи, дать такое удлиненіе, какъ листы, неподвергавшіеся прокаткѣ въ охлажденномъ состояніи.

Второй причиной является вліяніе размѣровъ поперечнаго сѣченія образца. При растяженіи всякаго образца, сначала замѣчается общее равномерное удлиненіе полоски по всей ея длинѣ, но затѣмъ, незадолго до разрыва, появляется мѣстное удлиненіе полоски, сопровождающееся особннымъ уменьшеніемъ поперечнаго сѣченія, или, какъ говорятъ, суженіемъ въ томъ же мѣстѣ полоски. Раіонъ мѣстнаго удлиненія тѣмъ больше, чѣмъ толще образецъ; поэтому относительное удлиненіе полоски въ толстыхъ образцахъ получается бѣльшимъ, чѣмъ въ тонкихъ, при одинаковыхъ прочихъ условіяхъ, то есть при одинаковой длинѣ и ширинѣ образцовъ, одинаковыхъ свойствахъ матеріала и пр. Такое вліяніе размѣровъ образца на относительное удлиненіе матеріала было изслѣдовано г. Барба *), нашедшимъ, что при одинаковомъ матеріалѣ только подобные по формѣ образцы даютъ одинаковое относительное удлиненіе послѣ разрыва.

Желая изслѣдовать степень вліянія каждой изъ двухъ при-

*) Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils. Etude sur les allongements des métaux après rupture, par J. Barba.

чинъ, вызывающихъ уменьшеніе относительнаго удлиненія тонкихъ листовъ сравнительно съ толстыми, мы произвели рядъ испытаній надъ доставленною Брянскимъ заводомъ серією образцовъ различной толщины, полученныхъ обстрогиваніемъ толстыхъ образцовъ. Результаты этихъ испытаній представлены въ таблицѣ 2 и на эпюрѣ 2.

Необходимо оговориться, что эта серія получена обстрогиваніемъ образцовъ не одинаковой, а разныхъ толщинъ отъ 7,5 до 20 миллиметровъ; поэтому на полученные результаты вліяли не только поперечные размѣры образцовъ, но также неодинаковость прокатки. Однако послѣднее вліяніе было, по всей вѣроятности, незначительно: въ самомъ дѣлѣ изъ таблицы 1, представляющей результаты испытанія неотожженныхъ образцовъ Брянскаго завода, легко усмотрѣть, что листы, толщиной отъ 7,5 до 20 миллиметровъ, весьма мало разнятся одинъ отъ другаго, какъ по временному сопротивленію, такъ и по процентному удлиненію и сѣуженію; на эпюрѣ 1 малая разница въ результатахъ испытанія этихъ образцовъ выражается тѣмъ, что кривыя ихъ близки къ совпаденію и заключены въ узкой полосѣ, тогда какъ кривыя остальныхъ образцовъ, болѣе тонкихъ, отстоятъ далеко одна отъ другой и отъ сказанной полосы.

При разсмотрѣніи таблицы 2 и соотвѣтствующей эпюры замѣчается слѣдующее: 1) Временное сопротивленіе, какъ и слѣдовало ожидать, мало разнится для различныхъ образцовъ и притомъ эти небольшие разницы таковы, что ихъ слѣдуетъ приписать лишь случайной неоднородности матеріала въ образцахъ. 2) Относительное удлиненіе постепенно уменьшается съ уменьшеніемъ толщины, но въ гораздо слабѣйшей степени, чѣмъ въ необстроганныхъ образцахъ Брянскаго же завода (таблица 1); при измѣненіи толщины послѣднихъ отъ 2,55 до 15 миллиметровъ, относительное удлиненіе ихъ, измѣренное по второму способу, измѣняется въ предѣлахъ отъ 5,0% до 33,8%, тогда какъ относительное удлиненіе строганныхъ образцовъ той же толщины заключено между 16,4% и 31,2%. 3) Процентное сѣуженіе листовъ разной толщины почти одинаково, отъ 52,2 до 60,8, что и должно быть для образцовъ изъ матеріала одинаковыхъ качествъ.

Кромѣ строганныхъ образцовъ Брянскаго завода, испытанію были подвергнуты еще четыре строганныхъ образца Кулебакскаго завода, толщиной 1,45, 5,00, 7,50 и 10,25 миллиметра; результаты испытанія помѣщены на таблицѣ и эпюрѣ 4. Наиболѣе толстый

изъ взятыхъ образцовъ повидимому вырѣзанъ изъ другаго матеріала, чѣмъ остальные три, и потому долженъ быть отстраненъ при обобщеніи результатовъ. Разсмотрѣніе же результатовъ испытанія прочихъ образцовъ приводитъ къ тому же выводу, какъ и для образцовъ Брянскаго завода: временное сопротивленіе и сѣуженіе—почти одинаково для всѣхъ образцовъ, а относительное удлиненіе слабо возрастаетъ съ увеличеніемъ толщины, причемъ возрастаніе это происходитъ лишь отъ вліянія размѣровъ поперечнаго сѣженія образцовъ, а не качества матеріала.

Испытанія строганныхъ образцовъ даютъ нѣкоторое представленіе объ относительномъ вліяніи поперечнаго сѣженія образцовъ и прокатки на относительное удлиненіе. Такъ, напримѣръ, они показываютъ, что уменьшеніе толщины образца строганіемъ съ 15—20 миллиметровъ до 1,5—2 понижаетъ относительное удлиненіе съ 18—30% до 16%; уменьшеніе же толщины подобныхъ листовъ до 1,5—2 миллиметровъ прокаткою понижаетъ относительное удлиненіе гораздо больше, а именно съ 25—34% до 5—7%.

Произведенныя нами испытанія строганныхъ образцовъ не даютъ возможности прослѣдить вполне отчетливо вліяніе толщины образца на относительное удлиненіе и выразить это вліяніе формулой. Матеріалъ образцовъ далеко не представлялся однороднымъ, хотя всѣ они выстроганы изъ листовъ одной плавки, а образцы Кулебакскаго завода—даже изъ листовъ совершенно одинаковой толщины. Испытаніе такихъ образцовъ, въ какомъ бы то ни было числѣ, не привело бы насъ къ опредѣленной формулѣ; поэтому мы ограничились небольшимъ числомъ опытовъ, лишь для нѣкотораго разъясненія сказаннаго вліянія.

Остается еще разсмотрѣть результаты испытанія отоженныхъ образцовъ Металлическаго и Кулебакскаго заводовъ, представленные на эпюрахъ 5 и 7 и въ соответствующихъ таблицахъ. Образцы Металлическаго завода были доставлены отоженными съ завода, образцы же Кулебакскаго завода были отожены частью на Металлическомъ заводѣ, частью на заводѣ Бутца и Папмеля. При сравненіи данныхъ только что названныхъ эпюръ и таблицъ съ результатами испытанія неотоженныхъ образцовъ тѣхъ же заводовъ, (эпюры и таблицы 3 и 6), легко замѣтить, что отжигъ понижаетъ временное сопротивленіе и начало замѣтнаго удлиненія и возвы-

шаетъ относительное удлинёніе. Самые тонкіе отожженные образцы дали удлинёніе не менѣе 13% — 16% и только одинъ образецъ № 958 Кулебакскаго завода, толщиною 4,55 мм., представилъ удлинёніе въ 11,1%, и то вѣроятно вслѣдствіе какого либо порока.

Такимъ образомъ оказывается, что отжигъ возвращаетъ тонкимъ листамъ, въ извѣстной мѣрѣ, ту мягкость, которую они утратили вслѣдствіе прокатки въ полуохлажденномъ состояніи. Такое дѣйствіе отжига представляетъ явленіе общеизвѣстное. Г. Консидеръ въ замѣчательномъ по богатству содержанія сочиненіи: *Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions* *), приводитъ между прочимъ слѣдующій примѣръ: тонкій листъ, имѣвшій до отжига начало замѣтнаго удлинёнія 48,6 килограммовъ, временное сопротивленіе 58,0 килограммовъ, а относительное удлинёніе 9%, далъ при испытаніи послѣ отжига тѣ же величины соответственно равными 23,2 кгр., 47,4 кгр. и 16,5%.

Повидимому, отжигъ понижаетъ также отношеніе начала замѣтнаго удлинёнія къ временному сопротивленію, т. е. дѣлаетъ матеріаль вязче. Это вліяніе отжига замѣчено нами на тонкихъ образцахъ Кулебакскаго завода (см. графы 7 таблицъ 3 и 5), но не замѣчено на образцахъ Металлическаго завода.

Необходимо еще оговориться, что достигаемая отжигомъ степень мягкости и вязкости всетаки оказывается для тонкихъ листовъ ниже, чѣмъ для толстыхъ. Кромѣ отжиганія, существуетъ еще другое средство для сообщенія тонкимъ листамъ литаго желѣза возможной степени мягкости и вязкости, а именно такое подогрѣваніе матеріала во время самой прокатки, чтобы температура листа при выходѣ изъ послѣднихъ вальцовъ была не ниже вишневокраснаго каленія.

Заканчивая описаніе произведенныхъ испытаній, отмѣтимъ еще, что тонкіе образцы Кулебакскаго завода оказались мягче образцовъ Брянскаго и Металлическаго заводовъ и что кривыя растяженія всѣхъ образцовъ Кулебакскаго завода поднимаются круче, не имѣя притомъ, за началомъ замѣтнаго удлинёнія, той почти горизонтальной части, которая замѣчается въ кривыхъ образцовъ другихъ заводовъ.

Вообще произведенныя испытанія приводятъ насъ къ слѣдующимъ заключеніямъ:

*) *Annales des ponts et chaussées*. Avril, 1885.

1) При практикуемомъ нынѣ заводами способѣ прокатки, тонкіе листы литаго желѣза выходятъ изъ прокатныхъ станковъ жесткими и хрупкими, причемъ степень жесткости и хрупкости вообще тѣмъ выше, чѣмъ тоньше листъ.

2) Отъ дѣйствія отжига тонкіе листы литаго желѣза теряютъ въ извѣстной мѣрѣ жесткость и хрупкость, то есть временное сопротивление ихъ уменьшается, относительное удлиненіе увеличивается, а отношеніе начала замѣтнаго удлиненія къ временному сопротивленію понижается.

3) Для сообщенія тонкимъ листамъ надлежащей мягкости и вязкости, необходимо отжигать ихъ послѣ прокатки, или подогревать во время прокатки, или же примѣнять то и другое средство

4) Примѣненіемъ отжига и подогреванія относительное удлиненіе тонкихъ листовъ увеличивается, но не доводится до величины удлиненія толстыхъ листовъ, вслѣдствіе вліянія толщины образцовъ и остающагося вліянія прокатки; поэтому требованія относительно удлиненія матеріала при пріемкѣ должны быть поставлены въ зависимость отъ толщины листовъ.

5) Для обезпеченія мягкости и вязкости листовъ литаго желѣза, поставляемаго заводами для мелкосидящихъ рѣчныхъ судовъ по заказамъ Министерства п. с., необходимо требовать, чтобы временное сопротивление матеріала заключалось въ предѣлахъ отъ 33 до 41 килограмма на кв. миллиметръ, а относительное удлиненіе, при длинѣ образцовъ 200 миллиметровъ и ширинѣ 30 миллиметровъ, было не менѣе величинъ указанныхъ въ табличкѣ:

Толщина листа въ миллиметрахъ.	Относ. удлиненіе въ процентахъ.
1,5—2	13
2—3	14
3—4	16
4—6	18
6—8	21
8 и выше.	24

Данныя послѣдняго пункта приняты комиссіей и введены въ проектированныя ею правила пріемки литаго желѣза для изготовленія паровыхъ котловъ и корпусовъ рѣчныхъ судовъ вѣдомства путей сообщенія.

ТАБЛИЦА I.

Результаты испытанія образцовъ Брянскаго завода (длина 200 мм.).
Литое желѣзо неотожженное.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
№№ Лаборатори.	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало заѣтнаго удлиненія.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, б: в.	Относительныя удлиненія.			Суженіе.	Расстояніе отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца полосы.	Положеніе разрывной плоскости относитель- но оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.
	мм.			кггр. на кв. мм.			Определенное по 1-му способу.	Определенное по 2-му способу.	Въ разрывной плоскости.		мм.	угложд.	
							%			‰			
866	2,55	2,55	30,30	47,5	53,0	0,90	6,0	5,0	59	37,1	12,7	90°	
865	2,65	2,65	30,30	46,0	52,4	0,87	7,1	7,1	120	54,6	104,4	70°	
948	5,15	3,70	30,20	34,5	44,3	0,76	13,3	13,7	102	50,4	76,5	86°	
867	4,50	4,50	30,10	38,5	46,1	0,83	14,3	14,6	110	52,3	79,2	90°	
868	4,65	4,65	30,10	37,5	46,8	0,80	15,0	14,5	111	52,5	71,5	78°	
869	5,00	5,00	30,50	34,5	44,3	0,78	22,7	23,0	118	54,1	118,2	80°	
871	7,45	7,45	30,20	30,0	41,1	0,73	23,3	25,0	110	52,4	63,2	90°	
872	7,50	7,50	30,00	29,0	42,2	0,69	22,3	24,7	110	52,3	52,0	90°	
873	10,20	10,20	30,50	24,0	38,6	0,62	29,0	29,5	134	57,2	77,2	90°	
919	10,30	10,30	30,20	24,0	38,5	0,62	27,4	27,1	177	63,9	79,2	90°	
926	15,00	15,00	30,00	24,3	38,9	0,62	31,4	33,8	179	64,2	74,2	90°	
925	20,00	20,00	30,10	23,2	41,5	0,56	25,7	25,0	13,3	57,0	45,2	90°	

ТАБЛИЦА II.

Результаты испытанія образцовъ Брянскаго завода (длина 200 мм.).
Литое желѣзо строганое.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.											
№№. Лаборатори.	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало замятаго удлиненія.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5: 6.	Относительныя		удлиненія.	Съжатіе.	Расстояние отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца поперекъ	Положеніе разрывной плоскости относи- тельно оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.											
							Опредѣленное по 1-му способу.	Опредѣленное по 2-му способу.																
							Въ разрывной плоскости.		°/о					°/о	мм.	УГОЛЪ.								
мм.														кг. на кв. мм.										
828	7,5	2,60	29,5	28,5	39,1	0,73	16,5	16,4	126	55,7	8,1	65°												
829	—	2,70	29,5	30,0	40,2	0,74	16,9	16,5	144	59,0	53,0	70°												
830	10,0	4,40	30,1	25,0	38,5	0,65	20,7	20,8	123	55,2	60,0	85°												
831	—	4,55	30,1	23,7	35,0	0,67	19,0	17,6	123	55,1	62,1	85°												
832	—	5,40	30,3	24,8	39,1	0,63	19,5	18,4	116	53,7	40,0	90°												
833	—	5,20	30,1	25,0	40,3	0,62	25,1	22,4	142	58,7	56,0	85°												
835	14,5	7,75	30,6	25,3	42,0	0,60	23,3	23,5	111	52,2	33,6	90°												
836	15,0	10,00	30,4	23,8	37,8	0,63	30,4	31,2	155	60,8	97,0	90°												
838	20,0	15,20	30,4	21,5	42,7	0,53	25,0	22,5	131	56,7	42,1	90°												

ТАБЛИЦА III.

Результаты испытанія образцовъ Кулебакскаго завода (длина 300 мм.).
Литое желѣзо неотожженное.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
№№ Лаборатори.	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало замѣтнаго удлиненья.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5 : 6.	Относительныя удлиненья.			Сжатіе.	Расстояніе отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца поперсн.	Положеніе разрывной плоскости относи- тельно оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.
							Опредѣленное по 1-му способу.	Опредѣленное по 2-му способу.	Въ разрывной плоскости.				
мм.										%	мм.	углоу.	
952	1,6	1,6	25,05	31,2	41,2	0,76	6,8	8,4	53	34,9	133,6	87°	
953	3,0	3,0	25,15	32,0	39,8	0,80	4,0	5,2	140	58,4	24,5	75°	
954	4,7	3,1	25,05	29,5	45,1	0,65	17,2	17,5	110	52,4	169,6	70°	
1460	7,2	7,2	25,50	25,2	42,9	0,59	16,5	17,5	119	54,4	106,5	90°	
922	9,9	9,9	25,50	22,8	39,6	0,57	21,7	23,9	152	60,4	153,5	90°	
1461	11,8	11,8	25,20	20,0	37,8	0,53	19,3	24,0	156	61,0	115,5	90°	

ТАБЛИЦА IV.

Результаты испытанія образцовъ Кулебакскаго завода (длина 300 мм.).
Литое желѣзо строганое.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	
№№ Лаборатори.	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало заѣтнаго удлиненія.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5: 6.	Относительныя удлиненія.			Служеніе.	Расстояние отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца подоски.	Положеніе разрывной плоскости относи- тельно оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.	
							Опреѣленное по 1-му способу.	Опреѣленное по 2-му способу.	Въ разрывной плоскости.					
														‰
мм.							‰			‰		мм.		угелъ.
950	20	1,45	25,15	21,5	41,1	0,52	15,6	16,7	105	51,2	48,5	65°		
955	20	5,00	25,10	24,0	43,8	0,55	15,6	17,6	103	50,6	31,2	90°		
956	20	7,50	25,20	21,5	41,3	0,52	15,5	18,1	95	48,8	124,0	90°		
921	20	10,25	25,50	19,5	36,3	0,54	27,3	28,2	174	63,5	129,5	90°		

ТАБЛИЦА V.

Результаты испытанія образцовъ Кулебакскаго завода (длина 300 мм.).
Литое желѣзо отоженное.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
№№ Лабораторіи.	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало замѣтнаго удлиненія.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5; 6.	Относительныя удлиненія.			Сжатіе.	Расстояніе отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца полоски.	Положеніе разрывной поверхности отно- сительно оси образца.	ПРИМѢЧАНІА.
							Определенное по 1-му способу.	Определенное по 2-му способу.	Въ разрывной поверхности.				
							%			‰	мм.	углы.	
951	1,60	1,60	25,1	17,5	32,4	0,54	12,4	13	63,3	38,8	18,6	88°	Образецъ изогнулся желобкомъ.
949	1,65	1,65	25,1	17,0	31,4	0,54	14,6	16,9	78,8	44,1	70,9	85°	Образецъ покривился.
957	2,85	2,85	25,05	17,5	35,0	0,50	13,9	16,8	72,0	41,9	35,7	85°	
1456	4,35	4,35	25,5	22,5	38,3	0,59	17,6	19,5	102,0	50,5	140,8	90°	
958	4,55	4,55	25,05	20,2	34,2	0,59	9,4	11,1	95,0	48,7	16,0	90°	На поверхности образца замѣтны углубленія, уменьшающія толщину до 4,20 мм.
1457	7,20	7,20	25,1	21,0	38,7	0,54	24,3	27,0	125,8	55,7	99,7	90°	
1458	9,80	9,80	25,5	21,0	36,4	0,58	23,0	25,9	195,0	66,0	35,0	90°	
1459	12,00	12,00	25,5	20,2	37,6	0,54	19,7	22,0	155,2	60,8	32,5	90°	Испытаніе начато 30 дек. 1887 г. окончено 5 янв. 1888 г.

ТАБЛИЦА VI.

Результаты испытанія образцовъ Металлическаго завода (длина 250 мм.).
Литое желѣзонеотожненное.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
№№ Лаборатори.	Толщина листа въ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало загибнаго удлиненія.	Временное сопротив- леніе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5: 6.	Относительныя удлиненія.			Съуженіе.	Расстояніе отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца полости.	Положеніе разрывной плоскости относи- тельно оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.
							Определенное по 1-му способу.	Определенное по 2-му способу.	Въ разрывной плоскости.				
							%			‰	мм.	углоѣ.	
1230	2,10	2,10	40,5	43,5	48,2	0,90	7,5	7,0	—	—	109,2	—	
1229	2,15	2,15	40,0	47,5	54,1	0,88	9,6	9,0	—	—	34,1	—	
1232	3,80	3,80	40,2	36,5	45,8	0,80	19,8	17,0	—	—	101,5	—	
1233	5,95	5,95	40,9	25,2	40,1	0,63	21,1	19,5	—	—	129,2	—	
1234	8,70	8,70	40,7	25,0	39,5	0,63	21,9	20,5	—	—	110,5	—	
1462	13,55	13,55	40,5	31,0	41,0	0,76	24,8	29,7	138,8	58,1	89,5	90°	

ТАБЛИЦА VII.

Результаты испытанія образцовъ Металлическаго завода (длина 250 мм.).
Литое желѣзо отожженное.

1. № Лаборатори.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.					
	Толщина листа изъ котораго вырѣзанъ образецъ.	Толщина образца.	Ширина образца.	Начало замѣтнаго удлиненія.	Временное сопроти- вленіе.	Отношеніе чиселъ предыдущихъ графъ, 5: 6.	Относительныя удлиненія.			Суженіе.	Расстояніе отъ мѣста разрыва до ближай- шаго конца поперечн.	Положеніе разрывной плоскости относи- тельно оси образца.	ПРИМѢЧАНІЯ.					
							Определенное по 1-му способу.	Определенное по 2-му способу.	Въ разрывной плоскости.									
														%			%	мм.
мм.														кгтр. на кв. мм.				
701	2,3	2,3	40,6	38,0	45,2	0,85	14,8	16,2	95,0	48,7	139,4	65°	Образецъ разорвался въ мѣ- стокъ.					
700	2,5	2,5	40,6	32,5	—	—	—	—	—	—	—	—						
699	4,0	4,0	37,4	33,0	39,4	0,84	16,9	17,3	155,5	60,9	124,2	65°						
702	4,1	4,1	39,6	33,0	41,2	0,80	19	21,5	122,3	55,0	128,8	70°						
703	6,2	6,2	40,7	25,0	38,04	0,65	26,6	29,5	123,2	55,2	110,1	70°						
698	6,3	6,3	39,9	—	33,8	—	23,1	25,7	182,5	64,2	25,3	70°						
704	8,7	8,7	38,0	22,5	34,9	0,65	28,0	31,2	148,4	59,7	96,4	80°						
697	9,2	9,2	39,1	—	35,7	—	26,6	31,2	197,9	66,4	72,6	90°						
706	13,6	13,6	40,6	—	39,7	—	25,6	29,7	151,5	60,2	150,2	90°						
707	13,6	13,6	40,5	26,0	36,7	0,71	30,6	33,5	157,8	61,2	133,5	90°						
705	15,1	15,1	39,7	24,0	35,7	0,67	31,2	32,5	218,2	68,6	66,1	90°						
695	15,6	15,6	40,5	—	34,8	—	31,0	36,8	243,3	70,9	68,0	90°						

Институтъ инженеровъ путей сообщенія Императора Александра I.

КУРСЪ ПРАКТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ.

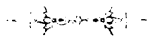
ОТДѢЛЪ II.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СЪ НЕПОСРЕДСТВЕН-
НЫМЪ СОПРИКОСНОВЕНІЕМЪ.

СОСТАВИЛЪ

Л. В. ЛАНДЦЕРТЪ,

ИНЖЕНЕРЪ ПУТЕЙ СООБЩЕНІЯ.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія инженера Ю. Н. Эрлихъ, Большая Садовая, № 9.

1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Передаточные механизмы съ непосредственнымъ соприкосновеніемъ.

стр.

I. Зубчатые колеса.	59
1. Цилиндрическія колеса:	
a) Форма зубцовъ	60
b) Кривыя очертанія профилей зубцовъ.	71
c) Эпициклоидальное заѣденіе	72
d) Заѣденіе по разверткамъ круга	79
e) Основанія для выбора формы зубцовъ зубчатыхъ колесъ.	81
f) Заѣденіе по дугамъ круга:	84
Очертаніе зубцовъ дугами круга по способу Виллиса.	85
Очертаніе зубцовъ дугами круга по способу профессора Петрова.	90
g) Расчетъ зубцовъ цилиндрическихъ колесъ	100
2. Коническія зубчатые колеса	107
3. Зубчатые колеса для осей не параллельныхъ и не пересѣкающихся	109
4. Трѣніе въ зубцахъ:	
a) Цилиндрическія колеса	112
b) Коническія колеса	116
5. Устройство зубчатыхъ колесъ	119
Размѣры частей зубчатыхъ колесъ	121
II. Колеса трѣнія	126

О Т Д Ъ Л Ъ II.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СЪ НЕПОСРЕДСТВЕННЫМЪ СОПРИКОСНОВЕНИЕМЪ.

I. Зубчатые колеса.

Въ разсмотрѣнныхъ нами механизмахъ съ гибкою связью передача движенія отъ одной оси къ другой происходитъ лишь до тѣхъ поръ, пока передаваемое усилие меньше силы тренія, проявляющейя на поверхностяхъ шкивовъ. Для того, чтобы по возможности увеличить это усилие, необходимо, какъ мы видѣли это напр. въ ременной передачѣ, увеличить натянутость ремня; но такое увеличеніе имѣетъ послѣдствіемъ возрастаніе тренія осей въ подшипникахъ, на преодоленіе котораго затрачивается значительная часть полезной работы; почему для передачи значительныхъ усилій и въ особенности въ тѣхъ случаяхъ гдѣ взаимное положеніе осей въ каждый моментъ времени должно быть строго опредѣленно, механизмы съ гибкою связью, по причинѣ возможнаго скольженія связи, не могутъ быть примѣнимы.

Эти обстоятельства заставили обратиться къ примѣненію зубчатыхъ колесъ, въ которыхъ, въ виду особаго устройства ихъ поверхностей, постоянное соприкосновеніе ведущаго колеса съ ведомымъ представляется вполне обеспеченнымъ.

По отношенію къ взаимному положенію осей зубчатыхъ колесъ различаютъ три случая:

- 1) оси параллельны;

Л. В. Ландцбергъ, Отд. II.

- 2) оси пересѣкаются;
- 3) „ не лежать въ одной плоскости.

Соотвѣтственно такимъ положеніямъ, зубчатые колеса получаютъ формы:

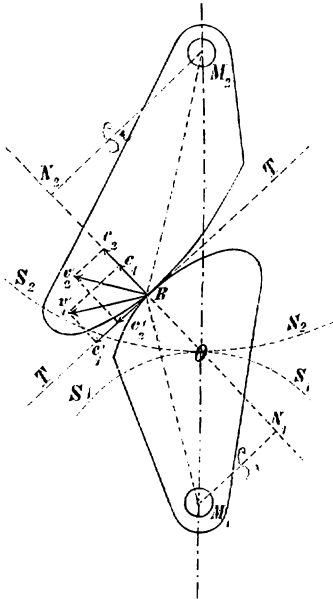
- 1) цилиндровъ (цилиндрическія колеса);
- 2) конусовъ (коническія колеса);
- 3) гиперболоидовъ вращенія (гиперболоидальныя колеса).

Въ предположеніи, что отношеніе между угловыми скоростями вращенія колесъ должно оставаться постояннымъ, основными формами колесъ будутъ тѣла вращенія, оси которыхъ совпадаютъ съ осями валовъ, на которыхъ насажены колеса.

1. Цилиндрическія колеса.

а. Форма зубцовъ.

Пусть въ точку M_1 проектируется первая ось, въ точку M_2 — вторая ось. (Чер. 1).



Чер. 1.

Движеніе должно передаваться отъ одной оси къ другой такъ, чтобы отношеніе между угловыми скоростями ω_1 и ω_2 оставалось постояннымъ. — Предположимъ сначала, что передача движенія происходитъ при помощи двухъ рычаговъ, неизмѣнно связанныхъ съ осями; сѣченіе этихъ рычаговъ плоскостью, перпендикулярною къ осямъ, имѣетъ форму показанную на чертежѣ.

Рычаги эти касаются по нѣкоторой линіи, которая проектируется въ точку B . Если положимъ $M_1B = R_1$ и $M_2B = R_2$, то скорость точки B , принадлежащей нижнему рычагу, будетъ:

$$v_1 = \omega_1 R_1 .$$

Скорость точки B въ тотъ-же моментъ времени, если разсматривать ее какъ принадлежащую верхнему рычагу, будетъ:

$$v_2 = \omega_2 R_2 .$$

Если N_1BN_2 общая нормаль къ профилямъ рычаговъ, а TBT' общая касательная, то разложеніе скоростей v_1 и v_2 даетъ составляющія: по нормалл — c_1 и c_2 , по касательной — c_1' и c_2' .

Назовемъ длину перпендикуляровъ M_1N_1 и M_2N_2 , опущенныхъ отъ центровъ M_1 и M_2 на общую нормаль черезъ ρ_1 и ρ_2 ; тогда изъ подобія треугольниковъ:

$$\frac{c_1}{v_1} = \frac{\rho_1}{R_1} \quad \text{и} \quad \frac{c_2}{v_2} = \frac{\rho_2}{R_2} .$$

Такъ какъ рычаги касаются въ точкѣ B , то $c_1 = c_2$. Если-бы c_2 было больше c_1 , то послѣдствіемъ этого было-бы удаленіе верхняго рычага отъ нижняго, что невозможно, такъ какъ верхній рычагъ получаетъ свое движеніе отъ нижняго.

Если бы c_2 было меньше c_1 , то нижній рычагъ врѣзался бы въ верхній, что опять таки, при извѣстномъ выборѣ матеріала рычаговъ, не можетъ быть допущено.

И такъ:

$$c_1 = c_2$$

или

$$\omega_1 \rho_1 = \omega_2 \rho_2 ,$$

а слѣдовательно

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = Const ;$$

затѣмъ, изъ подобія треугольниковъ M_2ON_2 и M_1ON_1 :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{M_2O}{M_1O} ,$$

откуда

$$\frac{M_2O}{M_1O} = Const ;$$

т. е. для любой точки соприкосновения B , общая нормаль къ профилям рычаговъ должна проходить черезъ одну и ту-же точку O на линіи, соединяющей центры.

Окружности S_1OS_1 и S_2OS_2 , опредѣляемыя радіусами $M_1O = r_1$ и $M_2O = r_2$ называются начальными окружностями, а профили рычаговъ — профилями зубцовъ; такъ что высказанное нами положеніе можетъ быть формулировано такъ: *нормаль къ профилямъ зубцовъ должна проходить черезъ точку касанія начальныхъ окружностей.*

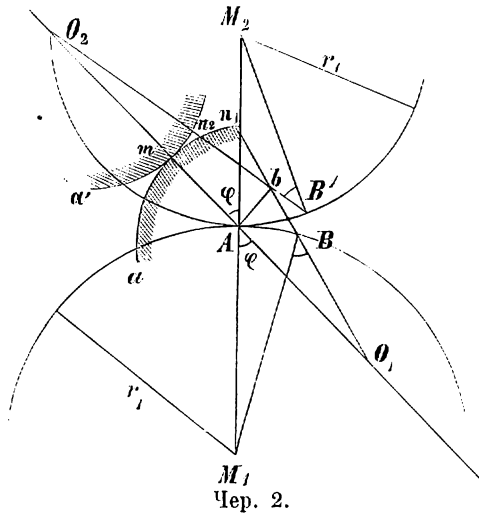
Скорости на начальныхъ окружностяхъ $r_1\omega_1$ и $r_2\omega_2$ будутъ величины постоянныя и равныя между собою, такъ какъ:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

и

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 ;$$

т. е. начальныя окружности будутъ катиться другъ по другу *безъ скольженія*.



Положимъ, что по доказанному, общая нормаль къ профилямъ зубцовъ въ данное мгновеніе проходитъ черезъ точку касанія начальныхъ окружностей (чер. 2). Положимъ еще, что въ слѣдующее

затѣмъ мгновеніе начальныхъ окружности повернутся такъ, что точка B совпадетъ съ точкою B' , т. е. $\sphericalangle AB = \sphericalangle AB' = ds$.

Посмотримъ: какія точки зубцовъ коснутся въ этотъ моментъ другъ друга?

Пусть центръ кривизны профиля зубца a въ точкѣ m будетъ O_1 и радіусъ кривизны ρ_1 . Центръ кривизны есть пересѣченіе двухъ смежныхъ нормалей; когда B и B' совпадутъ съ точкою A , то точка m придетъ въ новую точку, которая будетъ безконечно мало отстоять отъ точки m . Если изъ новаго положенія точки m проведемъ нормаль къ зубцамъ, то она пройдетъ черезъ точки O_1 и B , такъ какъ точка B въ это время будетъ находиться на линіи центровъ, а нормаль должна проходить черезъ точку касанія начальныхъ окружностей и черезъ центръ кривизны. Соединимъ поэтому O_1 съ B и продолживъ линію O_1B до пересѣченія съ профилемъ a , получимъ точку n_1 ; эта точка и будетъ новымъ положеніемъ точки m , когда B и B' совпадутъ. Пусть центръ кривизны профиля a' зубца верхняго колеса будетъ O_2 ; соединимъ O_2 съ B' . Когда B и B' совпадутъ на линіи центровъ въ точкѣ A , то M_1B и M_2B' сольются въ одну прямую; точка n_1 совпадетъ съ точкою n_2 и O_1Bn_1 сольется съ линіей O_2n_2B' .

На основанія сего $\sphericalangle B = \sphericalangle B'$, такъ какъ въ новомъ положеніи эти углы будутъ на крестъ лежащими.

Затѣмъ

$$\left. \begin{aligned} \sphericalangle \varphi + \sphericalangle M_1 &= \sphericalangle B + \sphericalangle O_1 \\ \sphericalangle \varphi + \sphericalangle O_2 &= \sphericalangle B + \sphericalangle M_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

откуда

$$\sphericalangle M_1 - \sphericalangle O_2 = \sphericalangle O_1 - \sphericalangle M_2$$

или

$$\sphericalangle M_1 + \sphericalangle M_2 = \sphericalangle O_1 + \sphericalangle O_2 .$$

Полагая $AM_1 = r_1$ и $AM_2 = r_2$;

„ радіусъ кривизны профиля $a = \rho_1$;

„ „ „ „ „ $a' = \rho_2$;

„ „ „ „ „ длину $Am = q$,

изъ послѣдняго уравненія получимъ:

$$\frac{\sphericalangle AB}{r_1} + \frac{\sphericalangle AB'}{r_2} = \frac{\sphericalangle Ab}{\rho_1 - q} + \frac{\sphericalangle Ab}{\rho_2 + q}, \quad (2)$$

но Ab можно разсматривать также какъ проекцію дугъ AB и AB' на линію перпендикулярную къ нормали, поэтому

$$\sphericalangle Ab = \sphericalangle AB' \cos \varphi$$

и

$$\sphericalangle Ab = \sphericalangle AB \cos \varphi$$

или такъ какъ

$$\sphericalangle AB = \sphericalangle AB' = ds,$$

то

$$\sphericalangle Ab = ds \cos \varphi$$

и тогда изъ уравненія (2)

$$\frac{ds}{r_1} + \frac{ds}{r_2} = \frac{ds \cos \varphi}{\rho_1 - q} + \frac{ds \cos \varphi}{\rho_2 + q},$$

или

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \cos \varphi \left(\frac{1}{\rho_1 - q} + \frac{1}{\rho_2 + q} \right). \quad (3)$$

Это послѣднее уравненіе называется *уравненіемъ Савари* и выражаетъ аналитически, что общая нормаль къ зубцамъ въ двухъ смежныхъ положеніяхъ колесъ проходитъ чрезъ точку касанія начальныхъ окружностей.

Вышеприведенный выводъ относился къ наружному зацепленію; для внутренняго же зацепленія, радіусъ меньшаго колеса r_2 надо считать отрицательнымъ и тогда уравненіе Савари приметъ видъ:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \cos \varphi \left(\frac{1}{\rho_1 - q} + \frac{1}{\rho_2 + q} \right)$$

Если бы $\sphericalangle m_1 = \sphericalangle m_2$, то зубцы катались бы другъ по другу безъ скольженія; если же m_1 не равно m_2 , то въ такомъ случаѣ разность ихъ представить дугу скольженія.

Назовемъ $\sphericalangle m_1 - \sphericalangle m_2 = d\delta$.

Тогда

$$d\delta = -mn_1 - mn_2 = -Ab \frac{\rho_1}{\rho_1 - q} - Ab \frac{\rho_2}{\rho_2 + q}$$

и такъ какъ

$$-Ab = ds \cos \varphi,$$

то

$$d\delta = ds \cos \varphi \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 - q} + \frac{\rho_2}{\rho_2 + q} \right)$$

или

$$d\delta = ds \cos \varphi \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{(\rho_1 - q)(\rho_2 + q)} \right) q,$$

откуда

$$d\delta = q ds \cos \varphi \left(\frac{\rho_1 - q + \rho_2 + q}{(\rho_1 - q)(\rho_2 + q)} \right);$$

$$d\delta = q ds \cos \varphi \left(\frac{1}{\rho_2 + q} + \frac{1}{\rho_1 - q} \right),$$

а такъ какъ

$$\cos \varphi \left(\frac{1}{\rho_2 + q} + \frac{1}{\rho_1 - q} \right) = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1},$$

то

$$d\delta = q ds \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (4)$$

Слѣдовательно, дуга скольженія $d\delta$ можетъ быть равна нулю, т. е. зубцы будутъ катиться безъ скольженія, когда $q=0$, т. е. когда зубцы находятся въ соприкосновеніи на линіи центровъ. Уравненіе Савари показываетъ, что форма зубцовъ на одномъ изъ сцепленныхъ колесъ зависитъ не только отъ размѣровъ этого колеса, но и отъ размѣровъ другаго колеса; такъ что вообще $\rho_1 = f(r_1, \rho_2, r_2)$.

Только въ одномъ случаѣ радіусъ кривизны профиля зуба на одномъ колесѣ не будетъ зависѣть отъ размѣровъ другаго колеса; это будетъ имѣть мѣсто когда уравненіе Савари распадается на два слѣдующія уравненія:

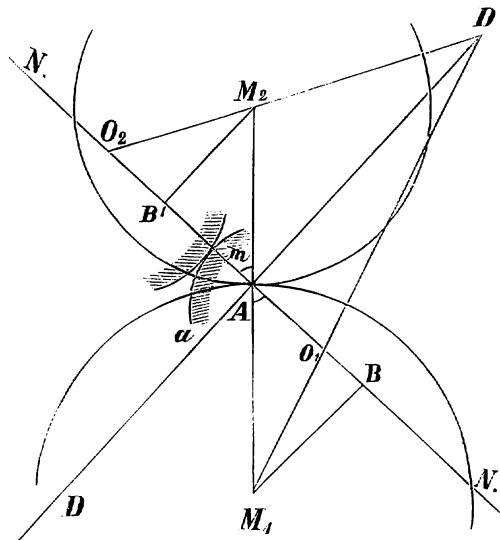
$$\frac{1}{r_1} = \frac{\cos \varphi}{\rho_1 - q}$$

и

$$\frac{1}{r_2} = \frac{\cos \varphi}{\rho_2 + q}$$

Когда радиус кривизны профиля зуба одного из колесъ заданъ, то радиус кривизны профиля зуба другого колеса можетъ быть найденъ слѣдующимъ построениемъ:

Пусть $O_1m = \rho_1$ будетъ радиус кривизны въ точкѣ m профиля зуба нижняго колеса AM_1 (чер. 3).



Чер. 3.

Проведемъ черезъ точку A прямую DD перпендикулярную къ общей нормали NN и соединивъ точку O_1 съ точкою M_1 , продолжимъ прямую O_1M_1 до пересѣченія съ перпендикуляромъ DD въ точкѣ D .

Соединимъ затѣмъ точку D съ центромъ M_2 втораго колеса, пересѣченіе прямой DM_2 съ нормалью NN и будетъ искомымъ центромъ кривизны O_2 профиля зуба верхняго колеса. Назовемъ длину O_2m черезъ x и опустимъ изъ точекъ M_1 и M_2 перпендикуляры на общую нормаль; тогда изъ подобныхъ треугольниковъ DAO_1 и M_1BO_1 , получимъ:

$$AD : AO_1 = BM_1 : BO_1$$

или

$$AD : \rho_1 - q = r_1 \sin \varphi : [r_1 \cos \varphi - (\rho_1 - q)].$$

Изъ подобныхъ же треугольниковъ DAO_2 и $M_2B'O_2$, получимъ:

$$AD : AO_2 = M_2B' : B'O_2$$

или

$$AD : x + q = r_2 \sin \varphi : [(x + q) - r_2 \cos \varphi].$$

Предъидущія пропорціи даютъ слѣдующую:

$$1 : \frac{\rho_1 - q}{x + q} = \frac{r_1}{r_2} : \frac{r_1 \cos \varphi - (\rho_1 - q)}{(x + q) - r_2 \cos \varphi};$$

изъ послѣдней пропорціи получимъ:

$$\cos \varphi \left(\frac{1}{\rho_1 - q} + \frac{1}{x + q} \right) = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

Сравнивая это уравненіе съ уравненіемъ Савари, получимъ $x = \rho_2$, чѣмъ и доказывается вѣрность построенія.

На основаніи найденнаго нами закона, что нормаль къ зубцамъ должна проходить черезъ точку касанія начальныхъ окружностей, оказывается возможнымъ по заданному профилю зуба на одномъ колесѣ найти профиль зуба на другомъ колесѣ, если кромѣ того даны начальные окружности.

Начертимъ заданную кривую зуба $a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1$ въ томъ положеніи когда точка, принадлежащая начальной окружности, лежитъ на линіи центровъ (чер. 4).

Сначала опредѣлимъ геометрическое мѣсто соприкосновенія зубцовъ. Точка A , въ которой точка a_1 касается къ искомому профилю, должна лежать на окружности круга, описаннаго изъ точки M_1 радиусомъ $M_1 a_1$. Разстояніе же точки A отъ точки d_1 должно быть равно длинѣ нормали aa_1 ; такимъ образомъ, положеніе точки A является вполнѣ опредѣленнымъ. Также точно опредѣлится точка B , въ которой b_1 касается искомага профиля и т. д.

Опредѣляя слѣдующія точки, найдемъ такимъ построениемъ кривую $ABCd_1EFG$, представляющую геометрическое мѣсто касанія зубцовъ, или такъ называемую *линію зацепленія*.

Точки искомаго профиля, соответствующія точкамъ A, B, C, D, E, F, G , должны лежать на окружностяхъ, описанныхъ изъ точки M_2 радиусами M_2A, M_2B, M_2C , и т. д.

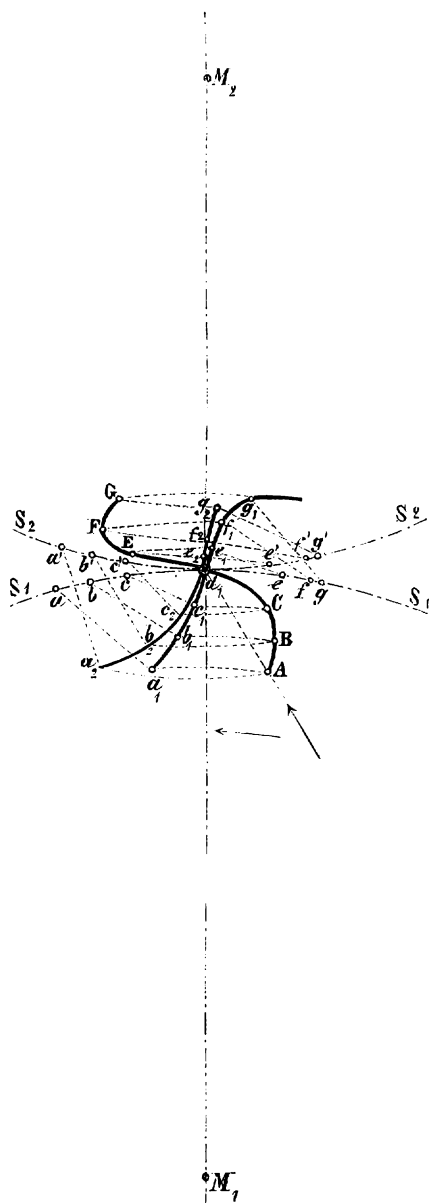
Если слѣдуемъ:

$$\begin{aligned} -d_1a' &= -d_1a; -d_1b' = \\ &= -d_1b; -d_1c' = -d_1c; \\ -d_1e' &= -d_1e; -d_1f' = \\ &= -d_1f; -d_1g' = -d_1g, \end{aligned}$$

то точка a_2 искомаго профиля, соответствующая точкѣ a_1 , должна отстоять отъ точки a' , на величину $a'a_2 = aa_1$; точка b_2 должна отстоять отъ точки b' на величину $b'b_2 = bb_1$ и т. д.

На основаніи сего получается слѣдующій, предложенный Рело*), способъ нахожденія профиля зуба на одномъ колесѣ по заданному профилю зуба на другомъ колесѣ.

Проводятъ нормали $aa_1, bb_1, cc_1, ff_1, gg_1$; описываютъ изъ центра M_1 окружности черезъ точки a_1, b_1, c_1, e_1, f_1 и g_1 ; затѣмъ наз-



Чер. 4.

*) См. Reuleaux. Der Constructeur, Braunschweig 1872. Pag. 412.

начаютъ точки A, B, C, D, E и G , засѣкая на соответствующихъ окружностяхъ величины $Ad_1 = aa_1, Bd_1 = bb_1$ и т. д. и вычерчиваютъ линію заѣпления $ABCD_1EFG$; затѣмъ изъ точки M_2 , центра втораго колеса, описываютъ окружности черезъ точки A, B, C, E и G и дѣлаютъ $d_1a' = d_1a; d_1b' = d_1b$ и т. д.

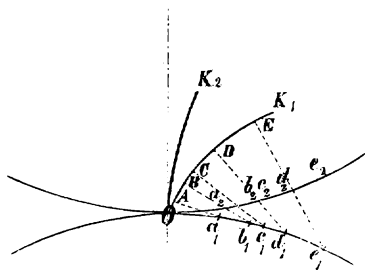
Изъ точекъ $a' b' c'$ и т. д. радіусами $a'a_2 = aa_1, b'b_2 = bb_1$ засѣкаютъ на соответствующихъ окружностяхъ точки $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2, g_2$ и получаютъ такимъ образомъ искомый профиль зуба.

Способъ этотъ примѣняется на практикѣ въ томъ случаѣ, когда къ одному колесу, способъ происхожденія зубцовъ котораго неизвѣстенъ, надо подыскать второе колесо.

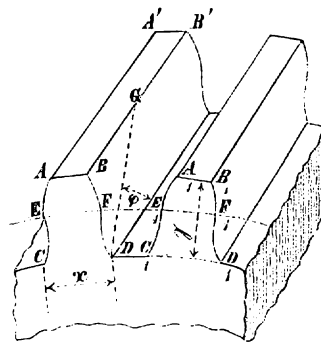
Второй способъ нахожденія профиля зуба предложенъ Понселе *) и состоитъ въ слѣдующемъ.

Откладываютъ по начальнымъ окружностямъ дуги:

$$- Oa_1 = - Oa_2; - a_1b_1 = - a_2b_2; - b_1c_1 = - b_2c_2 \text{ и т. д. (Чер. 5).}$$



Чер. 5.



Чер. 6.

Изъ точекъ $a_1 b_1 c_1 d_1$ проводятъ нормали къ заданному профилю K_1 ; беря на циркуль длины $a_1 A, b_1 B, c_1 C$ и т. д. описываютъ изъ точекъ $a_2 b_2 c_2 d_2$ и т. д. соответственными радіусами окружности. Обертывающая къ этимъ окружностямъ K_2 и будетъ представлять искомый профиль зуба верхняго колеса.

Зубцы цилиндрическихъ колесъ представляютъ призмы, сѣченіе которыхъ определяется профилемъ зубцовъ. Окружность, проходящая черезъ точки $E F E_1 F_1$, называется начальною окружностью. (Чер. 6).

*) См. Poncelet, Cours de mécanique appliquée aux machines, Paris 1874. Pag. 208.

Часть зубца $ABEF$, лежащая внѣ начальной окружности, называется выступомъ зубца; часть зубца $CDEF$, лежащая внутри начальной окружности, называется впадиною зубца.

Дуга $EFE_1 = FE_1F_1$, равная разстоянію между серединами двухъ смежныхъ зубцовъ по начальной окружности, называется шагомъ зубчатого колеса и будетъ обозначаться буквою t .

Дуга $EF = E_1F_1$ называется толщиною зубца и будетъ обозначаться буквою s ; дуга FE_1 называется шириною впадины; разстояніе между окружностью, проходящею черезъ точки C, D, C_1, D_1 , и окружностью, проходящею черезъ точки A, B, A_1, B_1 , называется длиною зубца и будетъ обозначаться буквою l .

Длина выступа зубца дѣлается обыкновенно $0,3t$; длина впадины зубца дѣлается $0,4t$; такъ что длина всего зубца $l = 0,3t + 0,4t = 0,7t$.

Толщина необдѣланныхъ зубцовъ дѣлается равной $\frac{19}{40}t$; ширина впадины — $\frac{21}{40}t$; такъ что между зубцомъ и соотвѣтствующей ему впадиной оставляется зазоръ въ $\frac{1}{20}t$.

Кривая $GFE d_1 CBA$, какъ указано выше, называется линіею зацепленія (чер. 4) и представляетъ геометрическое мѣсто касанія зубцовъ; часть этой кривой Ad_1 лежитъ передъ линіею центровъ, часть Gd_1 — за этой линіей, соотвѣтственно соприкосновенію зубцовъ передъ и за линіей центровъ.

Когда зубцы будутъ касаться въ точкѣ A , то начальные окружности будутъ касаться въ точкахъ a и a' ; при прикосновеніи зубцовъ въ точкѣ G , начальные окружности будутъ касаться въ точкахъ g и g_1 , которыя совпадутъ и будутъ лежать на линіи центровъ.

Дуга начальной окружности $ag = a'g'$ называется дугою зацепленія и представляетъ путь, проходимый точкою соприкосновенія начальныхъ окружностей въ теченіи того времени, пока какая либо пара зубцовъ находится въ сцепленіи.

Понятно, что сцепленіе между колесами не должно прекращаться ни на одно мгновеніе, т. е. прежде чѣмъ одна пара зубцовъ, находящихся въ сцепленіи, расцепится, другая пара должна уже сцепиться, въ виду чего дуга зацепленія не должна быть меньше шага *).

*) Весьма подробно о линіяхъ и дугахъ зацепленія изложено у Moll und Reuleaux, *Constructionslehre für d. Maschinenbau*, Braunschweig 1862. § 18 и др.

Отношеніе дуги зацѣпленія къ шагу называется *продолжительностью зацѣпленія*; отношеніе это должно быть всегда больше единицы.

Правильно работающія колеса должны имѣть одинаковыя линіи зацѣпленія и равные шаги и къ какому нибудь зубчатому колесу съ заданною начальною окружностью можно подобрать безконечное число, соотвѣствующихъ для правильнаго зацѣпленія, колесъ; если эти послѣднія должны работать попарно (рядовыя колеса), то линія зацѣпленія должна быть общею для всѣхъ колесъ и при томъ начальныя окружности и линіи центровъ должны раздѣлять линію зацѣпленія на 2 совершенно одинаковыя части.

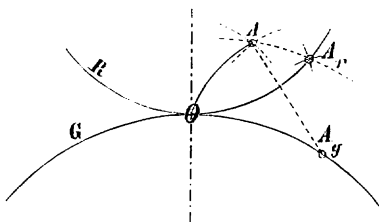
б. Кривыя очертанія профилей зубцовъ.

На практикѣ вошли во всеобщее употребленіе, для очертанія профилей зубцовъ, слѣдующія кривыя:

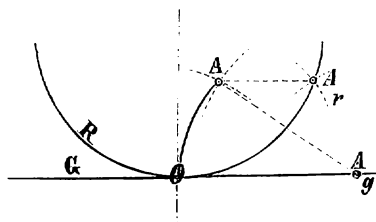
- 1) эпициклоида;
- 2) циклоида;
- 3) гипоциклоида и
- 4) развертка круга.

Всѣ эти кривыя могутъ быть произведены катаніемъ окружности.

1) Если окружность R катится безъ скольженія по окружности G , то точка O описываетъ *эпициклоиду* (Чер. 7).



Чер. 7.



Чер. 8.

2) Если окружность R катится безъ скольженія по прямой G , то точка O описываетъ *циклоиду* (Чер. 8).

3) Если окружность R катится внутри окружности G , то точка O описываетъ *гипоциклоиду* (Чер. 9).

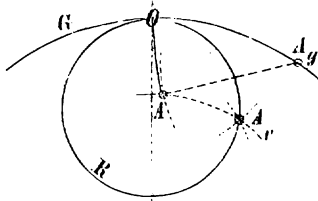
4) Наконецъ, если прямая R катится безъ скольженія по окружности G , то точка O описываетъ *развертку круга* (Чер. 10).

Точка A кривой опредѣляется условіемъ:

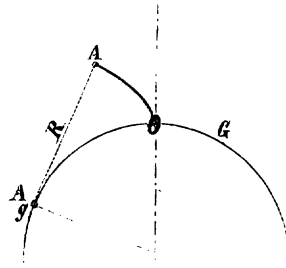
$$\left. \begin{aligned} A A_g &= A_r O \\ A O &= A_r A_g \end{aligned} \right\} \text{ (Чер. 7, 8 и 9).}$$

Для повѣрки положенія точки A можетъ служить условіе, что окружность, описанная изъ центра круга G черезъ точку A_r , должна пройти черезъ точку A кривой.—

Точка A развертки круга опредѣляется условіемъ: $A_g A = - A_g O$.



Черт. 9.



Черт. 10.

Нормали ко всемъ упомянутымъ кривымъ въ точкѣ A проходятъ черезъ точку A_g (мгновенную точку касанія обоихъ круговъ), на чемъ и основано примѣненіе этихъ кривыхъ къ очертанію профилей зубцовъ зубчатыхъ колесъ.

с. Эпициклоидальное зацепленіе.

Примѣненіе эпициклоиды къ очертанію профилей зубцовъ зубчатыхъ колесъ производится слѣдующимъ образомъ (чер. 11). Пусть $S_1 S_1$ и $S_2 S_2$ двѣ начальныя окружности; R_1 и R_2 круги производители. При катаніи окружности R_1 внутри начальной окружности $S_1 S_1$, точка O окружности R_1 опишетъ гипоциклоиду H_1 , которая будетъ профилемъ впадины зуба на колесѣ $S_1 S_1$; при катаніи окружности R_2 снаружи начальной окружности $S_2 S_2$, таже точка O опишетъ эпициклоиду E_2 , которая будетъ профилемъ выступа зуба на

верхнем колесѣ. Совершенно такимъ-же образомъ, при катаніи окружности R_2 внутри окружности S_2S_2 , точка O опишетъ гипоциклоиду H_2 , которая будетъ профилемъ впадины зубца верхняго колеса; при катаніи-же снаружы окружности S_1S_1 , точка O окружности R_2 опишетъ эпициклонду E_1 , которая будетъ профилемъ выступа зубца нижняго колеса.

На начальныхъ окружностяхъ откладываютъ:

$OO_1 = O_1B_1 = OO_2 = O_2B_2 =$
= половинѣ ширины зубца и проводятъ радіусы M_1O и M_2O .

Затѣмъ въ точкѣ B_1 чертятъ эпициклонду A_1B_1 , симметричную эпициклондѣ E_1 и гипоциклонду B_1C_1 , симметричную гипоциклондѣ H_1 .

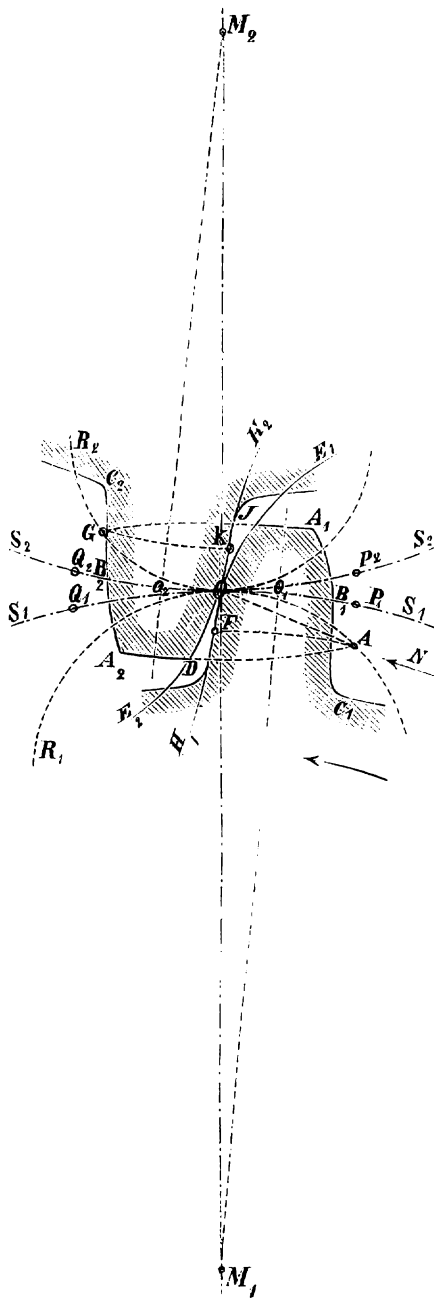
Также точно вычерчиваютъ кривую A_2C_2 , причемъ кривая A_2B_2 представляетъ эпициклонду E_2 , а кривая B_2C_2 — гипоциклонду H_2 . Наконецъ проводятъ окружности, ограничивающія выступы и впадины зубцовъ. Линія зацѣпленія совпадаетъ въ этомъ случаѣ съ кругами производителями. Длина ся AOG соотвѣтствуетъ дугѣ зацѣпленія $\sim P_1OQ_1 = \sim P_2OQ_2$.

Слѣдовательно

$$\sim OG = \sim OP_1 = \sim OP_2 = e_r.$$

$$\sim AO = \sim OQ_1 = \sim OQ_2 = e_b.$$

Изъ опредѣленія дуги зацѣп-



Чер. 11.

ленія очевидно, что когда точка соприкосновенія зубцовъ пройдетъ путь OG , длина пути, пройденнаго точкою касанія начальныхъ окружностей, выразится дугою $OP_1 = OP_2$.

Въ началѣ зацѣпленія точки D и F будутъ касаться къ точкѣ A ; когда точка соприкосновенія зубцовъ перейдетъ на линію центровъ, т. е. въ точку O , то части зубцовъ, бывшія въ соприкосновеніи, выразятся кривыми OF и OD .

Такъ какъ $OD > OF$, то слѣдовательно передъ линіею центровъ одинъ зубецъ будетъ скользить по другому на протяженіи:

$$\smile OD - \smile OF = d,$$

Совершенно также, за линіею центровъ, скольженіе произойдетъ на протяженіи $\smile OJ - \smile OK = d_*$.

Если N есть нормальное давленіе въ точкѣ A , направленное по линіи AO , то происходящее вслѣдствіе этого давленія треніе выразится черезъ fN , гдѣ f есть коэффициентъ тренія.

Такъ какъ направленіе давленія N и величина его измѣняется, то, вообще говоря, произведеніе изъ коэффициента тренія на нормальное давленіе есть величина переменная; для приближеннаго-же вычисленія, мы будемъ предполагать, что во время зацѣпленія пары зубцовъ, треніе выражается произведеніемъ fN , гдѣ подъ N мы будемъ подразумѣвать среднее значеніе давленія N .

Происходящая, вслѣдствіе скольженія зубцовъ работа тренія, можетъ быть выражена:

$$fN \{ (\smile OD - \smile OF) + (\smile OJ - \smile OK) \} = fN (d_r + d_h).$$

Работа, переданная въ тотъ-же промежутокъ времени ведущимъ зубцомъ ведомому зубцу, можетъ быть выражена: $N \cdot \smile AOG = N (\smile AO + \smile OG) = N (e_v + e_h)$; отношеніе работы тренія къ полезной работѣ выражается черезъ:

$$\eta = f \frac{\smile OD - \smile OF + \smile OJ - \smile OK}{\smile AO + \smile OG} = f \frac{d_r + d_h}{e_v + e_h}$$

Эта работа тренія имѣетъ всегда послѣдствіемъ извѣстное изнашиваніе зубцовъ; такъ какъ скольженіе происходитъ на большемъ про-

тяженіи по выступу зубца (OD , OJ), чѣмъ по впадинѣ (OF , OK), то и изнашивание выступа зубца будетъ значительнѣе, чѣмъ изнашивание впадины.

Условія, которымъ должна удовлетворять пара эпициклоидальныхъ колесъ, состоятъ въ слѣдующемъ:

- 1) колеса должны имѣть равные шаги;
- 2) дуга зацѣпленія должна быть болѣе шага.

Для рядовыхъ эпициклоидальныхъ зубчатыхъ колесъ, сверхъ сего, радіусы круговъ производителей R_1 и R_2 должны быть равны между собою, т. е. очертаніе профилей зубцовъ должно быть произведено одними и тѣми-же кругами производителями.

При проектированіи пары зубчатыхъ колесъ, радіусы круговъ производителей могутъ быть и не равны и, какъ мы увидимъ далѣе, предпочтительнѣе брать ихъ не равными.

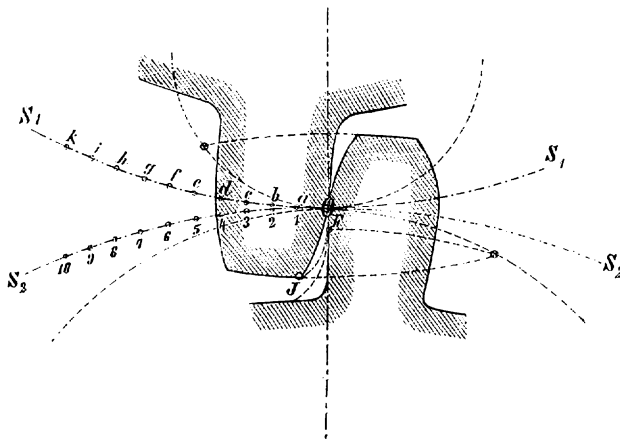
Что касается до величины круговъ производителей, то необходимо замѣтить, что чѣмъ больше будутъ выбраны радіусы этихъ круговъ, тѣмъ больше будетъ дуга зацѣпленія, т. е. тѣмъ большее число зубцовъ будетъ находится одновременно въ зацѣпленіи; кромѣ того, при большой величинѣ круговъ производителей, спокойнѣе движеніе колесъ и направленіе нормальнаго давленія менѣе уклоняется отъ направленія касательной.

Если будемъ увеличивать кругъ производитель R_1 до тѣхъ поръ, пока діаметръ его не сдѣлается равнымъ радіусу начальной окружности S_1S_1 , то гипоциклоида H_1 обратится въ прямую линію, направленную по радіусу начальной окружности и впадина зубца будетъ очерчена при этомъ прямою линіей OF .

При такомъ очертаніи, ширина зубца у основанія его будетъ менѣе ширины у начальной окружности, что можетъ имѣть послѣдствіемъ обламываніе зубца.

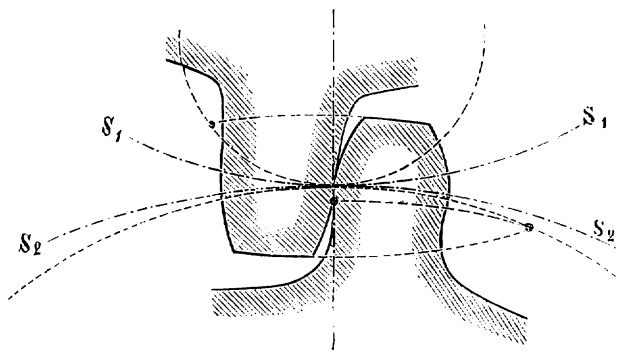
Неудобство это, однако, можетъ быть устранено слѣдующимъ образомъ: впадину зубца очерчиваютъ прямою линіей только до точки F , послѣдней точки касанія верхняго зубца къ нижнему; отъ точки-же F зубецъ можетъ быть утолщенъ, какъ показано на чер. 12 пунктиромъ. Кривая, ограничивающая утолщенную впадину зубца, находится въ зависимости отъ того пути, который проходитъ точка J верхняго зубца и можетъ быть получена слѣдующимъ образомъ:

Начальные окружности дѣлятъ на одинаковое число равныхъ частей; длиной Ja описываютъ окружность изъ точки 1-ой; затѣмъ, подобнымъ-же образомъ описываютъ окружности изъ точекъ 2-ой, 3-ей, 4-й и т. д. радіусами $Jb, Jc, \dots$; обертывающая ко всѣмъ этимъ



Чер. 12.

окружностямъ и представить очертаніе утолщеннаго зуба; для достиженія-же нѣкотораго зазора между зубцами, удаляютъ нѣсколько центры начальныхъ окружностей.



Чер. 13.

Если радіусъ круга производителя будетъ еще болѣе увеличенъ, то гипоциклоида будетъ обращена выпуклостью въ противоположную сторону (чер. 13); для утолщенія, при этомъ, основанія зуба должно

быть поступлено также, какъ указано выше для зубцовъ, впадины которыхъ очерчены прямою линіей.

На чертежѣ 11 дуга зацѣпленія $= 1,2t$; на чертежѣ 12 — $1,3t$ и на чертежѣ 13 дуга зацѣпленія $= 1,4t$; т. е., какъ уже сказано ранѣе, дуга зацѣпленія увеличивается при увеличеніи радіуса круга производителя.

Такое увеличеніе дуги зацѣпленія представляется особенно важнымъ въ случаѣ устройства пары зубчатыхъ колесъ съ большимъ передаточнымъ числомъ, какъ это имѣетъ, напримѣръ, мѣсто при передачѣ движенія отъ вододѣйствующаго колеса; при этомъ необходимо, чтобы въ зацѣпленіи находилось не менѣе 2-хъ зубцовъ, для чего дуга зацѣпленія должна быть по возможности увеличена, что достигается соответственнымъ увеличеніемъ круговъ производителей.

Если при постепенномъ увеличеніи радіусовъ круговъ производителей, діаметры ихъ сдѣлаются равными діаметрамъ начальныхъ окружностей, то обѣ гипоциклоиды обращаются въ точки, причемъ получается зацѣпленіе, представленное на чертежѣ 14.

При этомъ:

AO — есть эпициклоида, произведенная катаніемъ окружности $S_1 S_1$ по окружности $S_2 S_2$.

OB — есть эпициклоида, произведенная катаніемъ окружности $S_2 S_2$ по окружности $S_1 S_1$.

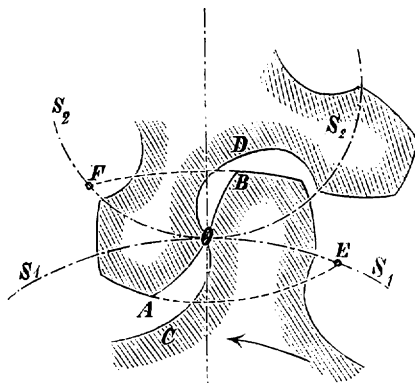
OC — опредѣлено, имѣя въ виду путь, проходимый точкою A .

OD — опредѣлено, имѣя въ виду путь, проходимый точкою B .

При указанномъ способѣ зацѣпленія, линія зацѣпленія будетъ EOF

и при движеніи зубцовъ до линіи центровъ, точка O нижняго колеса скользя по эпициклоидѣ AO выступа зуба верхняго колеса; за линіею-же центровъ точка O верхняго колеса будетъ скользя по эпициклоидѣ OB выступа зуба нижняго колеса.

Преимущество разсмотрѣннаго случая зацѣпленія состоитъ въ томъ, что число зубцовъ можетъ быть значительно уменьшено, что

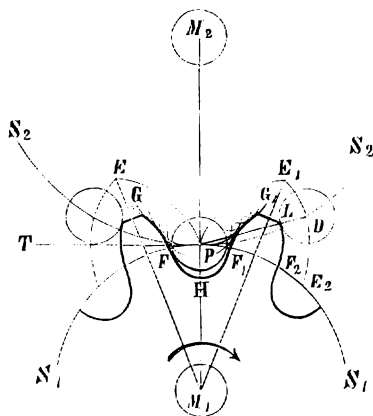


Чер. 14.

для нѣкоторыхъ подъемныхъ механизмовъ представляетъ большое удобство.

Къ недостаткамъ-же разсмотрѣннаго случая зацѣпленія надлежитъ отнести то обстоятельство, что по эпициклоидѣ профиля одного изъ колесъ скользить только одна точка профиля другого колеса и вслѣдствіе происходящаго при этомъ тренія и изнашиванія, зубцы очень скоро теряютъ правильную форму; въ виду сего къ устройству подобнаго рода колесъ надо прибѣгать лишь въ исключительныхъ случаяхъ.

Если діаметръ круга производителя верхняго колеса сдѣлаемъ равнымъ діаметру начальной окружности (черт. 15), то гипоциклоида, очерчивающая впадину зубцовъ верхняго колеса, обращается въ точку P , выступъ-же зубца нижняго колеса будетъ ограниченъ эпициклоидою PE , которую произведетъ точка P , при катаніи окружности S_2S_2 по окружности S_1S_1 . Эта эпициклоида была бы профилемъ выступа зубца нижняго колеса, если бы зубецъ верхняго колеса изображался точкою P .



Черт. 15.

На практикѣ такія колеса снабжаются зубцами не въ видѣ точекъ, а въ видѣ цилиндровъ, сѣченіе которыхъ плоскостью перпендикулярною къ оси представляетъ окружность PF . Такія зубцы получаютъ названіе *цѣвочъ*, а колеса — *цѣвочными колесами*.

Для полученія формы зубцовъ на колесѣ M_1 , сдѣленномъ съ цѣвочнымъ колесомъ M_2 , необходимо къ эпициклоидѣ PE , найти кривую FG , всѣ точки которой отстоятъ отъ кривой PE въ разстояніи PF , равномъ радіусу цѣвки; такимъ образомъ, профиль зубца нижняго колеса получается какъ обертывающая кривая (FG , F_1 G_1) ко всѣмъ положеніямъ цѣвки на эпициклоидахъ EP , E_1P . Впадины зубцовъ нижняго колеса и промежутки между ними ограничиваются кривою FHF_1 , причемъ очертаніе этой кривой не имѣетъ значенія, такъ какъ не приходится въ соприкосновеніе съ цѣвкой.

Что опредѣленная указаннымъ способомъ кривая F_1G_1 дѣйстви-
тельно представляетъ очертаніе зубца верхняго колеса, усматривается
изъ нижеслѣдующаго: если-бы цѣвка имѣла бесконечно малую тол-
щину, т. е. представлялась-бы въ видѣ прямой линіи, то эпици-
клоида PE_1 представляла-бы профиль зубца нижняго колеса, и вслѣд-
ствіе сего, въ какомъ нибудь положеніи цѣвки, напр. въ D , прямая
 PD , проходящая черезъ точку касанія начальныхъ окружностей, была
бы нормалью къ эпициклоидѣ E_1DE_2 ; а такъ какъ эпициклоида
 LE_2 параллельна эпициклоидѣ E_1DE_2 , то прямая PD будетъ нор-
мальною и къ этой послѣдней кривой; имѣя сверхъ сего въ виду, что
когда зубецъ верхняго колеса получитъ форму цѣвки, то прямая PD ,
какъ проходящая черезъ центръ D , будетъ нормалью къ окружности
цѣвки, можно заключить, что основное условіе правильной пере-
дачи будетъ выполнено, такъ какъ общая нормаль къ кривымъ зуб-
цовъ проходитъ черезъ точку касанія начальныхъ окружностей.

Начало зацѣпленія зубцомъ EP цѣвки P , имѣющей бесконечно
малую толщину, будетъ происходить въ тотъ моментъ, когда цѣвка
будетъ находиться на линіи центровъ; а потому начало зацѣпленія
зубцомъ FG , очерченнымъ кривою параллельною эпициклоидѣ EP ,
цѣвки P , описанной радіусомъ PF , будетъ происходить въ тотъ же мо-
ментъ въ точкѣ F , которая можетъ быть опредѣлена, если на нор-
мали къ эпициклоидѣ EP въ точкѣ P , т. е. на касательной PT' ,
отложить радіусъ поперечнаго сѣченія цѣвки PF .

Для непрерывной передачи движенія необходимо, чтобы зубецъ
 F_1G_1 , LE_2 находился въ соприкосновеніи съ цѣвкой D до тѣхъ поръ,
пока зубецъ FG не коснется цѣвки P въ точкѣ I' . Для выполненія
сего условія высота зубцовъ на колесѣ M_1 опредѣляется слѣдующимъ
образомъ: если PD есть разстояніе между цѣвками, то крайняя точка
профиля зубца должна совпадать съ точкою I , пересѣченія прямой
 PD съ кривою зубца LE_2 ; слѣдовательно, для непрерывной пере-
дачи движенія, выступы зубцовъ должны быть ограничены окруж-
ностью, описанною изъ точки A радіусомъ AL .

д. Зацѣпленіе по разверткамъ круга.

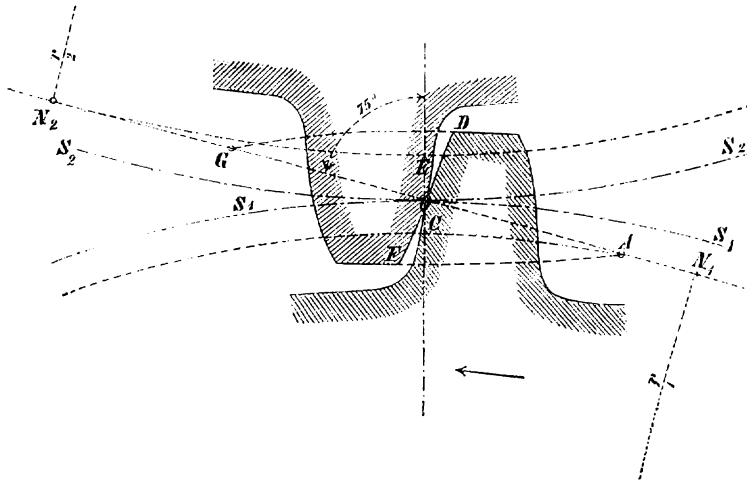
Предположимъ, что на заданной начальной окружности радіуса
 R_1 , точка O есть та точка, въ которой развертка круга, очерчиваю-

щая профиль зубцовъ, пересѣкаетъ начальную окружность (чер. 16). Производящая N_1ON_2 составляетъ обыкновенно съ линіею центровъ уголъ въ 75° , такъ что радіусъ развѣтываемой окружности будетъ:

$$r_1 = R_1 \cos 15^\circ = 0,966 R_1.$$

Когда прямая N_1N_2 будетъ катиться безъ скольженія по окружности r_1 , то точка O этой прямой опишетъ развѣтку COD ; когда та-же прямая будетъ катиться безъ скольженія по окружности r_2 , то точка O этой прямой опишетъ развѣтку EOF .

Радіусъ окружности, ограничивающей выступы зубцовъ нижняго колеса, будетъ $R_1 + 0,3t$; радіусъ окружности, ограничивающей впадины зубцовъ, будетъ $R_1 - 0,4t$.



Чер. 16.

Линія зацѣпленія совпадаетъ съ прямою N_1N_2 и равна AG .

Дуга зацѣпленія по данной линіи зацѣпленія находится по способу, указанному въ эпициклоидальномъ зацѣпленіи.

Нормальное давленіе въ зацѣпленіи по развѣткамъ круга остается *постояннымъ* и совпадаетъ съ линіею N_1N_2 ; въ эпициклоидальномъ же зацѣпленіи, какъ мы видѣли, нормальное давленіе *переменно*.

Радіусы развѣтываемыхъ окружностей соотвѣтствуютъ величинамъ r_1 и r_2 (черт. 1), по отношенію къ которымъ было найдено:

$$\omega_1 \rho_1 = \omega_2 \rho_2,$$

изъ чего слѣдуетъ, что скорости на развертываемыхъ окружностяхъ равны между собою, почему дѣленія зубцовъ можно также наносить на развертываемыя окружности.

Окружности извѣстнаго радіуса соотвѣтствуютъ только одна раз-
вертка и слѣдовательно форма очертанія зубцовъ зависитъ только
отъ радіуса развертываемой окружности и не зависитъ отъ положенія
производящей; вслѣдствіе сего, если-бы центры колесъ по какимъ
либо причинамъ удалились другъ отъ друга, то, такъ какъ радіусы
развертываемыхъ окружностей останутся одни и тѣ-же, кривыя
очертанія зубцовъ не измѣнятся и передача происходитъ также пра-
вильно, какъ и при прежнемъ положеніи осей.

Изъ способа произвожденія профилей зубцовъ, очерченныхъ по
разверткамъ круга, усматривается, что профиль зубца на одномъ
колесѣ не зависитъ отъ радіуса другаго колеса, почему колесо, зубцы
котораго очерчены по разверткамъ круга, можетъ быть *рядовымъ*;
необходимо только, чтобы уголъ наклоненія линіи $N_1 N_2$ къ линіи
центровъ, обуславливающій величину развертываемыхъ окружностей,
оставался для всѣхъ колесъ постояннымъ и чтобы всѣ рядовыя ко-
леса имѣли одинаковые шаги.

Такъ какъ способъ очертанія зубцовъ по разверткамъ круга предло-
женъ впервые Эйлеромъ, то колеса, зубцы которыхъ очерчены ука-
заннымъ способомъ, мы будемъ называть Эйлеровыми колесами.

е. Основанія для выбора формы зубцовъ зубчатыхъ колесъ.

Зубчатыя колеса, по роду механизмовъ, въ составъ которыхъ онѣ
входятъ, могутъ быть раздѣлены на 2 категоріи.

Колеса первой категоріи имѣютъ обыкновенно большую скорость
вращенія и число оборотовъ ихъ въ единицу времени значительно.

Для этого рода колесъ—правильная передача движенія, спокой-
ный ходъ, изнашиваніе зубцовъ, вліяющее на правильность пере-
дачи, сотрясенія и удары имѣютъ первостепенное значеніе.

Для колесъ второй категоріи—наиболѣе важное значеніе имѣютъ
условія прочности, которыя конечно должны быть выполнены и по

отношенію къ колесамъ первой категоріи; изъ вышеизложеннаго уже легко усмотрѣть, что рѣзкой границы между 2 упомянутыми группами колесъ, вообще говоря, не существуетъ.

Принятіе за основаніе для раздѣленія колесъ скорости на окружностяхъ представляется неудобнымъ, во первыхъ потому, что изнашивание зубцовъ зависитъ не только отъ скорости на окружностяхъ, но и отъ продолжительности передачи и многихъ другихъ причинъ, а во вторыхъ, вслѣдствіе того обстоятельства, что при двухъ сцепленныхъ между собою колесахъ, колесо меньшаго радіуса, хотя и имѣющее на окружности скорость, равную скорости большаго колеса, будетъ изнашиваться значительно колеса большаго радіуса.

Такимъ образомъ, казалось-бы, что за основаніе для раздѣленія колесъ на двѣ вышеуказанныя группы, можно было-бы принять число оборотовъ колесъ въ единицу времени; но на практикѣ оказывается болѣе цѣлесообразнымъ, какъ уже сказано выше, дѣлать колеса по роду механизмовъ, въ составъ которыхъ онѣ входятъ.

Типомъ колеса первой категоріи можетъ служить колесо въ передаточномъ механизмѣ, типомъ колеса второй категоріи—колесо, приводимое въ движеніе рукою въ какомъ нибудь подъемномъ механизмѣ, лебедкѣ, домкратѣ и т. п.

Колеса первой группы мы будемъ называть скоростью передающими или *скоростными* (Transmissionsräder); колеса второй группы—силу передающими или *силовыми* (Gewinderäder). При выборѣ формы очертанія зубцовъ колесъ необходимо имѣть въ виду какъ большую или меньшую трудность производства и сборки, такъ и правильность дѣйствія колеса.

Для изготовленія колесъ, зубцы, очерченные по разверткамъ круга, оказываются удобнѣе зубцовъ, очерченныхъ по эпициклоидамъ; при сборкѣ-же, Эйлеровы колеса представляютъ то преимущество, что въ случаѣ удаленія осей колесъ, передача движенія остается вполне правильной.—Для колесъ, подверженныхъ значительному износу, это послѣднее обстоятельство имѣетъ значеніе только при сборкѣ, такъ какъ съ теченіемъ времени, вслѣдствіе истиранія зубцовъ, форма развертки круга исчезаетъ и уступаетъ мѣсто формѣ близко подходящей къ эпициклоидѣ, что неоднократно было наблюдаемо.

При одномъ и томъ-же шагѣ, толщина зуба у основанія его, при очертаніи профиля по разверткѣ круга, нѣсколько болѣе толщины зуба очерченнаго по эпициклоидѣ, почему зубцы колесъ Эйлера, при равныхъ шагахъ, нѣсколько прочнѣе зубцовъ колесъ эпициклоидальныхъ, что для силовыхъ колесъ представляетъ извѣстное преимущество.

Для скоростныхъ колесъ, размѣры зубцовъ, опредѣленные въ зависимости отъ износа ихъ, получаютъ бѣльшихъ размѣровъ, чѣмъ будучи опредѣлены въ зависимости условій прочности, почему приведенное преимущество для колесъ скорость передающихъ не имѣетъ значенія.

Нормальный износъ зубцовъ, при прочихъ, остающихся безъ измѣненія условійхъ, возрастаетъ съ увеличеніемъ механической работы, затрачиваемой на преодоленіе тренія между зубцами, а также съ увеличеніемъ давленія на единицу поверхности зубцовъ и уменьшается съ увеличеніемъ трущихся поверхностей, на которыя распределяется давленіе между зубцами.

Представимъ себѣ двѣ пары зубчатыхъ колесъ, работающих въ совершенно одинаковыхъ условіяхъ, причемъ одна пара колесъ снабжена эпициклоидальными зубцами, а другая—зубцами, профили которыхъ очерчены по разверткамъ круга.

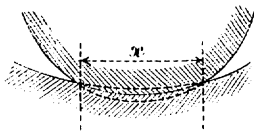
Пусть, затѣмъ, нормальное давленіе въ послѣдней парѣ колесъ равно среднему нормальному давленію въ первой парѣ и работа тренія въ обоихъ случаяхъ совершенно одинакова.

При обыкновенномъ устройствѣ эпициклоидальныхъ колесъ, т. е. въ предположеніи, что діаметры круговъ производителей меньше радиусовъ начальныхъ окружностей, въ эпициклоидальныхъ колесахъ, выпуклая эпициклоида выступа, касается вогнутой гипоциклоиды впадины; въ колесахъ-же Эйлера оба зуба касаются выпуклыми гранями.

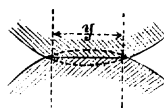
Вслѣдствіе давленія зуба ведущаго колеса на зубецъ ведомаго колеса, линія соприкосновенія зубцовъ переходитъ въ плоскость соприкосновенія, причемъ плоскость эта, въ случаѣ вогнуто-выпуклаго касанія зубцовъ, оказывается шире (чер. 17), чѣмъ въ случаѣ касанія зубцовъ выпуклыми гранями (черт. 18), т. е. x больше y ; а слѣдовательно, давленіе на единицу поверхности въ первомъ

случаѣ менѣе чѣмъ во второмъ, въ виду чего износъ колесъ Эйлера значительное эпициклоидальныхъ колесъ, при прочихъ одинаковыхъ условіяхъ.

Для устраненія такого износа, зубцы колесъ Эйлера должны быть сдѣланы нѣсколько шире зубцовъ колесъ эпициклоидальныхъ, почему колеса съ зубцами, очерченными по разверткамъ круга, нѣсколько тяжелѣе и дороже колесъ эпициклоидальныхъ.



Чер. 17.



Чер. 18.

Изъ всего вышеизложеннаго можно заключить, что для скоростныхъ зубчатыхъ колесъ, очертаніе зубцовъ эпициклоидальными кривыми представляетъ несомнѣнныя преимущества и только для силовыхъ колесъ предстоитъ выборъ между разверткою круга и эпициклоидою.

Для достиженія возможно спокойной передачи эпициклоидальными колесами, радіусы круговъ производителей должны быть взяты по возможности больше, причемъ такимъ увеличеніемъ достигается въ то-же время уменьшеніе изнашиванія зубцовъ; изнашиваніе зубцовъ будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ большее число зубцовъ находится одновременно въ сѣзѣніи; но съ другой стороны, увеличеніе радіусовъ круговъ производителей можетъ имѣть послѣдствіемъ переходъ отъ вогнуто-выпуклаго касанія зубцовъ къ касанію зубцовъ выпуклыми поверхностями, что будетъ имѣть послѣдствіемъ увеличеніе изнашиванія. По вышеприведеннымъ соображеніямъ діаметры круговъ производителей эпициклоидальныхъ колесъ не должны быть больше радіусовъ начальныхъ окружностей.

г. Запѣленіе по дугамъ круга.

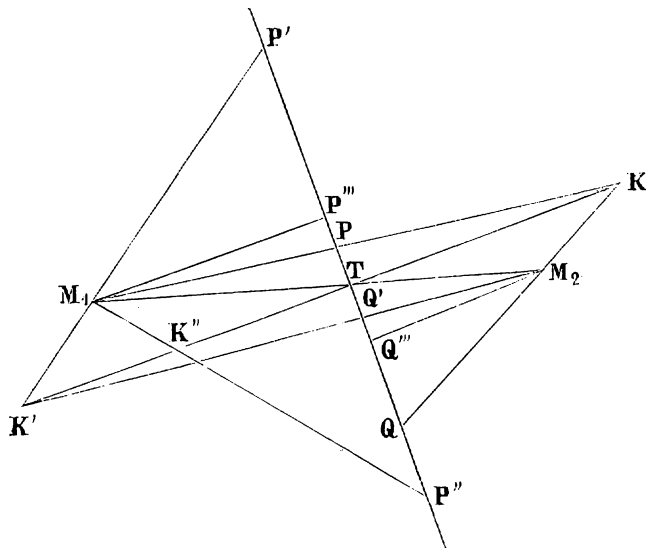
Очерчиваніе профилей зубцовъ совершенно точными геометрическими способами на практикѣ представляется затруднительнымъ; принимая во вниманіе, что кривыя зубцовъ имѣютъ весьма небольшую

длину, ихъ можно замѣнить дугами круга, не сдѣлавъ при этомъ большой погрѣшности.

Способовъ очертанія зубцовъ дугами круга существуетъ много; изъ нихъ, по простотѣ, заслуживаетъ особаго вниманія способъ Виллеса, а по точности—способъ профессора Петрова.

*Очертаніе зубцовъ дугами круга по способу Виллеса *).*

Если M_1 и M_2 центры колесъ, начальныя окружности которыхъ касаются въ точкѣ T , то черезъ точку T проводятъ подъ какимъ нибудь угломъ къ линіи центровъ прямую $P'P''$ (чер. 19) и возставляютъ въ точкѣ T перпендикуляръ KK' къ линіи $P'P''$.



Чер. 19.

Если примемъ точку P за центръ кривизны профиля зубца колеса M_1 , то точка Q , центръ кривизны зубца колеса M_2 , согласно построению Савари получится, если соединимъ точку P съ точкою M_1 , продолжимъ линію PM_1 до пересѣченія съ линією KK' , точку

*) См. R. Willis. Principles of Mechanism. London, 1870, pag. 130.

K соединимъ съ центромъ M_2 и продолжимъ линію $M_2 K$ до пересѣченія съ линіею $P' P''$ въ точкѣ Q .

Если-бы приняли за центръ кривизны колеса M_1 точку P' , то, для полученія центра кривизны зубца колеса M_2 , необходимо было-бы соединить точку P' съ точкою M_1 и продолжить линію $M_1 P'$ до пересѣченія съ перпендикуляромъ KK' ; соединивъ точку K' съ центромъ M_2 , мы получимъ въ пересѣченіи линіи $K' M_2$ съ линіею $P' P''$ точку Q' , центръ кривизны зубца колеса M_2 .

Наконецъ, если за центръ кривизны профиля зубца колеса M_1 возьмемъ точку P'' , то построение остается совершенно то-же, только зубецъ, описанный изъ точки P'' , будетъ вогнутымъ.

Указавъ способъ нахождения центровъ кривизны зубцовъ, необходимо установить еще значеніе нѣкоторыхъ величинъ, которыя въ способѣ Виллиса являются волюи произвольными.

Величина угла $M_1 T P'$ принята Виллисомъ въ 75° .

Если профиля зубцовъ очерчиваются *одною дугою круга*, то за центръ кривизны очертанія зубцовъ на колесѣ M_1 можетъ быть взята точка P''' , пересѣченія перпендикуляра, опущеннаго изъ точки M_1 на прямую $P' P''$; точка пересѣченія K въ этомъ случаѣ лежитъ на безконечно большомъ разстояніи отъ точки T ; а слѣдовательно, линія $M_2 Q$, пересѣченіе которой съ линіею $P' P''$, опредѣляетъ центръ кривизны зубца колеса M_2 должна быть параллельна линіи $M_1 P'''$, т. е. перпендикулярна къ $P' P''$; за радіусы профилей зубцовъ всего лучше взять линіи $P''' T$ и $Q''' T$; при этомъ всѣ колеса, имѣющія одинаковые шаги, могутъ работать попарно, т. е. служить рядовыми колесами. Изъ чер. 19 получимъ:

$$P''' T = M_1 T \cos M_1 T P''' = M_1 T \cos 75^\circ = 0,2588 M_1 T$$

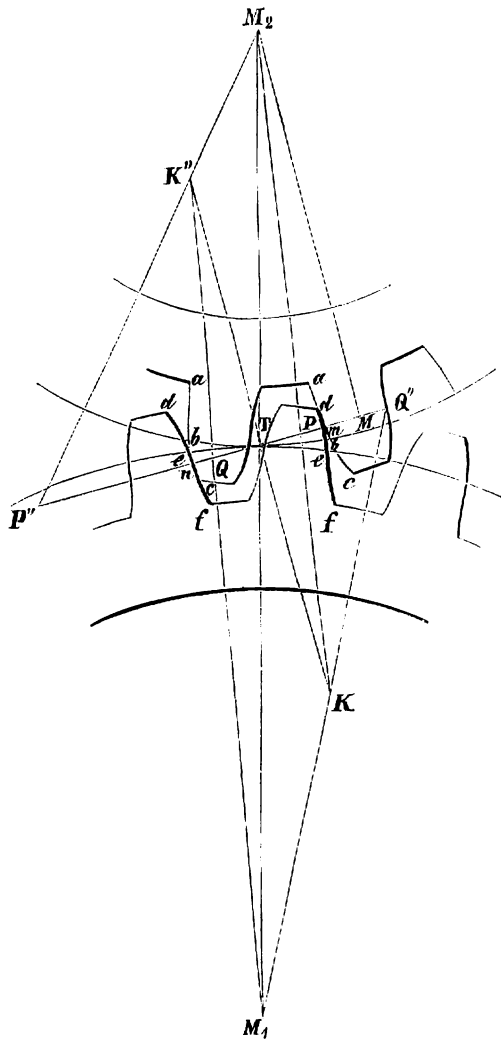
Точно также

$$Q''' T = 0,2588 M_1 T$$

Слѣдовательно, если радіусъ начальной окружности назовемъ черезъ R , то радіусъ дуги круга, очерчивающей профиля зубцовъ этого колеса будетъ $—0,2588 R$.

Если $S_1 S_1$ есть начальная окружность колеса, радіусъ котораго — $M_1 T$, то проведемъ линію PT подъ угломъ въ 75° къ $M_1 T$ и сдѣ-

радіусамъ начальныхъ окружностей для двухъ положеній точки касанія зубцовъ, въ чемъ и состоитъ преимущество этого послѣдняго способа.



Чер. 21.

Пусть M_1 и M_2 центры двухъ колесъ (черт. 21); T — точка касанія начальныхъ окружностей.

Черезъ точку T проведемъ подъ угломъ въ 75° прямую $P''Q''$ и въ точкѣ T возставимъ къ ней перпендикуляръ KK'' ; точки K и K'' берутся въ одинаковыхъ разстояніяхъ отъ точки T , причемъ линіи KT и $K''T$, должны быть взяты такой величины, чтобы впадины зубцовъ не были очерчены выпуклой кривою, для чего TK'' не должна быть больше M_2M , перпендикуляра изъ точки M_2 (центра меньшаго колеса) на прямую $P''Q''$; если же въ сдѣвленіи находятся нѣсколько колесъ разныхъ радіусовъ, то линія TK'' не должна быть больше $R' \sin \alpha$, гдѣ R' есть радіусъ наименьшаго изъ колесъ; наименьшимъ же колесомъ Виллисъ считаетъ то, которое имѣетъ 12 зубцовъ,

Если соединимъ точку M съ точкою K , то въ пере-

сѣченіи линіи M_2K съ линіею $P''Q''$ получимъ точку P — центръ дуги круга, очерчивающей профиль bnc выступа зуба верхняго колеса; радіусъ Pn дуги bnc получимъ, сдѣлавъ Tn равною половинѣ шага.

Соединяя точку M_1 съ точкою K и продолжая линію M_1K до пересѣченія съ линіею $P''Q''$, получимъ точку Q'' —центрѣ дуги круга, очерчивающей впадину зубца нижняго колеса, соприкасающуюся съ выступомъ зубца верхняго колеса; радіусъ $Q''n$ получимъ, сдѣлавъ Tn равной половинѣ шага.

Соединяя K'' съ M_1 , получимъ въ пересѣченіи съ линіею $I''Q''$ точку Q —центрѣ дуги круга dmh , очерчивающей профиль выступа зубца нижняго колеса; соединяя точку M_2 съ точкою K'' и продолжая линію M_2K'' до пересѣченія съ линіею $I''Q''$, получимъ точку I'' —центрѣ дуги круга adm , очерчивающей профиль впадины зубца верхняго колеса.

Радіусы Qm и $P''m$ опредѣлятся, сдѣлавъ Tm равной половинѣ шага.

Величины PT и $P''T$ могутъ быть опредѣлены вычисленіемъ слѣдующимъ образомъ:

Положивъ $PT=D$, $M_2T=R_2$, уголъ $M_2TP=\alpha$

$$\text{и } KT=K''T=R'\sin \alpha,$$

получимъ

$$M_2M=R_2\sin \alpha; \quad TM=R_2\cos \alpha.$$

$$PM=TM-TP=R_2\cos \alpha-D.$$

Изъ подобія треугольниковъ TPK и PMM_2 , получимъ:

$$TP : KT=PM : MM_2$$

или

$$D : R'\sin \alpha=R_2\cos \alpha-D : R_2\sin \alpha$$

и

$$D=\frac{R_2R'\cos \alpha}{R_2+R'} \quad . \quad (5)$$

Если TI'' назовемъ черезъ D' ,

$$\text{то } P''M=P''T+TM=D'+R_2\cos \alpha;$$

Сумма проекцій всѣхъ прямыхъ, проведенныхъ на чертежѣ (чер. 22), взятая на направленіе линіи M_1M_2 , дастъ уравненіе:

$$l - \rho_2 \cos a - \rho_1 \cos b = m \cos \varphi. \quad (9)$$

Проектируя тѣ же линіи на направленіе, перпендикулярное къ линіи M_1M_2 , получимъ:

$$\rho_2 \sin a + \rho_1 \sin b = m \sin \varphi. \quad (10)$$

Возвышая оба уравненія въ квадратъ и складывая получимъ:

$$l^2 + \rho_2^2 + \rho_1^2 - 2l(\rho_2 \cos a + \rho_1 \cos b) + \\ + 2\rho_2\rho_1 \cos(a-b) = m^2. \quad (11)$$

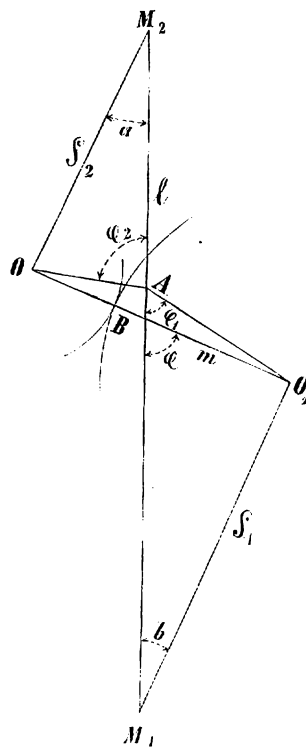
Положимъ теперь, что колесо M_2 повернулось на нѣкоторый уголъ α отъ положенія, представленнаго на чертежѣ; колесо M_1 въ то же время повернулось на уголъ β , причемъ углы α и β столь малы, что сѣщеніе между разсматриваемою парюю зубцовъ отъ поворота колесъ не прекратилось.

Для такого новаго положенія колесъ, уравненіе (11) очевидно превратится въ слѣдующее:

$$l^2 + \rho_2^2 + \rho_1^2 - 2l \left\{ \rho_2 \cos(a + \alpha) + \rho_1 \cos(b - \beta) \right\} + \\ + 2\rho_2\rho_1 \cos(a - b + \alpha + \beta) = m^2. \quad (12)$$

Если-бы зубцы были очерчены совершенно правильно, то отношеніе угловъ поворота α и β равнялось-бы обратному отношенію радиусовъ колесъ, т. е.

$$\alpha R_2 - \beta R_1 = 0;$$



Чер. 22.

но такъ какъ по условію, правильные профили замѣнены дугами круга, то разность $\alpha - \beta \frac{R_1}{R_2}$ не будетъ нулемъ.

Положимъ $\alpha - \beta \frac{R_1}{R_2} = \delta$.

Очевидно, что δ и представить величину погрѣшности, происходящую въ углахъ поворота отъ неточнаго очертанія зубцовъ. Извѣстно, что углы α и β обыкновенно бываютъ не велики, такъ что, принимая одинъ изъ нихъ, напр. β , за переменную независимую, другой — α можно развернуть въ строку Маклорена по степенямъ величины β .

Углы α и β суть приращенія угловъ a и b при поворотѣ колесъ, такъ что при $\beta = 0$ и $\alpha = 0$; слѣдовательно:

$$\alpha = \frac{d\alpha}{d\beta}\beta + \frac{1}{2} \frac{d^2\alpha}{d\beta^2}\beta^2 + \frac{1}{2 \cdot 3} \frac{d^3\alpha}{d\beta^3}\beta^3 + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} \frac{d^4\alpha}{d\beta^4}\beta^4 + \dots \quad (13)$$

Производныя α относительно β можно найти изъ уравненія (12); дифференцируя это уравненіе нѣсколько разъ относительно β , можно найти столько производныхъ α относительно β сколько требуютъ обстоятельства. Въ найденныхъ формулахъ, выражающихъ производныя α по β , надо сначала поставить $\alpha = 0$ и $\beta = 0$ и потомъ уже подставить эти формулы въ уравненіе (13).

Въ уравненіе $\alpha - \frac{R_1}{R_2}\beta = \delta$ подставимъ, вмѣсто α , его выраженіе изъ уравненія (13), тогда получимъ:

$$\left(\frac{d\alpha}{d\beta} - \frac{R_1}{R_2}\right)\beta + \frac{1}{2} \frac{d^2\alpha}{d\beta^2}\beta^2 + \frac{1}{2 \cdot 3} \frac{d^3\alpha}{d\beta^3}\beta^3 + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} \frac{d^4\alpha}{d\beta^4}\beta^4 + \dots = \delta \quad (14)$$

Величины a , b , r_1 и r_2 , отъ которыхъ зависитъ первая часть написаннаго равенства, должны быть опредѣлены такъ, чтобы величина δ была по возможности меньше.

Способъ для достиженія указанной цѣли основывается на томъ соображеніи, что если величины β , входящія въ формулу (14) довольно малы, то δ будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ больше коэффициентовъ β , начиная съ перваго, обратятся въ нули, т. е. чѣмъ больше будетъ удовлетворено уравненій.

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_1}{R_2} - \frac{d\alpha}{d\beta} &= 0, \\ \frac{d^2\alpha}{d\beta^2} &= 0, \\ \frac{d^3\alpha}{d\beta^3} &= 0, \\ \frac{d^4\alpha}{d\beta^4} &= 0, \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (15)$$

Большаго числа уравненій не написано, такъ какъ для удовлетво-
ренія уравненій группы (15) имѣется всего 4 величины a , b , ρ_1 и ρ_2 .

Каждое изъ приведенныхъ уравненій представляетъ особое усло-
віе; но уравненіе 4^{ое} группы (15), какъ показало изслѣдованіе, при-
водитъ къ результатамъ, не имѣющимъ практическаго примѣненія, а
потому мы ограничимся первыми тремя уравненіями группы (15).

Для опредѣленія-же производныхъ, входящихъ въ уравненія группы
(15), необходимо три раза продифференцировать уравненіе (12), отъ
чего получаются уравненія:

$$\left. \begin{aligned} & l \left\{ \rho_2 \sin(a + \alpha) \frac{d\alpha}{d\beta} - \right. \\ & \left. - \rho_1 \sin(b - \beta) \right\} - \rho_1 \rho_2 \sin(a + \alpha - b + \beta) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} + 1 \right) = 0 \\ & l \left\{ \rho_2 \cos(a + \alpha) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} \right)^2 - \rho_2 \sin(a + \alpha) \frac{d^2\alpha}{d\beta^2} + \rho_1 \cos(b - \beta) \right\} - \\ & - \rho_1 \rho_2 \cos(a + \alpha - b + \beta) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} + 1 \right)^2 - \\ & - \rho_1 \rho_2 \sin(a + \alpha - b + \beta) \frac{d^2\alpha}{d\beta^2} = 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots (16)$$

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ -\rho_2 \sin(\alpha + \alpha) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} \right)^2 + 3\rho_2 \cos(\alpha + \alpha) \frac{d\alpha}{d\beta} \cdot \frac{d^2\alpha}{d\beta^2} + \right. \\ & \quad \left. + \rho_2 \sin(\alpha + \alpha) \frac{d^3\alpha}{d\beta^3} + \right. \\ & \left. + \rho_1 \sin(b - \beta) \right\} + \rho_2 \rho_1 \sin(\alpha + \alpha - b + \beta) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} + 1 \right)^3 = \\ & \quad - 3\rho_1 \rho_2 \cos(\alpha + \alpha - b + \beta) \left(\frac{d\alpha}{d\beta} + 1 \right) \frac{d^2\alpha}{d\beta^2} \\ & \quad - \rho_1 \rho_2 \sin(\alpha + \alpha - b + \beta) \frac{d^3\alpha}{d\beta^3} = 0 \end{aligned} \right\} \dots (16)$$

Изъ написанныхъ 3-хъ уравненій можно опредѣлить три первыя производныя α по β ; затѣмъ въ полученныя выраженія подставить $\alpha=0$ и $\beta=0$ и ввести ихъ въ уравненія группы (15). Можно придти къ тому-же самому одновременно, рѣшая уравненія группы (15) и (16) съ прибавленіемъ къ нимъ условія $\alpha=0$ и $\beta=0$.

Принимая этотъ послѣдній способъ дѣйствія, введемъ два послѣднія условія и условія, выраженныя группою (15) въ группу уравненій (16); тогда получимъ, послѣ небольшихъ преобразованій:

$$\left. \begin{aligned} & \{R_1 \rho_2 \sin a - R_2 \rho_1 \sin b\} = \rho_1 \rho_2 \sin(a - b) \\ & \{R_1^2 \rho_2 \cos a + R_2^2 \rho_1 \cos b\} = (R_1 + R_2) \rho_1 \rho_2 \cos(a - b) \\ & \{R_1^3 \rho_2 \sin a - R_2^3 \rho_1 \sin b\} = (R_1 + R_2)^2 \rho_1 \rho_2 \sin(a - b) \end{aligned} \right\} (17)$$

Въ эти три уравненія входятъ только 4 неизвѣстныя величины a , b , ρ_1 и ρ_2 . Слѣдовательно, три изъ нихъ могутъ быть опредѣлены; а когда онѣ будутъ найдены, то будетъ извѣстно гдѣ слѣдуетъ взять центры дугъ круга, ограничивающихъ зубцы и удовлетворяющихъ тому условію, чтобы движеніе колесъ съ круговыми зубцами какъ можно менѣе уклонялось отъ движенія колесъ совершенно правильныхъ.

Мѣста отыскиваемыхъ центровъ находятся удобнѣе и геометрическія условія, которымъ удовлетворяютъ эти мѣста, выражаются

яснѣе, когда координатами искомыхъ точекъ будутъ не углы a и b и разстоянія, означенныя буквами ρ_1 и ρ_2 , но, какъ на черт. (22), разстоянія отъ точки прикосновенія начальныхъ окружностей и углы, составляемые линіею $M_1 M_2$ съ прямыми линіями, соединяющими искомыя точки O и O_1 съ точкою A —прикосновенія начальныхъ окружностей.

Положимъ что:

$$\begin{aligned} OA &= r_2, \text{ уголъ } OAM_2 = \varphi_2; \\ O_1A &= r_1, \quad \text{ „ } \quad O_1AM_1 = \varphi_1; \end{aligned}$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 \sin a &= r_2 \sin \varphi_2 \\ \rho_2 \cos a &= R_2 - r_2 \cos \varphi_2 \\ \rho_1 \sin b &= r_1 \sin \varphi_1 \\ \rho_1 \cos b &= R_1 - r_1 \cos \varphi_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

Вставляя эти послѣднія выраженія въ уравненія группы (17) получимъ:

изъ перваго уравненія послѣ небольшихъ преобразованій:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} \varphi_1 \dots \dots \dots (19)$$

Это и есть первое условіе изъ доставленныхъ намъ уравненіями группы (15).

Подставляя выраженія группы (18) во второе уравненіе группы (17) и принимая во вниманіе уравненіе (19), послѣ сокращенія подобныхъ членовъ, найдемъ:

$$R_1 R_2 (r_1 + r_2) \cos \varphi_1 = (R_1 + R_2) r_1 r_2, \quad \dots \dots (20)$$

или, раздѣляя обѣ части равенства на произведеніе $r_1 r_2 R_1 R_2$, получимъ уравненіе:

$$\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cos \varphi_1 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; \quad \dots \dots (21)$$

извѣстное намъ подъ именемъ уравненія Савари.

Это есть второе условіе, доставляемое намъ уравненіями группы (15).

Прежде подстановленія въ третье уравненіе группы (17), замѣтимъ, что его вторая часть равенства равна второй части равенства перваго уравненія той-же группы, умноженной на $(R_1 + R_2)^2$. Теперь, подставляя обозначенія группы 18, получимъ:

$$R_1^3 r_2 \sin \varphi_2 - R_2^3 r_1 \sin \varphi_1 = (R_1 + R_2)^2 \{ R_1 r_2 \sin \varphi_2 - R_2 r_1 \sin \varphi_1 \}.$$

Принимая въ соображеніе уравненіе (19) и сокращая подобные члены, найдемъ:

$$(R_2 + 2 R_1) r_2 = (R_1 + 2 R_2) r_1 (22)$$

Рѣшеніе уравненій (20) и (22) даетъ:

$$r_1 = \frac{3 R_2 R_1}{R_1 + 2 R_2} \cos \varphi_1 ; (23)$$

$$r_2 = \frac{3 R_2 R_1}{R_2 + 2 R_1} \cos \varphi_1 (24)$$

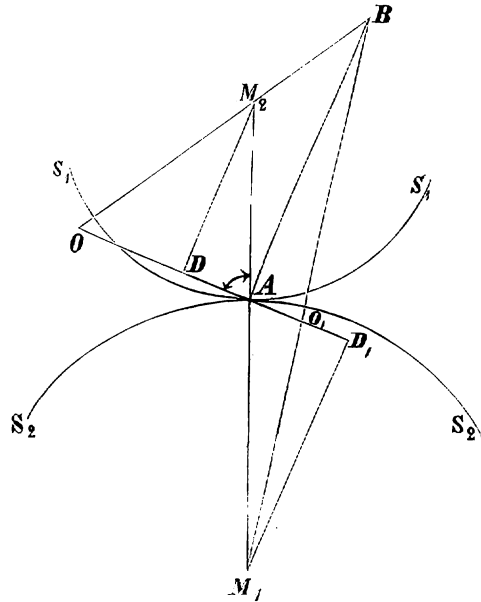
Это есть третье и послѣднее изъ практически примѣняемыхъ условій, доставляемыхъ намъ уравненіями группы (15). Обращаясь затѣмъ къ выведеннымъ уравненіямъ, можно сказать, что уравненіе (19) замѣняетъ первое уравненіе группы (17); уравненія (19) и (21)—два первыя уравненія группы (17); наконецъ уравненія (19), (23) и (24) замѣняютъ всю группу (17).

Уравненіе (19), или первое условіе, выражаетъ, что обѣ прямая линіи, соединяющія искомыя центры кривизны O и O_1 съ точкою прикосновенія начальныхъ окружностей A , составляютъ съ линіею центровъ равные и противоположные углы; другими словами, что опредѣляемые центры кривизны, во время правильнаго сцѣпленія, должны лежать на какой угодно прямой, проходящей черезъ точку касанія начальныхъ окружностей и разстоянія отъ этой послѣдней точки до центровъ O и O_1 могутъ быть произвольныя величины.

Уравненія (19) и (21), или второе условіе, выражаетъ, что опредѣляемые центры кривизны O и O_1 должны лежать на произвольной прямой, проходящей черезъ точку касанія начальныхъ окружно-

стей A (черт. 23) и; сверхъ того, что выбравъ произвольно одинъ изъ центровъ—другой опредѣлится построениемъ, которому слѣдуетъ Виллисъ, т. е. черезъ избранный центръ кривизны, напр. O и черезъ соотвѣтствующій центръ вращенія M_2 надо провести прямую до встрѣчи съ перпендикуляромъ къ AO , возставленнымъ въ точкѣ A и черезъ полученную точку встрѣчи B провести прямую BM_1 ; точка пересѣченія этой прямой съ продолженіемъ линіи AO и дастъ точку O_1 .

Для доказательства правильности построения достаточно изъ точекъ M_1 и M_2 опустить перпендикуляры M_1D_1 и M_2D на линію



Чер. 23.

OO_1 и сравнить подобные треугольники: ODM_2 съ OAB и $O_1D_1M_1$ съ O_1AB . Изъ нихъ получимъ:

$$\frac{r_2 - R_2 \cos \varphi_1}{R_2 \sin \varphi_1} = \frac{r_2}{AB}$$

и

$$\frac{R_1 \sin \varphi_1}{R_1 \cos \varphi_1 - r_1} = \frac{AB}{r_1}.$$

Перемножая эти равенства и раздѣля полученное произведеніе на $R_1 R_2 r_1 r_2$, найдемъ уравненіе (21).

Предшествующіе два способа опредѣленія центровъ кривизны дали дуги круговъ, составляющихъ первую и вторую степень приближенія.

Уравненія (19), (23) и (24), или третье условіе, опредѣляетъ центры круговъ еще болѣе удовлетворяющихъ условію достиженія возможно меньшихъ ошибокъ, при движеніи зубчатыхъ колесъ.

Извѣстно уже, что уравненію (19) соответствуетъ произвольная прямая, проходящая черезъ точку A , а уравненія (23) и (24) показываютъ, что разстоянія точекъ O и O_1 отъ A , означенныя буквами r_2 и r_1 , суть проекціи постоянныхъ величинъ

$$\frac{3 R_2 R_1}{R_2 + 2 R_1} \quad \text{и} \quad \frac{3 R_2 R_1}{R_1 + 2 R_2}$$

на избранную прямую.

Если длину, соответствующую формулѣ $\frac{3 R_2 R_1}{R_2 + 2 R_1}$, отложимъ отъ точки A по направленію къ центру M_2 (чер. 24) и назовемъ ее AE , а длину $\frac{3 R_2 R_1}{R_1 + 2 R_2}$, сделаемъ равною AE_1 , то опишемъ окружности на діаметрахъ AE и AE_1 , достаточно будетъ взять точку пересѣченія описанныхъ круговъ съ произвольною прямою, проходящею черезъ точку A , чтобы получить желаемые центры кривизны O и O_1 .

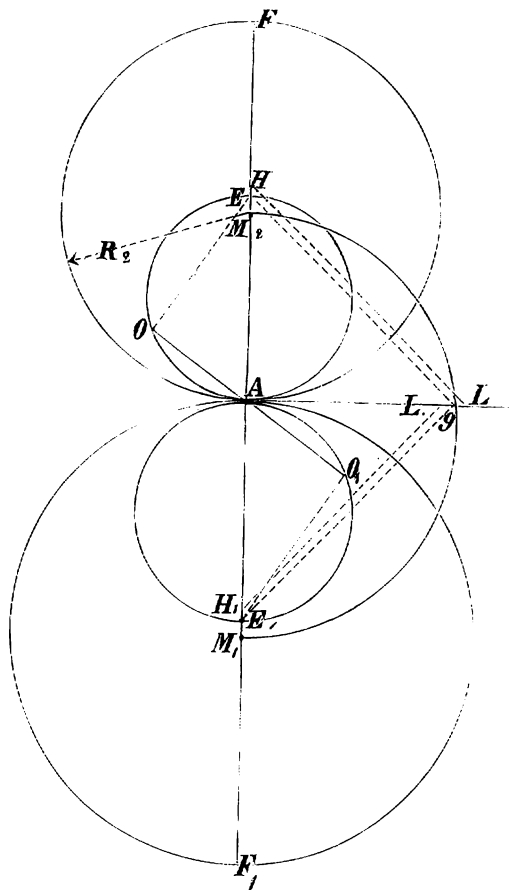
Дѣйствительно, извѣстно, что углы EOA и $E_1 O_1 A$ будутъ прямые, слѣдовательно:

$$OA = AE \cos \varphi_1 = \frac{3 R_2 R_1}{R_2 + 2 R_1} \cos \varphi_1 = r_2;$$

$$O_1 A = AE_1 \cos \varphi_1 = \frac{3 R_2 R_1}{R_1 + 2 R_2} \cos \varphi_1 = r_1.$$

Что касается геометрическаго опредѣленія линій AE и AE_1 , то ихъ можно построить напр. слѣдующимъ образомъ: продолжить линіи AM_1 и AM_2 , такъ чтобы $AF_1 = 2 R_1$ и $AF = 2 R_2$; разстояніе между центрами вращенія $M_1 M_2$ принять за діаметръ и описать полуо-

кружность; изъ точки A возставить къ линіи M_1M_2 перпендикуляръ и длину AG отложить отъ точки A по линіи M_1M_2 въ обѣ стороны такъ, чтобы $AH = AG$ и $AH_1 = AG$;



Чер. 24.

наконецъ сдѣлать

$$AL = \frac{1}{3} (R_2 + 2R_1) \text{ и}$$

$$AL_1 = \frac{1}{3} (R_1 + 2R_2).$$

Затѣмъ черезъ точку G провести линію параллельную прямой HL , что даетъ точку E и черезъ ту-же точку G провести прямую параллельную H_1L_1 , что даетъ точку E_1 .

Останавливаясь на указанномъ способѣ очертанія, удовлетворяющѣмъ уравненіямъ (19) (23) и (24), видимъ, что углу φ можно дать произвольную величину. Выбирая величину угла φ , можно руководствоваться различными соображеніями: 1) стараться сдѣлать четвертый членъ первой части равенства (14) по возможности меньше, такъ какъ нельзя его сдѣлать равнымъ нулю; 2) придать зубцамъ такой видъ, при которомъ взаимное истираніе ихъ становится по возможности меньше и 3) очертить зубцы такъ, чтобы наибольшая толщина ихъ была при соединеніи съ ободомъ.

Изъ всѣхъ приведенныхъ условій, оказывается наиболѣе цѣлесообразнымъ удовлетворить послѣднему условію, причемъ уголъ φ можетъ быть взятъ равнымъ 75° .

Вышеизложенный способъ очертанія зубцовъ годится въ случаѣ сцепленія двухъ колесъ или въ случаѣ сцепленія одного колеса съ нѣсколькими равными колесами; для рядовыхъ-же колесъ этотъ способъ не примѣнимъ *).

д. Расчетъ зубцовъ цилиндрическихъ колесъ.

Обозначимъ:

r —радіусъ начальной окружности;

t —шагъ;

b —ширину зуба $= \psi t$;

l —высоту зуба $= 0,7 t$;

s —толщину зуба по начальной окружности;

z —число зубцовъ;

P —давленіе на зубцы, опредѣляемое моментомъ передаваемой силы;

n —число оборотовъ колеса въ минуту;

N —число паровыхъ лошадей, которое должно быть передано при помощи зубчатого колеса.

Прежде всего должна быть опредѣлена толщина зубцовъ, представляющая достаточное сопротивленіе ихъ обламыванію.

Если предположимъ, что сила P приложена въ вертикальной пло-

*) Гр. Петровымъ выведены формулы для опредѣленія положенія центровъ и для рядовыхъ колесъ. См. Инженерный журналъ, 1875 г. № 11.

скости, проходящей через середину колеса къ вершинѣ зубца, (чер. 6), то

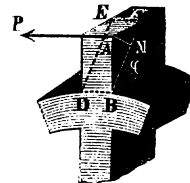
$$Pl = R \frac{bx^2}{6} .$$

откуда

$$R = \frac{6 Pl}{bx^2} .$$

Если-же предположимъ самый невыгодный случай, т. е. что давленіе приложено къ точкѣ A (чер. 25), то въ предыдущей формулѣ для l нужно взять длину нормали AN , которая равна:

$$AN = AB \cos \varphi = l \cos \varphi ;$$



Чер. 25.

для ширины зубца b нужно взять длину $BE = \frac{l}{\sin \varphi}$;

тогда получимъ:

$$Pl \cos \varphi = R \frac{1}{6} \frac{l}{\sin \varphi} x^2 ,$$

или

$$P \sin 2 \varphi = \frac{1}{3} R x^2 ,$$

откуда

$$R = \frac{3 P \sin 2 \varphi}{x^2} .$$

R получить наибольшее значеніе для $\varphi = 45^\circ$ и тогда

$$R = \frac{3 P}{x^2} .$$

Для того, чтобы напряженіе матеріала въ обоихъ случаяхъ было одинаково, необходимо, чтобы

$$\frac{3 P}{x^2} = \frac{6 Pl}{bx^2} .$$

Откуда

$$b = 2l = 1,4t;$$

т. е. слѣдовательно для того, чтобы толщина зубца въ обоихъ случаяхъ представляла одинаковую степень прочности, необходимо, чтобы ширина зубца равнялась двойной его высотѣ.

Принимая во вниманіе, что при тщательномъ выполненіи колесъ, дѣйствіе силы P на точку A зубца можно разсматривать какъ исключеніе, мы будемъ принимать для сильно нагруженныхъ колесъ, т. е. такихъ, при расчетѣ которыхъ приходится опредѣлять толщину зубца въ предположеніи возможности его обламыванія, ширину зубца не болѣе двойного шага, т. е. $2t$.

Изъ уравненія

$$Pl = \frac{1}{6} R b x^2,$$

обозначивъ

$$l = \alpha t$$

и

$$x = \beta t,$$

получимъ

$$P = \frac{1}{6} \frac{\beta^2}{\alpha} R b t;$$

если обозначимъ

$$\frac{1}{6} \frac{\beta^2}{\alpha} R \text{ черезъ } K, \dots \dots \dots (25)$$

получимъ

$$P = K b t. \dots \dots \dots (26)$$

Принявъ

$$\alpha = 0,7 \text{ и } \beta \text{ отъ } 0,5 \text{ до } 0,55,$$

получимъ

$$K = 0,06 R \text{ до } 0,07 R \dots \dots \dots (27)$$

Взявши R равнымъ прочному сопротивленію, которое для чугуна можетъ быть принято въ 300 кил. на квадратный см., получимъ

$$K = 18 \text{ до } 21 \text{ килограм.}$$

Такимъ образомъ, въ уравненіи $P = Kbt$, наибольшія значенія коэффиціента K колеблются между 18 и 21, причемъ b должно быть взято $b \leq 2t$.

Если для предупрежденія изнашиванія, ширину зубцовъ дѣлають больше $2t$, то при этомъ должно быть выполнено условіе:

$$K \leq 21 \cdot \frac{2t}{b} \text{ для } b \geq 2t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Такъ напр. для колесъ, ширина зубцовъ которыхъ $b = 4t$, коэффиціентъ K въ уравненіи (26) не долженъ быть больше 10,5 кил.

Для зубцовъ, толщина которыхъ значительно больше $0,5t$, величина коэффиціента K , опредѣляемая уравненіемъ (25), можетъ быть соотвѣтственно увеличена.

Вышеизложенное показываетъ, что уравненіе (26) въ связи съ условіемъ (28), можетъ быть принято въ основаніе расчетовъ какъ для силовыхъ, такъ и для скоростныхъ колесъ.

Для скоростныхъ колесъ, какъ мы видѣли ранѣе, должно быть выполнено условіе, чтобъ давленіе на единицу поверхности въ мѣстахъ соприкосновенія зубцовъ не превосходило извѣстнаго предѣла; имѣя въ виду, что поверхность соприкосновенія зубцовъ пропорціональна шагу и ширинѣ зубцовъ, можно принять что

$$P = K_1 bt,$$

гдѣ K_1 есть нѣкоторый эмпирическій коэффиціентъ. Такъ какъ приведенное уравненіе имѣетъ совершенно такой же видъ какъ и уравненіе (26), то это послѣднее можетъ быть примѣнено какъ для силовыхъ, такъ и для скоростныхъ колесъ; слѣдуетъ только при этомъ имѣть въ виду, что коэффиціентъ K для силовыхъ колесъ опредѣляется уравненіемъ (27), для скоростныхъ же колесъ K будетъ зависѣть отъ весьма многихъ условій.

Если изнашиваніе зубцовъ должно наступить лишь по истеченіи болѣе или менѣе продолжительнаго времени, то коэффиціентъ K для скоростныхъ колесъ долженъ быть взятъ тѣмъ меньше, чѣмъ большее число оборотовъ дѣлаетъ колесо, чѣмъ большее число часовъ оно ежедневно работаетъ, чѣмъ меньше сопротивленіе изнашиванію пред-

ставляет матеріалъ зубцовъ, чѣмъ больше треніе между зубцами и т. д.

Ввести каждое изъ перечисленныхъ условій въ расчетъ оказывается, конечно, невозможнымъ; при обыкновенныхъ условіяхъ для чугунныхъ скоростныхъ колесъ, зубцы которыхъ очерчены по эпициклоидамъ, при числѣ оборотовъ n до 250, можно пользоваться формулою, предложенною Бахомъ *):

$$K = 20 \sqrt{n}, \dots \dots \dots (29)$$

причемъ для

$n = 16$	36	64	100	144	196	256
$K = 16$	14	12	10	8	6	4

При приведенныхъ значеніяхъ K , наибольшая ширина зуба, въ зависимости отъ условія (28), можетъ быть опредѣлена въ

$$2,6t \quad 3t \quad 3,5t \quad 4,2t \quad 5,25t.$$

Если одно изъ колесъ имѣетъ деревянные зубцы, то величины K должны быть взяты въ этомъ случаѣ отъ 0,4 до 0,5 приведенныхъ выше значеній, причемъ низшій предѣлъ относится къ колесамъ съ небольшимъ числомъ оборотовъ, высшій—къ колесамъ съ значительнымъ числомъ оборотовъ.

Если задано число паровыхъ лошадей, которое должно быть передано при посредствѣ зубчатого колеса, то шагъ можетъ быть опредѣленъ слѣдующимъ образомъ:

$$75 N = P \frac{2\pi r}{100} \cdot \frac{n}{60};$$

$$2\pi r = \pi t;$$

$$P = Kbt = K\phi t^2,$$

откуда

$$t = 10 \sqrt[3]{\frac{450 \cdot N}{\pi \phi K \cdot n}} \dots \dots \dots (30)$$

*) См. Bach. Die Maschinenelemente, Stuttgart 1881. Pag. 103.

Если моментъ передаваемой силы заданъ въ килограммахъ и сантиметрахъ, то

$$M = Pr = K \phi t^2 \frac{z}{2\pi},$$

откуда

$$t = \sqrt[3]{\frac{2\pi}{\phi z K} \cdot M} \dots \dots \dots (31)$$

Для того, чтобъ получить удобную величину радіуса колеса, шагъ зацепленія t нужно взять кратнымъ отъ π .

По отношенію къ величинѣ ϕ , въ выраженіи $b = \phi t$, необходимо замѣтить, что для силовыхъ колесъ, какъ уже сказано ранѣе, ширина b дѣлается равной $2t$; для скоростныхъ колесъ $b = 2t$ и до $3t$; въ тѣхъ-же случаяхъ, гдѣ при посредствѣ зубчатаго колеса передается значительная механическая работа, ширина зубцовъ b дѣлается гораздо больше и доходитъ до $5t$.

Увеличивая ширину зуба, имѣють въ виду по возможности уменьшить шагъ, ибо чѣмъ меньше шагъ, тѣмъ спокойнѣе передача, такъ какъ большее число зубцовъ находится одновременно въ сцепленіи.

Обыкновенно t дѣлають не больше 80 мм., причемъ ширина зубцовъ отъ 4,5 t до 5 t должна быть выбрана сообразуясь съ условіемъ (28); если при этомъ K получается болѣе опредѣленнаго на основаніи формулы (29) значенія, то величину шага слѣдуетъ увеличить, причемъ всегда необходимо имѣть въ виду, по возможности, увеличивать радіусы круговъ производителей въ эпициклоидальномъ зацепленіи.

При широкихъ зубахъ должно быть обращено особенное вниманіе на тщательную ихъ отдѣлку, чтобъ прикосновеніе между зубцами происходило по всей ширинѣ зуба.

По отношенію къ числу зубцовъ z слѣдуетъ замѣтить, что наименьшее число зубцовъ для силовыхъ колесъ можетъ быть принято въ 10—11 зубцовъ, для скоростныхъ колесъ—въ 24 зуба.—Чѣмъ большимъ количествомъ зубцовъ снабжено колесо, тѣмъ спокойнѣе передача, такъ какъ шагъ зацепленія при этомъ меньше. Въ виду сего слѣдуетъ всегда стараться снабдить колесо, по возможности, большимъ числомъ зубцовъ. На практикѣ стараются обыкновенно

опредѣлить число зубцовъ двухъ сцѣпленныхъ колесъ такъ, чтобъ числа эти были взаимно первыми; при такомъ выборѣ числа зубцовъ, зубецъ одного изъ колесъ, при послѣдовательномъ вращеніи колеса, будетъ сцѣпляться все съ разными зубцами другого колеса, чѣмъ предупреждается неравномѣрный износъ зубцовъ. Въ виду сего, меньшее колесо снабжаютъ обыкновенно 11, 13, 17, 19 и т. д. зубцами, т. е. вообще числами первоначальными, на большемъ же колесѣ число зубцовъ должно быть опредѣлено какъ въ зависимости отъ числа зубцовъ на меньшемъ колесѣ, такъ и въ зависимости отъ конструктивныхъ особенностей; такъ напр. число это должно быть кратнымъ отъ числа спицъ.

Вообще же строгое соблюденіе приведеннаго правила не представляетъ особенной важности и въ нѣкоторыхъ случаяхъ, какъ напр. для рядовыхъ колесъ, оказывается не всегда выполнимымъ.

Передаточное число двухъ колесъ (отношеніе числа оборотовъ одного колеса къ числу оборотовъ другого колеса) бываетъ:

- 1) для силовыхъ колесъ не болѣе $1 : 10$;
- 2) для скоростныхъ колесъ, при незначительномъ числѣ оборотовъ, не болѣе $1 : 7$ (число зубцовъ при этомъ на меньшемъ колесѣ должно быть взято не менѣе 36—40), при значительномъ же числѣ оборотовъ—не болѣе $1 : 5$.

По отношенію къ выбору матеріала для зубцовъ, необходимо замѣтить слѣдующее:

При большой скорости и большомъ числѣ оборотовъ колесъ, зубцы одного изъ нихъ полезно дѣлать деревянными, чѣмъ достигается болѣе спокойная передача, обусловливаемая упругостью матеріала зубцовъ; при этомъ однако необходимо имѣть въ виду, что деревянные зубцы скорѣе изнашиваются чѣмъ чугунные. Чѣмъ меньшее значеніе будетъ взято для K въ уравненіяхъ (26), (30) и (31), тѣмъ дольше будутъ служить зубцы, но тѣмъ выше будетъ стоимость колеса.

Ширина зубцовъ дѣлается:

- 1) Для чугунныхъ колесъ:

$$\text{при тщательно отдѣланныхъ зубцахъ } s = \frac{19}{40}t \text{ до } \frac{39}{80}t; \quad (32)$$

$$\text{при необдѣланныхъ зубцахъ } s = \frac{19}{40}t \dots \dots \dots (33)$$

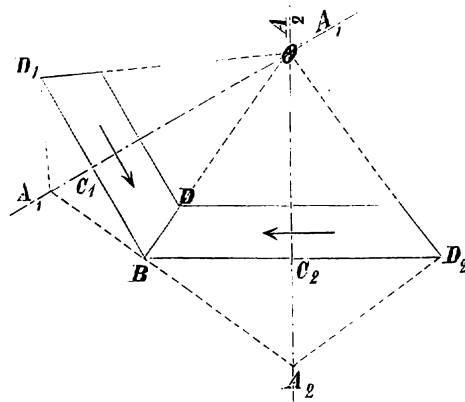
2) Для колесъ съ деревянными зубами, спѣяленныхъ съ чугу-
ными колесами:

$$\text{для чугунаго зуба } s = \frac{16}{40} t = 0,4 t \dots \dots (32a)$$

$$\text{для деревяннаго зуба } S = \frac{23}{40} t \dots \dots \dots (33a)$$

2. Коническія зубчатые колеса.

При разсмотрѣніи цилиндрическихъ колесъ мы видѣли, что дви-
женіе двухъ зубчатыхъ колесъ можно разсматривать какъ катаніе



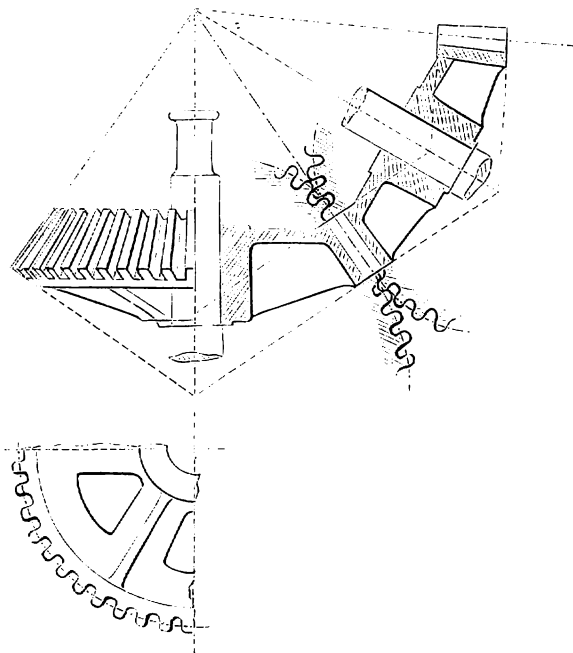
Чер. 26.

безъ скольженія двухъ цилиндровъ (начальныхъ окружностей); дви-
женіе двухъ коническихъ колесъ можетъ быть разсматриваемо какъ
катаніе безъ скольженія двухъ конусовъ, вершины которыхъ совпа-
даютъ съ точкой пересѣченія осей вращенія.

Пусть A_1A_1' и A_2A_2' оси, пересѣкающіяся въ точкѣ O (чер. 26);
конусы проектирующіеся въ OBD_1 и OBD_2 мы будемъ называть
основными и пользоваться только частью ихъ, опредѣляемою дли-
ною производящей BD (подъ именемъ начальныхъ окружностей ко-
ническихъ зубчатыхъ колесъ мы будемъ понимать окружности BD_1
и BD_2). Если вообразимъ себѣ сферу произвольнаго радіуса, центръ

которой совпадает съ точкою O , то поверхности зубцовъ коническихъ колесъ пересѣкутъ эту сферу по нѣкоторымъ кривымъ, которыя могутъ быть приняты за *профиля зубцовъ* коническихъ зубчатыхъ колесъ; конусы-же OBD_1 и OBD_2 пересѣкутъ эту сферу по окружностямъ, которыя могутъ быть приняты за начальныя окружности коническихъ колесъ; между получаемыми, такимъ образомъ, на сферѣ профилями и начальными окружностями существуетъ такая-же зависимость, какъ между профилями зубцовъ цилиндрическихъ колесъ и начальными ихъ окружностями, вычерченными въ плоскости, перпендикулярной къ осямъ колесъ.

Вслѣдствіе трудности полученія профилей зубцовъ на сферѣ; очертаніе зубцовъ коническихъ колесъ производится слѣдующимъ приближеннымъ способомъ, предложеннымъ Тредгольдомъ *).



Чер. 27.

*) См. Buchanan's Practical essays on mill work, London 1841. Pag. 58.

Берутъ такъ называемые вспомогательные конусы A_1BD_1 и A_2BD_2 , производящія которыхъ A_1B и A_2B перпендикулярны къ производящей OB основныхъ конусовъ. — Развертываютъ вспомогательные конусы на плоскость (чер. 27) и на полученныхъ, такимъ образомъ, секторахъ вычерчиваютъ зубцы по одному изъ способовъ, указанныхъ для цилиндрическихъ колесъ.

Затѣмъ наворачиваютъ секторы съ начерченными на нихъ зубцами на вспомогательные конусы и заставляютъ производящую прямую двигаться такъ, чтобы она слѣдовала по зигзаговой линіи полученныхъ профилей зубцовъ. Коническая поверхность, которую произведетъ при этомъ производящая прямая и будетъ поверхностью, ограничивающей коническія зубчатая колеса. Шагъ зацепленія и толщина зубцовъ будутъ отсчитываться по окружностямъ D_1B и D_2B , высота зубцовъ — по направленьямъ A_1B и A_2B , ширина зубцовъ будетъ считаться по направленью BO .

Что касается до выбора очертанія профилей зубцовъ, расчета шага зацепленія и т. д., то все сказанное при разсмотрѣніи цилиндрическихъ колесъ остается вполне примѣнимымъ и для коническихъ зубчатыхъ колесъ.

3. Зубчатая колеса для осей не параллельныхъ и не пересѣкающихся.

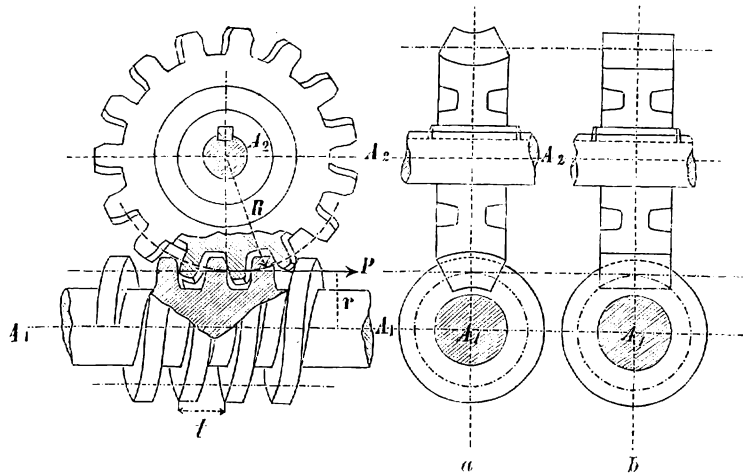
Основными формами такихъ зубчатыхъ колесъ будутъ гиперболоидъ и цилиндръ. — Движеніе двухъ гиперболоидальныхъ колесъ можетъ быть разсматриваемо какъ катаніе безъ скольженія двухъ гиперболоидальныхъ катковъ, соприкасающихся по производящей прямой.

Значительная стоимость устройства гиперболоидальныхъ колесъ, большая потеря работы на преодоленіе вредныхъ сопротивленій вслѣдствіе значительнаго тренія между зубцами, а также возможность избѣгнуть примѣненія гиперболоидальныхъ колесъ при помощи вспомогательной оси, дѣлаютъ примѣненіе такого рода колесъ крайне рѣдкимъ; почему этого рода колеса, какъ не имѣющія важнаго практическаго приложенія, могутъ быть и не разсматриваемы.

По отношенію къ упомянутой выше вспомогательной оси слѣдуетъ только замѣтить, что она можетъ быть расположена или такъ,

чтобы пересѣчь ось и тогда гиперболоидальныя колеса могутъ быть замѣнены двумя парами коническихъ зубчатыхъ колесъ, или-же вспомогательная ось можетъ быть параллельная одной изъ осей и пересѣкать другую ось и тогда гиперболоидальныя колеса замѣняются одной парой цилиндрическихъ и одной парой коническихъ зубчатыхъ колесъ.

Если оси взаимно перпендикулярны и не пересѣкаются между собою, то передача вращательнаго движенія отъ одной оси къ другой, можетъ быть произведена при помощи зацепленія *безконечнаго винта* съ зубчатымъ колесомъ.



Чер. 28.

Пусть $A_1 A_1$ и $A_2 A_2$ (черт. 28) взаимно перпендикулярны и не пересѣкающіяся оси. Если первая изъ нихъ будетъ вращаться и поступательному движенію ея будетъ воспрепятствовано, то тѣло соотвѣтствующее гайкѣ винта должно имѣть поступательное движеніе вдоль оси $A_1 A_1$, т. е. зубчатое колесо должно вращаться около оси $A_2 A_2$.—Такимъ образомъ, зубцы колеса $A_2 A_2$ должны представлять нарезку гайки винта, какъ показано на (чер. 28a); обыкновенно-же ограничиваются тѣмъ, что снабжаютъ зубчатое колесо зубцами, имѣющими форму призмъ, причемъ призмы эти наклонены къ оси колеса подъ угломъ, равнымъ углу подъема винта (чер. 28b).

Такое устройство колеса даетъ въ началѣ недостаточное сопри-

косновение зубцовъ съ наръзкою винта, но съ теченіемъ времени недостатокъ этотъ исчезаетъ.

Шагъ винта и шагъ колеса должны быть равны между собою; для того, чтобы колесо сдѣлало одинъ полный оборотъ, необходимо повернуть винтъ столько разъ, сколько зубцовъ имѣетъ зубчатое колесо; такъ что, называя ω и ω_1 угловыя скорости колеса и винта, а черезъ n число зубцовъ на колесѣ, получимъ:

$$\frac{\omega}{\omega_1} = \frac{1}{n}.$$

Если на винтѣ расположить болѣе одной наръзки, то такой винтъ, при одномъ оборотѣ, будетъ поворачивать колесо на столько зубцовъ, сколько наръзокъ расположено на винтѣ.

Если напр. ходъ винта сдѣлаемъ въ два раза больше шага колеса, то на винтѣ можно расположить 2 наръзки и такой винтъ, при одномъ оборотѣ, будетъ поворачивать колесо на 2 зубца; если винтъ будетъ имѣть n' наръзокъ, то

$$\frac{\omega}{\omega_1} = \frac{n'}{n}.$$

Расчетъ толщины зубцовъ производится по формулѣ (26), причемъ при малыхъ скоростяхъ и незначительномъ изнашиваніи, можно положить

$$K = 18 \text{ кил.}$$

При большихъ скоростяхъ и во избежаніе заѣданія зубцовъ, K можетъ быть взято отъ 8 до 12 кил.

Ширина зубцовъ b можетъ быть сдѣлана $1,5t$.

Моментъ силы, вращающей безконечный винтъ, выражается, не принимая въ расчетъ треніе винта въ подшипникахъ,

$$M = Pr \operatorname{tg} (\alpha + \varphi) = Pr \frac{h + 2\pi r f}{2\pi r - f/h},$$

гдѣ h есть ходъ винта, φ —уголъ тренія, α —уголъ наклона винтовой линіи, f коэффициентъ тренія и r радіусъ винта.

Для винта съ одиночною наръзкой $h = t$, для винта съ двойною наръзкою $h = 2t$ и т. д.

Если принять, что потеря работы на преодоленіе тренія винта въ подшипникахъ составляетъ около 10%, то

$$M = 1,1 Pr \frac{h + 2\pi r f}{2\pi r - fh},$$

причемъ, при хорошей смазкѣ, можно принять $f = 0,1$.

Если

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{2\pi r} < 1/10,$$

то механизмъ будетъ имѣть свойство задерживать движеніе и передача возможна только отъ винта къ колесу; если-же

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{2\pi r} > 1/10,$$

то возможна передача и отъ колеса къ винту, что впрочемъ на практикѣ встрѣчается рѣдко.

Безконечный винтъ и принадлежащее къ нему зубчатое колесо представляютъ необыкновенно простое средство для преобразованія быстраго вращательнаго движенія въ медленное; слѣдуетъ только замѣтить, что если уклонъ винтовой линіи менѣе угла тренія, то полезное дѣйствіе этого механизма не превышаетъ 40% затраченной работы.

Вслѣдствіе столь значительной потери работы, зубцы и наръзки винта изнашиваются весьма быстро.

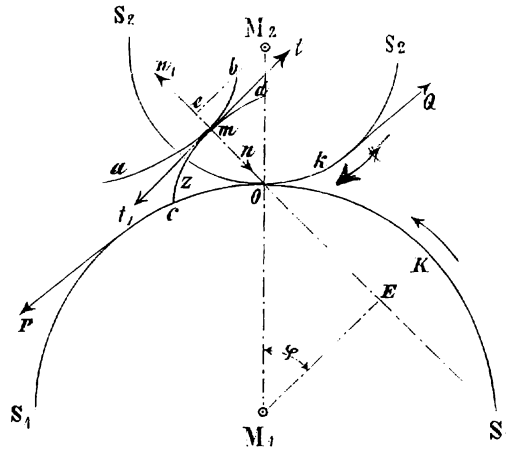
4. Треніе въ зубцахъ.

а. Цилиндрическія колеса.

Намъ уже извѣстно, что при зацѣпленіи цилиндрическихъ зубчатыхъ колесъ, общая нормаль къ зубцамъ должна проходить черезъ точку касанія начальныхъ окружностей.

Пусть S_1S_1 и S_2S_2 начальныя окружности, касающіяся въ точкѣ O (черт. 29); ab профиль зуба верхняго колеса, cd профиль зуба нижняго колеса; m точка касанія профилей зубцовъ въ нѣкоторый моментъ времени; et общая нормаль къ зубцамъ въ точкѣ m ; Q сопротивление, приложенное къ окружности S_2S_2 ; P усиліе приложенное къ окружности S_1S_1 , которое должно преодолѣвать сопротивление Q и треніе въ зубцахъ; r_1 и r_2 радіусы начальныхъ окружностей; N взаимное давленіе зубцовъ.

Давленіе это направлено по линіи mn , для зуба ab и по линіи



Черт. 29.

mn для зуба cd . Вслѣдствіе давленія N , проявляется между зубцами треніе Nf , которое для зуба ab направлено по линіи mt_1 , для зуба cd —по линіи mt .

Для равновѣсія силъ P, Q и силы тренія, необходимо чтобы:

1) Сила P уравнивалась съ силами: N , направленной по mn и Nf , направленной по mt .

2) Сила Q уравнивалась съ силами: N , направленной по mn , и Nf , направленной по mt_1 .

Если сдѣлаемъ уголъ $OM_1E = \varphi$ и линію $om = p$, то получимъ слѣдующія уравненія моментовъ:

$$\left. \begin{aligned} Pr_1 &= Nr_1 \cos \varphi + Nf(r_1 \sin \varphi + p) \\ Qr_2 &= Nr_2 \cos \varphi - Nf(r_2 \sin \varphi - p) \end{aligned} \right\} \dots (34)$$

Раздѣляя одно уравненіе на другое, получимъ:

$$\frac{P}{Q} = \frac{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi + \frac{p}{r_1} \right)}{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)}.$$

Если изъ этого равенства опредѣлимъ $\frac{P-Q}{Q}$, то получимъ:

$$\frac{P-Q}{Q} = \frac{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi + \frac{p}{r_1} \right) - \cos \varphi - f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)}{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)}$$

или

$$\frac{P-Q}{Q} = \frac{fp \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)}.$$

Но такъ какъ $P-Q$ представляетъ силу тренія, то положивъ $P-Q=F$, получимъ отношеніе силы тренія къ передаваемому усилию, которые мы называемъ черезъ η :

$$\eta = \frac{F}{Q} = \frac{fp \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}{\cos \varphi + f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)} \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

При помощи этого уравненія можно опредѣлить силу тренія при какомъ угодно способѣ очертанія зубцовъ, если выразить величину p въ функціи отъ угла φ .

Но вмѣсто опредѣленія силы тренія на основаніи вышеприведенной точной формулы, для зубцовъ, различнымъ образомъ очерченныхъ, можно вывести приближительную формулу одинаково примѣняемую ко всѣмъ способамъ зацѣпленія. Такъ какъ шагъ зацѣпленія во всѣхъ колесахъ есть величина небольшая, то мы не сдѣлаемъ боль-

шой погрѣшности, принявъ знаменатель выраженія (35) равнымъ единицѣ ($\cos \varphi$ есть величина близкая къ единицѣ, а величина $f \left(\sin \varphi - \frac{p}{r_2} \right)$ мало отличается отъ нуля, т. к. f , $\sin \varphi$ и $\frac{p}{r_2}$ величины весьма малы).

Такимъ образомъ, для всѣхъ способовъ заѣмления получимъ:

$$\gamma = \frac{F}{Q} = f \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) p \dots \dots \dots (36)$$

Изъ формулы (36) между прочимъ усматривается, что сила тренія пропорціональна p , т. е. положенію точки касанія зубцовъ; чтобы получить среднюю величину силы тренія необходимо опредѣлить среднее значеніе для величины p .

Величина p измѣняется отъ 0 до величины близкой къ шагу t , а слѣдовательно среднее значеніе p будетъ $\frac{1}{2} t$ и средняя величина силы тренія выразится черезъ:

$$\frac{F_c}{Q} = \frac{1}{2} f t \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \dots \dots \dots (37)$$

Если назовемъ z_1 и z_2 число зубцовъ на колесахъ M_1 и M_2 , то

$$r_1 = \frac{t z_1}{2\pi} \quad \text{и} \quad r_2 = \frac{t z_2}{2\pi} ,$$

откуда

$$\gamma_c = \frac{F_c}{Q} = f \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) \dots \dots \dots (38)$$

Уравненіе (38) опредѣляетъ силу тренія для цилиндрическихъ зубчатыхъ колесъ при какомъ угодно способѣ очертанія профилей зубцовъ *).

*) Формула (38) выведена Poncelet; болѣе точныя формулы для опредѣленія тренія въ зубцахъ, различнымъ образомъ очерченныхъ, выведены впервые Resal'емъ (см. Journal de l'Ecole polytechnique, cahier XXXIII); формулы эти показали, что при употребительнѣйшихъ формахъ зубцовъ, тренія хотя и различны, но отличаются другъ отъ друга весьма незначительно. Reuleaux принимаетъ

$$\begin{aligned} \text{для эпитрохонального заѣмления} \quad \frac{F}{Q} &= f \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) \frac{\varepsilon}{2} \\ \text{„ заѣмления по разверткамъ круга} \quad \frac{F}{Q} &= f \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) \frac{3}{4} \varepsilon , \end{aligned}$$

гдѣ ε есть продолжительность заѣмления.

Изъ уравненія (38) между прочимъ усматривается, что треніе въ зубахъ уменьшается съ увеличеніемъ числа зубцовъ, почему малые шаги зацѣпленія представляются въ этомъ отношеніи выгодными.

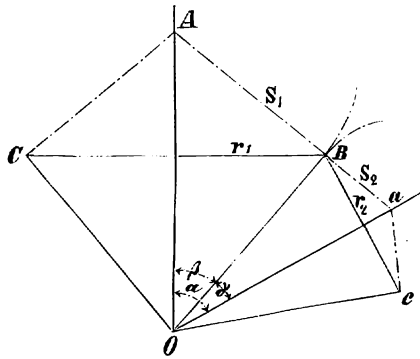
Если положимъ $f' = 1/10$, $z_1 = z_2 = 48$, то изъ уравненія (38) получимъ:

$$\eta = 3,142 \cdot 0,1 \left(\frac{1}{48} + \frac{1}{48} \right) = 0,013;$$

такимъ образомъ, оказывается, что 1,3% полезной работы поглощается треніемъ въ зубахъ, т. е. сопротивление это вообще незначительно.

в. Коническія колеса.

Мы знаемъ уже, что зубцы коническихъ колесъ получаютъ при помощи зубцовъ цилиндрическихъ колесъ, радіусы которыхъ равны



Чер. 30.

производящимъ вспомогательныхъ конусовъ, вслѣдствіе чего можно сказать, что треніе зубцовъ коническихъ колесъ равно тренію зубцовъ воображаемыхъ цилиндрическихъ колесъ, радіусы которыхъ равны производящимъ вспомогательныхъ конусовъ.

Пусть AO и aO оси коническихъ колесъ (черт. 30), пересѣкающихся подъ угломъ α ; r_1 и r_2 радіусы колесъ, s_1 и s_2 производящія вспомогательныхъ ко-

нусовъ, z_1 и z_2 число зубцовъ коническихъ колесъ, z'_1 и z'_2 число зубцовъ вышеупомянутыхъ вспомогательныхъ цилиндрическихъ колесъ.

Такъ какъ шаги зацѣпленія цилиндрическихъ и коническихъ колесъ равны между собою, то

$$\frac{2\pi r_1}{z_1} = \frac{2\pi r_2}{z_2} = \frac{2\pi s_1}{z'_1} = \frac{2\pi s_2}{z'_2}.$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{z_2'} &= \frac{r_1}{s_1 s_2} \\ \frac{1}{z_1'} &= \frac{r_1}{s_1 s_1} \end{aligned} \right\} (39)$$

На основаніи сказаннаго ранѣе о треніи зубцовъ въ цилиндрическихъ колесахъ и имѣя въ виду, что воображаемыя колеса цилиндрическія, получимъ:

$$F = Q\pi f \left(\frac{1}{z_1'} + \frac{1}{z_2'} \right),$$

подставивъ вмѣсто $\frac{1}{z_1'}$ и $\frac{1}{z_2'}$, найденныя ранѣе величины, получимъ

$$F = Q\pi f \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) \frac{r_1}{z_1} (40)$$

Такимъ образомъ, для опредѣленія тренія въ коническихъ колесахъ необходимо опредѣлить стороны вспомогательныхъ конусовъ s_1 и s_2 .

Изъ чертежа (30) получимъ:

$$\frac{1}{s_1} = \frac{\cos \beta}{r_1}$$

и

$$\frac{1}{s_2} = \frac{\cos \gamma}{r_2},$$

гдѣ β и γ углы, составляемые производящей OB основныхъ конусовъ съ осями конусовъ.

Если подставить эти выраженія въ уравненіе (40), имѣя при этомъ въ виду, что $\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2}$, то получимъ:

$$F = Q\pi f \left(\frac{\cos \beta}{z_1} + \frac{\cos \gamma}{z_2} \right) (41)$$

Для опредѣленія же угловъ β и γ , имѣемъ:

$$\left. \begin{aligned} \beta + \gamma &= \alpha \\ \frac{r_1}{r_2} &= \frac{z_1}{z_2} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (42)$$

Изъ послѣднихъ уравненій получимъ:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{z_2}{z_1}} \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{z_1}{z_2}} \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (43)$$

а такъ какъ

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}$$

и

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}}$$

то

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta &= \frac{\frac{\cos \alpha}{\frac{z_2}{z_1} + 1} \cdot \frac{1}{z_1}}{\sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + 2 \cdot \frac{1}{z_1} \cdot \frac{1}{z_2} \cos \alpha}} \\ \cos \gamma &= \frac{\frac{\cos \alpha}{\frac{z_1}{z_2} + 1} \cdot \frac{1}{z_2}}{\sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + 2 \cdot \frac{1}{z_1} \cdot \frac{1}{z_2} \cos \alpha}} \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot (44)$$

Подставивъ выраженія $\cos \beta$ и $\cos \gamma$ въ уравненіе (41), получимъ:

$$F = Q\pi f \sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + 2 \cdot \frac{1}{z_1} \cdot \frac{1}{z_2} \cos \alpha} \cdot \cdot \cdot (45)$$

Значеніе подкоренной величины меньше $\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}$ до тѣхъ поръ, пока α не равно 0; изъ чего слѣдуетъ, что треніе въ зубцахъ коническихъ колесъ, а слѣдовательно и потеря работы меньше чѣмъ въ зубцахъ цилиндрическихъ колесъ.

Къ числу вредныхъ сопротивленій при зубчатой передачѣ, помимо тренія зубцовъ, надлежитъ отнести треніе цапфъ или шеекъ валовъ ихъ въ подшипникахъ.

При разсмотрѣніи вредныхъ сопротивленій въ передачѣ гибкими связями, мы видѣли, что цапфы валовъ, на которые насажены шкивы, прижимаются къ подшипникамъ силою, равною тройной величинѣ передаваемого усилія.

Въ зубчатой передачѣ, цапфы или шейки валовъ прижимаются къ подшипникамъ усиліемъ, равнымъ передаваемому усилію P , вслѣдствіе чего потерю работы на преодоленіе тренія шеекъ валовъ въ подшипникахъ, при зубчатой передачѣ, можно было бы считать, при одинаковости отношенія радіуса вала къ радіусу колеса, въ три раза меньше, чѣмъ при передачѣ гибкою связью; но вслѣдствіе нѣскольکو большихъ значеній $\frac{P}{R}$ для зубчатыхъ колесъ, потеря работы на преодоленіе указанного сопротивленія будетъ нѣсколько больше исчисленнаго значенія.

Во всякомъ случаѣ, изъ вышеизложеннаго усматривается, что по отношенію къ вреднымъ сопротивленіямъ зубчатая передача представляется болѣе выгодною, чѣмъ передача гибкими связями.

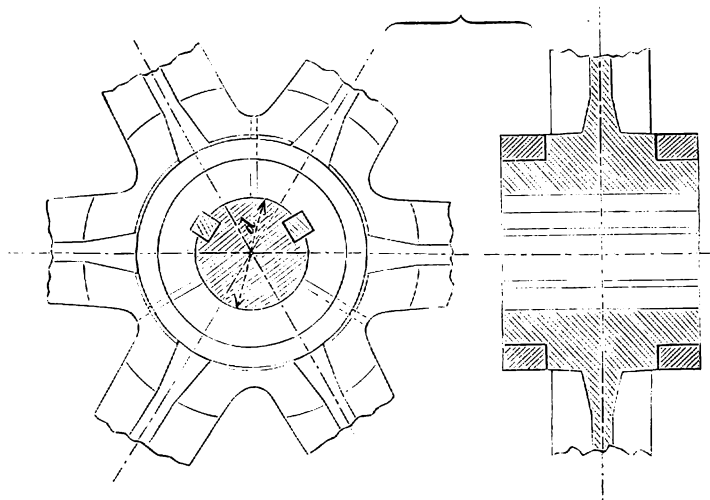
5. Устройство зубчатыхъ колесъ.

Зубчатые колеса бываютъ обыкновенно чугунные, рѣже желѣзные и бронзовые. Деревянные зубчатые колеса, вслѣдствіе измѣняемости ихъ подъ вліяніемъ атмосфернаго воздуха, а также неточности ихъ, въ настоящее время почти не употребляются; тогда какъ примѣненіе деревянныхъ зубцовъ къ металлическимъ колесамъ, при быстро вращающихся колесахъ, имѣетъ весьма обширное распространеніе.

Различная усадка частей чугуннаго колеса, проявляющаяся при отливкѣ, вслѣдствіе того, что одна часть остываетъ медленнѣе дру-

гихъ, вызываетъ довольно значительныя напряженія матеріала, которыя могутъ достигнуть такого предѣла, что уже тотчасъ послѣ отливки, прочность колеса можетъ быть нарушена. Вслѣдствіе сего, необходимо принять мѣры къ возможно равномерному остыванію всѣхъ частей колеса и при бѣльшихъ размѣрахъ отливать колесо изъ нѣсколькихъ частей. Колеса діаметромъ до 1800 мм. отливаются обыкновенно цѣльными, при чемъ, однако, напряженіе матеріала становится уже столь значительнымъ, что при передачѣ, подверженной сотрясеніямъ, при размѣрахъ діаметровъ колесъ въ 1800 мм., предпочтительнѣе составлять колесо изъ нѣсколькихъ частей.

Уничтоженіе указанныхъ напряженій въ матеріалѣ колеса можетъ



Чер. 31.

быть достигнуто тѣмъ, что при отливкѣ въ ступицѣ оставляются промежутки (черт. 31) и она, такимъ образомъ, получается составленной изъ трехъ частей. Послѣ отливки, оставленные промежутки заливаются цинкомъ и ступица стягивается горячими обручами.

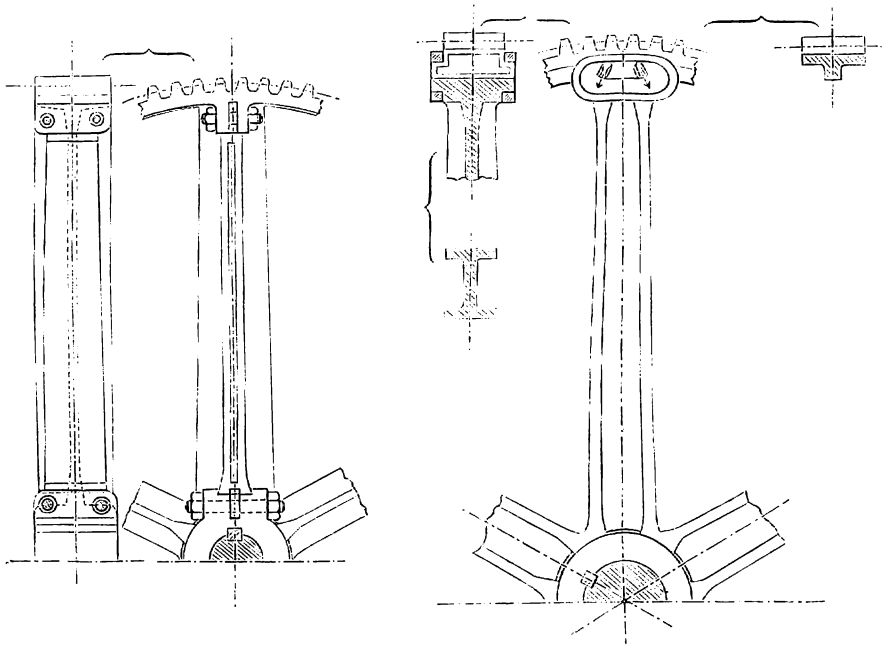
Та же цѣль можетъ быть достигнута при отливкѣ колеса изъ двухъ частей, которыя соединяются болтами (черт. 32).

Если діаметръ колеса достигаетъ 5000 мм., то ободъ составляется изъ отдѣльныхъ сегментовъ, причемъ колесо можетъ имѣть различныя устройства. Ступица и спицы могутъ быть отлиты вмѣстѣ и тогда сегменты обода должны соединяться со спицами и между собою

(черт. 33); такое соединеніе производится обыкновенно при помощи особыхъ желѣзныхъ колецъ и клиньевъ.

Затѣмъ ступица можетъ быть отлита отдѣльно, а сегменты колеса отливаются вмѣстѣ со спицами.

Наконечъ ступица, спицы и сегменты могутъ быть отлиты от-



Чер. 32.

Чер. 33.

дѣльно и соединяться между собою при помощи коническихъ болтовъ (черт. 34 стр. 64) *).

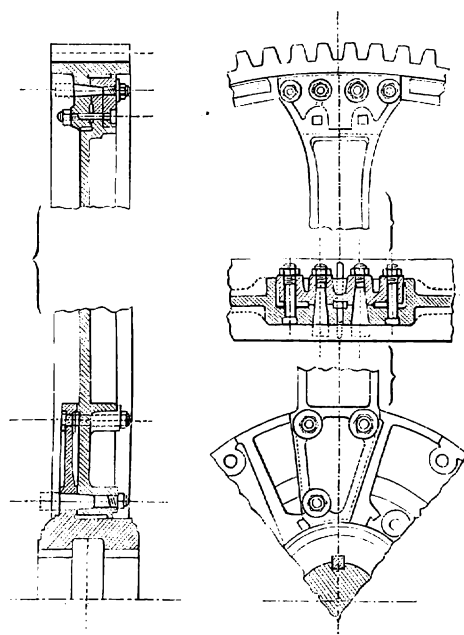
Размѣры частей зубчатыхъ колесъ.

Ободъ колеса. Для чугунныхъ цилиндрическихъ зубчатыхъ колесъ толщина обода $\delta = 3 + 0,4t$ **), гдѣ t величина шага; въ серединѣ

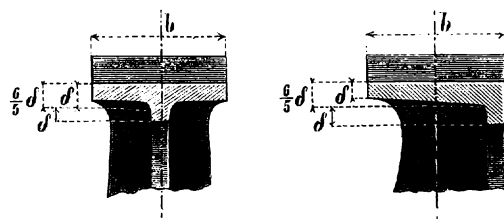
*) Подробности объ устройствѣ зубчатыхъ колесъ см. J. Haindl. Maschinenkunde, München 1852.—Möll und Reuleaux. Constructionslehre für den Maschinenbau, Braunschweig 1862.—Bach. Maschinenelemente. Stuttgart, 1881 и др.

**) Формулы для опредѣленія отдѣльных частей зубчатыхъ колесъ заимствованы у Reuleaux, Der Constructeur, pag. 404.

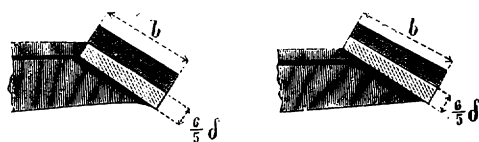
колеса или у одной изъ его сторонъ ободъ утолщается до $\frac{6}{5} \delta$ (черт. 35).



Чер. 34.



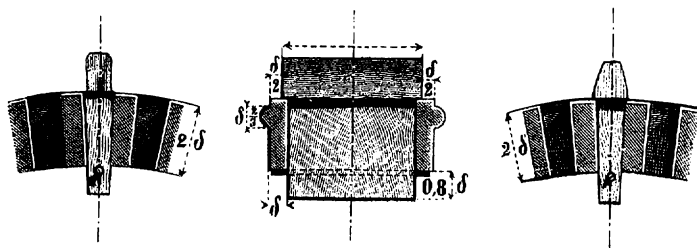
Чер. 35.



Чер. 36.

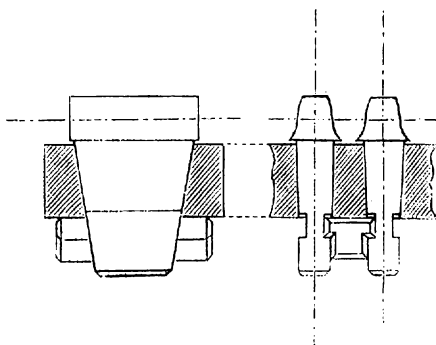
Для конических колесъ, толщина обода достигаетъ $\frac{6}{5}$ (черт. 36). Ободъ металлическаго колеса съ деревянными зубцами дѣлается

нѣсколько шире и усиливается боковыми приливами, какъ показано на черт. (37).

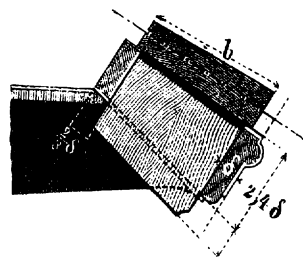


Черт. 37.

Укрѣпленіе деревянныхъ зубцовъ производится или при помощи штифтовъ, какъ показано на черт. 37, или при помощи особыхъ деревянныхъ клиньевъ (черт. 38).!

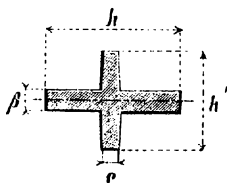


Черт. 38.

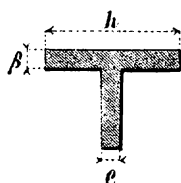


Черт. 39.

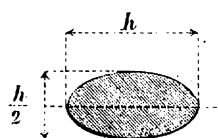
Размѣры обода чугунаго коническаго колеса съ деревянными зубцами показаны на (черт. 39).



Черт. 40.



Черт. 41.



Черт. 42.

Спицы. На чертежахъ (40, 41 и 42) показаны поперечныя сѣченія спиць зубчатыхъ колесъ.

Число спицъ опредѣляется по формулѣ:

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{1}{4} \sqrt{z} \sqrt[4]{t} \\ N &= \frac{1}{3} \sqrt{z} \sqrt[4]{\frac{t}{\pi}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (46)$$

или

Если

$$z\sqrt{t} = 144 \quad 256 \quad 400 \quad 576 \quad 784 \quad 1024 \quad 1600 \quad 2304$$

или

$$z\sqrt{\frac{t}{\pi}} = 81 \quad 144 \quad 225 \quad 324 \quad 441 \quad 576 \quad 900 \quad 1296,$$

то число спицъ

$$N = 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 10 \quad 12.$$

Для опредѣленія высоты спицы h въ серединѣ колеса, задаются обыкновенно отношеніемъ $\frac{h}{t}$, которое, при обыкновенныхъ обстоятельствахъ, можетъ быть принято отъ 1,5 до 3-хъ, чаще же отъ 2 до 2,5.

Выбравъ отношеніе $\frac{h}{t}$, опредѣляютъ зависимость между толщиной прилива спицы β и шириною обода по формулѣ:

$$\frac{\beta}{b} = 0,07 \frac{z}{N} \left(\frac{t}{h} \right)^2. \quad (47)$$

Если бы получаемая по этой формулѣ толщина прилива оказалась неподходящей по наружному виду или затруднительною при отливкѣ, то необходимо измѣнить выбранное отношеніе $\frac{t}{h}$ и для опредѣленія β подставить вновь выбранное значеніе $\frac{t}{h}$ въ формулу (47).

Нижеслѣдующая таблица Reuleaux *) облегчаетъ опредѣленіе отношенія $\frac{\beta}{b}$.

$\frac{h}{t}$	Значенія $\frac{\beta}{b}$ для								
	$\frac{z}{N}=7$	9	12	16	20	25	30	35	40
1,50	0,20	0,28	0,37	0,50	0,62	0,78	0,93	1,08	1,24
1,75	0,16	0,21	0,27	0,37	0,46	0,57	0,69	0,80	0,91
2,00	0,12	0,16	0,21	0,28	0,35	0,44	0,53	0,61	0,70
2,25	0,10	0,12	0,17	0,22	0,28	0,35	0,41	0,48	0,55
2,50	0,08	0,10	0,13	0,18	0,22	0,28	0,34	0,39	0,45
2,75	0,06	0,08	0,11	0,15	0,18	0,23	0,28	0,32	0,37
3,00	0,05	0,07	0,09	0,12	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31

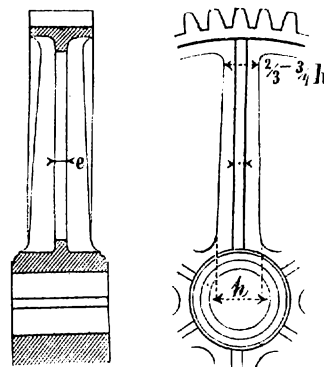
У обода, высота h уменьшается до $\frac{2}{3}$ — $\frac{3}{4}$ h (чер. 43).

Высота h' боковаго прилива дѣлается у ступицы равной ширинѣ обода, у обода—равной $\frac{4}{5}$ ширины обода.

Толщина боковаго прилива e дѣлается отъ $\frac{2}{3}$ до $\frac{3}{4}$ толщины β .

Ступица. Смотря по формѣ спиць, ступица дѣлается слегка конической въ одну или въ обѣ стороны. Длина ступицы дѣлается обыкновенно $\frac{5}{4}$ b ., толщина стѣнокъ ея ω дѣлается:

$$\omega = 10 + 0,4 \ h.$$



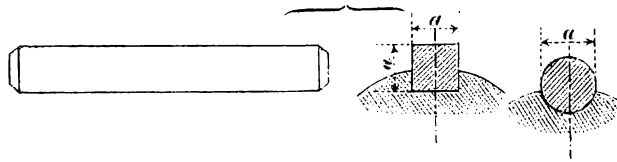
Чер. 43.

Укрѣпленіе зубчатыхъ колесъ на осяхъ производится при по-

*) Reuleaux. Der Constructeur. pag. 467.

мощи шпонокъ, вѣзанныхъ въ тѣло вала и колеса и имѣющихъ въ поперечномъ сѣченіи видъ квадрата или круга (чер. 44).

Обыкновенно укрѣпленіе колесъ производится при помощи квадратныхъ шпонокъ и только въ случаѣ необходимости укрѣпить безъ



Чер. 44.

разборки ослабшее на валу колесо, употребляется цилиндрическая шпонка.

Поперечное сѣченіе шпонки можетъ быть опредѣлено по одной изъ слѣдующихъ формулъ:

$$a = 2\sqrt{d} \text{ для діаметра вала } d \leq 100 \text{ мм.}$$

$$a = \frac{1}{2} d \text{ „ „ „ } d > 100 \text{ мм.}$$

Шпонки дѣлаются обыкновенно стальные.

II. Колеса тренія.

Къ передаточнымъ механизмамъ съ непосредственнымъ соприкосновеніемъ, кромѣ зубчатыхъ колесъ, должны быть отнесены еще колеса тренія или катки.

Для передачи движенія катками, они должны быть нажаты одинъ на другой на столько, чтобы возбуждающееся на поверхностяхъ ободовъ ихъ треніе было болѣе или равно передаваемому усилию P .

Чертежъ (45) представляетъ простѣйшій случай передачи при помощи колесъ тренія; усилие P , передаваемое катками, прямо пропорціонально давленію Q , которымъ одинъ катокъ прижимается къ другому и коэффициенту тренія f , т. е.

$$P \leq fQ.$$

Величина коэффициента трения, зависящая от материала и свойств поверхностей ободовъ катковъ, можетъ быть принята:

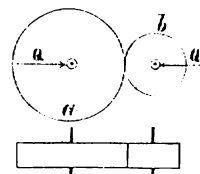
въ случаѣ движенія чугунаго обода по чугунному ободу отъ 0,1 до 0,15;

въ случаѣ движенія чугунаго обода по ободу обтянутому кожей отъ 0,20 до 0,30;

въ случаѣ движенія чугунаго обода по деревянному ободу отъ 0,20 до 0,50.

Такимъ образомъ, если примемъ $f = 0,4$, то давление, которымъ одинъ катокъ долженъ быть прижать къ другому,

$$Q = \frac{P}{f} = \frac{P}{0,4} = 2,5 P.$$



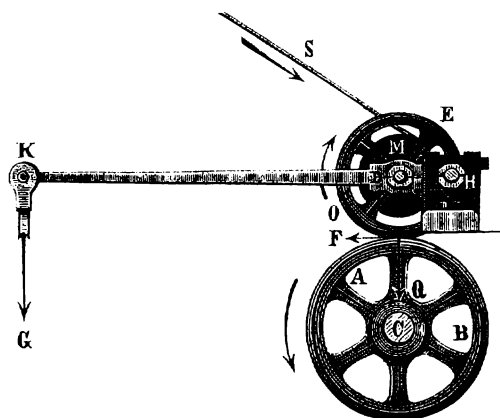
Чер. 45.

Давленіе это, конечно, вызываетъ весьма значительное треніе шеекъ валовъ, на которыхъ насажены катки въ подшипникахъ, что имѣетъ послѣдствіемъ значительную потерю работы.

Кромѣ того, колеса тренія представляютъ еще то неудобство, что по крайней мѣрѣ одно изъ колесъ должно быть укрѣплено подвижно, такъ какъ только измѣненіемъ положенія оси передается давленіе съ одного колеса на другое.

Вслѣдствіе сего колеса тренія употребляются рѣдко и обыкновенно только въ тѣхъ случаяхъ, гдѣ при помощи ихъ передается неизмѣняемое усиліе и гдѣ при томъ часто приходится останавливать движеніе машины.

Такъ, на чертежѣ (46) представлена передача при посредствѣ колеса тренія въ подъемномъ механизмѣ.

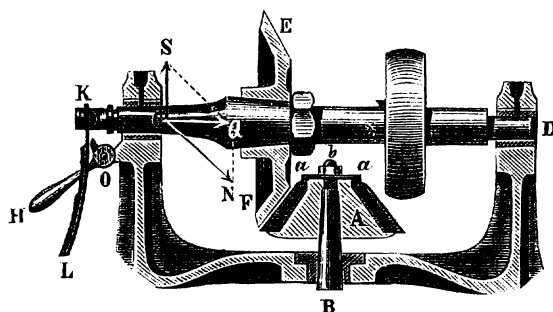


Чер. 46.

AB ведущее колесо, вращающееся около неподвижно укрѣпленной оси *C*; *OE* ведомое колесо, ось котораго укрѣплена на рычагѣ *КН*, вращающемся около оси *Н*;

рычагъ этотъ можетъ подниматься или, при приложеніи силы G , опускаться, причемъ колесо OE сообщается или разобщается съ ведущимъ колесомъ AB . При опусканіи рычага, колесо OE прижимается нѣкоторою силою Q къ окружности колеса AB и вслѣдствіе происходящаго при этомъ тренія fQ , движеніе колеса AB передается колесу OE и отъ него барабану M , на который наматывается канатъ S , поднимающій грузъ.

Сверхъ указаннаго примѣненія, колеса тренія употребляются также въ машинахъ съ весьма быстро вращающимися валами, какъ то имѣетъ мѣсто напр. въ центробѣжныхъ турбинахъ (на сахарныхъ заводахъ); такъ какъ сила тренія измѣняетъ скорость вращенія постепенно, то при примѣненіи колесъ тренія для передачи быстрого вращатель-



Чер. 47.

наго движенія, избѣгаются удары и сотрясенія, которые будутъ неизбежны при зубчатой передачѣ.

Въ упомянутомъ выше приборѣ, вертикальный валъ долженъ дѣлать до 1000 оборотовъ въ минуту и при такой скорости, остановка движенія его или начало этого движенія, во избѣжаніе весьма значительныхъ сопротивленій, должны происходить постепенно, а не вдругъ, что и достигается примѣненіемъ колесъ тренія.

На чертежѣ (47) показано устройство коническихъ колесъ тренія въ центробѣжной турбинѣ.

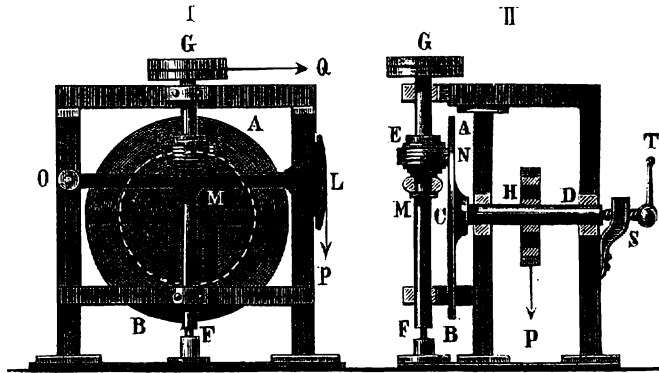
На вертикальномъ валу B турбины, при помощи гайки b , насажено коническое колесо A , обложено ременными кольцами, которыя сжаты гайкою aa .

На горизонтальномъ валу CD насажено другое, гладко обточен-

ное колесо EF , которое прижимается нормальной силой N къ поверхности первого колеса; происходящее при этомъ треніе fN и будетъ представлять наибольшее усиліе, передаваемое отъ одного колеса другому.

Пружина KL стремится перемѣстить валъ CD по направленію его оси; сила Q , съ которою пружина давитъ на валъ CD разлагается на 2 составляющія N и S .

Первая изъ этихъ силъ и представляетъ нормальное давленіе колесъ тренія, а вторая сила давитъ на подшипникъ, въ которомъ вращается валъ CD .



Чер. 48.

Если назовемъ черезъ α , уголъ составляемый производящей конуса A съ осью Bb или равный ему уголъ QCN , то

$$N = \frac{Q}{\cos \alpha} \quad \text{и} \quad S = Q \operatorname{tg} \alpha$$

и слѣдовательно передаваемое усиліе выразится черезъ

$$P = fN = \frac{fQ}{\cos \alpha}.$$

Остановка вращенія вала B производится отгибаніемъ пружины KL при помощи рычага OH .

Вмѣсто коническихъ катковъ часто примѣняютъ приспособленіе, показанное на чертежѣ (48), которое имѣетъ то преимущество, что позволяетъ весьма легко измѣнять передаточное число, т. е. отношеніе числа оборотовъ одной оси къ числу оборотовъ другой.

На концѣ ведущей оси CD укрѣпляется плоская чугунная шайба AB , на ведомую-же ось насаженъ деревянный или обтянутый кожей катокъ E . Давленіе между шайбою AB и каткомъ E достигается при помощи винта S , вращаемаго рукояткою T , причемъ валъ CD укрѣпленъ такъ, что позволяетъ перемѣщеніе по направленію своей оси.

Ось CD приводится во вращательное движеніе при помощи ремня и шкива H , на ведомую-же ось GF насаженъ шкивъ G , который также при помощи ремня можетъ передавать какому нибудь исполнительному механизму движеніе оси GF .

Катокъ E , при помощи рычага LO , вращающагося около точки O , можетъ быть перемѣщаемъ по оси GF , каковое приспособленіе и позволяетъ измѣнять передаточное число.

Если точка соприкосновенія шайбы AB и катка E будетъ находиться въ разстояніи $CN=a$ отъ оси CD и b есть радіусъ катка E , то передаточное число будетъ $\frac{a}{b}$; если же катокъ E будетъ передвинутъ по оси G въ новое положеніе и точка соприкосновенія будетъ отстоять отъ оси CD въ разстояніи a_1 , то передаточное число въ этомъ случаѣ будетъ $\frac{a_1}{b}$; наконецъ, если катокъ E опуститъ ниже центра C шайбы AB , то съ измѣненіемъ передаточнаго числа, будетъ достигнуто и измѣненіе направленія движенія катка E , который при этомъ будетъ вращаться въ обратную сторону.

Для передачи болѣе значительныхъ усилій, при возможно меньшемъ взаимномъ давленіи колесъ тренія, итальянскій инженеръ Минотто предложилъ такъ называемыя клиновыя колеса тренія (чер. 49).

На ободахъ этихъ колесъ сдѣлано нѣсколько желобовъ, представляющихъ въ поперечномъ сѣченіи форму клина, причемъ возвышенія обода одного колеса входятъ въ соотвѣтствующія углубленія обода другого колеса и треніе между колесами при этомъ увеличивается. Давленіе между колесами Q разлагается на 2 составляющія NN' , нормальныя къ щекамъ клина.

Назвавъ уголъ между щеками клина 2α (чер. 50) и положивъ $f = tg \varphi$, получимъ

$$Q = 2 R \sin (\alpha + \varphi)$$

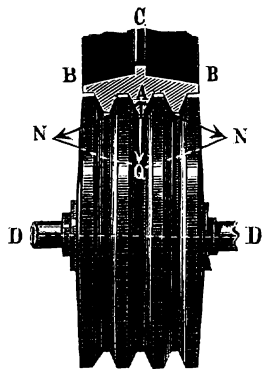
$$P = 2 R \cos \varphi f = 2 R \sin \varphi,$$

гдѣ R есть равнодѣйствующая нормальнаго давленія и тренія fN , проявляющагося на щекахъ клина.

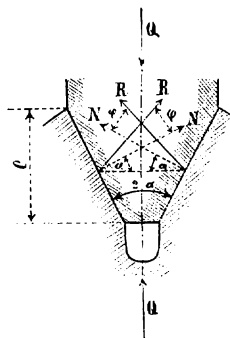
Изъ послѣднихъ уравненій:

$$P = \frac{Q \sin \varphi}{\sin (\alpha + \varphi)} = \frac{Q f}{\sin \alpha + \cos \alpha f} = Q f_1;$$

$$Q = P \frac{\sin \alpha + f \cos \alpha}{f} = \frac{P}{f_1}.$$



Чер. 49.



Чер. 50.

Уголъ α дѣлають обыкновенно равнымъ 15° и тогда

$$f_1 = \frac{f}{0,26 + 0,96 f}.$$

Взявъ коэффициентъ тренія $f = 0,4$, получимъ

$$f_1 = \frac{0,4}{0,26 + 0,96 \cdot 0,4} = 0,64.$$

Откуда давленіе между клиновыми колесами

$$Q = \frac{P}{0,64} = 1,56 P,$$

т. е. значительно менѣе, чѣмъ въ обыкновенныхъ колесахъ тренія.

Хотя клиновые колеса и представляют то преимущество, что для передачи усилия P , давление между ними может быть значительно меньше, но они имѣют и весьма серьезный недостатокъ заключающійся въ томъ, что катаніе колесъ безъ скольженія будетъ происходить лишь въ одной точкѣ линіи соприкосновенія; во всѣхъ другихъ точкахъ будетъ происходить скольженіе, вслѣдствіе чего колеса будутъ изнашиваться и тѣмъ въ большей степени, чѣмъ длиннѣе линія соприкосновенія, т. е. чѣмъ глубже желоба.

Въ виду этого обстоятельства стараются, по возможности, уменьшать глубину желобовъ, что можетъ быть достигнуто увеличеніемъ числа ихъ на каждомъ парѣ колесъ.



КУРСЪ ГИДРАВЛИКИ.

Лекціи читанныя въ Институтѣ инженеровъ путей сообщенія
Императора Александра I.

с о с т а в и л ь

Ф. Е. Максименко,

инженеръ путей сообщенія,

экстраординарный профессоръ Института инженеровъ путей сообщенія
Императора Александра I и преподаватель Горнаго Института.

ВЫПУСКЪ ВТОРОЙ

съ 3 листами чертежей.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія инженера Ю. Н. Эрлихъ, Большая Садовая, 9.
1888.

Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

Содержаніе 2-го выпуска.

I. Движеніе жидкости черезъ отверстія.

В. Движеніе жидкости черезъ отверстія съ насадками.

(Продолженіе).

- | | стр. |
|---|------|
| § 28. Всасывающее дѣйствіе конически расходящихся пасадокъ. . . | 130 |
| § 29. Коэффициентъ сопротивленія для насадокъ и сравненіе послѣднихъ между собою. Цейперова формула для коеф. расхода при отверстіяхъ съ различною обдѣлкою | 134 |

С. Движеніе жидкости черезъ водосливы.

- | | |
|--|-----|
| § 30. Виды водосливовъ. Полныя водосливы. Скорость подхода воды. | 138 |
| § 31. Водосливы съ неполнымъ и несовершеннымъ сжатіемъ. Описаніе опытовъ Лебро, Френсиса, Фгили и Стирнса | 142 |
| § 32. Коэффициентъ расхода для водосливовъ съ полнымъ и неполнымъ боковымъ сжатіемъ при напорахъ отъ 0,1 ф. до 2 ф. и при длинѣ большей 0,5 ф. | 148 |
| § 33. Коэффициентъ расхода для короткихъ водосливовъ съ полнымъ сжатіемъ (длиною меньшихъ 0,5 ф.) | 155 |
| § 34. Наиболѣе употребительныя формулы для опредѣленія расхода черезъ водосливъ | 158 |
| § 35. Затопленные водосливы. Формула Дюбюа | 164 |
| § 36. Водосливы съ широкимъ и округленнымъ порогомъ | 167 |
| § 37. Поверхность воды выше водослива; измѣреніе напора H ; высота воды H_w на порогѣ водослива | 169 |

Д. Движеніе жидкости черезъ отверстія при перемѣнномъ горизонтѣ.

- | | |
|---|-----|
| § 38. Гипотеза относительно скорости вытеканія при перемѣнномъ горизонтѣ. Выводъ общаго дифференціального уравненія для скорости вытеканія. Случай установившагося движенія | 172 |
|---|-----|
-

конусности $\beta = 7^{\circ}38'$ и при напорѣ въ 0,15 м. коэффициентъ $\mu = 0,42$. Чтобы уменьшить сжатіе струи при входѣ въ насадку и этимъ уменьшить гидравлическія сопротивленія а слѣдов. увеличить коэффициентъ расхода *Вентури* (1746—1822) снабжалъ *входное* отверстие насадки конически-сходящейся трубкой $C'D'KL$ (черт. 86) а *Эйтельвейнъ* (1764—1848) конoidalнымъ мундштукомъ $C'D'KL$ (черт. 87); при размѣрахъ насадки и мундштука показанныхъ на чертежѣ Эйтельвейнъ получилъ $\mu = 0,483$. Конически-расходящаяся насадки обладаютъ свойствомъ *всасыванія* *).

Наибольшая величина коэффициента расхода получается въ случаѣ *коноидальныхъ* насадокъ (черт. 88), очертаніе коихъ соответствуетъ приблизительно виду струи выходящей изъ отверстия въ тонкой стѣнкѣ. При этихъ насадкахъ не проявляется ни внутренняго ни внѣшняго сжатія струи а если послѣднее и проявляется, то лишь въ весьма слабой степени; очевидно, что здѣсь можно принимать $\mu = \varphi$. По опытамъ *Мичелотти*, *Эйтельвейна*, *Вейсбаха* и др. для такого рода насадокъ коэффициентъ $\mu = 0,97—0,98$. Отношеніе размѣровъ $d : l : D$ въ опытахъ Мичелотти равнялось 1 : 2 : 2,56; Эйтельвейна — 1 : 1,5 : 1,875 и Вейсбаха — 1 : 1,78 : 2,22. Въ опытахъ Вейсбаха съ довольно значительнымъ напоромъ въ 17 м. коэффициентъ μ для короткой конoidalной насадки достигалъ даже 0,995, такъ что коэф. сопротивленія ζ составлялъ всего 0,011.

Необходимо замѣтить, что при цилиндрической насадкѣ коэффициентъ расхода можетъ быть значительно *увеличенъ* округленіемъ входнаго отверстия, какъ это показано на черт. 89, или обдѣлкой его въ видѣ раструба по черт. 90. Такъ по опытамъ *Вейсбаха* округленіе входнаго отверстия повышало коэффициентъ μ съ 0,816 до 0,908, т. е. на 11,3%. Такія округленія особенно сильно увеличиваютъ коэф. μ при *большихъ* напорахъ; такъ при напорахъ въ 17 м. и 103,6 м. коэф. μ достигалъ 0,98 и даже 0,997. Увеличеніе μ въ подобныхъ случаяхъ объясняется тѣмъ, что при обдѣлкѣ отверстия уменьшается и даже совсѣмъ уничтожается сжатіе струи а слѣд. и гидравлическія сопротивленія.

*) Подробнѣе о насадкахъ этого рода см. *Rühlmann. Hydromechanik.* 289 S. und folg.

§ 28. *Всасывающее дѣйствіе конически-расходящихся насадокъ.*

Конически-расходящіяся насадки могутъ, подобно цилиндрическимъ, всасывать жидкость или газъ черезъ трубку, помѣщенную въ узкой части насадки. Этимъ свойствомъ всасыванія конически-расходящихся насадокъ пользуются для устройства такъ назыв. паро—и водо-струйныхъ аппаратовъ, водоструйчатыхъ насосовъ, вентиляторовъ и т. п. Всасываніе обнаруживается при истеченіи жидкости какъ въ атмосферѣ, такъ и въ жидкость.

Опредѣлимъ гидравл. давленіе p_1 въ суженномъ сѣченіи mn насадки (черт. 91). Примѣняя для этого ур. (74), въ которомъ ω обозначаетъ сѣченіе GH , а O —сѣченіе mn , и пренебрегая гидравлическими сопротивленіями на линіи тока M_0M_1 , т. е. полагая $\zeta = 0$, получимъ

$$\frac{p_1}{\Delta} = \frac{p_0}{\Delta} + H_1 - \left(\frac{\mu\omega}{O} \right)^2 H_0$$

По изъ черт. 92 видно, что, если обозначить черезъ β уголъ конусности насадки, а черезъ l — разстояніе сѣченій GH и mn , то

$$\frac{\omega}{O} = \left(\frac{D}{d} \right)^2 = \left(\frac{2l}{d} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + 1 \right)^2 \quad \text{и} \quad \frac{H_0}{H_1} = 1 + \frac{l}{H_1}$$

Тогда предшествующее уравненіе переписнется въ такомъ видѣ:

$$\frac{p_1}{\Delta} = \frac{p_0}{\Delta} - H_1 \left\{ \mu^2 \left(\frac{2l}{d} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + 1 \right)^4 \left(1 + \frac{l}{H_1} \right) - 1 \right\} \quad . . \quad (81).$$

При насадкѣ расположенной горизонтально $H_1 = H_0$ и слѣдов. множитель $1 + \frac{l}{H_1}$ обращается въ единицу. Изъ ур. (81) видно, что гидравлическое давленіе p_1 тѣмъ *меньше* а слѣдов. всасывающее дѣйствіе насадки тѣмъ *больше*, чѣмъ *больше*: напоръ H_1 , коэф. расхода μ , $\angle \beta$, отношенія $\frac{l}{d}$ и $\frac{l}{H_1}$. Въ свою очередь коэф. μ зависитъ отъ H_0 (а слѣдов. и отъ H_1), $\angle \beta$ и $\frac{l}{d}$. По опытамъ *Френсиса* *)

*) *Francis. Lowell Hydraulic Experiments. Third ed. New-York, 1871., p. 209.*

коэф. μ увеличивается съ увеличеніемъ напора H_0 и уменьшается съ увеличеніемъ $\frac{l}{d}$; последнее доказано также опытами *Вентури*, *Эйтельвейна*, профес. *И. А. Тиме* и др. Съ увеличеніемъ $\angle \beta$ коэф. μ также увеличивается но только до нѣкотораго предѣла, за которымъ дальнѣйшее увеличеніе угла конусности влечетъ уменьшеніе μ .

Изъ вышеизложеннаго слѣдуетъ, что наименьшее p_1 получается при наибольшемъ H_1 и при нѣкоторыхъ наивыгоднѣйшихъ значеніяхъ $\angle \beta$, $\frac{l}{d}$ и $\frac{l}{H_1}$, причемъ эти значенія вообще различны для случаевъ истеченія въ воду и въ атмосферу.

По опытамъ проф. *И. А. Тиме* *) оказываются наивыгоднѣйшими при истеченіи въ воду: $\angle \beta = 12^\circ 14'$ и $\frac{l}{d} = 11,33$; въ испытанной насадкѣ $d = \frac{3}{8}$ д.; $D = 1\frac{9}{32}$ д.; $\mu = 0,25$ и разность горизонтовъ въ верхнемъ и нижнемъ сосудахъ $H_0 = 2,91$ ф. до 3,66 ф. При истеченіи въ атмосферу наивыгоднѣйшій $\angle \beta$ составляетъ около 7° .

О величинѣ p_1 обыкновенно судятъ по значенію такъ называемаго коэф. расхода μ_1 для суженнаго сѣченія m насадки. Изъ ур. 73 а (стр. 113) слѣдуетъ:

$$V_1 = \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{p_0 - p_1}{\Delta} \right)} = \sqrt{1 + \frac{p_0 - p_1}{\Delta H_1}} \sqrt{2g H_1} \quad (82)$$

Обозначая

$$\mu_1 = \sqrt{1 + \frac{p_0 - p_1}{\Delta H_1}}$$

т. е. полагая

$$\frac{p_1}{\Delta} = \frac{p_0}{\Delta} - (\mu_1^2 - 1) H_1 \quad . \quad . \quad . \quad (82a)$$

дадимъ предыдущему уравненію такую форму:

$$V_1 = \mu_1 \sqrt{2g H_1}$$

*) Профес. *А. И. Тиме*. Всасывающее дѣйствіе коническихъ расходящихся насадокъ. Горный Журналъ, 1884, т. 1-й. Изъ этой статьи заимствованы нами также черт. 93—96.

Здѣсь μ_1 хотя по виду формулы и играетъ роль коеф. расхода, но существенно отличается отъ сего послѣдняго, такъ какъ коеф. расхода равенъ произведенію коэффициентовъ скорости и сжатія; между тѣмъ въ разсматриваемомъ случаѣ μ_1 опредѣляется равенствомъ (82a) и представляетъ простое обозначеніе.

Дѣйствительный коеф. расхода для сѣченія m и получится, если жидкость изъ этого сѣченія вытекаетъ непосредственно въ атмосферу; тогда, какъ извѣстно:

$$V_1' = \mu' \sqrt{2gH_1}$$

здѣсь μ' всегда меньше единицы, между тѣмъ μ_1 можетъ быть и меньше и больше единицы.

Изъ равенства (82a) видно, что p_1 тѣмъ *меньше* чѣмъ больше H_1 и μ_1 , такъ что дѣйствительно величина коеф. μ_1 можетъ служить мѣрой всасывающаго дѣйствія насадки при одномъ и томъ же H_1 . Коеф. μ_1 опредѣлится по условію, что расходы для сѣченій m и GH равны, т. е.

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0} = \mu_1 O \sqrt{2gH_1}$$

слѣдов.

$$\mu_1 = \frac{\mu \omega}{O} \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} = \mu \left(\frac{D}{d} \right)^2 \sqrt{\frac{H_0}{H_1}}$$

По этому уравненію опредѣлится μ_1 а по рав. (82a) — давленіе p_1 . Наибольшее значеніе μ_1 получилось для вышеописанной насадки равнымъ 2,92.

Если сравнить случаи истеченія черезъ отверстіе m (черт. 91) въ двухъ предположеніяхъ, когда жидкость изъ отверстія прямо вытекаетъ въ атмосферу и когда она изъ отверстія входитъ сперва въ конически-расходящуюся насадку m и GH , то расходы въ томъ и другомъ случаѣ выразятся формулами:

$$Q' = \mu' O \sqrt{2gH_1} \quad \text{и} \quad Q = \mu_1 O \sqrt{2gH_1}$$

въ которыхъ: коеф. расхода μ' , согласно изложенному на стр. 129, равняется 0,97—0,98 а коеф. μ_1 доходитъ до 1,9—при истеченіи въ атмосферу, и до 2,9—при истеченіи въ воду. Отсюда слѣдуетъ, что приставляя конически-расходящуюся насадку къ конической, можно увеличить скорость истеченія а также расходъ черезъ *коничес-*

да.и.ну.ю насадку въ два и даже въ три раза. Такой результат не представляет ничего противорѣчиваго. Въ самомъ дѣлѣ, изъ формулы (82) или, что одно и то же, изъ (73a) видно, что одному и тому же напору H_1 могутъ соответствовать различныя значенія V_1 въ зависимости отъ измѣненія гидравлическаго давленія p_1 и изъ двухъ величинъ:

$$\frac{p_1}{\Delta} \quad \text{и} \quad \frac{V_1^2}{2g}$$

одна увеличивается на счетъ другой.

Въ первомъ случаѣ—при истеченіи изъ отверстія mn прямо въ атмосферу—един. давленіе p_1 близко къ атмосферному, а во второмъ—един. давленіе p_1 значительно меньше. Если слѣдить за перемѣщеніемъ какой либо частицы жидкости изъ сѣченія mn въ сѣченіе GH , то ед. давленіе для нея постепенно возрастаетъ и подходитъ къ атмосферному, т. е. изъ p_1 переходитъ въ p_0 ; скорость при этомъ уменьшается, измѣняясь отъ

$$V_1 = \mu_1 \sqrt{2gH_1} \quad \text{до} \quad V = \mu \sqrt{2gH_0}.$$

Подобное измѣненіе давленія *Вентури* наблюдалъ, вставляя въ насадку тонкія трубки опущенныя въ сосудъ съ водою и замѣчая высоту столба воды поднявшейся въ нихъ (черт. 98); если обозначить $aa' = z_1$; $bb' = z_2$ и $cc' = z_3$, то ед. давленія въ соответственныхъ точкахъ будутъ равны.

$$p_0 - \Delta z_1; \quad p_0 - \Delta z_2 \quad \text{и} \quad p_0 - \Delta z_3$$

т. е. онѣ возрастаютъ и приближаются къ атмосферному.

Въ заключеніе приводимъ краткое описаніе нѣкоторыхъ изъ приборовъ, дѣйствіе которыхъ основано на всасывающемъ свойствѣ конически-расходящихся насадокъ.

На черт. 93 и 94 представленъ струйчатый насосъ *Наеля* и *Кемпе* изъ коллекціи приборовъ Горнаго Института. Изъ напорнаго резервуара K вода входитъ въ насадку N по трубѣ A , снабженной краномъ C . Внутри вертикальнаго колѣна этой трубы вставленъ мундштукъ M подходящій къ суженному сѣченію насадки, какъ это видно изъ детальнаго чертежа 95. Мундштукъ соединяется съ трубкой B , по которой идетъ всасываемая жидкость изъ резервуара M (черт. 94). На трубкѣ B устроенъ отростокъ d для помѣщенія ваку-

метра измѣряющаго гидравлическое давленіе въ сѣуженномъ сѣченіи насадки. Полезное дѣйствіе насоса доходить до 40%—50%.

Черт. 96 изображаетъ струйчатый пневматическій насосъ бр. *Кертисъ* (изъ той-же коллекціи). Вода изъ трубки *AB* входитъ въ насадку *CD*, причемъ въ *C* проявляется гидравл. давленіе p_1 меньшее атмосфернаго, измѣряемое манометромъ *G*. Къ сѣуженному сѣченію примыкаетъ трубка *EE'*, по которой всасывается въ насадку воздухъ или вообще газъ. Подобные насосы употребляются на сахарныхъ, химическихъ и т. п. заводахъ для пропуска воздуха и газовъ сквозь жидкость.

§ 29. *Коэффициентъ сопротивленія для насадокъ и сравненіе послѣднихъ между собою. Цейнерова формула для коэффициента расхода при отверстіяхъ съ различною обдѣлкою.*

Коэффициентъ сопротивленія для насадокъ опредѣляется точно также какъ и въ случаѣ отверстія въ тонкой стѣнкѣ. Въ § 26 былъ уже опредѣленъ коэф. сопротивленія для цилиндрической насадки; теперь рассмотримъ общій случай.

Если для примѣра взять конически-сходящуюся насадку, то рассматривая линію тока M_0M (черт. 83), проходящую черезъ центр тяжести наружнаго сжатаго сѣченія $G'H'$ и обозначая дѣйствительную скорость въ т. *M* черезъ V_p а высоту гидравлическихъ сопротивленій $h''—h''_0$ для M_0M полагая равной

$$h''—h''_0 = \zeta_1 \frac{V_p^2}{2g} \dots \dots \dots (83)$$

напишемъ ур. Д. Бернулли для несовершенныхъ жидкостей (ур. 30) въ такомъ видѣ

$$\frac{V_p^2}{2g} + \zeta_1 \frac{V_p^2}{2g} = \left(z_0 + \frac{p_0}{\Delta} \right) - \left(z + \frac{p}{\Delta} \right)$$

отсюда

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_1}} \sqrt{2g \left(z_0 - z + \frac{p_0 - p}{\Delta} + \frac{V_0^2}{2g} \right)}$$

Такъ какъ частицы, лежація въ сѣченіи $G'H'$ въ какой либо моментъ, въ слѣдующій моментъ движутся независимо другъ отъ друга, то по § 14 $p = p_0$, а обозначая $z_0 = z = H_0$ найдемъ:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_1}} \sqrt{2g \left(H_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right)}$$

но съ другой стороны извѣстно, что

$$V_p = \varphi V_0$$

слѣдов.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_1}} \quad \text{и} \quad \zeta_1 = \frac{1}{\varphi^2} - 1 \quad . \quad . \quad . \quad (84)$$

Во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, въ которыхъ внѣшняго сжатія струи не проявляется, какъ извѣстно $\varphi = \mu$ и тогда

$$\zeta_1 = \frac{1}{\mu^2} - 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (84a)$$

Подобно изложенному въ § 20 опредѣлимъ высоту гидравлическихъ сопротивленій на единицу вѣса протекающей въ секунду жидкости ($V_0 = 0$):

$$h'' - h_0'' = \zeta_1 \frac{V^2}{2g} = \zeta_1 \cdot \varphi^2 H_0 = (1 - \varphi^2) H_0$$

Работа гидравлическихъ сопротивленій на вѣсъ жидкости проходящей чрезъ насадку въ секунду, т. е. на вѣсъ расхода, равна

$$\triangle Q (h'' - h_0'') = \triangle \mu (1 - \varphi^2) \omega \sqrt{2g H_0^3}$$

Какъ и выше найдемъ, что отношеніе работы гидравлическихъ сопротивленій для всего расхода къ живой силѣ того же расхода равно коэффициенту сопротивленія.

По извѣстнымъ значеніямъ μ и φ для различнаго рода насадокъ составлена нижеслѣдующая таблица.

Таблица XXI.

($\Delta \omega \sqrt{2gH_0^3}$ обозначено через C).

	Коефф. скорост. ξ	Коефф. расхода. "	Коефф. сопрот. ξ_1	Работа гидр. сопротивл. на единицу вѣс. $h'' - h_0''$	Работа гидр. сопротивл. на вѣсъ расхода. $\Delta Q (h'' - h_0'')$	Живая сила всего расход. $\frac{M}{2} V_p^2$
Цилиндрическая на- садка	0,82	0,82	0,487	$0,328H_0$	$0,269C$	$0,551C$
Кон. сходящаяся на- садка ($\angle \beta = 13^\circ$) . .	0,96	0,95	0,085	$0,078H_0$	$0,074C$	$0,876C$
Конически-расходя- щаяся насадка . . .	0,45	0,45	3,938	$0,797H_0$	$0,359C$	$0,091C$
Коническая на- садка	0,97	0,97	0,063	$0,059H_0$	$0,057C$	$0,913C$
Отверстіе въ тонкой стѣнкѣ	0,97	0,62	0,063	$0,059H_0$	$0,037C$	$0,583C$

Разсмотрѣніе этой таблицы даетъ возможность опредѣлить преимущества различнаго рода обдѣлокъ отверстій. Такъ, если сравнивать движеніе черезъ отверстіе въ *тонкой стѣнкѣ* и черезъ *цилиндрическую* насадку, то оказывается, что въ первомъ случаѣ хотя расходъ и меньше но скорость движенія и живая сила вытекающей массы больше чѣмъ во второмъ случаѣ; поэтому, если требуется скорѣйшее опорожненіе сосуда, то выгоднѣе отверстіе съ цилиндрическою насадкою, когда же желательно, чтобы вытекающая жидкость обладала большею живою силою, то предпочтительнѣе отверстіе въ тонкой стѣнкѣ. Вообще-же оказываются наивыгоднѣйшими *коническими* а затѣмъ *конически-сходящаяся* насадки съ угломъ конусности въ 13° какъ по величинѣ *скорости*, такъ и *живой силы*; наиболѣе невыгодными въ этихъ отношеніяхъ оказываются конически-расходящаяся насадки.

Изъ таблицы XXI видно также, что высота гидравлическихъ сопротивленій на единицу вѣса—наибольшая для конически-расходящихся насадокъ а затѣмъ для цилиндрическихъ насадокъ и составляетъ для первыхъ $0,8 H_0$ а для вторыхъ $0,33 H_0$.

Какъ можно замѣтить изъ предыдущаго, обдѣлка отверстія имѣетъ значительное вліяніе на скорость, расходъ и др. обстоятельства вытеканія. *Цейнеръ* на основаніи 33 опытовъ *Вейсбаха* относящихся къ

11 различнымъ обдѣлкамъ выражаетъ коэффициентъ расхода при различного рода обдѣлкѣ формулой вида:

$$\frac{\mu'}{\mu} = 1 + a \cos^3 \varphi + b \cos^4 \varphi \dots \dots \dots (85)$$

гдѣ μ — коэффициентъ расхода черезъ отверстіе въ тонкой стѣнкѣ; φ — уголъ между направленіями скоростей частицъ подходящихъ къ отверстію по стѣнкѣ насадки и частицъ движущихся по продольной оси насадки; a , b постоянныя количества *).

Опыты производились съ круглыми насадками діаметра 0,02 м. причемъ напоръ измѣнялся отъ 1 до 10 футовъ а $\angle \varphi$ отъ 0° до 180°; для нихъ получилось:

$$a = 0,33214 \quad b = 0,16672$$

На черт. 97 изображены видъ этихъ насадокъ; въ насадкѣ № 1: $\angle \varphi = 0^\circ$; въ №№ 2 — 6: $\angle \varphi$ — острый; въ № 7: $\angle \varphi = 90^\circ$; въ №№ 8 — 10: $\angle \varphi$ — тупой, и въ № 11: $\angle \varphi = 180^\circ$. Въ слѣдующей таблицѣ показаны для поименованныхъ насадокъ коэффициенты расхода по опытамъ и по форм. (85).

Таблица XXII

коэффициентовъ расхода для различного рода насадокъ по опытамъ Вейсбаха и по формулѣ Цейнера.

№№ наса- докъ.	$\angle \varphi$	μ' по опы- тамъ.	μ' по фор- мулѣ.	μ' μ	№№ наса- докъ.	$\angle \varphi$	μ' по опы- тамъ.	μ' по фор- мулѣ.	μ' μ
1	0°	0,966	0,957	1,528	7	90°	0,632	0,638	1
2	53 $\frac{1}{4}$ °	0,949	0,952	1,501	8	112 $\frac{1}{2}$ °	0,606	0,604	0,959
3	111 $\frac{1}{4}$ °	0,924	0,937	1,462	9	135°	0,577	0,591	0,913
4	221 $\frac{1}{2}$ °	0,882	0,883	1,395	10	157 $\frac{1}{2}$ °	0,546	0,549	0,864
5	45°	0,753	0,737	1,191	11	180°	0,541	0,543	0,856
6	67 $\frac{1}{2}$ °	0,684	0,716	1,082					

*) Zeuner, G. Ueber die Contractionscala. Civil-Ingenieur. B. II.

Слѣдоват. коэффициентъ расхода тѣмъ меньше, чѣмъ больше $\angle \varphi$. Наименьшій коеф. $\mu = 0,54$ соотвѣтствуетъ входящей трубкѣ Борды, а наибольшій коеф. $\mu = 0,97$ — цилиндрической насадкѣ съ обдѣлкой входнаго отверстія.

Впослѣдствіи другіе опыты *Вейсбаха* *) съ насадками діаметромъ въ 0,01 м. и при напорѣ въ 17 м. показали, что коэффициенты расхода при этомъ довольно мало разнятся отъ вышеприведенныхъ.

При пользованіи форм. (85) для коэффициента μ слѣдуетъ брать значеніе соотвѣтствующее данному напору и отверстію данныхъ размѣровъ но въ *тонкой* стѣнкѣ (§ 21).

С. Движеніе жидкости черезъ водосливъ **).

§ 30. Виды водосливовъ. Полные водосливы. Скорость подхода воды.

Если жидкость вытекаетъ черезъ отверстіе въ стѣнкѣ такимъ образомъ, что верхнія частицы струи CD (черт. 99) лежатъ ниже верхней грани C' отверстія, то получается такъ называемый *водосливъ*. Наиболѣе обыкновенный видъ водослива наблюдается въ томъ случаѣ, когда жидкость движется по каналу $EAIB$, $E'A'I'B'$ (черт. 100), въ которомъ помѣщена поперечная стѣнка AB , $A'B'$ съ *прямоугольнымъ* вырѣзомъ AD , $C'D'$. Нижняя грань D отверстія носитъ названіе *порога* водослива; длина порога есть вмѣстѣ съ тѣмъ и длина водослива. Порогъ можетъ быть весьма узкимъ (въ видѣ острія) и болѣе или менѣе широкимъ, закругленнымъ и т. п. (черт. 101—104). Стѣнки и дно канала могутъ быть или совершенно придвинуты къ соотвѣтственнымъ краямъ отверстія или же находиться въ нѣкоторомъ разстояніи отъ нихъ.

Поверхность воды въ каналѣ передъ водосливомъ постепенно понижается, образуя плавную кривую, обращенную выпуклостью

*) *Weisbach*. Versuche über den Ausfluss des Wassers unter hohem Drucke. Der Civil-Ingenieur. Bd. IX. 1863.

**) Этотъ отдѣлъ составленъ главнымъ образомъ по сочиненію: *Smith*. Hydraulics. The flow of Water etc.

кверху. Струя по выходѣ изъ плоскости водослива имѣетъ поперечныя сѣченія значительно отличающіяся отъ прямоугольнаго; высота сѣченій все уменьшается а ширина увеличивается, какъ это видно изъ черт. 106 и 107, представляющихъ продольный и поперечные разрѣзы водослива шириною 0,2 м. по измѣреніямъ *Понсле* и *Лебро*.

При весьма узкомъ а также при закругленномъ порогѣ (черт. 101 и 104) нижняя часть струи *A* поднимается нѣсколько выше горизонтальной линіи *DD'*, если только толщина струи не очень мала. При широкомъ порогѣ (черт. 102 и 103) нижняя часть струи также поднимается надъ порогомъ, но затѣмъ, понижаясь, образуетъ полость *m* наполненную жидкостью находящеюся въ медленномъ вращательномъ движеніи.

Если вода, перейдя водосливъ, образуетъ потокъ, поверхность котораго *GI* (черт. 105) выше горизонта *DD'* порога, то такой водосливъ называется *неполнымъ* или *затопленнымъ*, въ отличіе отъ предыдущаго назыв. *полнымъ*. Въ неполномъ водосливѣ поверхность воды передъ порогомъ также постепенно понижается; наибольшее пониженіе соотвѣтствуетъ нѣкоторой точкѣ *F* по другую сторону порога; далѣе поверхность повышается до горизонта *GI*.

Водосливы устраиваются при водоудержательныхъ плотинахъ, въ водохранилищахъ для орошенія, водоснабженія городовъ и т. п., глухихъ плотинахъ, для *водоизмѣренія* и во многихъ другихъ случаяхъ.

Разсмотримъ сперва *полные* водосливы.

Главная цѣль при изученіи движенія воды черезъ водосливъ заключается въ опредѣленіи расхода *Q*. Изъ опытовъ сюда относящихся оказывается, что *Q* зависитъ отъ многихъ факторовъ, а именно: 1) отъ вида водослива (полный или затопленный), 2) отъ длины *a* (черт. 100), 3) отъ напора *H* (за *H* принимается возвышеніе горизонта *EF* надъ порогомъ *D* въ точкѣ *F*, въ которой еще не замѣчается пониженія поверхности въ сторону водослива), 4) отъ формы порога, 5) отъ большей или меньшей близости боковыхъ стѣнокъ и дна къ соотвѣтственнымъ ребрамъ водослива и 6) отъ скорости подхода воды къ водосливу, т. е. отъ скорости движенія воды въ сѣченіи *FK* канала.

Выяснить зависимость расхода отъ всѣхъ перечисленныхъ факторовъ—это и составляетъ задачу настоящаго отдѣла.

На стр. 73 была выведена слѣдующая формула для расхода черезъ прямоугольный водосливъ:

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} \left\{ \left(H_2 + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right\} . . . (44a)$$

Въ этой формулѣ H_2 представляетъ напоръ надъ порогомъ водослива (въ послѣдующемъ изложеніи эта величина будетъ обозначаться черезъ H); V_0 —начальная скорость какой-либо частицы движущейся черезъ водосливъ; μ —коэф. расхода для водослива. На величину этого коэффициента, какъ показываютъ опыты, вліяютъ: длина a , напоръ H , форма порога и большая или меньшая близость боковыхъ стѣнокъ и дна къ ребрамъ водослива. Поэтому зависимость Q отъ вышеперечисленныхъ факторовъ (1, 2... 6), выражаемая формулой (44a),—двоякая: явная (отъ a , H и V_0) и неявная—подъ видомъ коэф. μ (отъ a , H , отъ формы порога и степени приближенія боковыхъ стѣнокъ и дна).

Покажемъ сперва, какую величину слѣдуетъ принимать для скорости подхода V_0 .

Очевидно черезъ водосливъ проходятъ преимущественно частицы принадлежащія *верхней* части потока; скорость ихъ вообще больше *средней* скорости v потока, которая получится дѣленіемъ расхода Q на живое сѣченіе потока Ω .

Такъ какъ $V_0 = \alpha v$, гдѣ α —численный коэффициентъ измѣняющійся приблизительно отъ 1,1 до 1,25, то въ выраженіи (44a) количество $\frac{V_0^2}{2g}$ можно замѣнить черезъ

$$\frac{\alpha^2 v^2}{2g} = \frac{\alpha^2}{2g} \left(\frac{Q}{\Omega} \right)^2 .$$

Френсисъ, произведшій въ 1851 и 1852 гг. въ Лоуэллѣ въ С. Американскихъ Штатахъ много опытовъ надъ водосливами, вычисляетъ Q по формулѣ (44a) принимая въ ней $V_0 = v$; такъ что по Френсису

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} \left\{ \left(H + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right\} . . . (86)$$

Если обозначить

$$\left\{ \left(H + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right\} = h$$

то форм. (86) можно написать еще так:

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} h^{3/2} \dots \dots \dots (86a)$$

Смитз вводит въ выраженіе для Q вмѣсто V_0 также скорость v и взамѣнь форм. (44a) предлагаетъ пользоваться слѣдующей, болѣе удобной для вычисленій, хотя по виду и не вполне правильной съ теоретической точки зрѣнія:

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} \left(H + \frac{bv^2}{2g} \right)^{3/2} \dots \dots \dots (87)$$

Если обозначить

$$H + \frac{bv^2}{2g} = h$$

то предыдущее выраженіе получить такой сокращенный видъ

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} h^{3/2} \dots \dots \dots (87a)$$

Коеф. b равенъ 1,4 для водосливовъ съ *полнымъ* сжатіемъ струи и $1\frac{1}{3}$ —для водосливовъ, въ которыхъ сжатіе струи съ *боковъ* устранено приближеніемъ боковыхъ стѣнокъ канала къ вертикальнымъ ребрамъ водослива; при устраненіи сжатія струи съ *боковъ* и *снизу* приближеніемъ боковыхъ стѣнокъ и дна канала къ соотвѣтственнымъ ребрамъ водослива b должно принимать равнымъ 1 *).

Переписывая выраженіе (87) въ такой формѣ

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} \left(H + \frac{b Q^2}{2g \Omega^2} \right)^{3/2}$$

получимъ ур. 6 степени относительно Q , приводящееся къ рѣшенію ур. 3 степени.

*) Въ форм. (86a и 87a) величину h можно разсматривать какъ напоръ исправленный на скорость подхода.

Въ предыдущихъ формулахъ количества

$$\frac{V_0^2}{2g} \quad \text{и} \quad \frac{bv^2}{2g}$$

выражается зависимость Q отъ скорости подхода воды. Такъ какъ *точное* опредѣленіе V_0 а также коеф. b весьма затруднительно, то въ тѣхъ случаяхъ, въ которыхъ водосливы употребляются для *точной* опредѣленія расхода какого-либо потока, т. е. для водоизмѣренія, средняя скорость v не должна быть сколько нибудь значительной, напр. не должна превосходить 1 ф.; тогда вліяніе скорости подхода на Q будетъ мало а погрѣшность происходящая отъ неточности коеф. b будетъ ничтожной.

§ 31. *Водосливы съ неполнымъ и несовершеннымъ сжатіемъ.* *Описаніе опытовъ Лебро, Френсиса, Фтили и Стуриса.*

Выяснивши вліяніе на Q скорости подхода, опредѣлимъ зависимость коеф. расхода а слѣдов. и Q отъ степени приближенія боковыхъ стѣнокъ и дна отъ соотвѣтственныхъ граней водослива.

Если одна или обѣ боковыя стѣнки канала или дно его придвинуты совершенно къ соотвѣтственной грани водослива, то сжатіе струи уменьшается, поперечное сѣченіе ея а слѣдов. и коеф. расхода увеличиваются. Такой водосливъ назыв. *водосливомъ съ неполнымъ сжатіемъ*. Вліяніе боковыхъ стѣнокъ и дна канала на сжатіе струи а слѣдов. и на коеф. расхода замѣчается и тогда, когда они будутъ находиться отъ граней водослива на разстояніи не превосходящемъ нѣкотораго предѣла. Въ этомъ случаѣ водосливъ назыв. *водосливомъ съ несовершеннымъ сжатіемъ*. Разстояніе между дномъ канала и порогомъ водослива будемъ обозначать черезъ G , а разстоянія между боковыми стѣнками канала и вертикальными ребрами водослива—черезъ L и L' ; *наименьшую* величину изъ L , L' и G назовемъ черезъ e .

а) *Описаніе опытовъ Лебро, Френсиса, Фтили и Стуриса.* Такъ какъ далѣе будутъ постоянно приводиться ссылки на опыты различныхъ гидравликовъ, то приведемъ здѣсь краткое описаніе главнѣйшихъ изъ этихъ опытовъ.

Лебро (1790 —) производилъ въ 1831 и 1834 гг. въ Мецѣ опыты надъ водосливами при тѣхъ же обстоятельствахъ, какъ и вышеописанные опыты его надъ отверстіями. Каналъ прямоугольнаго поперечнаго сѣченія шириною 12,07 ф. преграждался вертикальною стѣнкою, въ которой помѣщалось отверстіе, служившее водосливомъ; порогъ водослива возвышался надъ дномъ канала на $G = 1,77$ ф. При длинѣ водослива $a = 0,656$ ф. боковыя стѣнки отстояли отъ вертикальныхъ граней его на $L = L' = 5,71$ ф. Съ цѣлью изученія вліянія боковыхъ стѣнокъ канала на коеф. расхода одна изъ боковыхъ стѣнокъ (черт. 108 *b*) или обѣ (черт. 108 *c*) приближались къ водосливу на разстояніе $L = L' = 1,77$ ф. или придвигались къ вертикальнымъ гранямъ его на разстояніе 0,79 дюйма (20 миллим.), или наконецъ примыкали къ нимъ вполне (черт. 108 *d* и *e*). Въ нѣкоторыхъ опытахъ боковыя стѣнки были наклонены къ плоскости водослива подъ $\angle 45^\circ$ и примыкали къ ней въ разстояніи 0,79 дюйма отъ вертикальныхъ граней водослива (черт. 108 *f*). За исключеніемъ расположенія показаннаго на черт. 108 *c* во всѣхъ остальныхъ дно канала отстояло отъ порога водослива на 1,77 ф. или же на протяженіи 8,2 ф. шло поднятымъ до порога. Напоръ H во всѣхъ случаяхъ измѣрялся въ точкѣ отстоявшей отъ водослива на 11,48 ф. вверхъ по теченію.

При всѣхъ указанныхъ устройствахъ порогъ водослива имѣлъ видъ подобный изображенному на черт. 101; длина a водослива равнялась 0,656 ф.; напоръ H измѣнялся отъ 0,05 ф. до 1,06 ф. а расходъ Q отъ 0,025 куб. ф. до 2,03 куб. ф. Нѣсколько опытовъ было произведено при длинѣ a равной 0,066 ф. и 1,968 ф. (въ послѣднемъ случаѣ порогъ водослива имѣлъ ширину 0,164 ф.); въ этихъ опытахъ ширина канала у водослива равнялась 12,07 ф. *).

Въ болѣе широкихъ размѣрахъ были произведены опыты *Френсисомъ* въ 1852 г. въ Лоуэллѣ; по точности наблюденія они пользуются большимъ довѣріемъ **). Водосливъ CD , $C'D'$ (черт. 109) былъ устроенъ въ каналѣ шириною 12,5 ф., эта ширина увеличивалась до 14 ф. передъ поперечною стѣнкою водослива по длинѣ ка-

*) *Lesbros*. Expériences hydrauliques sur les lois de l'écoulement de l'eau etc. Paris. 1851.

**) *Francis*. Lowell Hydraulic Experiments. Third ed. New-York. 1871.

нала на протяженіи 6 ф. Длина водослива равнялась 10 ф. и высота порога $BD = G = 4,6$ ф. Напоръ H измѣрялся въ точкахъ E, E' , лежавшихъ въ 6 ф. отъ водослива; измѣрительные приборы устанавливались въ небольшихъ деревянныхъ бездонныхъ ящикахъ для уменьшенія вліянія волненія; точность измѣренія могла быть доведена до 0,0005 ф. (0,15 милим.). Нѣсколько опытовъ произведено было съ водосливами длиною въ 4 ф.; для этого въ водосливѣ $CD, C'D'$ помѣщалась въ серединѣ стѣнка ab длиною 2 ф.

Для опытовъ надъ водосливомъ съ *неполнымъ* сжатіемъ въ каналѣ были помѣщены вертикальныя стѣнки $AC, A'C'B'D'$ (черт. 111) длиною 20 ф. примыкавшія къ вертикальнымъ гранямъ водослива $C'D'$. Для водосливовъ съ *несовершеннымъ* сжатіемъ въ каналѣ по длинѣ на 23 ф. устраивалось второе дно EFB (черт. 110) въ разстояніи $G = 2$ ф. отъ порога D .

Во всѣхъ этихъ опытахъ напоръ H измѣнялся отъ 0,59 ф. до 1,57 ф. а расходъ Q —отъ 14,22 куб. ф. до 63,35 куб. ф.

Опыты *Фтилли* и *Стирнса* надъ водосливами съ *неполнымъ* сжатіемъ съ боковъ, длиною 5 ф. и 19 ф. были произведены въ 1877 и 1879 гг. по случаю устройства для г. Бостона водопровода изъ р. Седбери *). Черт. 112 и 113 представляютъ: первый—продольный разрѣзъ, а второй—планъ водопроводной каменной трубы, внутри которой помѣщался водосливъ. Водосливъ длиною 5 ф. былъ устроенъ въ стѣнкѣ, расположенной поперекъ каменной трубы; высота порога равнялась 3,17 ф. Продольныя вертикальныя стѣнки GK , длиною 12 ф., примыкали къ боковымъ гранямъ водослива и служили для уничтоженія сжатія струи съ боковъ; для этой-же цѣли верхнія части стѣнокъ продолжались нѣсколько и за водосливъ и шли, *не опускаясь* ниже горизонта порога. Напоръ H измѣрялся въ разстояніи 6 ф. отъ порога; онъ колебался въ предѣлахъ отъ 0,07 ф. до 0,82 ф. Вода впускалась въ трубу черезъ отверстія $B, B, \dots$ въ разстояніи 33,5 ф. отъ водослива; для уничтоженія волненія и неравномѣрности движенія, вода вливалась сперва въ ящикъ C и затѣмъ про-

*) *Etteley and Stearns*. Description of some Experiments on the Flow of Water etc. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1883. Въ этой статьѣ весьма много цѣнныхъ свѣдѣній относительно производства *точного* измѣренія большихъ массъ протекающей воды помощью водослива.

ходила черезъ щиты *D* и *E*, снабженныя отверстіями; для этого также служили доски *F*, *F*. Расходъ *Q* измѣнялся отъ 0,37 куб. ф. до 12,75 куб. ф.

Водосливъ длиною 19 ф. былъ расположенъ въ другомъ мѣстѣ водопровода, именно въ шлюзныхъ камерахъ, черезъ которыя вода шла изъ водохранилища въ трубу. Этотъ водосливъ былъ также съ неполнымъ сжатіемъ съ боковъ; высота порога равнялась 6,55 ф.; *H* измѣнялось въ 6 ф. отъ водослива и колебалось между 0,47 ф. и 1,60 ф. а *Q* заключалось между 20,18 куб. ф. и 130,12 куб. ф. Этотъ водосливъ—наибольшій изъ всѣхъ, на которыхъ до настоящаго времени производились изслѣдованія.

б) *Неполное сжатіе*. Для болѣе нагляднаго сравненія коэффициентовъ расхода при полномъ и неполномъ сжатіи будемъ откладывать по оси *X* величины тѣхъ и другихъ коэффициентовъ а по оси *Y*—соотвѣтственные величины *h*, т. е. напора *H* исправленнаго на скорость подхода (форм. 86а и 87а); по этимъ координатамъ подобно изложенному въ § 21 построятся кривыя коэффициентовъ расхода.

На черт. 114 нанесены по даннымъ опытовъ *Лебро*: линія I—для водослива съ полнымъ сжатіемъ, изображеннаго на черт. 108 *b* и *c*, и линія II—для водослива съ неполнымъ сжатіемъ съ боковъ, показаннаго на черт. 108 *e*. Пунктирныя линіи Ia и IIa представляютъ вѣроятнѣйшія кривыя коеф. расхода для такихъ водосливовъ при длинѣ послѣднихъ въ 0,656 ф. и при *h* отъ 0,1 ф. до 0,6 ф.

Изъ сравненія этихъ кривыхъ а также изъ опытовъ *Френсиса* надъ водосливами длиною въ 10 ф. и при *h* отъ 0,8 ф. до 1 ф. оказывается, что если обозначить черезъ μ_c —коеф. расхода для водослива съ полнымъ сжатіемъ, а черезъ μ_s —коеф. расхода для водослива съ неполнымъ сжатіемъ, то

$$\mu_s = \mu_c \left(1 - m \frac{s}{p} \right) \dots \dots \dots (88)$$

гдѣ: *p*—смачиваемый (разсчетный а не дѣйствительный) периметръ отверстія водослива, т. е. $p = a + 2h$; *s*—периметръ, на которомъ проявляется неполное сжатіе, и *m*—коэффициентъ равный въ среднемъ отъ 0,15 до 0,17 при *h* отъ 0,3 ф. до 1 ф.

Необходимо при этомъ замѣтить, что неполное сжатіе съ боковъ при водосливахъ значительной длины не оказываетъ особенно замѣтнаго вліянія на увеличеніе коэф. μ_s ; въ подобныхъ случаяхъ вліяніе полного сжатія, такъ равно и неполнаго сжатія съ боковъ отражается лишь на частицахъ струи находящихся вблизи боковыхъ стѣнокъ. Въ противоположность этому неполное сжатіе *снизу* при длинныхъ водосливахъ увеличиваетъ значительно коэф. μ_s .

Опредѣленіе коэф. расхода μ_s по форм. (88) приводится очевидно къ опредѣленію коэф. расхода μ_c . Въ § 32 указанъ другой способъ опредѣленія коэф. μ_s —именно помощью чертежа или таблицъ.

в) *Несовершенное сжатіе*. На томъ же черт. 114 нанесены по результатамъ опытовъ *Лебро*: линія III—для водослива съ несовершеннымъ сжатіемъ съ одного бока, и линія IV—съ двухъ боковъ (черт. 108 *d* и *e* съ тѣмъ отличіемъ отъ случая неполнаго сжатія, что стѣнки здѣсь отстоятъ отъ вертикальныхъ реберъ водослива на 0,79 дюйма). Изъ сравненія линій II и IV видно, что даже при небольшомъ удаленіи боковыхъ стѣнокъ отъ соотвѣтственныхъ реберъ водослива коэф. расхода замѣтно уменьшается. Удаленіе одной стѣнки на 0,79 дюйма, а другой—на 5,71 ф. еще болѣе уменьшаетъ коэф. расхода, какъ показываетъ линія IV. Сопоставляя линіи I—IV, видимъ, что отодвигая постепенно одну или обѣ боковыя стѣнки, т. е. увеличивая L и L' можно достигнуть такого предѣльнаго разстоянія λ , за которымъ дальнѣйшее отодвиганіе уже не уменьшаетъ коэф. расхода.

Изъ опытовъ *Лебро* и *Френсиса* слѣдуетъ заключить, что такое предѣльное разстояніе λ , за которымъ несовершенное сжатіе уже не обнаруживается, въ *три* раза больше *наименьшаго* измѣренія водослива, т. е. длины его a или поправленнаго напора h . Если наименьшее измѣреніе водослива обозначить черезъ M , то $\lambda = 3M$.

Если μ_r обозначаетъ коэф. расхода для несовершеннаго сжатія, то

$$\mu_r = \mu_c \left(1 - n \frac{\sigma}{p} \right) (89)$$

здѣсь μ_c и p —тѣ же обозначенія, что и въ форм. (88), σ —периметръ, на которомъ проявляется несовершенное сжатіе, и n —коэффициентъ, который измѣняется въ зависимости отъ наименьшаго разстоянія e

стѣнки или дна отъ соотвѣтственнаго ребра водослива, Ясно, что при $e = \lambda = 3M$ коэф. $n = 0$, а при $e = 0$, т. е. при полномъ приближеніи стѣнки или дна къ ребру, должно быть $m = n$, т. е. коэф. μ_p обращается въ μ_s . При промежуточныхъ разстояніяхъ e коэф. n имѣетъ приблизительно такіа значенія:

при $\frac{e}{M} =$	3	2	1	$\frac{1}{2}$	0
$n =$	0	0,005	0,025	0,06	0,16.

Отсюда видно, что при приближеніи стѣнокъ или дна къ водосливу на разстояніе e только въ два раза больше наименьшаго измѣренія водослива увеличеніе коэф. μ_p отъ несовершеннаго сжатія оказывается довольно малымъ, около $\frac{1}{2}\%$.

Приведенныя выше значенія для n справедливы для несовершеннаго сжатія съ боковъ и только приблизительно—при несовершенномъ сжатіи съ дна. Для этого послѣдняго случая коэф. n *вѣроятно* больше, такъ какъ приближеніе дна канала къ порогу водослива вліяетъ на μ_p сильнѣе, чѣмъ приближеніе стѣнокъ.

Вычисленіе коэф. μ_p по форм. (89), какъ и коэф. μ_s , приводится къ опредѣленію коэф. μ_c , который въ обыкновенныхъ случаяхъ всегда можетъ быть найденъ съ достаточною степенью точности, какъ объ этомъ излагается въ § 32.

Вопросъ о несовершенномъ сжатіи весьма сложный и еще недостаточно выясненный путемъ опыта; поэтому при точныхъ водонизмѣреніяхъ слѣдуетъ употреблять водосливы съ *полнымъ* сжатіемъ, или по крайней мѣрѣ съ *боковымъ* несовершеннымъ сжатіемъ, и избѣгать водосливовъ съ *низовымъ* несовершеннымъ сжатіемъ.

Полное сжатіе, согласно вышеизложенному, получается при L , L' и G равныхъ или большихъ $\lambda = 3M$. Такъ какъ обыкновенно длина a больше поправленнаго напора h , то $M = h$; въ этомъ случаѣ при $G = 3h$ и $L = L' = 2h$ а также при $G = 2h$ и $L = L' = 3h$ получается почти полное сжатіе. При неполномъ сжатіи съ боковъ, т. е. при $L = L' = 0$ вліяніе дна канала неощутительно при $G = 3h$, а при малыхъ напорахъ, напр. при $h = 0,1$ ф. или 0,2 ф. только при G равномъ отъ $4h$ до $5h$.

§ 32. Коэффициентъ расхода для водосливовъ съ полнымъ и неполнымъ боковымъ сжатіемъ при напорахъ отъ 0,1 ф. до 2 ф. и при длинѣ большей 0,5 ф.

Изложимъ результаты опытовъ по опредѣленію коэф. расхода μ_e и μ_s и покажемъ, какимъ образомъ въ каждомъ частномъ случаѣ могутъ быть найдены величины этихъ коэффициентовъ. Какъ видно изъ опытовъ, законъ измѣненія коэф. μ_e существенно различенъ для водосливовъ длинныхъ (больше 0,5 ф.) и короткихъ (меньше 0,5 ф.). Рассмотримъ сперва водосливы длиною больше 0,5 ф.

Подобно кривымъ I—IV показаннымъ на черт. 114 построены кривыя I—XI (черт. 115). Въ слѣдующей таблицѣ обозначены видъ и длина опытныхъ водосливовъ а также имена экспериментаторовъ.

Таблица XXIII.

№ кривыхъ.	Экспериментаторъ.	Длина водо- слива въ фут.	№ кривыхъ.	Экспериментаторъ.	Длина водо- слива въ фут.
I	Лебро	0,66	VII	Френсисъ . . полное сж.	10
II	Лебро *)	1,97	VIII	Лебро	0,66
III	Фтили и Стирись . .	2,3	IX	Фтили и Стирись . .	5
IV	Смитъ	2,6	X	Френсисъ	10
V	Фтили и Стирись . .	3	XI	Фтили и Стирись . .	19
VI	Френсисъ	4			

Изъ обзорѣнія полученныхъ кривыхъ видно, что съ возрастаніемъ длины водослива коэф. расхода μ_e при полномъ сжатіи *увеличивается* а коэф. расхода μ_s при неполномъ боковомъ сжатіи—*умень-*

*) Этотъ водосливъ имѣлъ ширину порога въ 0,164 ф., какъ объ этомъ упомянуто выше при описаніи опытовъ Лебро.

нается; при этомъ, какъ показываютъ кривыя VII и XI, величины ν_c и ν_s сближаются между собою и подходят къ нѣкоторой предѣльной кривой XII. Таковое расположеніе кривыхъ объясняется тѣмъ, что дѣйствіе полного и неполнаго боковаго сжатія простирается только на часть струи прилегающую къ вертикальнымъ гранямъ отверстія; остальная-же часть струи такому дѣйствию не подвергается. Чѣмъ длиннѣе водосливъ, тѣмъ больше будетъ средняя часть и тѣмъ слабѣе будетъ отражаться дѣйствіе сжатія на расходъ. Такъ какъ полное сжатіе уменьшаетъ расходъ а неполное—увеличиваетъ его, то очевидно что съ уменьшеніемъ длины водослива ν_c должно уменьшаться а ν_s —увеличиваться.

Если назвать черезъ ν_i ординаты кривой XII, то при ширинѣ водослива *а весьма большой* и при h отъ 0,1 ф. до 2 ф. вѣроятно $\nu_c = \nu_s = \nu_i$. Кривая XII при $h > 0,9$ ф. обращается въ прямую параллельную оси абсциссъ; для этой части кривой $\nu_i = 0,614$.

Разсматривая отдѣльныя кривыя, видимъ, что въ *предѣлахъ опыта* съ увеличеніемъ напора h кривыя коэффициентовъ ν_c — понижаются, а кривыя коэффициентовъ ν_s — также понижаются, но только до нѣкотораго значенія, за которымъ поднимаются.

На основаніи такихъ опытныхъ данныхъ *Смитъ* построилъ кривыя коэф. ν_c и ν_s для водосливовъ различной длины отъ 2 ф. до 19 ф.; эти кривыя отмѣчены на черт. 115 цифрами 1, 2, 3 и т. д. обозначающихъ длину водослива въ футахъ. Въ вѣрности назначенныхъ кривыхъ можно удостовѣриться опредѣленіями ν_c для нѣкоторыхъ опытовъ *Френсиса*, въ которыхъ Q не измѣрялось но было одно и тоже для всѣхъ опытовъ принадлежащихъ къ одной серіи.

Если для одного опыта расходъ выразится такъ (форм. 87a):

$$Q = \frac{2}{3} \nu_c' a' \sqrt{2g} h'^{3/2},$$

а для другаго:

$$Q = \frac{2}{3} \nu_c'' a'' \sqrt{2g} h''^{3/2},$$

то отсюда слѣдуетъ, что

$$\nu_c'' = \nu_c' \frac{a'}{a''} \left(\frac{h'}{h''} \right)^{3/2}$$

Опредѣляя μ_c' по чертежу (по кривымъ Смитза 1, 2, 3...) для данныхъ a' и h' можно при помощи этого уравненія вычислить μ_c'' ; съ другой стороны можно, также по чертежу, найти μ_c' для данныхъ a'' и h'' . Очевидно, при вѣрности кривыхъ Смитза обѣ величины для μ_c'' не должны значительно разниться; въ дѣйствительности разности эти оказались довольно малыми, не превосходящими 1,2‰.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ показаны: 1) данныя a и H опытовъ Френсиса, 2) найденныя по чертежу величины μ_c' и μ_c'' , 3) вычисленныя Q и μ_c'' и 4) разности между вычисленными и опредѣленными по чертежу значеніями μ_c'' .

Таблица XXIV.

(мѣры въ футахъ).

Серія опытовъ.	№№ опытовъ Френсиса.	длина a	напоръ H	вычислен- ный рас- ходъ. Q	μ_c' и μ_c'' по чертежу	μ_c'' по вычисл.	разность.
I	1	6,987	0,3146	4,096	0,6214		
	6	3,500	0,5085		0,609	0,604	—0,005
II	14	6,987	0,3745	5,291	0,618		
	11	3,500	0,6049		0,606	0,601	—0,005
III	17	6,987	0,4681	7,347	0,6141		
	22	3,500	0,7580		0,602	0,595	—0,007
IV	32	6,987	0,6554	12,087	0,6098		
	31	3,496	1,0656		0,595	0,588	—0,007
V	56	6,987	0,9554	21,096	0,6047		
	55	5,487	1,1336		0,599	0,596	—0,003
	57	8,489	0,8361		0,609	0,608	—0,001
VI	70	8,489	0,3662	6,229	0,6193		
	69	1,829	1,0627		0,587	0,581	—0,006
	71	5,487	0,4936		0,612	0,612	0.

Изъ этой таблицы видно, что дѣйствительно разности между коэффициентами расхода вычисленными и найденными по чертежу весьма незначительны.

Обратимся теперь къ водосливамъ съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *одного* бока.

Выше было указано, что полное сжатіе уменьшаетъ расходъ, а неполное боковое — увеличиваетъ его. При неполномъ сжатіи съ одного бока и при полномъ — съ другого противоположныя дѣйствія того и другого сжатія взаимно уничтожаются и струя водослива находится приблизительно въ тѣхъ-же условіяхъ, въ какихъ состоитъ средняя часть струи при очень длинныхъ водосливахъ; на эту часть, какъ извѣстно, не распространяется дѣйствіе полного и неполного сжатія. На этомъ основаніи можно предположить, что при неполномъ сжатіи съ одного бока коэф. расхода будетъ равняться μ_i , т. е. кривая коэф. расхода для этого случая изобразится кривою XII (черт. 115). Такое предположеніе оправдывается опытами *Фтили* и *Стирнса*. Въ слѣдующей таблицѣ помѣщены: 1) длина a и напоръ h водослива, 2) величины коэффициентовъ расхода μ вычисленныхъ по форм. (87а) и опредѣленныхъ по чертежу помощью кривой XII, и 3) разности между этими величинами.

Таблица XXV.

(мѣры въ футахъ).

№№	Длина <i>a</i>	Попр. напоръ <i>h</i>	<i>u</i> по вычисленію.	<i>u</i> по чертежу.	разность.
69	4,01	0,176	0,6388	0,6379	+ 0,0009
71	—	0,269	0,6285	0,6279	+ 0,0006
73	—	0,395	0,6212	0,6204	+ 0,0008
77	—	0,499	0,6177	0,6174	+ 0,0003
82	—	0,602	0,6177	0,6156	+ 0,0021
87	—	0,709	0,6156	0,6147	+ 0,0009
92	—	0,950	0,6196	0,6142	+ 0,0054
75	3,31	0,450	0,6173	0,6187	— 0,0014
76	—	0,569	0,6139	0,6160	— 0,0021
81	—	0,578	0,6130	0,6159	— 0,0029
84	—	0,688	0,6114	0,6149	— 0,0035
89	—	0,809	0,6105	0,6143	— 0,0038
91	—	0,935	0,6092	0,6142	— 0,0050

Полученныя разности довольно малы, наибольшая изъ нихъ не превосходитъ 0,8‰. По этому, предположеніе, что при неполномъ сжатіи съ одного бока законъ измѣненія коэф. расхода изображается кривой XII, слѣдуетъ признать близкимъ къ дѣйствительности.

По кривымъ 1, 2, 3... нанесеннымъ на черт. 115. *Смитъ* составилъ нижеслѣдующую таблицу, въ которой даны величины коэф. расхода для водосливовъ съ *полнымъ* сжатіемъ и съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *одного* и *двухъ* боковъ.

Т а б л и ц а XXVI

коэф. расхода для водосливовъ длиною не менѣе 0,66 ф. съ полнымъ сжатіемъ (μ_c) и съ неполнымъ сжатіемъ съ одного (μ_1) и съ двухъ боковъ (μ_s), составленная Смитомъ на основаніи опытовъ Лебро, Френсиса, Фтили и Стирнса и др.

(Размѣры въ футахъ. Расходъ по форм. 86а или 87а : $Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g h^{3/2}}$).

погреш. напоръ h .	полное сжатіе											неполное сжатіе съ одного бока μ_1 .	неполное сжатіе съ обоихъ боковъ											погреш. напоръ h .
	μ_c												μ_s											
	длина водослива a												длина водослива a											
	0,66	1	2	2,6	3	4	5	7	10	15	19		19	15	10	7	5	4	3	2	0,66			
0,1	0,632	0,639	0,646	0,650	0,652	0,653	0,653	0,654	0,655	0,655	0,656	0,656	0,657	0,657	0,658	0,658	0,659				0,675	0,1		
0,15	0,619	0,625	0,634	0,637	0,638	0,639	0,640	0,640	0,641	0,642	0,642	0,643	0,643	0,644	0,644	0,645	0,645	0,647	0,649	0,652	0,662	0,15		
0,2	0,611	0,618	0,626	0,629	0,630	0,631	0,631	0,632	0,633	0,634	0,634	0,635	0,635	0,636	0,637	0,637	0,638	0,641	0,642	0,645	0,656	0,2		
0,25	0,605	0,612	0,621	0,623	0,624	0,625	0,626	0,627	0,628	0,628	0,629	0,629	0,630	0,631	0,632	0,633	0,634	0,636	0,638	0,641	0,653	0,25		
0,3	0,601	0,608	0,616	0,618	0,619	0,621	0,621	0,623	0,624	0,624	0,625	0,625	0,626	0,627	0,628	0,629	0,631	0,633	0,636	0,639	0,651	0,3		
0,4	0,595	0,601	0,609	0,612	0,613	0,614	0,615	0,617	0,618	0,619	0,620	0,620	0,621	0,622	0,623	0,625	0,628	0,630	0,633	0,636	0,650	0,4		
0,5	0,590	0,596	0,605	0,607	0,608	0,610	0,611	0,613	0,615	0,616	0,617	0,617	0,619	0,620	0,621	0,624	0,627	0,630	0,633	0,637	0,650	0,5		
0,6	0,587	0,593	0,601	0,604	0,605	0,607	0,608	0,611	0,613	0,614	0,615	0,616	0,618	0,619	0,620	0,623	0,627	0,630	0,634	0,638	0,651	0,6		
0,7	0,585	0,590	0,598	0,601	0,603	0,604	0,606	0,609	0,612	0,613	0,614	0,615	0,618	0,619	0,620	0,624	0,628	0,631	0,635	0,640	0,653	0,7		
0,8	...	...	0,595	0,598	0,600	0,602	0,604	0,607	0,611	0,612	0,613	0,614	0,618	0,620	0,621	0,625	0,629	0,633	0,637	0,643	0,656	0,8		
0,9	...	...	0,592	0,596	0,598	0,600	0,603	0,606	0,609	0,611	0,612	0,614	0,619	0,620	0,622	0,627	0,631	0,635	0,639	0,645	...	0,9		
1,0	...	...	0,590	0,593	0,595	0,598	0,601	0,604	0,608	0,610	0,611	0,614	0,619	0,621	0,624	0,628	0,633	0,637	0,641	0,648	...	1,0		
1,1	...	...	0,587	0,591	0,593	0,596	0,599	0,603	0,606	0,609	0,610	0,614	0,620	0,622	0,625	0,630	0,635	0,639	0,644	...	...	1,1		
1,2	...	...	0,585	0,589	0,591	0,594	0,597	0,601	0,605	0,608	0,610	0,614	0,620	0,623	0,626	0,632	0,636	0,641	0,646	...	...	1,2		
1,3	...	...	0,582	0,586	0,589	0,592	0,596	0,599	0,604	0,607	0,609	0,614	0,621	0,624	0,628	0,633	0,638	0,643	0,648	...	...	1,3		
1,4	...	...	0,580	0,584	0,587	0,590	0,594	0,598	0,602	0,606	0,609	0,614	0,622	0,625	0,629	0,634	0,640	0,644	...	...	...	1,4		
1,5	...	...	...	0,582	0,585	0,589	0,592	0,596	0,601	0,605	0,608	0,614	0,622	0,625	0,630	0,636	0,641	0,646	...	...	...	1,5		
1,6	...	...	...	0,580	0,582	0,587	0,591	0,595	0,600	0,604	0,607	0,614	0,623	0,626	0,631	0,637	0,642	0,647	...	...	...	1,6		
1,7	...	...	...	...	...	...	...	0,594	0,599	0,603	0,607	0,614	0,623	0,626	0,632	0,638	...	...	...	...	...	1,7		

Изъ разсмотрѣнія чиселъ помѣщенныхъ въ этой таблицѣ, а также кривыхъ 1, 2, 3... можно сдѣлать слѣдующія заключенія въ *предѣлахъ опыта*:

1) При длинѣ водослива отъ 0,66 ф. до 19 ф. и при напорѣ отъ 0,1 ф. до 1,7 ф. коэффициентъ расхода измѣняется отъ 0,58 до 0,67; нижній предѣлъ соотвѣтствуетъ водосливу съ *полнымъ* сжатіемъ, а верхній—водосливу съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *обоихъ* боковъ.

2) Съ увеличеніемъ длины водослива коэффициенты μ_c и μ_s приближаются, первый—*увеличиваясь*, а второй—*уменьшаясь*, къ коэф. μ_r , который отъ длины не измѣняется.

3) Съ увеличеніемъ напора коэф. μ_c уменьшается, коэф. μ_r также уменьшается, обращаясь при $h=0,8$ ф. въ постоянную величину равную 0,614, а коэф. μ_s уменьшается только до нѣкотораго предѣльнаго h , за которымъ этотъ коэффициентъ увеличивается.

При пользованіи предыдущей таблицей или кривыми 1, 2, 3 (черт. 115) необходимо имѣть въ виду, что приведенныя значенія коэф. расхода имѣютъ мѣсто для водосливовъ удовлетворяющихъ слѣдующимъ условіямъ:

„Водосливъ устроенъ въ поперечной стѣнкѣ, которой сторона обращенная вверхъ по теченію вертикальна; порогъ горизонтальный и толщины весьма малой. Боковыя стѣнки канала вертикальны и нормальны къ поперечной стѣнкѣ; при полномъ сжатіи, а равно при неполномъ сжатіи съ одного и съ *обоихъ* боковъ разстоянія L , L' и G должны быть не меньше предѣловъ указанныхъ въ концѣ § 31. При неполномъ сжатіи струя по переходѣ черезъ порогъ ограничивается съ одного или, соотвѣтственно, съ *обоихъ* боковъ продолженной стороной канала, однако *не ниже* горизонта порога (на черт. 111 эти продолженныя стороны обозначены $C'E'$ и $D'F'$); если такого стѣсненія струи не имѣется, то коэф. расхода показанный на чертежѣ или взятый по таблицѣ долженъ быть уменьшенъ по $\frac{1}{4}\%$. Подъ низъ струи, въ A (черт. 101), долженъ быть свободный доступъ воздуха; въ противномъ случаѣ вслѣдствіе атмосфернаго давленія струя измѣняетъ естественный видъ“.

„Напоръ H при неполномъ сжатіи измѣняется въ 6 ф. отъ порога вверхъ по теченію; на этомъ протяженіи стѣнки канала должны быть гладкими во избѣжаніе гидравлическихъ сопротивленій отъ тренія. При полномъ сжатіи H измѣняется въ разстояніи отъ 4 ф.

до 10 ф. выше порога. Если напоръ H и длина a особенно значительны, то измѣреніе слѣдуетъ дѣлать въ точкѣ H' (черт. 100) лежащей внѣ кривой ограничивающей воду сверху. Напоръ долженъ быть исправленъ на скорость подхода согласно правилу данному въ § 30.

Относительно вида кривыхъ 1, 2, 3... приведемъ еще одно замѣчаніе, основывающееся на сравненіи коеф. расхода для водосливовъ и отверстій.

Если при движеніи черезъ отверстіе горизонтъ воды въ сосудѣ понижается, то при переходѣ отъ отверстія къ водосливу жидкость сразу отдѣляется отъ верхней грани отверстія и спадаетъ на замѣтную величину. Если для различныхъ напоровъ опредѣлить путемъ опыта коеф. расхода для отверстія и водослива и построить извѣстнымъ намъ образомъ кривыя коеф. расхода, то между кривой для отверстія и таковой-же линіей для водослива замѣчается, какъ показываютъ опыты *Лебро*, рѣзкій переходъ, именно: коеф. расхода для послѣдняго меньше чѣмъ для перваго. Это уменьшеніе *Смитзъ* приписываетъ сжатію струи сверху—большему при водосливѣ, чѣмъ при отверстіи. Такое предположеніе даетъ Смитзу возможность судить о приблизительныхъ значеніяхъ коеф. μ_c при размѣрахъ водосливовъ, не встрѣчавшихся въ опытахъ. Оказывается, что кривыя 1, 2, 3... (черт. 115) для коеф. μ_c , съ увеличеніемъ h удаляясь все болѣе и болѣе отъ кривой XII, при дальнѣйшемъ возрастаніи h вѣроятно приближаются къ ней, что впрочемъ нуждается въ подтвержденіи новыми опытными данными. Во всякомъ случаѣ кривыя 1, 2, 3... не могутъ представлять закона измѣненія коэффициентовъ μ_c и μ_s при *всякихъ* значеніяхъ h , такъ какъ тогда при h достаточно большомъ получилось-бы $\mu_c = 0$, что конечно невѣрно.

§ 33. Коэффициентъ расхода для короткихъ водосливовъ съ полнымъ сжатіемъ (длиною меньшихъ 0,5 ф.).

Разсмотримъ теперь короткіе водосливы, т. е. длиною меньше 0,5 ф. Опыты надъ короткими водосливами были произведены *Лебро* и *Кастелемъ*.

Первымъ изъ этихъ изслѣдователей производились опыты надъ водосливомъ съ *полнымъ* сжатіемъ и длиною 0,066 ф. Результаты этихъ опы-

товъ приведены въ нижеслѣдующей таблицѣ, въ которой для сравненія помѣщены также данныя опытовъ *Лебро*, *Смитза* и *Френсиса*. Изъ этой таблицы видно, что коеф. расхода μ_c для такого водослива значительно *больше*, чѣмъ въ водосливахъ длиною большихъ 0,5 ф.

Таблица XXVII.

(размѣры въ футахъ).

<i>Лебро;</i> $a = 0,066.$		<i>Лебро;</i> $a = 0,656.$		<i>Смитзъ;</i> $a = 2,586.$		<i>Френсисъ;</i> $a = 10.$	
$H = h$	μ_c	H	μ_c	H	μ_c	h	μ_c
1,9472	0,639	—	—	—	—	—	—
0,9892	0,670	—	—	1,1063	0,5878	1,0019	0,6078
—	—	0,5955	0,590	—	—	—	—
0,5331	0,652	—	—	0,5659	0,6087	0,6251	0,6138
—	—	0,3625	0,596	—	—	—	—
0,2674	0,653	—	—	—	—	—	—
—	—	0,1788	0,610	—	—	—	—

Кастель произвелъ въ 1835 и 1836 гг. въ Тулузѣ двѣ серіи опытовъ надъ водосливами длиною отъ 0,03 ф. до 2,23 ф. Водосливы первой серіи помѣщались въ каналъ длиною 19,5 ф., и шириною 2,43 ф. и глубиною отъ 0,1 до 0,74 ф., считая эту послѣднюю отъ порога до дна; для водосливовъ второй серіи въ этомъ каналѣ продольною стѣнкою длиною 7,35 ф. отдѣлялся меньшій каналъ шириною 1,18 ф., въ поперечной стѣнкѣ котораго и устраивались водосливы; поправленный напоръ h измѣнялся отъ 0,09 ф. до 0,8 ф.

Результаты опытовъ *Кастеля*, относящіеся къ водосливамъ длиною болѣе 0,5 ф., вообще согласуются съ данными другихъ изслѣдователей, приведенными въ § 32, поэтому ограничимся здѣсь только тѣми изъ водосливовъ, которые были устроены въ широкомъ каналѣ и

длина которых не превосходила 0,33 ф.; во всехъ этихъ водосливахъ $G = 0,56$ ф. Данныя для этихъ водосливовъ приведены въ слѣдующей таблицѣ *).

Таблица XXVIII

коэф. расхода для короткихъ водосливовъ съ полнымъ сжатіемъ по опытамъ Кастеля.
(размѣры въ футахъ).

№ Смѣта.	Длина	Попр. напоръ	Коеф. расх.	№ Смѣта.	Длина	Попр. напоръ	Коеф. расх.	№ Смѣта.	Длина	Попр. напоръ	Коеф. расх.
	a	h	μ_c		a	h	μ_c		a	h	μ_c
135	0,0328	0,6526	0,6681	152	0,0988	0,5236	0,6280	168	0,1637	0,1959	0,6118
136	—	0,5899	0,6720	153	—	0,4597	0,6278	169	—	0,1624	0,6137
137	—	0,5249	0,6730	154	—	0,3947	0,6274	170	—	0,1303	0,6134
138	—	0,4626	0,6748	155	—	0,3294	0,6274	171	0,3294	0,7898	0,5940
139	—	0,3947	0,6785	156	—	0,2615	0,6280	172	—	0,7238	0,5931
140	0,0653	0,7869	0,6386	157	—	0,1975	0,6276	173	—	0,6527	0,5926
141	—	0,7218	0,6394	158	—	0,1627	0,6294	174	—	0,5918	0,5931
142	—	0,6421	0,6400	159	0,1637	0,7962	0,6148	175	—	0,5212	0,5913
143	—	0,5889	0,6411	160	—	0,7329	0,6143	176	—	0,4555	0,5911
144	—	0,5217	0,6418	161	—	0,6597	0,6135	177	—	0,3937	0,5890
145	—	0,4623	0,6429	162	—	0,5826	0,6129	178	—	0,3299	0,5904
146	—	0,3911	0,6451	163	—	0,5267	0,6122	179	—	0,2619	0,5919
147	—	0,3255	0,6482	164	—	0,4565	0,6133	180	—	0,1992	0,5945
148	—	0,2608	0,6521	165	—	0,3964	0,6120	181	—	0,1660	0,5968
149	—	0,2008	0,6587	166	—	0,3288	0,6122	182	—	0,1401	0,6044
150	0,0988	0,6550	0,6283	167	—	0,2603	0,6119	183	—	0,0991	0,6176
151	—	0,5926	0,6279								

*) *Smith*. Hydraulics The flow of Water etc. p. 138.
Lesbros. Expériences hydrauliques etc. p. 234 et 243.

Сопоставляя между собою результаты приведенныя въ этой таблицѣ, приходимъ къ слѣдующимъ выводамъ въ *предѣлахъ опытовъ*.

1) При длинѣ водослива отъ 0,033 ф. до 0,33 ф. и при напорѣ отъ 0,1 ф. до 0,8 ф. коэф. расхода μ_c измѣняется отъ 0,59 до 0,68; *наименьшее* значеніе соотвѣтствуетъ *большой* длинѣ водослива а *наибольшее*—*меньшей*.

2) При одномъ и томъ-же напорѣ h съ *уменьшеніемъ* длины a коэф. расхода *увеличивается*, такъ напр.

при $a = 0,329$	0,164	0,099	0,065	0,033 ф.
$\mu_c = 0,594$	0,615	0,628	0,642	0,666.

3) Съ *увеличеніемъ* h до 0,3 ф. коэф. μ_c —*уменьшается*; при дальнѣйшемъ увеличеніи напора μ_c продолжаетъ уменьшаться только при очень короткихъ водосливахъ ($a = 0,33$ и 0,65 ф.) и увеличиваться—при другихъ.

Если сравнить эти выводы съ заключеніями приведенными въ § 32, то окажется, что *наименьшій* коэф. расхода μ_c соотвѣтствуетъ водосливу длиною равной приблизительно 0,5 ф.; при увеличеніи или при уменьшеніи длины коэф. μ_c —увеличивается.

§ 34. *Наиболѣе употребительныя формулы для опредѣленія расхода черезъ водосливъ.*

Въ § 30 даны формулы для опредѣленія расхода черезъ водосливъ, а въ §§ 31 и 32 изложены способы нахождения коэффициентовъ расхода μ_c , μ_x и μ_r . Такимъ образомъ въ большинствѣ случаевъ возможно найти Q съ значительною степенью точности. Указанный путь вычисленія расхода открылся благодаря главнымъ образомъ опытамъ *Лебро*, *Френсиса*, *Фтили* и *Стирнса*, которые дали возможность прійти къ заключеніямъ о наиболѣе вѣроятномъ измѣненіи коэффициентовъ μ_c и μ_x въ зависимости отъ длины водослива и напора и позволили составить таблицу XXVI и нанести кривыя 1, 2, 3...

При рѣшеніи практическихъ вопросовъ иногда не требуется опредѣлять Q съ большою степенью точности; въ такихъ случаяхъ можно пользоваться формулами, которыми почти каждый изъ вышепоименованныхъ экспериментаторовъ выражалъ результаты своихъ опытовъ надъ водосливами.

Изъ такихъ формулъ упомянемъ только о наиболѣе заслуживающихъ вниманія, а именно о формулахъ: а) *Френсиса*, б) тоже *Френсиса* измѣненныхъ *Смитзомъ*, *Фтили* и *Стирнсомъ*, в) *Браимана*, г) *Лебро*, д) *Вейсбаха* и е) *Буало*.

а) *Формулы Френсиса*. Изъ своихъ опытовъ, описанныхъ выше, *Френсисъ* нашелъ слѣдующія выраженія для расхода черезъ водосливъ съ *полнымъ* сжатіемъ:

$$Q = \frac{2}{3} \mu (a - 0,2 h) \sqrt{2g h^{3/2}} \quad (90)$$

черезъ водосливъ съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *одного бока*:

$$Q = \frac{2}{3} \mu (a - 0,1 h) \sqrt{2g h^{3/2}} \quad (91)$$

черезъ водосливъ съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *обоихъ боковъ*:

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g h^{3/2}} \quad (92)$$

Въ этихъ выраженіяхъ черезъ *h* обозначено количество:

$$h = \left\{ \left(H + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right\}^{2/3}$$

а коэф. расхода $\mu = 0,6228$.

Вышеприведенные формулы даютъ результаты согласные съ опытомъ при *h* отъ 0,5 ф. до 2 ф. и при *a* равномъ или большемъ 3 *h*.

Полагая въ форм. (90—92) коэф. $\mu = 0,6228$ и $\sqrt{2g} = 8,02$, получимъ слѣдующія упрощенныя выраженія для расхода съ мѣрами въ *футахъ*:

для 1 случая

$$Q = 3,33 (a - 0,2 h) h^{3/2} \quad (90a)$$

для 2 случая

$$Q = 3,33 (a - 0,1 h) h^{3/2} \quad (91a)$$

для 3 случая

$$Q = 3,33 a h^{3/2} \quad (92a)$$

б) *Формулы Френсиса видоизмѣненныя Смитзомъ, Фтили и Стирнсомъ*. Въ выраженія 90а—92а, данныя *Френсисомъ* для мѣръ

въ футахъ, *Смитъ* ввелъ нѣкоторыя измѣненія согласно опытамъ произведеннымъ въ послѣднее время; именно расходъ выражается такимъ образомъ (мѣры въ футахъ):

для водослива съ *полнымъ* сжатіемъ

$$Q = 3,29 (a - 0,1h) h^{3/2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (90b)$$

для водослива съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *одного* бока

$$Q = 3,29 a h^{3/2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (91b)$$

для водослива съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *обоихъ* боковъ

$$Q = 3,29 \left(a - 1 \cdot \frac{1}{4} h \right) h^{3/2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (92b)$$

Высота h имѣетъ то-же значеніе что и въ форм. Френсиса. Эти формулы даютъ результаты достаточно вѣрные, если h заключается въ предѣлахъ отъ 0,5 ф. до 2 ф. а длина водослива равна или больше $3h$.

Фтили и *Стирисъ*, произведшіе много опытовъ надъ водосливами длиною 5 ф. и 19 ф., находятъ, что хорошо согласуется съ ихъ опытами и съ опытами *Френсиса* слѣдующая формула для водосливовъ съ *неполнымъ боковымъ* сжатіемъ (для *футовъ*):

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} h^{3/2} + 0,007a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (93)$$

гдѣ $\mu = 0,619$; такъ какъ $\sqrt{2g} = 8,02$ то окончательно получится:

$$Q = 3,31 a h^{3/2} + 0,007a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (93a)$$

Эта формула не примѣнима при $h < 0,07$ ф.

в) *Формулы Браимана*. Профессоръ Московскаго университета *Браиманъ* (1796—1866) принимаетъ эмпирически, что коеф. расхода μ при водосливѣ можетъ быть представленъ подѣ такимъ видомъ

$$\mu = \alpha + \beta \frac{a}{B} + \frac{\gamma}{H} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (94)$$

здѣсь B —ширина канала въ томъ мѣстѣ гдѣ измѣряется напоръ H ; α , β и γ —постоянные коэффициенты равные (для *футовъ*):

$$\alpha = 0,5757 \quad \beta = 0,0579 \quad \gamma = 0,0026$$

такъ что расходъ изобразится такой формулой *):

$$Q = \frac{2}{3} \left(0,5757 + 0,0579 \frac{a}{B} + \frac{0,0026}{H} \right) a \sqrt{2g} H^{3/2}. \quad (95)$$

При *неполномъ* сжатіи съ *обоихъ* боковъ, т. е. при $B = a$ предыдущая формула перенинется такъ:

$$Q = \frac{2}{3} \left(0,6336 + \frac{0,0026}{H} \right) a \sqrt{2g} H^{3/2} \quad . \quad . \quad (95a)$$

Сравнивая результаты получаемые по этимъ формуламъ съ опытными данными а также сопоставляя всѣ формулы разсматриваемыя въ этомъ §, приходимъ къ заключенію, что формула Брашмана выражаетъ законъ движенія жидкости черезъ водосливъ *лучше*, чѣмъ другія формулы, и что она даетъ результаты вообще достаточно согласныя съ опытомъ, за исключеніемъ только водосливовъ весьма малой длины, меньше 0,33 ф. Такое согласіе особенно замѣчательно въ виду того, что постоянныя величины α , β и γ были опредѣлены Брашманомъ по немногимъ опытамъ *Кастеля* надъ водосливами длиной всего отъ 0,33 ф. до 2,43 **).

г) *Формулы Лебро*. *Лебро* опредѣляетъ расходъ черезъ водосливъ по формулѣ

$$Q = \mu \alpha H' \sqrt{2g (H - \frac{1}{2} H')} \quad . \quad . \quad . \quad (96)$$

гдѣ H' —толщина струи переливающейся черезъ водосливъ (черт. 100) и μ —коэф. расхода, различный для случаевъ водосливовъ изслѣдованныхъ *Лебро* (черт. 108 $a-f$); такъ для случая водослива изображеннаго на черт. 108 b коэф. μ заключается въ предѣлахъ отъ 0,679 до 0,585 при измѣненіи H отъ 0,1 ф. до 0,59 ф. ***). Выраженіе (96) по виду одинаково съ тѣмъ, которое получилось бы, если опредѣлять расходъ черезъ отверстіе шириною a , высотой H' и при напорѣ надъ центромъ тяжести равномъ $H - \frac{1}{2} H'$; такъ что водосливъ при этомъ уподобляется отверстию.

*) *Braschmann*. Sur l'application du principe de moindre action à la détermination du volume de fluide qui s'écoule d'un déversoir. Bulletin de la société impériale des naturalistes de Moscou. T. XXXIV. Année 1861. № 4. Moscou. 1861.

Биографія и портретъ Брашмана помѣщены въ Математическомъ Сборникѣ. Т. I. Москва. 1866.

**) *Lesbros*. Expériences hydrauliques etc. p. 243.

***) *Lesbros*. Expériences hydrauliques etc. p. 485.

Такъ какъ для опредѣленія Q по форм. (96) необходимо знать H , то употребленіе ея въ приложеніяхъ оказывается неудобнымъ. Имѣя въ виду это обстоятельство, Лебро даетъ слѣдующую формулу для расхода, хотя и болѣе простую но, по его мнѣнію выражающую законъ движенія черезъ водосливъ не столь хорошо, какъ предыдущая:

$$Q = \mu' a \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (96a)$$

здѣсь коэф. μ' различный для различныхъ случаевъ водосливовъ и измѣняется съ измѣненіемъ H ; коэф. μ' *меньше* коэф. μ ; такъ для водослива представленнаго на черт. 108*b* коэф. μ' измѣняется отъ 0,412 до 0,393 при H отъ 0,1 ф. до 0,49 ф. Слѣдующая таблица заключаетъ значенія коэф. μ' для различнаго рода водосливовъ.

Таблица XXIX

коэффициентовъ расхода μ' (форм. 96*a*) для водосливовъ съ полнымъ и неполнымъ сжатіемъ по опытамъ Лебро.

При водосливахъ II, III, V, VI и VII боковыя стѣнки (одна или обѣ) отстояли на 0,79 дюйм. отъ соответственныхъ вертикальныхъ реберъ водослива.

Напоръ H футовъ.	Коэффициентъ расхода μ' для водосливовъ:						по черт. 108 <i>b</i> .
	съ пол- нымъ сжатіемъ.	съ неполн. сж. съ 1 бока.	съ неполн. сж. съ 2 боковъ.	съ неполн. сж. снизу.	съ неполн. сж. снизу и 1 бока.	съ неполн. сж. снизу и 2 бок.	
	I	II	III	IV	V	VI	VII
0,049	0,421	0,450	0,450	0,394	0,371	0,305	0,441
0,066	0,417	0,446	0,444	0,402	0,379	0,318	0,437
0,098	0,412	0,437	0,435	0,410	0,388	0,337	0,430
0,131	0,407	0,430	0,429	0,411	0,394	0,352	0,424
0,164	0,404	0,425	0,426	0,411	0,398	0,362	0,419
0,230	0,398	0,416	0,422	0,409	0,402	0,375	0,412
0,328	0,395	0,409	0,420	0,408	0,405	0,382	0,405
0,492	0,393	0,406	0,423	0,407	0,407	0,383	0,403
0,656	0,390	0,402	0,424	0,405	0,408	0,383	0,403
0,820	0,379	0,396	0,422	0,404	0,407	0,381	0,401
0,984	0,371	0,390	0,418	0,403	0,406	0,378	0,398

Однако при пользованіи формулой (96 а) необходимо помнить, что эта таблица значеній μ' получена изъ опытовъ надъ водосливами длиною 0,656 ф. и при H между 0,07 ф. и 0,98 ф. а потому для водосливовъ другихъ размѣровъ эта формула можетъ дать результаты не достаточно согласные съ дѣйствительностью.

По Лебро, при водосливахъ съ полнымъ сжатіемъ и длиною меньше 0,262 ф. (80 милим.) цифрами помѣщенными въ столбцѣ I предыдущей таблицы совсѣмъ не слѣдуетъ пользоваться.

д) *Формулы Вейсбаха*. Изъ опытовъ надъ водосливами шириною въ 0,656 ф. Вейсбахъ вывелъ слѣдующія формулы:

для водослива съ *полнымъ* или *несовершеннымъ* сжатіемъ

$$Q = \frac{2}{3} \mu \left\{ 1 + 1,718 \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^4 \right\} a \sqrt{2g} H^{3/2} \quad . \quad . \quad (97)$$

для водослива съ *неполнымъ* сжатіемъ съ *обоихъ* боковъ

$$Q = \frac{2}{3} \mu \left\{ 1,041 + 0,3693 \left(\frac{H}{H+G} \right)^2 \right\} a \sqrt{2g} H^{3/2} \quad . \quad . \quad (97a)$$

Въ этихъ выраженіяхъ Ω — площадь живого сѣченія канала въ томъ мѣстѣ гдѣ измѣряется H , и ω — площадь aH ; коеф. $\frac{2}{3}$ μ равенъ коеф. μ' формулы Лебро (96 а).

Формулы Вейсбаха даютъ вполне удовлетворительные результаты въ случаѣ водосливовъ, своими размѣрами подходящими къ опытнымъ, въ другихъ-же случаяхъ употребленіе ихъ можетъ привести къ погрѣшностямъ, такъ какъ они получены на основаніи опытовъ съ водосливами малой длины и заключаютъ коеф. μ , справедливый для водосливовъ также малой длины.

Съ цѣлью бѣльшаго согласованія форм. Вейсбаха съ опытами Брюкманнъ предлагаетъ опредѣлять Q для длинныхъ водосливовъ, разбивая длину ихъ на три части: CK , KL и LD' (черт. 116), причемъ крайнія части равны 0,328 ф. каждая, и опредѣляя расходъ черезъ среднюю часть по форм. (97а) а черезъ крайнія, разсматриваемыя сдвинутыми вмѣстѣ, по форм. (97).

е) *Формула Буало*. Основываясь на собственных опытахъ, Буало даетъ слѣдующую формулу для расхода черезъ водосливъ *):

$$Q = \sqrt{\frac{1 - \frac{H}{H'}}{1 - \left(\frac{H}{H+G}\right)^2}} a \sqrt{2g} H^{3/2} \dots (98)$$

здѣсь H , H' и G —прежнія обозначенія.

Смитъ считаетъ эту формулу невѣрной въ принципѣ а самые опыты Буало недостаточно точными.

§ 35. Затопленные водосливы. Формула Дюбюа.

Расходъ черезъ затопленный водосливъ (черт. 105) обыкновенно опредѣляютъ, рассматривая поперечное сѣченіе $B'D'$ равное BD состоящимъ изъ 2-хъ частей—нижней $C'D'=CD$ и верхней $B'C'=BC$; черезъ нижнюю часть сѣченія жидкость протекаетъ какъ черезъ затопленное отверстіе подъ напоромъ $h=H_1-H_2$, а черезъ верхнюю какъ черезъ водосливъ съ порогомъ $СК$ и съ напоромъ h .

Предположимъ сперва, что скорость подхода настолько незначительна, что можно его пренебречь.

Если μ и μ' —коэффициенты расхода для затопленного отверстія и для водослива, то расходъ для части сѣченія CD по форм. (54с и 40а):

$$Q' = \mu a H_2 \sqrt{2gh}$$

а расходъ для части BC по форм. (46)

$$Q'' = \frac{2}{3} \mu' a h \sqrt{2gh}$$

Слѣдовательно расходъ черезъ затопленный водосливъ выразится, при $\mu = \mu'$:

$$Q = Q' + Q'' = \mu a \sqrt{2gh} \left\{ H_2 + \frac{2}{3} h \right\} \dots (99) **).$$

*) *Boileau*. Traité de la mesure des eaux courantes. Paris. 1854.

Rühlmann. Hydromechanik, S. 301.

**) Въ этой формулѣ $h=H_1-H_2$: его не слѣдуетъ смѣшивать съ поправленнымъ напоромъ.

Эта формула была выведена *Дюбюа* (1732—1787), почему и называется его именемъ.

Если скорость подхода V_0 не очень мала, то вмѣсто напора H_1 слѣдуетъ брать

$$H_1 + b \frac{v^2}{2g}$$

гдѣ $b = 1,33$ при неполномъ боковомъ сжатіи, а вмѣсто h нужно взять h' равное

$$h' = \left(H_1 + b \frac{v^2}{2g} \right) - H_2 \dots \dots \dots (100)$$

Въ этомъ случаѣ расходъ черезъ затопленный водосливъ представляется такъ:

$$Q = \mu a \sqrt{2gh'} \left(H_2 + \frac{2}{3} h' \right) \dots \dots \dots (101)$$

Если принять, что $\mu = \beta \mu'$, гдѣ $\beta = 0,915$ по *Смитзу* и $\beta = 0,921$ по *Френсису*, то форм. (101) принимаетъ болѣе общій видъ:

$$Q = \mu' a \sqrt{2gh'} \left(\beta H_2 + \frac{2}{3} h' \right) \dots \dots \dots (102)$$

Изъ опытовъ, которые были произведены надъ затопленными водосливами, упомянемъ объ опытахъ *Френсиса* и *Фтили* и *Стирнса*.

Френсисъ *) произвелъ въ 1883 г. въ Лоуэлѣ опыты надъ затопленными водосливами при неполномъ боковомъ сжатіи; длина водослива составляла 11,1 ф., высота H_1 измѣнялась отъ 1 ф. до 2,19 ф. а H_2 доходило до 1,07 ф.; H_1 измѣнялось въ разстояніи 6 ф. отъ порога а H_2 —въ 18 ф.

Опыты *Фтили* и *Стирнса* **) относятся къ водосливу шириной 5 ф. и также съ неполнымъ боковымъ сжатіемъ; H_1 колебалось между 0,42 и 0,81 ф. а H_2 доходило до 0,57 ф.; высота порога $G = 3,17$ ф.; H_1 и H_2 измѣнялись въ 6 ф. отъ порога; ширина отводнаго канала составляла 8,7 ф.

*) Transactions of the American Society of Civil Engineers, IX, 1884.

**) Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1883.

Изъ разсмотрѣнія результатовъ этихъ опытовъ приходимъ къ заключенію въ *предѣлахъ опытовъ*, что коеф. расхода для затопленных водосливовъ съ неполнымъ боковымъ сжатіемъ измѣняется отъ 0,58 до 0,63 и *уменьшается съ увеличеніемъ H_2* , такъ что *наибольшее* его значеніе (0,63) соотвѣтствуетъ *наименьшему H_2* (около 3 дюйм.).

Отсюда видно, что значеніе для коеф. μ , предложенное *Эйтельвейномъ* и равное 0,633—велико, по крайней мѣрѣ для водосливовъ шириною отъ 5 ф. до 11 ф.

По *Смитзу*, результаты достаточно согласные съ опытами даются формулой (102), полагая въ ней $\mu' = \mu_s$ —коеф. расхода для обыкновенныхъ водосливовъ съ *неполнымъ боковымъ сжатіемъ* (черт. 115 и таблица XXVI).

Въ опытахъ надъ затопленными водосливами, какъ видно изъ только-что сказаннаго, играетъ важную роль точное измѣреніе H_2 . Струя, переливаясь черезъ порогъ, образуетъ въ точкѣ F (черт. 105) пониженіе. Если предположить, что струя въ этомъ случаѣ сжимается, такъ что EF —представляетъ сжатое сѣченіе струи, то очевидно, что опредѣлять H_2 слѣдуетъ не въ сѣченіи $D'I$ а въ EF ; измѣренное здѣсь H_2' меньше H_2 . Къ сожалѣнію, нельзя строго утверждать, что сжатое сѣченіе соотвѣтствуетъ именно EF ; сверхъ того, въ пониженной точкѣ F обыкновенно замѣчается сильное волненіе, мѣшающее точному опредѣленію H_2' . Вслѣдствіе этихъ затрудненій результаты опытовъ пока не даютъ возможности составить ясное представленіе объ обстоятельствахъ движенія жидкости черезъ затопленный водосливъ. По этому-то затопленные водосливы представляютъ весьма несовершенный способъ для *водоизмѣренія*. При

*) *Борнеманъ* произвелъ довольно много опытовъ надъ затопленными водосливами длиною 1,81 ф., 2,63 ф. и 3,72 ф. (Versuche über den Ausfluss des Wassers bei breiten Ueberfällen. Civil-Ingenieur, B. XVI, 1870. Weitere Versuche über den Ausfluss unter Wasser bei Ueberfällen über die ganze Wand. Civil-Ingenieur, B. XXII, 1876.). Къ сожалѣнію, изъ этихъ опытовъ довольно трудно вывести какія-либо опредѣленные заключенія о расходѣ черезъ водосливы этого рода. Формулы составленныя *Дельпа* а также самимъ *Борнеманномъ* на основаніи этихъ опытовъ весьма сложны и какъ эмпирическія врядъ-ли могутъ быть употребляемы для водосливовъ съ другими значеніями величинъ a , H_1 ; H_2 , G . *Фтили* и *Стирисъ* приписываютъ малоуспѣшность этихъ опытовъ главнымъ образомъ значительнымъ скоростямъ, съ которыми вода подходила къ водосливу и удалялась отъ него.

очень малой скорости подхода возможно еще *грубое* опредѣленіе расхода потока, а при большей — даже и такое опредѣленіе не мыслимо.

§ 36. Водосливы съ широкимъ и округленнымъ порогомъ.

Въ практикѣ весьма часто устраиваются водосливы съ широкимъ и округленнымъ порогомъ, поэтому вопросъ объ опредѣленіи расхода для такихъ водосливовъ заслуживаетъ особеннаго вниманія.

Опыты надъ водосливами съ широкимъ порогомъ были произведены *Лебро, Фтили и Стирнсомъ* *). Послѣдніе два изслѣдователи устраивали водосливъ длиною въ 5 ф. съ *неполнымъ боковымъ сжатіемъ*, при высотѣ порога $G = 3,17$ ф. и при ширинѣ его b въ 2, 3, 4, 6 и 10 дюйм.; напоръ H' измѣнялся отъ 0,12 ф. до 0,89 ф.

Для сравненія такихъ водосливовъ съ вышерассмотрѣнными, въ которыхъ b — весьма мало, опредѣлялись при *одномъ и томъ-же* расходе напоръ H — для случая b весьма малаго и H' — для испытуемаго. Если h и h' , μ и μ' — суть исправленные напоры и коеф. расходы въ первомъ и второмъ случаѣ, то

$$Q = \frac{2}{3} \mu a \sqrt{2g} h^{3/2} = \frac{2}{3} \mu' a \sqrt{2g} h'^{3/2}$$

откуда видно, что при $h' > h$, т. е. при $H' > H$ будетъ $\mu' < \mu$ и наоборотъ.

Опыты показываютъ, что если постепенно увеличивать H' , то при H' *маломъ* сравнительно съ b , коеф. μ' меньше μ и разность между ними, увеличиваясь въ началѣ, затѣмъ уменьшается, при H' равномъ приблизительно $1,6 b$ обращается въ нуль и далѣе дѣлается отрицательной; такъ что при H' достаточно *большомъ* относительно b коеф. μ' *больше* коеф. μ .

Такое измѣненіе коеф. μ' объясняется тѣмъ, что струя проходя черезъ широкій порогъ суживается (черт. 102 и 103), такъ что *она* представляетъ сжатое сѣченіе; затѣмъ расширяясь, струя протекаетъ по части порога qr ; въ n образуется полость занятая жидкостью

*) *Smith. Hydraulics. The flow of Water etc.*

находящуюся въ медленномъ вращательномъ движеніи. Такимъ образомъ между сѣченіями mn и pq происходитъ быстрое измѣненіе скорости и вслѣдствіе этого проявляются гидравлическія сопротивленія. Эти послѣднія увеличиваются еще вслѣдствіе тренія жидкости о порогъ на протяженіи qr *). Гидравлическія сопротивленія конечно уменьшаютъ коэф. μ' .

Съ другой стороны движеніе по широкому водосливу находится въ условіяхъ аналогичныхъ неполному сжатію съ обоихъ боковъ и снизу, когда коэф. расхода *больше*, чѣмъ при водосливѣ съ полнымъ сжатіемъ; вслѣдствіе этого обстоятельства коэф. μ' *увеличивается*. Какъ видно изъ вышеприведенныхъ опытовъ—при малыхъ H' уменьшеніе коэф. μ' отъ гидравлическихъ сопротивленій перевѣшиваетъ увеличеніе его отъ второй причины; при большихъ H' происходитъ обратное.

Для опредѣленія расхода черезъ водосливъ съ *широкимъ* порогомъ и съ неполнымъ боковымъ сжатіемъ *Фтили* и *Стирнсъ* предлагаютъ пользоваться формулами для такихъ же водосливовъ но съ *узкимъ* порогомъ, напр. форм. (93), только вмѣсто напора H (или h) въ эти формулы слѣдуетъ подставлять напоръ равный $H' + \frac{\xi}{2}$, гдѣ H' —напоръ для водослива съ *широкимъ* порогомъ и

$$\xi = 0,2016 \sqrt{H'^2 - 1,614 b H'} + 0,7658 b^2 = 0,1876 b$$

Эту формулу можно примѣнять для водосливовъ съ порогомъ шириною до 2 ф. и даже до 3 ф. и съ значительнымъ напоромъ H' , если только скорость подхода незначительна. При $H' < 0,1$ ф. и при $b < 1$ дюйм. формула не примѣнима.

Фтили и *Стирнсъ* производили опыты также съ водосливами; порогъ которыхъ имѣлъ съ внутренней стороны закругленіе (черт. 104); закругленіе было сдѣлано въ четверть круга радіусомъ $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ и 1 дюймъ. Также какъ и въ предыдущемъ случаѣ для одного и того же расхода измѣрялся напоръ H —для водослива съ весьма узкимъ порогомъ и H'' —для водослива вышеописаннаго устройства. При

*) Изъ этого можно замѣтить, что между движеніемъ жидкости черезъ широкій водосливъ и между движеніемъ въ *насадкѣ* (см. § 26) существуетъ нѣкоторая аналогія.

малыхъ H'' струя проходила по порогу, но затѣмъ при увеличеніи H'' она отдѣлялась отъ него и поднималась кверху (черт. 104). Коеф. μ'' для закругленнаго порога *больше* коеф. μ для порога весьма малой толщины и съ возрастаніемъ H'' превышеніе коэффициента μ'' увеличивается.

§ 37. *Поверхность воды выше водослива; измѣреніе напора H ; высота воды H_w на пороги водослива.*

Вода выше водослива образуетъ нѣкоторую поверхность; сѣченіе этой поверхности вертикальной плоскостью перпендикулярною къ длинѣ водослива представляетъ кривую (продольную) выпуклую кверху (черт. 106), а плоскостями параллельными длинѣ его — кривыя подобныя изображеннымъ на черт. 107 k и l , такъ что поверхность воды понижается довольно сильно отъ вертикальныхъ граней водослива къ серединѣ его.

Точка C , въ которой продольная кривая касается горизонтальной линіи, представляетъ особый интересъ, такъ какъ измѣреніе напора H должно производиться въ разстояніи отъ порога неближе этой точки, какъ объ этомъ сказано въ концѣ § 32. Разстояніе точки C отъ порога по опытамъ *Кастеля* и *Буало* *увеличивается* съ *увеличеніемъ* длины водослива a и напора H , хотя нѣкоторые опыты *Понсле* и *Лебро* показываютъ обратное, а именно, что это разстояніе увеличивается съ уменьшеніемъ напора. При большихъ H и a оно можетъ быть довольно значительнымъ, такъ по измѣреніямъ *Гершеля* для глухой деревянной плотины въ Холіокѣ высотой до 30 ф. при $a = 1200$ ф. и $H = 5,2$ ф., оно равнялось приблизительно 50 ф.

Точность измѣренія напора H имѣетъ значительное вліяніе на точность опредѣленія коеф. расхода и чѣмъ H *меньше* тѣмъ вліяніе *больше*; такъ при $H = 0,1$ ф. ошибка въ измѣреніи равная 0,001 ф. (0,3 миллим.) даетъ погрѣшность въ коэффициентѣ расхода составляющую 1,5%; при $H = 0,6$ ф. таже ошибка даетъ погрѣшность всего 0,25%. Вслѣдствіе нѣкотораго волненія, постоянно существующаго на поверхности воды, точность измѣренія врядъ-ли можетъ превзойти 0,0005 ф. (0,15 миллим.). Отсюда видно, что при ма-

лых H коэффициентъ расхода можетъ быть опредѣленъ съ точностью всего въ 0,75% до 1%, тогда какъ при большихъ напорахъ точность значительно выше.

Наилучшимъ приборомъ для опредѣленія H надо считать *мультельный крючекъ Бойдена* *). Этимъ приборомъ между прочимъ пользовался *Френсисъ* при своихъ извѣстныхъ опытахъ надъ водосливами. Онъ состоитъ изъ стержня AB (черт. 117), къ которому—внизу прикрѣпленъ крючекъ C , а вверху—винтъ D , проходящій черезъ неподвижно-укрѣпленную обойму E . При вращеніи гайки F стержень скользитъ въ направляющей GH при посредствѣ поперечины K . На стержнѣ прикрѣпленъ масштабъ съ дѣленіями въ 0,01 ф., нониусъ L даетъ возможность отсчитывать 0,001 ф. Весь приборъ привинчивается къ деревянной рейкѣ, прикрѣпляемой къ неподвижной стойкѣ, сваѣ и т. п. Въ текучей водѣ для лучшаго отсчета необходимо помѣщать приборъ въ бездонный ящикъ, въ боковыхъ стѣнкахъ котораго должны быть просверлены отверстія.

Что касается высоты воды H_w **) на порогѣ водослива, то введеніе ея въ формулу для опредѣленія Q , какъ это дѣлалъ *Лебро* (стр. 161), пока не дало никакихъ положительныхъ результатовъ. Поэтому измѣреніе ея не представляетъ практическаго интереса; самое опредѣленіе H_w весьма затруднительно.

Извѣстный ученый и инженеръ *Навье* ***) (1785—1836) опредѣлилъ при помощи принципа наименьшаго дѣйствія, что

$$\frac{H_w}{H} = 0,725$$

Впослѣдствіи *Брашманъ* ****), основываясь на томъ-же принципѣ, нашелъ, что

$$\left(\frac{H - H_w}{H} \right)^{3/2} = \frac{2}{3} \frac{L}{L + a}$$

*) *Francis. Lowell Hydraulic Experiments.*

**) Такъ какъ высота воды на порогѣ водослива въ различныхъ точкахъ его—различна (черт. 107 *В*), то здѣсь подъ H_w подразумѣвается *средняя* высота.

***) *Rühlmann. Hydromechanik*, S. 296. О принципѣ наименьшаго дѣйствія см. напр. *Duhamel. Cours de mécanique*, 3-me éd. t. second, p. 215.

****) См. выноски на стр. 161.

гдѣ L —ширина канала подводящаго воду къ водосливу и a —длина водослива.

Однако опыты *Понсле* и *Лебро*, *Лебро* и *Кастеля* не подтвердили ни первой, ни второй зависимости между H и H_w ; наоборотъ, они показали, что

$$\frac{H - H_w}{H}$$

т. е. относительное пониженіе воды на порогѣ *увеличивается съ увеличеніемъ длины водослива и съ уменьшеніемъ напора H* . Эта послѣдняя зависимость видна довольно ясно изъ слѣдующей таблицы, относящейся къ водосливу изслѣдованному *Понсле* и *Лебро* длиною 0,656 ф. и съ полнымъ сжатіемъ струи.

H	H_w	$H - H_w$	$\frac{H - H_w}{H}$
0,682	0,627	0,055	0,080
0,595	0,544	0,052	0,086
0,535	0,485	0,050	0,094
0,372	0,333	0,040	0,107
0,362	0,323	0,039	0,108
0,338	0,298	0,039	0,117
0,198	0,169	0,030	0,151
0,179	0,151	0,028	0,156
0,146	0,121	0,026	0,175
0,107	0,084	0,023	0,212
0,0958	0,0755	0,020	0,212
0,0771	0,0577	0,019	0,252

Увеличеніе относительнаго пониженія съ уменьшеніемъ напора особенно значительно при *неполномъ* сжатіи съ низу и съ боковъ, такъ напр.

$$\begin{aligned} \text{при } H = 0,837 \text{ ф.} \quad \frac{H - H_w}{H} &= 0,398 \\ \text{" } H = 0,0702 \text{ ф.} \quad \frac{H - H_w}{H} &= 0,481 \end{aligned}$$

что слѣдуетъ приписать гидравлическимъ сопротивленіямъ отъ тренія о стѣнки и дно, а также отъ сжатія струи при входѣ въ каналъ.

Вліяніе *длины* водослива подтверждается между прочимъ слѣдующими данными взятыми изъ опытовъ *Лебро*:

$$\begin{aligned} \text{при } \alpha = 1,97 \text{ ф.} \quad H = 0,349 \text{ ф.} \quad \frac{H - H_w}{H} &= 0,177 \\ \text{" } \alpha = 0,066 \text{ ф.} \quad H = 0,533 \text{ ф.} \quad \frac{H - H_w}{H} &= 0,005 \end{aligned}$$

Д. Движеніе жидкости черезъ отверстія при перемѣнномъ горизонтѣ.

§ 38. *Гипотеза относительно скорости вытеканія при перемѣнномъ горизонтѣ. Выводъ общаго дифференціального уравненія для скорости вытеканія. Случаи установившагося движенія.*

Въ предыдущихъ §§ разсматривались случаи движенія жидкости черезъ отверстія въ предположеніи, что горизонтъ въ сосудѣ не измѣняется. Переходимъ теперь къ случаямъ движенія жидкости при перемѣнномъ горизонтѣ. Задачи сюда относящіяся обыкновенно рѣшаются на основаніи гипотезы, что скорость вытеканія для каждаго момента времени равна скорости установившагося движенія, соотвѣствующей тому же положенію горизонта. Такой способъ рѣшенія въ большинствѣ случаевъ, встрѣчающихся въ практикѣ, даетъ результаты достаточно точные; но въ другихъ случаяхъ примѣненіе его можетъ привести къ ошибочнымъ заключеніямъ. Поэтому приводимъ здѣсь рѣшеніе вопроса о движеніи жидкости при перемѣнномъ горизонтѣ, основывающееся на уравненіяхъ гидродинамики *); оно

*) См. *Grashof*. Theoretische Maschinenlehre. 1 B. S. 668.
Duhamel. Cours de mécanique, 3-me ed. t. second, p. 294.

даетъ возможность не только судить о степени точности вышеупомянутой гипотезы но также придти къ вѣрнымъ выводамъ и въ тѣхъ случаяхъ, когда эта гипотеза недопустима.

Пусть жидкость вытекаетъ черезъ отверстія CD (черт. 118) въ *дно* сосуда, продольная ось котораго вертикальна, а поперечныя сѣченія измѣняются постепенно и весьма мало, такъ что можно предположить, что для частицъ какого-либо поперечнаго сѣченія AB скорости имѣютъ только одну составляющую w параллельную оси Z , другія-же двѣ u и v равны каждой нулю. Ось Z —направимъ вертикально вверхъ, а плоскость XU —совмѣстимъ съ плоскостью сжатаго сѣченія струи GH ; для упрощенія изслѣдованія мы принимаемъ положеніе этого сѣченія неизмѣннымъ.

Такъ какъ проекціи вѣншей силы отнесенной къ единицѣ массы суть: $X=0$, $Y=0$ и $Z=-g$, то Эйлеровы уравненія (стр. 34) дадутъ

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 & \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= -g - \left(\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \dots \dots (103) \end{aligned}$$

къ нимъ, согласно сказанному въ §10, слѣдуетъ присоединить уравненія неразрывности (стр. 37), изъ которыхъ получается:

$$\rho = \text{постоянно} \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Последнее уравненіе было-бы справедливо, если-бы предположеніе, что $u=0$ и $v=0$, было вполнѣ точно; но такъ какъ поперечныя сѣченія сосуда измѣняются, хотя и мало, то упомянутое предположеніе только приблизительно. Поэтому условіе неразрывности массы удобнѣе выразить равенствомъ расходовъ напр. черезъ сѣченія AB и GH , согласно основнымъ гипотезамъ гидравлики (§16).

Обозначая площади сѣченій AB и GH черезъ O и Ω , а скорости имъ соотвѣтствующія черезъ w и V , получимъ

$$Ow = \Omega V \quad \text{или} \quad w = \frac{\Omega}{O} V \dots \dots (103a)$$

Имѣя въ виду, что

$$w = f(t, z) \quad V = \varphi(t) \quad O = \psi(z) \quad \Omega = \alpha\omega = \text{постоянно},$$

найдемъ дифференцированиемъ ур. (103a) по t и z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\Omega}{O} \frac{dV}{dt} \quad \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\Omega V}{O^2} \frac{dO}{dz}$$

Тогда ур. (103) приметъ слѣдующій видъ:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g - \left(\frac{\Omega}{O} \frac{dV}{dt} - \frac{\Omega^2 V^2}{O^3} \frac{dO}{dz} \right)$$

Един. давленіе p , представляющее вообще функцію x , y , z и t , въ данномъ случаѣ зависитъ только отъ z и t , такъ какъ изъ ур. (103) слѣдуетъ, что p не зависитъ отъ x и y . Предполагая, что t *постоянно* и интегрируя послѣднее уравненіе по z , найдемъ законъ измѣненія p отъ z , т. е. опредѣлимъ давленіе p для различныхъ поперечныхъ сѣченій сосуда, соотвѣтствующее данному моменту времени t . Такимъ образомъ получимъ для един. давленія p въ какой-либо точкѣ сѣченія AB :

$$\frac{p}{\rho} = -g\zeta - \frac{\Omega}{O} \frac{dV}{dt} \int \frac{dz}{O} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega V}{O} \right)^2 + C \quad . \quad (104)$$

здѣсь C —не зависитъ отъ z но можетъ зависѣть отъ t .

Назначая ζ и z предѣлами въ интегралѣ

$$\int \frac{dz}{O}$$

опредѣлимъ C по условію, чтобы для свободной поверхности EF ед. давленіе $p = p_0$ и $O = \Omega_0$, тогда

$$\frac{p_0}{\rho} = -g\zeta - \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega V}{\Omega_0} \right)^2 + C$$

такъ что C зависитъ дѣйствительно отъ времени, потому что ζ , V и Ω_0 суть функція t .

Тогда для ед. давленія p въ какой-либо точкѣ сѣченія AB найдемъ окончательно

$$\frac{p_0 - p}{\Delta} = -(\zeta - z) + \frac{\Omega}{g} \frac{dV}{dt} \int_z^{\cdot} \frac{dz}{O} + \frac{\Omega^2 V^2}{2g} \left(\frac{1}{O^2} - \frac{1}{\Omega_0^2} \right) \dots (104a)$$

Если требуется опредѣлить единичное давленіе въ сжатомъ сѣченіи GH , то въ этомъ уравненіи нужно очевидно положить $z = 0$, а площадь O замѣнить черезъ Ω ; тогда получится:

$$\frac{p_0 - p}{\Delta} = -\zeta + \frac{\Omega}{g} \frac{dV}{dt} \int_0^{\cdot} \frac{dz}{O} + \frac{V^2}{2g} \left(1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_0^2} \right) \dots (105)$$

здѣсь p обозначаетъ ед. давленіе въ сѣченіи GH .

Выраженіе (105) и есть искомое дифференціальное уравненіе для скорости вытеканія V . Изслѣдуемъ его сперва въ двухъ слѣдующихъ случаяхъ установившагося движенія, а затѣмъ въ § 39 дадимъ общее рѣшеніе этого уравненія.

а) Если разсматриваемое движеніе — *установившееся*, то

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

и предыдущее уравненіе даетъ извѣстную формулу Бернулли (ур. 38, стр. 66):

$$V = \sqrt{\frac{2g \left(\zeta + \frac{p_0 - p}{\Delta} \right)}{1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^2}}$$

б) Когда движеніе начинается и совершается при одномъ и томъ-же положеніи горизонта EF , то скорость вытеканія V въ весьма короткое время отъ начала вытеканія достигаетъ величины соотвѣтствующей установившемуся движенію (стр. 67).

Дѣйствительно, обозначая

$$m = \int_0^{\cdot} \frac{dz}{O} \qquad \beta^2 = 1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_0^2}$$

$$k^2 = 2g \left(z + \frac{\rho_0 - \rho}{\Delta} \right)$$

получимъ изъ ур. (105)

$$dt = \frac{2m\Omega dV}{k^2 - \beta^2 V^2}$$

Но

$$\frac{1}{k^2 - \beta^2 V^2} = \frac{1}{2k} \left(\frac{1}{k - \beta V} + \frac{1}{k + \beta V} \right)$$

а потому интегрированіе предыдущаго равенства даетъ:

$$t = \frac{m\Omega}{k\beta} \lg. nat. \frac{1}{C} \left(\frac{k + \beta V}{k - \beta V} \right)$$

Постоянную C опредѣлимъ, полагая, что $V=0$ при $t=0$; тогда будетъ $C=1$. Рѣшая это уравненіе по V , получимъ:

$$V = \frac{k}{\beta} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{k\beta t}{m\Omega}}}{1 + e^{-\frac{k\beta t}{m\Omega}}} \dots \dots \dots (106)$$

Скорость w для какого-либо сѣченія AB опредѣлится затѣмъ по ур. (103a).

Изъ ур. (106) видно, что при Ω достаточно *маломъ* сравнительно съ поперечными сѣченіями сосуда показатель степени

$$\frac{k\beta t}{m\Omega}$$

съ увеличеніемъ времени дѣлается настолько большимъ, что количество

$$e^{-\frac{k\beta t}{m\Omega}}$$

весьма близко къ нулю; слѣдов. V съ увеличеніемъ t весьма быстро подходитъ къ предѣльной величинѣ, соответствующей скорости установившагося движенія:

