

U 181  
1899

БИБЛИОТЕКА

**Н. А. АРТЛЕБЕНА**

*Отдѣленіе*

№

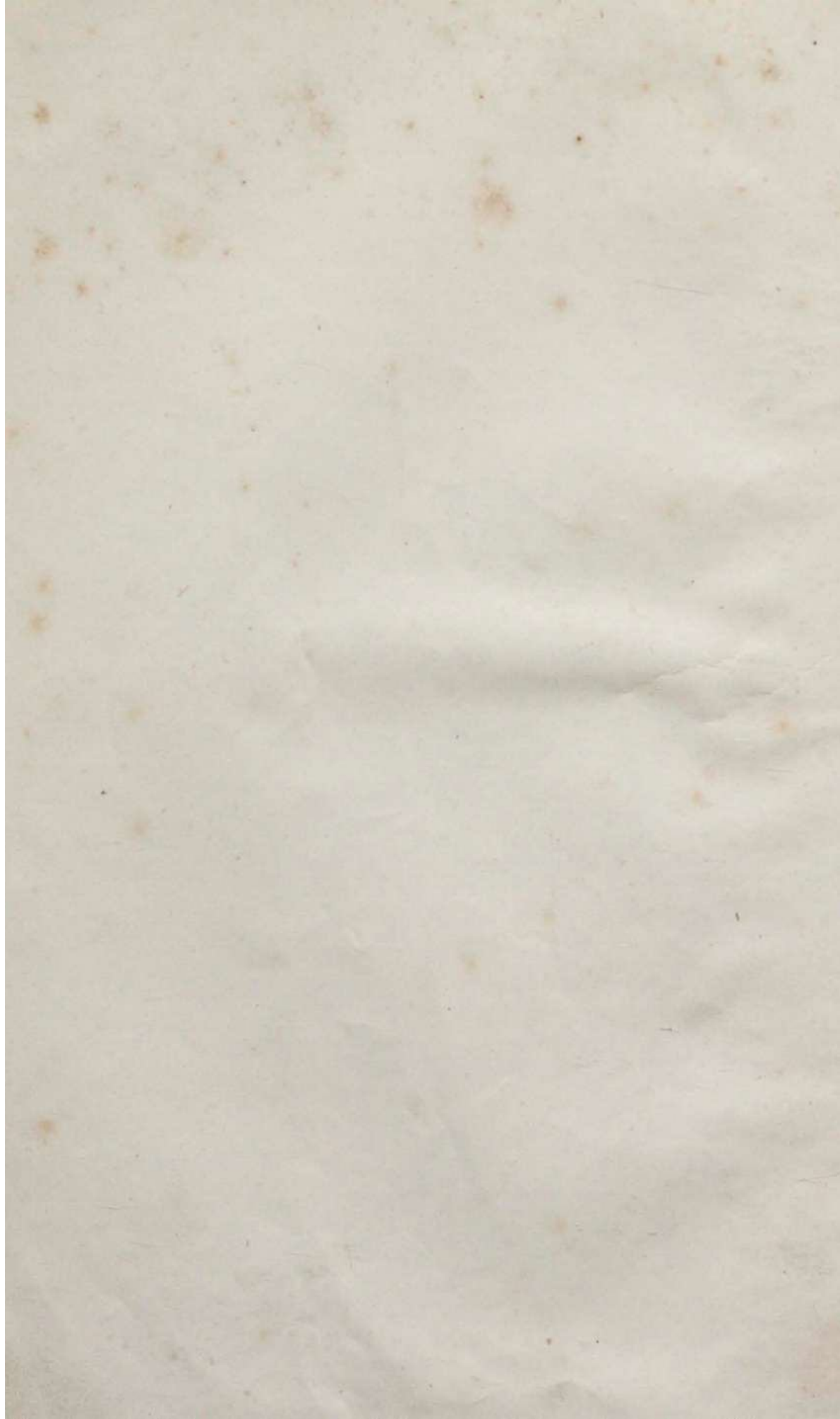
У 181  

---

1699



+





**ОСНОВАНІЯ ТЕОРІИ**

**ПАРОВЫХЪ МАШИИЪ И КОТЛОВЪ.**

~~2397~~



97

*Handwritten signature or scribble*

*CM*  
*3590*



У 181  
1699

N=15

621.1  
С32

**ОСНОВАНИЯ**  
**ТЕОРИИ**  
**ПАРОВЫХЪ МАШИИЪ И КОТЛОВЪ.**

ИНЖЕНЕРЪ-ТЕХНОЛОГА

**А. СЕРЕБРЕННИКОВА.**

1628

СЪ 68 ПОЛИТИПАЖАМИ ВЪ ТЕКСТЪ.

САНКТПЕТЕРБУРГЪ.

ВЪ ТИПОГРАФИИ КАРЛА ВУЛЬФА.

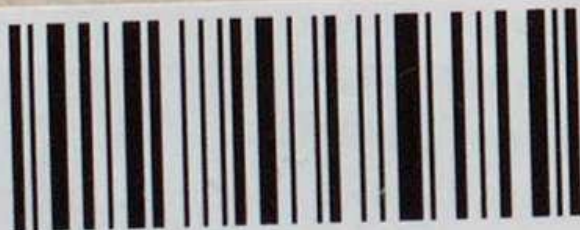
=  
1860.

OP

ПЕЧАТАТЬ ПОЗВОЛЯЕТСЯ.

съ тѣмъ, чтобы по отпечатаніи представлено было въ Ценсурный  
Комитетъ узаконенное число экземпляровъ. С. Петербургъ 31 декабря  
1859 года.

*Ценсоръ П. Новосильскій.*



2011123482



## ПРЕДИСЛОВІЕ.

---

Въ настоящее время наука о производствѣ работъ парами принадлежитъ къ числу знаній, возбуждающихъ живѣйшій интересъ. Дѣйствительно, едва ли какая другая наука, въ практическомъ отношеніи, сдѣлала въ такое короткое время подобные успѣхи, какъ употребленіе пара для всевозможныхъ приложеній.

Построеніе паровыхъ машинъ и котловъ, какъ искусство, доведено на заводахъ почти до совершенства; оттого литература паровыхъ машинъ богата описаніями и чертежами всякаго рода. Между множествомъ сочиненій, выходившихъ въ разное время, укажемъ для примѣра на сочиненія: Тредгольда (Tredgold), Годжа (Hodge), Стефенсона (Stephenson), Стюарта (Stuart), Жюльена и Батайля (Jullien et Bataille), также собранія чертежей машинъ Лебланка (Le Blanc), старшаго Арманго (Armengaud aîné) и друг.

Слѣдовательно въ способахъ къ изученію устройства пріемниковъ работы пара нѣтъ недостатка; но сочиненій, содержащихъ въ себѣ теоретическія изслѣдо-



ванія, пролагающія путь къ дальнѣйшему усовершенствованію, весьма мало. Читая разныя описанія машинъ, можно хорошо ознакомиться съ различными ихъ системами (знать ихъ классификацію), можно хорошо понимать все движеніе ихъ, можно даже изъ сравненія ихъ между собою составить болѣе или менѣе вѣрное сужденіе объ относительномъ ихъ достоинствѣ; наконецъ, скажемъ болѣе, можно и проектировать новыя машины, придавая имъ размѣры отдѣльныхъ частей по аналогіи, и — только. Но чтобы имѣть полное понятіе о существенныхъ свойствахъ двигателя, постигать законы дѣйствія его на пріемники, чтобы можно было опредѣлять работу, какую онъ способенъ доставить при данныхъ обстоятельствахъ, находить размѣры дѣйствующихъ частей машины, отъ которыхъ зависитъ большее или меньшее полезное дѣйствіе двигателя — для всего этого нужно знать тѣ начала, изъ которыхъ проистекаетъ все ученіе о паровыхъ машинахъ — весь кругъ сужденій, составляющихъ собою теорію употребленія пара, какъ двигателя.

— Всякая практическая наука развивается сравненіемъ выводовъ теоріи съ фактами, основанными на опытахъ и наблюденіяхъ. Последніе весьма важны въ томъ отношеніи, что они или подтверждаютъ положительность выводовъ умозрѣнія, или опровергаютъ ихъ.

— Между тѣмъ для рѣшенія нѣкоторыхъ вопросовъ о производствѣ работъ парами, по настоящее время, сдѣлано мало еще ученыхъ изслѣдованій, поэтому — то иные вопросы и рѣшаются только по приближенію.

— Мысль изобразить тѣ начала, которыя служатъ основаніемъ теоріи паровыхъ машинъ и ключемъ къ рѣше-



нію всѣхъ вопросовъ о движеніи и построеніи ихъ, была единственною причиною, по которой мы приступили къ написанію предлагаемаго сочиненія. Потребность подобнаго рода источниковъ ощутительна сама собою, тѣмъ болѣе, что постиженіе началъ науки, изображенныхъ въ ихъ истинномъ состояніи, только и можетъ руководить въ дальнѣйшемъ основательномъ изученіи и обработываніи этого предмета.

Главными и основными руководствами у насъ были:

*Traité de mécanique appliquée aux machines, par Poncelet. Bruxelles 1845..*

*Leçons de mécanique pratique, par A. Morin. Paris. 1846 (troisième partie).*

*Théorie des machines à vapeur, par Pambour. Paris 1844 (deuxième édition).*

Какъ матеріалы для разбора отдѣльныхъ вопросовъ служили статьи, помѣщаемыя въ разныхъ техническихъ журналахъ, какъ на примѣръ *the Engineer, Journal of arts, Repertory of Patent Inventions, Scientific American, Publication industrielle des machines, outiles etc par Armengaud aîné, ego же le Genie industriel, Dingler's Polytechnisches Journal, Polytechnisches Centralblatt* и друг.

Понселе (Poncelet), бывшій профессоръ артиллерійскаго училища въ Метцѣ, нынѣ членъ Парижской Академіи Наукъ, и Моренъ (A. Morin), офицеръ французской службы, ученикъ и сотрудникъ Понселе, сдѣлали довольно для науки. Понселе былъ первый, составившій формулы для вычисленія работы паровой машины при данныхъ ея размѣрахъ и при извѣстныхъ условіяхъ движенія. Моренъ развилъ многіе вопросы о *движеніи*



паровыхъ машинъ. Означенное сочиненіе его содержитъ въ себѣ много опытовъ, произведенныхъ имъ съ цѣлію опредѣлить нѣкоторые законы движенія пара и количества дѣйствія паровыхъ машинъ. После высказалъ много оригинальныхъ идей, не принадлежащихъ никому другому, какъ напримѣръ, *квадратура скорости мотыля*, теорія маховаго колѣса для машинъ двойнаго дѣйствія и проч.

Созданіемъ теоріи дѣйствія паровыхъ машинъ наука обязана графу Памбуру (Pambour), обнародовавшему свой первый трудъ въ 1835 году. Онъ далъ ученію о производствѣ работъ парами новое направленіе, вывелъ общую зависимость между всѣми вопросами, входящими въ область паровыхъ машинъ, опредѣлилъ условія наивыгоднѣйшаго дѣйствія пара и проч., и съ помощію опытовъ, изъ которыхъ многіе были произведены имъ самимъ, подтвердилъ многія заключенія, выводимыя его теоріею.

Но онъ не успѣлъ дать ей полнаго примѣненія въ дѣлѣ построенія и употребленія паровыхъ машинъ, такъ что многіе вопросы, и именно объ опредѣленіи надлежащихъ размѣровъ существенныхъ частей машины, не рѣшены удовлетворительно. Къ крайнему сожалѣнію незабвенный трудъ Памбура не имѣлъ скоро послѣдователей, по той причинѣ, что новыя идеи, хотя бы онѣ были и истинныя, не скоро вступаютъ въ права свои и должны первое время всегда уступать старымъ понятіямъ, съ которыми свыклись, и которыя по-этому считаются достовѣрными. Доказательствомъ этому можно привести то, что послѣ открытія теоріи Памбура и по настоящее время нѣтъ ни одного сочиненія (по



крайней мѣрѣ, сколько намъ извѣстно), свидѣтельствующаго о дальнѣйшемъ развитіи и обработываніи этой теоріи. Прибавимъ еще къ этому, что являются даже такіе писатели, которые съ полнымъ убѣжденіемъ проповѣдуютъ, что Памбуръ представилъ теорію паровыхъ машинъ неясно, неотчетливо, и что въ изложеніи ея впалъ въ ложный кругъ сужденій!!

Что теорія паровыхъ машинъ подвигается къ совершенному ея развитію весьма тихими шагами—причиною этому недостаточное число произведенныхъ опытовъ и наблюденій. Какъ ни странно покажется съ перваго взгляда, что теоретическія заслуги ученыхъ не находятъ, по-крайней-мѣрѣ, не находили теплаго сочувствія со стороны тѣхъ, кто имѣетъ возможность дополнять трудъ умозрѣній непосредственными повѣрками ихъ на дѣлѣ, и тѣмъ самымъ содѣйствовать развитію науки; какъ ни странно, повторяемъ, это явленіе, все-таки оно справедливо. Началомъ этого зла была взаимная вражда, которая, въ эпоху возрожденія прикладныхъ промышленныхъ наукъ, долгое время раздѣляла ученыхъ и практиковъ. Недовѣріе и невниманіе послѣднихъ къ трудамъ первыхъ, которые въ самомъ началѣ не могли удовлетворять всѣмъ случайнымъ вопросамъ практики, произвело современемъ совершенное отчужденіе обѣихъ сторонъ, что и имѣло сильное вліяніе на состояніе науки. Практическая сторона также мало выиграла отъ этой вражды, и всѣ усовершенствованія въ построеніи машинъ были только слѣдствіями попытокъ, догадокъ, или дѣломъ случая. На сколько пострадала наука — это можно замѣтить даже изъ недостатка многихъ фактическихъ данныхъ, необходимыхъ въ примѣ-



неніи формуль теоріи къ рѣшенію вопросовъ. Нельзя не согласиться, что есть обстоятельства, входяція въ какой-нибудь вопросъ, которыя, по своей неуловимости, никакъ не могутъ быть опредѣлены умозрѣніемъ, и дѣлаются осязательными только послѣ непосредственныхъ наблюденій надъ самимъ процессомъ дѣйствія. Между тѣмъ, эти обстоятельства, будучи введены въ кругъ сужденій съ надлежащею точностію, могли бы дать ключъ къ дальнѣйшимъ выводамъ. Въ этомъ-то и состоитъ цѣль послѣдовательныхъ научныхъ завоеваній. Если же при опредѣленіи какого-нибудь вопроса нѣтъ фактическихъ данныхъ, тогда онъ остается не вполне развитымъ или рѣшается приблизительно, по аналогіи. Въ изложеніи теоретической части науки о паровыхъ машинахъ, мы встрѣчаемъ на каждомъ шагу подобныя недоконченности. Возьмемъ, на примѣръ, самый главный вопросъ о дѣйствіи паровыхъ машинъ — степень ихъ полезнаго дѣйствія. Не смотря на то, что вопросъ этотъ въ наукѣ о производствѣ работъ парами первостепенной важности, онъ все-таки не подверженъ еще строгому анализу, и хотя существуютъ уже нѣкоторые коэффициенты, найденные для многихъ машинъ непосредственно произведенными надъ ними опытами; но эти результаты неопредѣленны, потому-что неизвѣстно, при какихъ обстоятельствахъ опыты были произведены и на основаніи какихъ указаній, во-вторыхъ, они сбивчивы, потому-что опытамъ подтверждены были такія системы, которыя теперь вовсе неупотребительны. Мы могли представить въ предлагаемомъ нами сочиненіи только результаты опытовъ Морена, который въ свое время, дѣйствительно, много трудился надъ



опредѣленіемъ дѣйствительной работы паровыхъ машинъ. Эти опыты принадлежатъ времени около 16—20 лѣтъ тому назадъ, и слѣдовательно результаты ихъ не могутъ быть примѣнимы, безъ исправленій, къ устройству современныхъ паровыхъ машинъ; новыхъ опытовъ, которые бы обнаруживали степень совершенствованія устройства новѣйшихъ машинъ, мы не имѣемъ, и потому затрудняемся въ точномъ рѣшеніи вопросовъ, касающихся разсматриваемаго предмета. То же самое можно сказать и о паровыхъ котлахъ, и въ такой же степени полноты опредѣлено треніе паровыхъ машинъ, представляемое весьма удачно теоріею Памбура; много есть и другихъ вопросовъ въ теоріи производства работъ парами, требующихъ еще строгихъ изслѣдованій.

Все это зависитъ отъ того, что въ производительной массѣ практическихъ спеціалистовъ вообще мало еще распространены теоретическія свѣдѣнія, которыя могли бы доставить наибольшую пользу. И дѣйствительно, что можетъ такъ хорошо и такъ основательно руководить насъ, какъ не богатство основныхъ понятій, вѣрно намъ переданныхъ и въ точности нами усвоенныхъ? Изъ какихъ источниковъ мы можемъ составить безъ ошибки или неудачи планъ къ усовершенствованію или къ исправленію того или другаго предмета, если достаточно точные даже очевидные факты доказываютъ несовершенство существующаго? Разсматривая причины хорошихъ или дурныхъ результатовъ, доставляемыхъ даннымъ устройствомъ какого бы ни было механизма, и, подвергая его умственному анализу, не создаемъ ли мы теоріи, на которой уже основываемъ проектъ



преобразованій въ этомъ устройствѣ. Развивая этимъ путемъ отдѣльные вопросы, составляютъ потомъ, чрезъ послѣдовательное ихъ обсужденіе, цѣлый кругъ или область понятій, которыя и слагаются въ теорію.

Предлагая публикѣ первый опытъ въ технической литературѣ, по избранному нами предмету, мы надѣемся на снисходительность лицъ, знающихъ этотъ предметъ спеціально, и понимающихъ все трудности и почти неизбежные недостатки. При этомъ, считаемъ долгомъ изъяснить, что не приписываемъ себѣ ничего въ дѣлѣ развитія или обогащенія науки новыми изслѣдованіями; трудъ нашъ ограничивается только совокупленіемъ отдѣльныхъ ученій, высказанныхъ по сіе время разными писателями и техниками о томъ или другомъ вопросѣ. Мы старались изложить ихъ въ логической послѣдовательности, дать каждой отдѣльной мысли свое мѣсто въ ряду заданной себѣ темы, и только. Съ такимъ настроеніемъ, мы ограничились на первый разъ изложеніемъ только общихъ началъ (*éléments*) науки о паровыхъ машинахъ, независимо отъ ихъ спеціальныхъ назначеній. По-мѣрѣ развитія у насъ искусства построенія машинъ и котловъ вмѣстѣ съ ихъ употребленіемъ, явится и потребность въ изученіи этого предмета; тогда можно заняться разработываніемъ отдѣльныхъ теорій дѣйствія машинъ паровозныхъ, пароходныхъ, водокачальныхъ и проч., въ которыхъ существуютъ еще особенныя условія наивыгоднѣйшаго дѣйствія двигателя, смотря по назначенію.

Англичане повсюду ввели въ промышленность движущую силу пара, развили производство построенія машинъ и котловъ до высокой степени совершенства



и приобрѣли въ практическомъ отношеніи заслуженную похвалу, но они менѣе другихъ занимались развитіемъ и разработываніемъ теоріи. Сочиненіе «*Artisan Club*», изданное въ Лондонѣ въ 1846 году, совершенно характеризуетъ эмпирической духъ англійскихъ инженеровъ и строителей машинъ. Оно преисполнено формулами, таблицами и правилами для опредѣленія размѣровъ разныхъ частей паровыхъ машинъ и котловъ въ разныхъ случаяхъ ихъ употребленія. Безспорно, что подобныя сочиненія приносятъ существенную пользу, какъ руководства при исполненіи построеній; но они не открываютъ никакого пути къ дальнѣйшимъ усовершенствованіямъ пріемниковъ работы двигателя и не развиваютъ никакихъ понятій о законахъ дѣйствія его.

Между литературными явленіями по части изложенія теоретическихъ началъ науки о производствѣ работъ парами, едва ли не первое мѣсто занимаетъ, какъ руководство, сочиненіе Вейсбаха (*Julius Weisbach*), профессора Саксонской Королевской Горной Академіи во Фрейбергѣ: «*Lehrbuch der Ingenieur und Maschinen-Mechanik*». Впрочемъ, оно не принадлежитъ къ числу оригинальныхъ, потому что авторъ не высказываетъ ни одного новаго начала, основаннаго на собственныхъ изслѣдованіяхъ.

На отечественномъ языкѣ мы имѣемъ еще мало сочиненій, рассуждающихъ о дѣйствіи паровыхъ машинъ и законахъ употребленія пара, а еще менѣе такихъ, на которыя можно бы было указать, какъ на заслуживающія особаго вниманія.

Будемъ надѣяться, что съ распространеніемъ теоре-



тическихъ знаній между тѣми, кто имѣеть возможность изучать предметъ на дѣлѣ, кто могъ бы осуществлять указанія науки въ дѣйствительныхъ ея приложеніяхъ, наука достигнетъ той степени развитія, при которой и можетъ принести всю ожидаемую отъ нея пользу.

*А. Сребенниковъ*

С. Петербургъ. Декабрь 1859 г.



# ОСНОВАНІЯ ТЕОРІИ ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ И КОТЛОВЪ.

---

§ 1. Парь, который, безспорно, между всѣми движителями, употребляемыми для производства механическихъ работъ, занимаетъ первое мѣсто, обладаетъ въ наибольшей степени способностью *разширяться*, и на этомъ—то его свойствѣ, которымъ онъ превосходитъ всѣ газообразныя тѣла, основано его употребленіе. Сверхъ того, его возможно употреблять вездѣ и въ размѣрахъ какихъ только угодно, независимо отъ внѣшнихъ обстоятельствъ. Оттого этотъ движитель и получилъ повсемѣстное и разнообразное примѣненіе не только въ промышленности, но и въ другихъ областяхъ общественныхъ потребностей.

Свойства движителей имѣютъ такое вліяніе на устройство пріемниковъ ихъ работы, что для cadaго изъ нихъ можетъ быть найдено только извѣстное устройство пріем-



ника, соответствующее условіямъ наивыгоднѣйшаго дѣйствія движущей силы.

Такимъ образомъ, заключая паръ въ такое пространство, котораго объемъ могъ бы измѣняться отъ вліянія разширенія, можно произвести *перемѣщаемость* или всѣхъ стѣнокъ, его заключающихъ, или одной изъ нихъ. Последній случай, какъ наипростѣйшій, и примѣненъ къ устройству паровыхъ машинъ. Дѣйствительно, паръ, входя въ цилиндръ паровой машины, производитъ перемѣщеніе находящагося въ немъ поршня, который собственно и воспринимаетъ непосредственное дѣйствіе пара. Поршень, будучи удобоподвиженъ, имѣетъ, сверхъ того, такую форму, что представляетъ пару большую или мѣншую поверхность для дѣйствія. Такимъ образомъ, въ устройствѣ и формѣ этой части соблюдены оба элемента механической работы всякой силы: и *давленіе*, состоящее здѣсь изъ суммы частныхъ давленій пара на всю площадь поршня, и *пространство*, которое поршень проходитъ отъ дѣйствія этой силы.

Перемѣщеніе поршня можно вообразить себѣ или непрерывнымъ — по окружности круга, или возвратнымъ — по прямой линіи. Современное устройство паровыхъ машинъ представляетъ только второй случай. Путь, пробѣгаемый поршнемъ въ каждое возвратное движеніе, называется его ходомъ или размахомъ. Чтобы каждый разъ дать поршню толчокъ для обратнаго хода, въ устройство паровыхъ машинъ введенъ особый механизмъ, дѣйствіемъ котораго паръ впускается въ цилиндръ попеременно то по одну, то по другую сторону, и чтобы дать возможность новому пару, текущему изъ котла въ цилиндръ, во время движенія поршня, дѣйствовать и производить работу, выпускаютъ *мятые* пары, работавшіе во время предыдущаго хода, въ атмосферу



или охлаждають ихъ. Слѣдовательно, дѣйствіе пара въ паровыхъ машинахъ соединено съ его потерей, которая должна быть вознаграждаема образованіемъ новыхъ паровъ. Для этого паровыя машины снабжены всегда особымъ генераторомъ, назначеннымъ для приготовленія паровъ — котломъ или паровикомъ. Изъ этого объясненія видна между этими обоими отправлениями тѣсная зависимость, — и зависимость эта проявляется въ сильномъ вліяніи того и другаго изъ нихъ на *полезное дѣйствіе* пара, которое измѣряется степенью потребленія теплорода, доставляемаго въ практикѣ горѣніемъ топлива. Чѣмъ паровой котель болѣе производитъ паровъ, при извѣстномъ потребленіи горючаго матеріала, и чѣмъ эти пары производятъ болѣе полезное дѣйствіе, работая посредствомъ пріемника, тѣмъ для данной работы машина будетъ потреблять наименьшее количество пара и котель будетъ расходовать наименьшее количество топлива.

Обстоятельства употребленія въ промышленности пара, какъ двигателя, часто далеко не удовлетворяютъ условіямъ наивыгоднѣйшаго его дѣйствія и отъ того, въ какой степени выполнимы эти условія, происходитъ, что въ разныхъ случаяхъ примѣненія тотъ же двигатель, при тѣхъ же физическихъ его свойствахъ, доставляетъ не одно и то же полезное дѣйствіе.

Разбирая теорію дѣйствія пара, какъ двигателя, не слѣдуетъ забывать тѣхъ обстоятельствъ, которыя дѣлаютъ приложеніе того или другаго вывода теоріи въ нѣкоторыхъ случаяхъ или невозможнымъ, или, по крайней мѣрѣ, трудно примѣнимымъ въ исполненіи; они показываютъ, въ какой степени полезное дѣйствіе потребляемаго топлива можетъ быть достигнуто при данномъ назначеніи двигателя и данныхъ условіяхъ его дѣйствія.



§ 2. И такъ производство работъ парами состоитъ изъ двухъ операцій: приготовленія паровъ и дѣйствія ихъ на ихъ пріемники. Первое совершается въ паровыхъ котлахъ, второе въ паровыхъ машинахъ. Поэтому предметъ изученія работъ парами естественнымъ образомъ состоитъ изъ двухъ отдѣльныхъ категорій: теоріи дѣйствія паровыхъ машинъ и теоріи производства паровъ.

Паровыя машины должны быть разсматриваемы съ двухъ точекъ зрѣнія: онѣ, какъ пріемники работы пара, передаютъ *дѣйствіе двигателя* исполнительнымъ орудіямъ, и должны, передавая эту работу, имѣть такое движеніе, какого требуютъ условія наивыгоднѣйшаго дѣйствія движущей силы и скорость исполнительныхъ орудій. Отъ этого двусторонняго взгляда на паровыя машины произошло и двустороннее изученіе ихъ устройства и дѣйствія, для достиженія тѣхъ началъ, коими обусловливается наисовершенное употребленіе двигателя. Въ первыхъ двухъ главахъ у насъ изложено ученіе о паровыхъ машинахъ и въ каждой съ особой точки зрѣнія.

Производство паровъ и ихъ охлажденіе составляютъ программу третьей главы. Здѣсь мы, главнымъ образомъ, старались показать зависимость между степенью развитія теплоты, доставляемой горѣніемъ, и процессомъ парообразованія, и потомъ разъяснили вліяніе устройства котловъ съ ихъ топками на каждое изъ этихъ упомянутыхъ обстоятельствъ порознь и вмѣстѣ. Это изложеніе составило цѣлую теорію, которая можетъ дать новыя идеи къ дальнѣйшему усовершенствованію устройствъ паровыхъ котловъ. Представляя особенное явленіе въ дѣйствіи паровиковъ — взрывы разобраны въ отдѣльной главѣ, какъ предметъ самостоятельный и не имѣющій никакой связи съ вышеизло-



женными условіями дѣйствія котловъ. Вообще много было объясненій по этому предмету, но всеѣ они имѣли основною мыслію одно и то же мнѣніе, которое въ особенности хорошо высказано американскимъ инженеромъ Перкинсъ. Въ новѣйшее время нѣкто Галль (въ Соединенныхъ Штатахъ) сообщилъ много новыхъ идей, которыми переработалъ и разъяснилъ теорію *взрывовъ въ паровыхъ котлахъ*, такъ что съ именами этихъ двухъ личностей соединена основа ученія объ этомъ предметѣ.

Въ концѣ сочиненія приложена исполнительная сторона теоріи въ дѣлѣ построенія пріемниковъ работы пара. Хотя такое прибавленіе и составляетъ нѣкоторое уклоненіе отъ темы общаго изложенія, но замѣтимъ, что рѣшеніе различныхъ вопросовъ объ опредѣленіи *динамическихъ* размѣровъ машинъ и ихъ генераторовъ, то—есть такихъ размѣровъ, отъ которыхъ зависитъ динамическое достоинство пріемника двигателя, составляетъ почти *прямое* практическое примѣненіе теоріи. Всякое подобное знаніе должно проявляться въ дѣйствительныхъ нашихъ работахъ, и поэтому изученіе излагаемой здѣсь науки должно имѣть едва ли не непремѣнною цѣлію постепенное дальнѣйшее усовершенствованіе конструкціи и дѣйствія механическихъ двигателей (*машинъ—двигателей*), составляющихъ непосредственныя орудія той или другой движущей силы. Въ природѣ по настоящее время найдены примѣнимыми къ производству механическихъ работъ только слѣдующія физическія силы: мышечная сила животныхъ, теплородъ, сила тяжести и электричество. Какъ ни совершенны законы дѣйствія этихъ силъ, какъ ни интересны явленія, ими производимыя; но, примѣняя ихъ къ нашимъ пользамъ, мы не



всегда, даже рѣдко пользуемся полнотою этого совершенства, и ясно обнаруживаемъ неполноту нашей научности.

Къ истинѣ, то-есть вѣрному, безошибочному приложенію законовъ природы къ нашимъ работамъ, можно приблизиться *только* глубокимъ изученіемъ теоріи, сосредоточивающей въ себѣ взаимное вліяніе выводовъ умозрѣнія и фактовъ или данныхъ, доставляемыхъ дѣйствительными наблюденіями, опытностію или практическою научностію, изученіемъ не мертвымъ или отвлеченнымъ, а прилагая результаты его къ практическому исполненію. Въ этомъ отношеніи сдѣланное нами прибавленіе не отстываетъ отъ направленія всего изложенія и естественнымъ образомъ должно составлять какъ бы его *заключеніе*, изъясляющее видимую необходимость знаній, выработанныхъ трудами ученыхъ и техниковъ, показавшихъ истинное направленіе ихъ дѣятельности, и вмѣстѣ съ тѣмъ ту пользу, какую теорія должна доставить тамъ, гдѣ ея дѣйствительное вліяніе будетъ осуществлено.

---



## ГЛАВА I.

### ТЕОРІЯ ДѢЙСТВІЯ ПАРА ВЪ ПАРОВЫХЪ МАШИНАХЪ.

---

#### I. ГЛАВНЫЯ СВОЙСТВА ПАРА, КАКЪ ДВИЖИТЕЛЯ.

§ 3. Пары имѣютъ свойства газовъ, когда они *не насыщаютъ* занимаемого ими пространства; тогда ихъ упругость и плотность измѣняются по законамъ Мариотта и Гелюссака.

Пары, *насыщающіе* собою занимаемое ими пространство, отличаются отъ газовъ тѣмъ, что ихъ упругость и плотность невозможно увеличить, не увеличивъ въ то же время ихъ температуры.

Ибо, уменьшимъ ли мы объемъ пара, въ намѣреніи увеличить его упругость, или подвергнемъ его большому давленію, увидимъ, что и въ томъ и другомъ случаѣ часть пара осаждается въ капли, а упругость, и слѣдовательно также плотность остатка, останутся тѣ же самыя и тогда только измѣнятся, когда измѣнится его температура.



Такую упругость пара и соответствующую ей плотность, которая невозможно увеличить при данной температурѣ, называютъ *наибольшими*.

При употребленіи пара въ паровыхъ машинахъ, оба означенныя состоянія его имѣютъ мѣсто, то—есть пары, дѣйствуя въ цилиндрахъ паровыхъ машинъ, въ одномъ случаѣ насыщаютъ наполняемое ими пространство, въ другомъ — они дѣйствуютъ, какъ газъ. Образуюсь и находясь въ паровомъ котлѣ, пары, будучи въ соприкосновеніи съ водою, изъ которой они произошли, *всегда* насыщаютъ пространство внутри котла, и, слѣдовательно, упругость ея вмѣстѣ съ температурою, бывають въ котлѣ всегда *наибольшими* при дѣйствіи теплорода въ извѣстной степени; эта упругость и соответствующая ей температура въ этомъ случаѣ могутъ измѣниться только отъ вліянія теплорода на паробразование въ бѣльшей или меньшей степени. Въ такомъ же состояніи насыщенія пары бывають какъ при движеніи ихъ по паропроводнымъ трубамъ, такъ и въ цилиндрѣ, до тѣхъ-поръ, пока сообщеніе между симъ послѣднимъ и котломъ еще существуетъ; въ этомъ случаѣ пространство пароваго цилиндра, соединенное съ пространствомъ котла, есть какъ бы продолженіе его и слѣдовательно пары, входящія въ цилиндръ, также насыщаютъ пространство его, какъ это бываетъ и въ котлѣ.

Напротивъ того, если пары разъединены съ жидкостію, изъ которой они образовались, тогда они дѣйствуютъ какъ газы, и упругость ихъ измѣняется вмѣстѣ съ объемомъ, описываемымъ поршнемъ при его движеніи.

§ 4. *Зависимость между упругостію пара и его температурою.* Очевидно, что каждой температурѣ пара соответствуетъ особенная наибольшая упругость и плот-



ность, и, притомъ такъ, что между этими обстоятельствами существуетъ *постоянная* извѣстная зависимость, которая была изслѣдована учеными въ обширныхъ предѣлахъ, и выражена эмпирическими формулами. Изъ этихъ формулъ, въ которыхъ  $p$  означаетъ давленіе пара въ русскихъ фунтахъ на одинъ квадратный дюймъ, а  $t$  — число градусовъ по Реомюру, мы представимъ слѣдующія:

1. Соутерна:

$$p = 0,0548 + \left( \frac{37,01 + t}{67,85} \right)^{5,13}$$

$$t = 67,85 \sqrt[5,13]{p - 0,0548} - 37,01^\circ$$

2. Тредгольда:

$$p = \left( \frac{60 + t}{87,9} \right)^6$$

$$t = 87,9 \sqrt[6]{p} - 60^\circ$$

3. Памбура:

$$p = \left( \frac{58,14 + t}{86,76} \right)^6$$

$$t = 86,76 \sqrt[6]{p} - 58,14^\circ$$

4. Дюлона и Араго:

$$p = \left( \frac{31,841 + t}{64,0126} \right)^5$$

$$t = 64,0126 \sqrt[5]{p} - 31,841^\circ$$

(1)



5. «Artisan Club»

для упругостей отъ 1 до 24 атмосферъ:

$$p = \left( \frac{68 + t}{95,84} \right)^{6,42}$$

$$t = 95,84 p^{0,15576} - 68. \quad (1)$$

для упругостей ниже 1 атмосферы:

$$p = \left( \frac{92 + t}{119,81} \right)^{7,713}$$

$$t = 119,81 p^{0,12965} - 92.$$

Каждая изъ этихъ формулъ представляетъ отношеніе между  $p$  и  $t$  съ наибольшою точностію только въ нѣкоторыхъ предѣлахъ, ей соответствующихъ.

Формулу Соутерна употребляютъ, когда упругость пара ниже атмосферной; ея выводы тогда весьма мало разнятся отъ получаемыхъ непосредственно изъ опыта.

Формула Тредгольда пригодна, когда упругость пара измѣняется отъ одной до четырехъ съ половиною атмосферъ. Въ этихъ предѣлахъ ея наибольшее отклоненіе отъ опыта не превышаетъ 0,5 градусовъ по Реомюру. Между одною и тремя атмосферами она отдалается отъ опыта не болѣе, какъ на  $0^{\circ},2$  по Реомюру.

Наибольшее отклоненіе отъ опыта формулы Памбура, которая служитъ также между одною и четырьмя съ половиною атмосферами, менѣе  $0^{\circ},3$  по Реомюру. При  $4\frac{1}{2}$  атмосферахъ ея выводы совпадаютъ почти съ опытомъ и съ выводами изъ формулы Дюлона и Араго.

Формулу Дюлона и Араго употребляютъ между предѣ-



лами отъ 4 до 24 атмосферъ. Въ нѣкоторыхъ точкахъ она отдалается отъ опыта только на  $0^{\circ},13$ , а въ другихъ — на  $0^{\circ},5$  по Реомюру. Ея наименьшее отклоненіе отъ опыта соотвѣтствуетъ также высшему предѣлу. Посему, по мнѣнію Дюлона и Араго, она можетъ служить для опредѣленія температуры въ зависимости отъ упругости пара и наоборотъ, до пятидесяти атмосферъ. Наибольшая ошибка, они полагаютъ, не должна тогда превышать  $1^{\circ},25$  по Реомюру.

Упругость паровъ, приготовляемыхъ въ котлахъ для машинъ разныхъ системъ, измѣняется отъ  $1\frac{1}{3}$  до 6 и болѣе атмосферъ (\*).

Съ цѣлю повѣрить точность предложенныхъ формулъ (1) были сдѣланы нарочныя наблюденія для измѣренія дѣйствительной температуры пара. Ихъ можно найти въ *Mémoires de l'Académie de France* 1831, tome X, pages 220 et 231. Разность между температурами, полученными изъ наблюденій и вычисленными по формуламъ (1), самая малая.

§ 5. *Зависимость между объемами, упругостями и температурами паровъ* Полагаемъ, что данная масса пара, насыщая объемъ  $V$  при упругости  $p$  и температурѣ  $t$ , переходитъ къ объему  $V'$  и упругости  $p'$ , сохраняя ту же температуру  $t$ . Тогда по закону Мариотта

$$\frac{V}{V'} = \frac{p'}{p} \dots \dots \dots (\alpha)$$

---

(\*) Въ Россіи закономъ постановлено не употреблять паровыхъ машинъ, въ котлахъ которыхъ абсолютная упругость пара превышала бы 6 атмосферъ. Въ Англии и Америкѣ допускаются машины высокаго давленія, при упругости пара отъ 4 до 10 атмосферъ.



Предполагаемъ потомъ, что разсматриваемая масса пара отъ объема  $V$  и температуры  $t$  переходитъ къ объему  $V'$  и температурѣ  $t'$  сохраняя прежнюю упругость  $p$ . Тогда по закону Ге-Люссака

$$\frac{V}{V'} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'} \dots \dots \dots (\beta)$$

Помножая  $(\alpha)$  на  $(\beta)$ , имѣемъ

$$\frac{V}{V'} = \frac{p'}{p} \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'} \dots \dots \dots (2)$$

Эта формула можетъ служить для опредѣленія зависимости между объемами, упругостями и температурами данной массы пара и тогда, когда паръ, переходя изъ одного состоянія въ другое, остается всегда въ состояніи насыщения. Тогда  $p$  и  $p'$  должны означать только наибольшія упругости пара, соответствующія температурамъ  $t$  и  $t'$ .

§ 6. *Опредѣленіе плотности паровъ.* Точно также, если извѣстная масса паровъ  $\omega$ , занимая объемъ  $V_0$  при плотности  $\varepsilon_0$  перейдетъ къ нѣкоторому объему  $V$ , при которомъ плотность пара будетъ  $\varepsilon$ , то, такъ какъ вѣсъ пара въ обоихъ случаяхъ одинъ и тотъ же, т. е.  $\omega = \varepsilon_0 V_0 = \varepsilon V$ , получимъ

$$V : V_0 = \varepsilon_0 : \varepsilon \quad \text{или}$$

$$\varepsilon_0 : \varepsilon = p_0 (1 + \alpha t) : p (1 + \alpha t_0) \dots \dots \dots (\gamma)$$

откуда по извѣстнымъ  $\varepsilon_0$ ,  $p_0$  и  $t_0$  можно опредѣлять плотность пара для какой угодно его упругости и температуры. При рѣшеніи этихъ вопросовъ помощію пропорціи, плотность пара по данной его упругости и температурѣ опредѣляютъ обыкновенно въ зависимости отъ величинъ  $\varepsilon_0$ ,  $p_0$  и



$t_0$ , соответствующих *точкѣ кипѣнія* воды, и называемыхъ иногда начальными. Такимъ образомъ въ пропорціи (7) какая нибудь плотность пара  $E$  опредѣлится по уравненію

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{p (1 + \alpha t_0)}{p_0 (1 + \alpha t)} \dots \dots \dots (3)$$

въ зависимости отъ постоянныхъ величинъ:

$t_0 = 100^\circ$  Цельсія,  $p_0 = 16,28$  русск. фунтовъ на квадратный дюймъ и  $E_0 = 0,042$  фунта (вѣсъ кубическаго фута).

Такъ какъ множитель

$$\frac{\varepsilon_0 (1 + \alpha t_0)}{p_0}$$

для всѣхъ случаевъ остается одинъ и тотъ же и равенъ 0,003528; то для простоты въ вычисленіяхъ можно назвать эту численную величину чрезъ  $A$  и формула (3), опредѣляющая плотность пара, можетъ быть представлена проще:

$$\varepsilon = \frac{Ap}{1 + \alpha t}; \dots \dots \dots (4)$$

это выраженіе плотности пара имѣетъ примѣненіе при вычисленіи объема извѣстной массы пара по даннымъ его упругости и температурѣ. Положимъ, что данъ вѣсъ  $\omega$  пара, коего упругость  $p$  и температура  $t$ . Тогда объемъ его

$$V = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{\omega (1 + \alpha t)}{Ap} \dots \dots \dots (5)$$

Также можетъ быть сдѣлано рѣшеніе обратнаго вопроса — отысканія вѣса пара по данному его объему, соответствующему какой нибудь упругости и температурѣ.



Для избѣжанія всякій разъ нарочныхъ вычисленій которой нибудь изъ величинъ  $p$ ,  $\epsilon$  или  $t$  при рѣшеніи вопросовъ о паровыхъ машинахъ, составлены уже помощію этихъ формулъ таблицы, которыя можно найти во многихъ сочиненіяхъ.

§ 7. *Относительный объемъ пара.* Извѣстно, что вода при обращеніи въ паръ воспринимаетъ объемъ, несравненно большій противу того, какой она имѣла въ капельномъ состояніи. Такъ напр. какой нибудь объемъ воды  $S$  при обращеніи его въ паръ, займетъ при какой нибудь температурѣ  $t$  объемъ  $V = \mu S$ . Отвлеченная величина  $\mu$ , показывающая отношеніе объема пара къ объему воды, изъ которой онъ образованъ, называется *относительнымъ объемомъ пара*.

Если какой нибудь объемъ воды  $S$  обратимъ въ пары при различныхъ температурахъ  $t_0$  и  $t$ ; то объемы паровъ, соответствующіе этимъ температурамъ, будутъ

$$V_0 = \mu_0 S \text{ и } V = \mu S.$$

Раздѣляя эти два равенства одно на другое, будемъ имѣть отношеніе

$$V_0 : V = \mu_0 : \mu$$

т. е. что объемы паровъ при различныхъ температурахъ прямо пропорціональны относительнымъ ихъ объемамъ.

Подставляя отношеніе  $\frac{\mu_0}{\mu}$  въ уравненіе (2) вмѣсто отношенія  $\frac{V_0}{V}$  получимъ пропорцію

$$\mu_0 : \mu = p (1 + \alpha t_0) : p_0 (1 + \alpha t),$$

которою можно воспользоваться для вычисленій относительнаго объема  $\mu$  пара по данной его температурѣ  $t$ , потому что относительный объемъ  $\mu_0$  пара, коего начальная—тем-



пература  $t_0$  и упругость  $p_0$ , соответствующія точкѣ кипѣнія воды, можетъ быть названъ также *начальнымъ* и составляетъ какъ бы основаніе для опредѣленія относительныхъ объемовъ пара для всѣхъ прочихъ температуръ.

По наблюденіямъ найдено, что вода, обращаясь въ паръ *при ея кипѣніи*, воспринимаетъ въ парообразномъ состояніи объемъ въ 1691 разъ большій противу того, какой она занимала въ капельномъ видѣ. Слѣдовательно для температуры пара  $t_0$  и упругости его  $p_0$  относительный объемъ пара  $\mu_0 = 1691$ . По этому изъ предыдущей пропорціи можетъ быть выведена формула

$$\mu = \mu_0 \frac{p_0}{p} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_0} \dots \dots \dots (6)$$

для опредѣленія относительныхъ объемовъ пара.

Назовемъ подобно предыдущему постоянную извѣстную величину

$$\mu_0 \frac{p_0}{1 + \alpha t_0}$$

и равную 20122,9 чрезъ  $B$ , будемъ имѣть формулу болѣе простую и удобную для вычисленій, слѣдующаго вида:

$$\mu = B \frac{1 + \alpha t}{p} \dots \dots \dots (7)$$

§ 7 bis. Французскій ученый *Навье* (Navier) нашель слѣдующее приближительное выраженіе зависимости между относительнымъ объемомъ пара и его упругостію

$$= \frac{m}{n + p}, \dots \dots \dots (8)$$

въ которомъ  $p$  есть упругость или давленіе пара въ русскихъ фунтахъ на квадратный дюймъ,  $m$  и  $n$  численныя величины,



опредѣленные опытомъ для каждаго рода паровыхъ машинъ.  
По Памбуру, для давленій отъ  $1\frac{1}{3}$  до  $5\frac{1}{2}$  атмосферъ

$$m = 31507, \quad n = 1,890.$$

Для давленій отъ  $1\frac{1}{3}$  до 10 атмосферъ

$$m = 33448 \quad n = 4,758 (*).$$

Получая паръ изъ какого нибудь объема воды  $S$ , можно съ помощію выраженія (8) Навье опредѣлить объемъ этого пара для извѣстной его упрукости  $p$ , ибо такъ какъ

$$\mu = \frac{V}{S} \quad \text{и} \quad \mu = \frac{m}{n+p},$$

$$\text{то } V = \frac{m S}{n+p} \dots \dots \dots (9)$$

Переставивъ величины  $V$  и  $S$  изъ одной половины уравненія въ другую, получимъ формулу для объема воды  $S$ , соотвѣтствующаго объему  $V$ , занимаемому паромъ при какой нибудь упрукости его  $p$ .

§ 8. Въ нижеслѣдующей таблицѣ представлены употребляемыя въ практикѣ упрукости паровъ, соотвѣтствующія имъ температуры и объемы паровъ; также плотности ихъ, давленія на единицу площади, вѣса кубическаго фута, относительные объемы, вычисленные помощію предыдущихъ формулъ для соотвѣтствуемыхъ имъ упрукостей пара.

---

(\*) Численные эти величины даютъ при вычисленіяхъ помощію формулы (8) достаточно точные объемы  $\mu$  для упрукостей паровъ  $p$ , употребляемыхъ въ практикѣ.



Упругость паровъ въ атмосферахъ.	Высота ргунтаго столба въ дюймахъ, измѣряющая эту упругость.	Соответствующая температура по сто- градусному термо- метру.	Давленіе паровъ въ фунтахъ на квадрат- ный дюймъ.	Плотность паровъ или въсь кубиче- скаго фута въ фунт.	Объемъ 1 фунта паровъ въ кубиче- скихъ футахъ.	Относительный объемъ паровъ	
						по формулѣ (7).	по формулѣ Навье (8).
0,031	0,90	25,5	0,50	0,0015	620,47	43614,23	6371,04
0,062	1,85	37,5	1,00	0,0030	333,27	22687,56	5817,04
0,125	3,70	51,7	2,03	0,0059	167,05	11769,73	4933,33
0,25	7,47	66,0	4,07	0,0110	88,01	6169,61	3792,29
0,50	14,95	82,0	8,14	0,0332	46,02	3218,08	2594,85
0,70	22,31	92,0	12,21	0,0301	32,23	2206,03	1973,33
1,00	29,92	100.	16,28	0,0407	24,18	1690,91	1590,49
1,25	37,39	106.	20,35	0,0502	21,16	1374,56	1332,58
1,50	45,2	112.	24,42	0,0586	16,66	1161,88	1146,65
1,75	52,34	117.	28,49	0,0676	14,47	1010,42	1006,25
2,00	59,82	121,4	32,56	0,0766	12,51	894,12	896,48
2,25	67,30	125,2	36,63	0,0855	11,48	802,46	808,31
2,50	74,78	128.	40,70	0,0945	10,42	727,31	735,92
2,75	82,26	132.	44,77	0,1028	9,56	654,08	675,44
3,00	89,74	135,1	48,84	0,1117	8,83	616,85	624,14
3,25	96,82	137,8	52,91	0,1193	8,19	574,27	580,09
3,50	104,69	140.	56,98	0,1283	7,67	533,52	541,84
3,75	111,78	143.	61,05	0,1366	7,19	503,23	506,80
4,00	119,65	145,4	65,12	0,1449	6,78	474,34	478,71
4,25	126,74	147.	69,19	0,1532	6,40	448,16	452,23
4,50	134,61	149.	73,26	0,1615	6,08	423,92	428,76
4,75	141,69	151.	77,33	0,1693	5,79	404,82	407,50
5,00	149,56	153,1	81,40	0,1780	5,52	386,49	388,25
5,25	156,65	155.	85,47	0,1856	5,37	369,73	370,73
5,50	164,52	156.	89,54	0,1939	5,07	353,75	354,73
5,75	171,61	158,5	93,61	0,2022	4,87	340,35	340,05
6,00	179,48	160,2	97,68	0,2104	4,68	327,43	326,54
6,50	194,44	163.	105,82	0,2263	4,35	304,22	302,50
7,00	209,39	166,5	113,95	0,2415	4,07	284,77	280,91
7,50	224,35	169.	122,10	0,2573	3,82	267,22	263,68
8,00	239,30	172,1	130,24	0,2740	3,59	252,35	247,77
8,50	254,26	174,6	138,38	0,2898	3,38	238,85	233,68
9,00	269,22	177,1	146,52	0,3036	3,24	220,21	221,11
10,00	299,13	181,6	162,80	0,3339	2,94	206,20	199,62
12,00	358,96	190,0	195,36	0,3942	2,50	175,02	167,14
15,00	448,70	200,5	244,20	0,4809	2,05	143,20	134,35
20,00	589,27	214,7	325,60	0,6231	1,58	110,62	101,24
25,00	747,84	226,3	407,00	0,7611	1,29	90,61	81,23
50,00	1495,68	265,9	814,00	1,4196	0,70	48,91	40,85

1628



§ 9. *Реньо* (Regnault) произвелъ недавно рядъ наблюдений съ цѣлю опредѣлить упругость пара для температуръ отъ  $-32^{\circ}$  до  $+230^{\circ}$  стоградуснаго термометра. Результаты, полученные имъ, представляются съ большою точно-стію слѣдующими формулами:

Для температуръ отъ  $-32^{\circ}$  до  $0^{\circ}$

$$p = a + b\alpha^x,$$

гдѣ упругость пара  $p$  выражена въ миллиметрахъ (высотой ртутнаго столба);  $a$ ,  $b$  и  $\alpha$  постоянныя величины, и равныя  $a = -0,08038$ ,  $\log b = 1,6024724$ ,  $\log \alpha = 0,0333980$ ;  $x = t + 32$ .

Для температуръ отъ  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$

$$\log p = a + b\alpha^{\frac{t}{\beta_1}} - c\beta_1^{\frac{t}{\beta_1}},$$

въ которой  $a = 4,7384380$ .,  $\log b = 2,1340339$ ,  
 $\log c = 0,6116485$ ,  $\log \alpha_1 = 0,006865036$   
 $\log \beta_1 = 1,9967249$ ;

Для температуръ отъ  $100^{\circ}$  до  $230^{\circ}$

$$\log p = a - b\alpha_1^{\frac{x}{\beta_1}} - c\beta_1^{\frac{x}{\beta_1}},$$

въ которой  $a = 6,2640348$ ,  $\log b = 0,1397743$ ,  
 $\log c = 0,6924351$ ,  $\log \alpha_1 = 1,994049292$ ,  
 $\log \beta_1 = 1,998343862$ .

Слѣдующая таблица представляетъ вычисленныя по формуламъ Реньо упругости паровъ, выраженные высотами ртутнаго столба въ русскихъ дюймахъ, и соотвѣтствующія имъ температуры по стоградусному термометру



Тем- пера- тура пара.	Упругость его въ рус- скихъ. дюймахъ.	Тем- пера- тура пара.	Упругость его въ рус- скихъ дюймахъ.	Тем- пера- тура пара.	Упругость его въ рус- скихъ. дюймахъ.
-32°	0,0126	+60°	5,8367	150°	140,9560
-20°	0,0366	70°	9,1748	160°	183,0869
-10	0,0822	80	13,9370	170°	234,6323
0°	0,1810	90	20,6797	180°	297,0263
+10°	0,3621	100	29,9136	190°	371,6646
20°	0,6848	110	42,3277	200°	460,0790
30°	1,2398	120	58,6973	210°	563,8241
40°	2,1608	130	79,9126	220°	684,4861
50°	3,6211	140°	106,9647	230°	823,6631

Но въ практикѣ въ различныхъ вопросахъ о паровыхъ машинахъ упругость пара опредѣляется обыкновенно числомъ атмосферъ, и потому весьма важно въ этихъ случаяхъ узнать температуру, соотвѣтствующую извѣстному числу атмосферъ, измѣряющихъ упругость пара. Съ этою цѣлю предложена здѣсь еще таблица температуръ для упругостей пара отъ 1 до 24 атмосферъ, выведенная изъ тѣхъ же результатовъ Реньо.

Упругость пара въ ат- мосферахъ.	Температура по термом. Цельсія.	Упругость пара въ ат- мосферахъ.	Температура по термом. Цельсія.
1	100°,0	13	198°,8
2	120 ,6	16	201 ,9
3	133 ,9	17	204 ,9
4	144 ,0	18	207 ,7
5	152 ,2	19	210 ,4
6	159 ,2	20	213 ,0
7	163 ,3	21	215 ,5
8	170 ,8	22	217 ,9
9	175 ,8	23	220 ,3
10	180 ,3	24	222 ,5
11	184 ,5	25	224 ,7
12	188 ,4	26	226 ,8
13	192 ,1	27	228 ,9
14	195 ,5	28	230 ,9



II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАБОТА ПАРА.

§ 10. *Работа пара безъ разширенія.* Паръ, производя давленіе, равное его упругости, на стѣнки сосуда, его заключающаго, такого, какъ паровой цилиндръ, въ которомъ одна изъ стѣнокъ удободвижима, преодолеваетъ сопротивленіе этой послѣдней и перемѣщаетъ ее на извѣстномъ протяженіи, составляющемъ ходъ поршня. Если назвать чрезъ  $p$  упругость пара, или давленіе его на поршень, коего діаметръ назовемъ чрезъ  $d$ ; то работа пара, соотвѣтствующая одному розмаху поршня  $l$ , можетъ быть представлена произведеніемъ

$$p \frac{\pi d^2}{4} l, \dots \dots \dots (10)$$

пренебрегая треніемъ поршня и его стержня, и допуская совершенную пустоту по другую сторону поршня. Или, такъ какъ  $\frac{\pi d^2}{4} l$  есть объемъ пара, описанный поршнемъ въ одинъ ходъ его, то теоретическое количество работы пара можетъ быть выражено чрезъ

$$p W \dots \dots \dots (10 \text{ bis})$$

называя  $W$  объемъ пара  $= \frac{\pi d^2}{4} l$ .

Но какъ совершенной пустоты по другую сторону поршня не бываетъ, какъ это мы видимъ въ практикѣ, поэтому называя чрезъ  $p'$  давленіе, производимое на противоположную дѣйствию пара сторону поршня, выраженіе (10) работы пара безъ разширенія должно быть представлено разностию произведеній

$$\begin{aligned} T_1 &= p \frac{\pi d^2}{4} l - p' \frac{\pi d^2}{4} l = (p - p') \frac{\pi d^2}{4} l = \\ &= (p - p') W \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

для одного розмаха поршня.



§ 11. *Разширеніе пара.* Давленіе, производимое паромъ на стѣнки сосуда, его заключающаго, есть слѣдствіе *разширяемости* — свойства, характеризующаго паръ, какъ движителя. Такъ какъ разширяемость пара происходитъ отъ стремленія атомовъ его взаимно отдаляться при дѣйствіи теплорода, поэтому и говорятъ, что давленіе, производимое паромъ, равно его упругости, измѣняющейся съ температурою. Если въ закрытыхъ сосудахъ, такихъ, какъ паровые котлы, паръ имѣетъ постоянный выходъ въ опредѣленномъ количествѣ и расходъ его каждое мгновеніе пополняется вновь образующимся въ котлѣ паромъ; то давленіе, вслѣдствіе котораго происходитъ движеніе поршня, есть упругость, соотвѣтствующая опредѣленному скопленію пара при извѣстной температурѣ, разумѣется при всѣхъ прочихъ обстоятельствахъ, остающихся постоянными въ разсматриваемый промежутокъ времени.

По своему отличительному свойству, паръ способенъ разширяться до весьма малой его температуры и слѣдовательно до тѣхъ поръ, пока еще онъ способенъ производить давленіе, равное его упругости. Но въ паровыхъ машинахъ, въ цилиндры которыхъ паръ течетъ постоянно и даже во весь розмахъ поршня, приращеніе объема, описываемаго поршнемъ при его движеніи, составляетъ весьма небольшое увеличеніе всего объема, занимаемаго паромъ въ котлѣ и цилиндрѣ; а потому и давленіе пара на поршень и стѣнки цилиндра во время всего хода поршня измѣняется очень незначительно; это подтверждаютъ и многія наблюденія надъ упругостію паровъ въ цилиндрахъ паровыхъ машинъ. При томъ же замѣтимъ, что какъ паръ въ котлѣ всегда бываетъ въ состояніи *насыщенія*, поэтому можно утвердительно принять, что давленіе пара на поршень, при постоянномъ тече-

1839/



ніи его въ цилиндръ, если и измѣняется, такъ только по причинѣ охлажденія, и отъ устройства паропроводныхъ трубъ, которое разсмотримъ вскорѣ. Поэтому-то и принято выражаться, что паръ при непрерывномъ теченіи въ паровой цилиндръ дѣйствуетъ на поршень *полною упругостію*, для различія отъ того дѣйствія, какое происходитъ отъ совершеннаго расширенія пара.

Но употреблять паръ такимъ образомъ значитъ не пользоваться всѣми его свойствами и соединенными съ ними выгодами. Представимъ себѣ, что возможно бы было употреблять паръ такъ, чтобы онъ воспринималъ окончательно возможно наибольшій объемъ, соотвѣтствующій предѣльной его упругости для извѣстнаго сопротивленія; тогда паръ, при извѣстной первоначальной его упругости, доставилъ бы всю работу, какую онъ способенъ произвести при данныхъ обстоятельствахъ. По этому по прекращеніи теченія пара въ цилиндръ на нѣкоторой части хода поршня, паръ не перестаетъ производить давленіе на поршень, хотя постепенно меньшее, соотвѣтственно объему, занимаемому имъ при каждомъ положеніи поршня. Движеніе поршня вслѣдствіе этого давленія будетъ имѣть мѣсто до тѣхъ поръ, пока упругость пара не сдѣлается равною давленію на поршень со стороны сопротивленій, дѣйствующихъ по другую его сторону. Этому мгновенію соотвѣтствуетъ предѣлъ дѣйствія пара, и величина объема, окончательно имъ занятаго, опредѣляетъ *возможный предѣлъ расширяемости пара*. При возможно-наибольшемъ окончательномъ объемѣ пара развивается *весь запасъ его работы*, и слѣдовательно извлекается изъ двигателя *все полезное его дѣйствіе*. Дѣйствіе пара въ этомъ случаѣ совершенно отлично отъ того, которое имѣетъ мѣсто при постоянномъ сообщеніи паровика



съ цилиндромъ, и для отличенія его отъ перваго, говорятъ: что парь въ подобныхъ обстоятельствахъ *работаетъ расширеніемъ*.

И такъ большее или меньшее расширеніе паровъ въ цилиндрѣ зависитъ, какъ мы сейчасъ видѣли, главнымъ образомъ отъ величины побѣждаемаго ими сопротивленія, не принимая впрочемъ въ разсужденіе охлажденія паровъ. Великою этого-то сопротивленія и опредѣляется возможность расширять пары въ большей или меньшей степени. Въ паровыхъ машинахъ эти *сопротивленія (полезныя и вредныя)* бывають весьма значительны, какъ мы это разсмотримъ въ своемъ мѣстѣ, и потому предѣлы расширенія паровъ въ практикѣ весьма ограничены. Самое наибольшее расширеніе, возможное для нѣкоторыхъ машинъ, соотвѣтствуетъ прекращенію притока пара въ цилиндръ на  $\frac{1}{10}$ -й части хода поршня. По прекращеніи сообщенія паровика съ цилиндромъ, парь, пришедшій въ цилиндръ и оставаясь при упругости, какую онъ имѣлъ въ котлѣ, или покрайней мѣрѣ, близкой къ ней, продолжаетъ давить на поршень съ силою, соотвѣтствующею этой упругости и двигаетъ его.

Но какъ съ движеніемъ сего послѣдняго объема пара постепенно увеличивается, поэтому парь выходитъ изъ состоянія насыщенія и начинаетъ дѣйствовать какъ газъ; тогда давленіе, имъ производимое, не остается одинаковымъ и уменьшается по мѣрѣ увеличенія занимаемаго имъ объема.

При объясненіи расширенія пара можно сдѣлать два предположенія. Или температура его остается неизмѣняемою во время расширенія, или она понижается по мѣрѣ расширенія пара. Первый случай можетъ имѣть мѣсто только тогда, если парь при дѣйствіи въ цилиндрѣ пріобрѣтаетъ во время его расширенія еще нѣкоторую теплоту *извне* въ



такой степени, что температура пара остается постоянною; это можетъ быть, впрочемъ, вѣроятно, когда паровой цилиндръ окруженъ нагрѣтымъ воздухомъ или свѣжими парами, и когда движеніе поршня происходитъ медленно. Но какъ расширение пара происходитъ большею частію въ самое короткое время, и какъ сверхъ того паръ не пріобрѣтаетъ въ цилиндрѣ никакой теплоты во время расширения его, поэтому слѣдуетъ предполагать, что второй случай болѣе правдоподобенъ, нежели первый.

Въ этомъ (первомъ) случаѣ упругость пара слѣдуетъ закону Мариотта и находится поэтому въ обратномъ отношеніи къ объемамъ пара. По изслѣдованіямъ же Памбура паръ охлаждается во время его расширения на столько, что онъ остается всегда при *наиббольшей* упругости.

Скорѣе же можно принять, что паръ дѣйствуетъ, при быстромъ его расширеніи, совершенно какъ воздухъ, и поэтому упругость его во время расширения находится въ обратномъ отношеніи къ степенямъ объема пара.

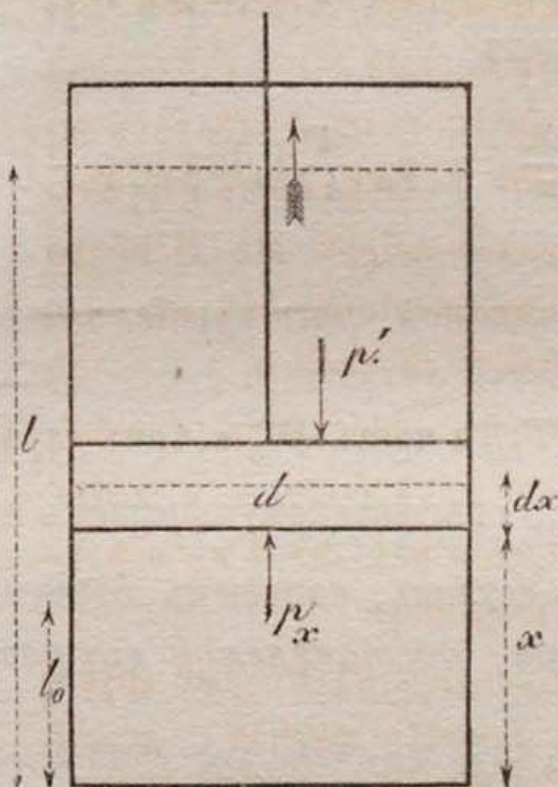
Понсе и Моренъ, также Тредгольдъ и нѣкоторые другіе основываются на предположеніи перваго случая, между тѣмъ какъ Памбуръ сильно защищаетъ второе. Моренъ доказываетъ помощію опытовъ, что примѣненіе закона Мариотта къ объясненію теоріи паровыхъ машинъ представляетъ результаты довольно согласные съ дѣйствительностію (см. *Leçons de mécanique pratique, 3-me partie, par A. Morin. Paris 1846*).

Принимая законъ Мариотта, выражаемый обратнымъ отношеніемъ упругостей къ объемамъ, имъ соотвѣтствующимъ, т. е.

$$p : p_1 = V : V_1 \dots \dots \dots (12)$$



и вычисляя помощію ея упругость пара для каждаго положенія поршня, соответствующаго большему или меньшему разширенію паровъ, можно опредѣлить всю работу, развивающуюся во все время дѣйствія паровъ *разширеніемъ*. Напримѣръ возьмемъ какое нибудь положеніе поршня  $x$  и назовемъ пространство, проходимое имъ въ одно мгновеніе, чрезъ  $dx$ ; то работа пара, дѣйствующаго разширеніемъ послѣ *отсѣчки* пара (\*) для разсматриваемаго мгновенія равна



Фигура 1.

$$p_x \frac{\pi d^2}{4} dx;$$

для всего же  $l_0 — l$  величина работы пара, происходящей отъ его разширенія, есть сумма частичныхъ работъ, такихъ какъ  $p_x \frac{\pi d^2}{4} dx$ , произведенныхъ въ каждое мгновеніе движенія поршня, т. е. равна

$$\int_{l_0}^l p_x \frac{\pi d^2}{4} dx.$$

Для разсматриваемаго мгновенія упругость  $p_x$  пара, дѣйствующаго на поршень, принимая законъ Мариотта, можно опредѣлить помощію извѣстной пропорціи (12) въ зависи-

(\*) *Отсѣчкою* пара называется прекращеніе теченія паровъ изъ котла въ цилиндръ.



мости отъ упругости  $p_0$  пара, притекающаго изъ котла въ цилиндръ во время сообщенія ихъ, такъ что

$$p_x = p_0 \frac{V_0}{V_x}, \quad \text{или въ настоящемъ случаѣ}$$

$$p_x = p_0 \frac{\frac{\pi d^2}{4} l}{\frac{\pi d^2}{4} x} = p_0 \frac{l}{x},$$

Слѣдовательно сумма частичныхъ работъ пара въ теченіи части хода поршня  $l_0 - l$  будетъ

$$\int_{l_0}^l p_0 \frac{l_0}{x} \frac{\pi d^2}{4} dx = p_0 \frac{\pi d^2}{4} l_0 \int_{l_0}^l \frac{dx}{x} = p_0 \frac{\pi d^2}{4} l_0 \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} (*)$$

*величина работы, доставляемой расширеніемъ паровъ въ цилиндръ.*

Называя эту работу чрезъ  $T_{11}$  и чрезъ  $W_0$  объемъ пара, соотвѣтствующій объему  $\frac{\pi d^2}{4} l_0$ , описываемому поршнемъ во время сообщенія цилиндра съ котломъ, напомнимъ слѣдующее выраженіе *работы пара, доставляемой его расширеніемъ,*

$$T_{11} = p_0 W_0 \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} \dots (13),$$

изъ котораго видно, что данный объемъ пара при данной его упругости, можетъ доставить тѣмъ большую работу, чѣмъ въ большей степени произведено расширеніе его, и доведя это расширеніе до крайнихъ предѣловъ, можно бы извлечь всю работу, представляемую формулою (13). Но какъ въ

(\*) Ибо

$$\int_{l_0}^l \frac{dx}{x} = \log \text{hyp} \frac{l}{l_0}$$



практикѣ упругость пара, дѣйствующаго на поршень, должна быть всегда *больше* давленія на него отъ сопротивленій, иначе работа пара будетъ отрицательная, поэтому и разширеніе паровъ въ цилиндрахъ паровыхъ машинъ имѣетъ свои предѣлы, принимаемые за крайніе. Въ существующихъ машинахъ *наибольшее разширеніе* пара не превосходитъ 10, при которомъ сообщеніе цилиндра съ котломъ бываетъ только на  $\frac{1}{10}$  хода поршня. И вотъ одна изъ причинъ, по которымъ нѣтъ возможности воспользоваться въ практикѣ всѣмъ запасомъ работы двигателя.

И такъ *теоретическая работа пара* для того случая, когда онъ дѣйствуетъ на поршень полною его упругостію и разширеніемъ, можетъ быть выражена суммою работъ, доставленной полною упругостію и разширеніемъ, т. е.

$$T = T_1 + T_2 \text{ или}$$

$$T = p_0 W_0 + p_0 W_0 \log \text{hyp} \frac{1}{l_0} = \\ = p_0 W_0 \left( 1 + \log. \text{hyp.} \frac{1}{l_0} \right) \dots \dots (14)$$

Чтобы дать понятіе о величинѣ работы, доставляемой *разширеніемъ единицы* вѣса пара, вычислимъ второй членъ написаннаго уравненія для разширеній начиная отъ 1 до 10, возможныхъ въ практикѣ, и представимъ въ слѣдующей таблицѣ *величину работы пара отъ разширеній*.

Величина $\frac{1}{l_0}$	Работа отъ разширенія пара.	Величина $\frac{1}{l_0}$	Работа отъ разширенія пара.
1	0,000	6	1,791
2	0,693	7	1,946
3	1,098	8	2,079
4	1,386	9	2,197
5	1,609	10	2,303



Вычитая изъ работы пара (14) работу сопротивленій, дѣйствующихъ по другую сторону поршня и равную

$$p' \frac{\pi d^2}{4} l,$$

для цѣлаго хода поршня, получимъ выраженіе *полной теоретической работы*

$$T_t = p_0 W_0 \left( 1 + \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} \right) - p' W \dots (15)$$

какую парь способенъ доставить при извѣстной его упругости  $p_0$  и данномъ расширеніи  $\frac{l}{l_0}$ , *принимая расширение паровъ по Мариоттову закону.*

§ 12. Открытіе Навье (§ 7 bis) даетъ поводъ думать, что парь расширяется иначе, нежели какъ это слѣдуетъ по закону Мариотта. И дѣйствительно, разсматривая объемы  $V$  и  $V_0$  паровъ, произшедшихъ изъ одного какого либо объема  $S$  воды, но при разныхъ упругостяхъ  $p_0$  и  $p_x$  увидимъ, что

$$V_0 = \frac{mS}{n + p_0} \quad \text{и} \quad V_x = \frac{mS}{n + p_x},$$

и потому

$$V_0 : V_x = n + p_x : n + p_0 \dots (16)$$

т. е., что объемы паровъ обратно пропорціональны не упругостямъ или давленіямъ  $p_0$  и  $p_x$ , а *зависитъ еще отъ постоянной величины  $n$ .* Поэтому *работа пара отъ расширенія*, вычисленная на основаніи этого начала, будетъ разнствовать отъ величины работы, представляемой формулою (13). Работа пара, дѣйствующаго въ цилиндрѣ полною упругостію и расширеніемъ, имѣетъ выраженіе слѣдующаго вида



$$p_0 \frac{\pi d^2}{4} l_0 + \int_{l_0}^1 p_x \frac{\pi d^2}{4} dx$$

для одного размаха поршня. Вычисляя теперь упругость пара  $p_x$  соответствующую рассматриваемому положению поршня  $x$  по пропорции (16), получимъ, что

$$p_x = \frac{V_0}{V_x} (n + p_0) - n$$

и слѣдовательно

$$\int_{l_0}^1 p_x \frac{\pi d^2}{4} dx = \int_{l_0}^1 \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \frac{V_0}{V_x} (n + p) - n \right\} dx,$$

или

$$\begin{aligned} & \frac{\pi d^2}{4} \int_{l_0}^1 \left\{ \frac{l_0}{x} (n + p_0) - n \right\} dx = \\ & = \frac{\pi d^2}{4} l_0 (n + p_0) \int_{l_0}^1 \frac{dx}{x} - \frac{\pi d^2}{4} n \int_{l_0}^1 dx \quad (*) \\ & = \frac{\pi d^2}{4} l_0 (n + p_0) \log \frac{1}{l_0} - \frac{\pi d^2}{4} n (1 - l_0) \end{aligned}$$

выраженіе работы пара отъ расширения. Ему можно еще придать слѣдующій видъ:

$$\frac{\pi d^2}{4} \left\{ l_0 (n + p_0) \log \frac{1}{l_0} - n (1 - l_0) \right\}$$

(\*) Такъ какъ

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{\pi d^2}{4} l_0 n \\ V_x &= \frac{\pi d^2}{4} l_x \end{aligned}$$



Принимая, подобно предъидущему, совершенную пустоту по другую сторону поршня, теоретическую работу пара, дѣйствующаго полною упругостію и разширеніемъ, можно изобразить суммою работъ, т. е.

$$p_0 \frac{\pi d^2}{4} l_0 + \frac{\pi d^2}{4} \left\{ l_0 (n + p_0) \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} - n (l + l_0) \right\} \\ = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ p_0 l_0 + l_0 (n + p_0) \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} - n (l - l_0) \right\} \quad (17)$$

Вычисляя для каждаго особеннаго въ практикѣ случая величину работы, доставляемой разширеніемъ пара, можно видѣть, на сколько разнятся результаты формулы Навье отъ предъидущаго случая т. е. закона Мариотта. Въ слѣдующихъ двухъ таблицахъ представлены количества работъ пара отъ разширенія, рассматриваемаго согласно мнѣнію Навье.

Работа отъ разширенія пара для упругостей его $p_0$ отъ $\frac{1}{3}$ до $5\frac{1}{2}$ атмосферъ (машины съ холодильникомъ)						
Величина $\frac{l}{l_0}$	Упругость пара $p_0$ въ атмосферахъ.					
	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	3	4
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,54	0,73	0,67	0,67	0,68	0,69
3	0,88	0,98	1,02	1,04	1,06	1,06
4	1,00	1,19	1,25	1,28	1,31	1,33
5	1,03	1,33	1,33	1,46	1,50	1,45
6	1,04	1,42	1,54	1,60	1,66	1,61
7	0,99	1,47	1,62	1,70	1,77	1,82
8	0,92	1,50	1,69	1,78	1,88	1,93
9	0,83	1,51	1,74	1,85	1,96	2,02
10	0,74	1,52	1,78	1,91	2,04	2,10



Работа отъ разширенія пара для упругостей его $p_0$ отъ 1 до 10 атмосферъ (машины безъ холодильника).									
Величина $\frac{1}{1_0}$	Упругость пара $p_0$ въ атмосферахъ.								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,63	0,67	0,67	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
3	0,98	1,00	1,03	1,04	1,05	1,06	0,96	0,96	0,97
4	1,14	1,22	1,26	1,28	1,30	1,31	1,32	1,32	1,33
5	1,23	1,31	1,43	1,46	1,50	1,50	1,51	1,52	1,53
6	1,32	1,47	1,56	1,60	1,62	1,63	1,67	1,68	1,69
7	1,35	1,54	1,65	1,70	1,74	1,76	1,79	1,80	1,82
8	1,35	1,59	1,70	1,79	1,91	1,86	1,89	1,90	1,92
9	1,34	1,62	1,77	1,83	1,91	1,94	1,97	2,00	2,03
10	1,32	1,65	1,81	1,91	1,97	2,02	2,06	2,08	2,10

Изъ всего предъидущаго видно, что паръ, дѣйствуя разширеніемъ, начинающимся на  $\frac{1}{10}$  хода поршня, т. е. дѣйствуя *наибольшимъ* для практики расширеніемъ, производитъ въ 3,3 раза большую работу противу того случая, когда онъ работаетъ безъ разширенія. Послѣ этого нужно ли еще доказывать, что употреблять паръ высокаго давленія безъ разширенія, значить, говоря для большей части случаевъ, *пользоваться только половиною полезнаго дѣйствія двигателя?* Оттого машины высокаго давленія безъ разширенія суть наигрубѣйшіе пріемники работы двигателя и невыгодны въ отношеніи расхода пара, а слѣдовательно и въ отношеніи потребленія горючаго матеріала.

Вычитая изъ количества (17) работу пара противодѣйствующаго, находящагося по другую сторону поршня, т. е.

$$p' \frac{\pi d^2}{4} l,$$



(для одного размаха поршня и принимая давление  $p'$  постоянным во все это время), получимъ слѣдующее выраженіе *полной теоретической работы пара*, для рассматриваемаго случая.

$$T_t = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ p_0 l_0 + l_0 (n + p_0) \log \text{hyp} \frac{l}{l_0} - n (l - l_0) - p'l \right\} \dots \dots \dots (18)$$

для одного размаха, или одиночнаго хода поршня.

§ 13. Предложимъ теперь вопросъ, въ какой степени разширеніе пара должно быть усилено, чтобы достигнуть *наибольшаго* полезнаго дѣйствія даннаго количества пара? Конечно, разширеніе пара приноситъ пользу до тѣхъ поръ, пока работа, имъ производимая, превосходитъ еще работу сопротивленій т. е. до тѣхъ поръ, пока упругость пара еще болѣе давленія, противопоставляемаго поршнемъ; если бы эта упругость была менѣе давленія сопротивленій, то естественно работающая сила была бы отрицательная.

Такъ какъ, по закону Навье, отношеніе объемовъ паровъ выражается пропорціею слѣдующаго вида

$$V : V_r = n + p_r : n + p$$

(формула 16) или для настоящаго случая,

$$l + c : l_r + c = n + p_r : n + p,$$

и такъ какъ, по закону равновѣсія силъ, всякая дѣйствующая сила вызываетъ равное ей и противоположное сопротивленіе, то, подставляя въ вышенанписанную пропорцію вмѣсто упругости  $p_r$ , соотвѣтствующей наибольшему разширенію пара, равное ей сопротивленіе  $R + p'$ , получимъ



$$l + c : l_1 + c = n + R + p' : n + p,$$

или, пренебрегая величиною  $c$ , которая въ машинахъ хорошо устроенныхъ должна быть весьма незначительна (\*)

$$l : l_1 = n + R + p' : n + p,$$

или

$$l : \frac{1}{l_1} = \frac{1}{n + p} : \frac{1}{n + R + p'},$$

такимъ образомъ, если относительные объемы паровъ  $\frac{m}{n + p}$  и  $\frac{m}{n + R + p'}$ , соотвѣтствующіе упругостямъ  $p$  и  $R + p'$ , обозначимъ чрезъ  $\mu$  и  $\mu_1$  получимъ

$$\frac{l}{l_1} = \frac{\mu}{\mu_1} \dots \dots \dots (19)$$

т. е. что наибольшее полезное дѣйствіе пара будетъ при такомъ устройствѣ машины, когда пространство, проходимое поршнемъ до разширенія пара относится къ цѣлому ходу поршня такъ, какъ относительный объемъ, соотвѣтствующій упругости пара, входящаго въ цилиндръ изъ котла во время ихъ сообщенія, относится къ относительному объему, соотвѣтствующему сопротивленію  $R + p'$ .

### III. РАЗЛИЧНЫЯ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВО ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ.

§ 14. Во всѣхъ паровыхъ машинахъ, какъ бы они разнообразны ни были, существенную или главную часть со-

---

(\*) Большею частію въ машинахъ двойнаго дѣйствія величину зазора  $c$  дѣлаютъ 0,05 (5%) хода поршня  $l$ . Въ машинахъ же одиночнаго дѣйствія или вообще безъ маховиковъ, зазоръ долженъ быть 0,1 (10%) всего хода поршня, потому что при маломъ зазорѣ поршень легко можетъ опускаться на дно цилиндра.

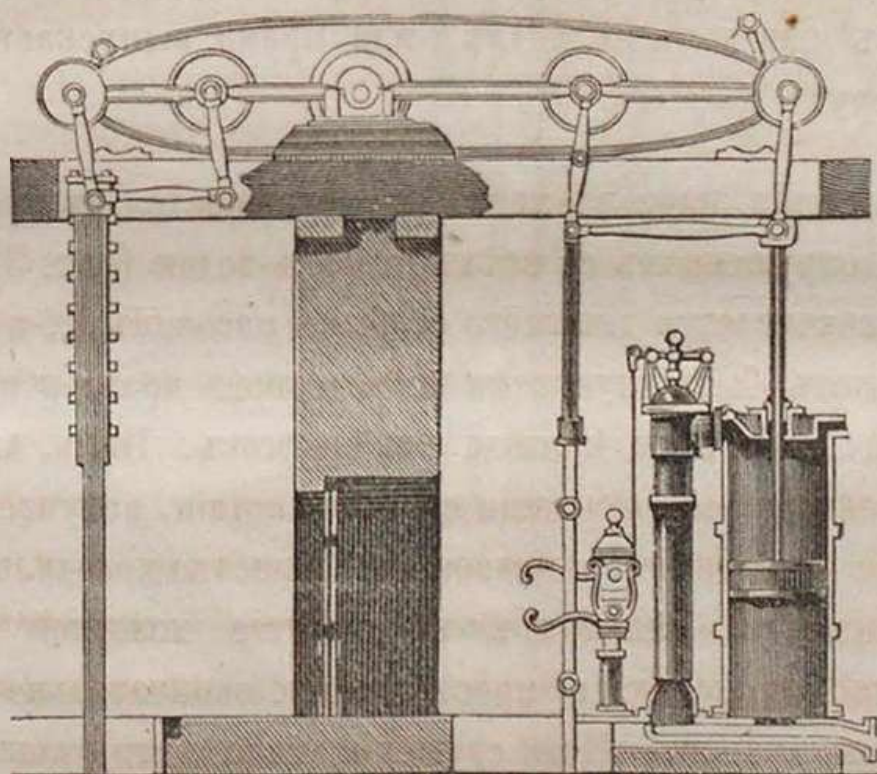


ставляет паровой цилиндръ съ движущимся въ немъ взадъ и впередъ поршнемъ, непосредственно принимающимъ дѣйствіе пара; всѣ прочія движущіяся части служатъ только для передачи и преобразованія движенія, производимаго поршнемъ. Такъ какъ примѣненія паровыхъ машинъ въ промышленности разнообразны, поэтому назначенію машины соотвѣтствуетъ и родъ движенія ея, а вмѣстѣ съ нимъ и способъ передачи этого движенія исполнительнымъ механизмамъ. Вмѣсто *поперемѣннаго* прямолинейнаго движенія поршня, обыкновенно употребляемаго въ практикѣ, не однократно уже пытались устроить *непосредственно—круговращательный* пріемникъ работы пара, и чрезъ это искали избѣгнуть всѣхъ промежуточныхъ частей, входящихъ въ составъ обыкновенныхъ паровыхъ машинъ; но всѣ подобныя усилія остаются бесполезными. Да и едвали при такихъ свойствахъ, какими обладаетъ паръ, возможно употребить выгодно круговращательное движеніе поршня. Въ томъ то и состоитъ отличительное свойство пара, что онъ при своей совершенной расширяемости, дѣйствуетъ тѣмъ удобнѣе, чѣмъ болѣе встрѣчаетъ противодѣйствіе его просачиванію. А по этимъ свойствамъ круговращательное движеніе поршня не можетъ быть достигнуто ни какими путями:—при поршневомъ круговращательномъ пріемникѣ треніе является весьма значительнымъ; употребленіе же пара дѣйствіемъ его инерціи во все не соотвѣтствуетъ главнымъ и характеристическимъ свойствамъ, потому что, при дѣйствіи на круговращательный пріемникъ, паръ, по незначительной своей плотности, не можетъ работать живою силою, приобретаемой вслѣдствіе расширяемости.

Въ отношеніи устройства передаточныхъ частей, паровыя машины могутъ быть раздѣлены на круговраща-



тельные и попеременно движущіяся. Последнія употребляются только при таких исполнительныхъ механизмахъ, въ которыхъ единообразіе движеній пароваго поршня и рабочаго механизма не требуетъ участія частей круговращательныхъ. Примѣры такихъ машинъ представляютъ машины Корнваллійскія (въ Англии), которыя употребляются для выкачиванія воды изъ рудниковъ. Для примѣра представляемъ на фигурѣ 2 общее расположеніе



фигура 2.

одной изъ машинъ Корнваллійскихъ. Паровой молотъ долженъ быть отнесенъ сюда же.

Но самые обыкновенные и наиболее частые случаи употребленія паровыхъ машинъ, какъ постоянныхъ такъ и подвижныхъ, требуютъ круговращательнаго движенія, передаваемого окончательною частію машины, и оттого въ устройство этихъ машинъ входятъ многія новыя части, назначенныя для преобразованія движенія первоначально прямолинейнаго въ окончательно круговое.

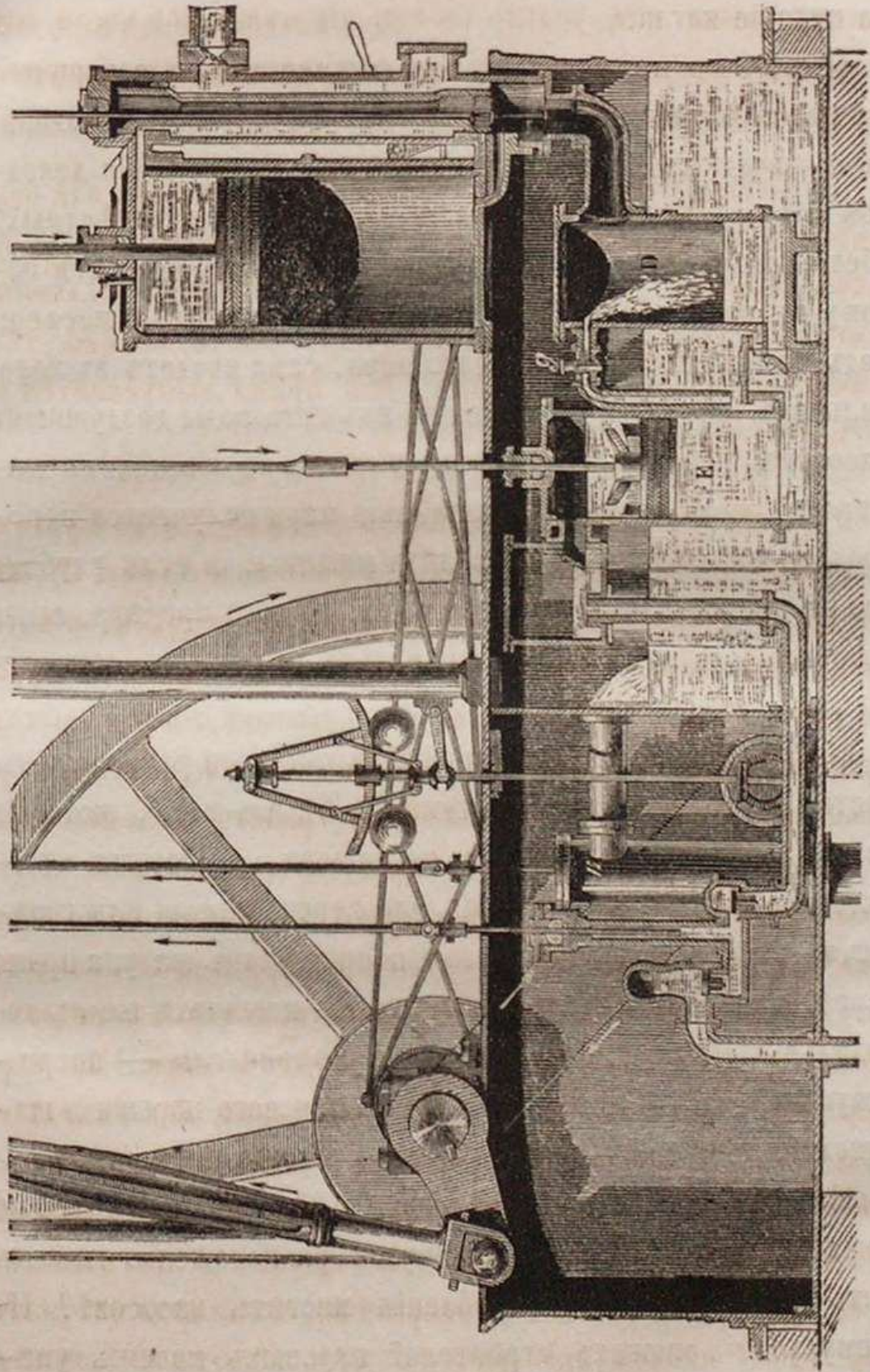


Смотря по тому, дѣйствуетъ ли паръ изъ котла во весь ходъ поршня или только въ теченіи нѣкоторой части хода его, машины называются съ *расширеніемъ*, или *безъ расширенія пара*.

Независимо отъ того, съ расширеніемъ ли пара или безъ расширенія производится работа, машина можетъ быть въ тоже время съ *холодильникомъ*, или *безъ холодильника* смотря по тому—охлаждается ли паръ, кончившій свое дѣйствіе въ паровомъ цилиндрѣ, или прямо выпускается въ атмосферу.

Охлажденіе пара въ машинахъ совершается въ пустомъ сосудѣ, окруженномъ со всѣхъ сторонъ водою (фиг. 3), которая накачивается для этаго особымъ насосомъ *к*, и которая можетъ быть впускаема посредствомъ крана *г* внутрь холодильника въ видѣ дождя или брызговъ. Паръ, выходя изъ цилиндра по окончаніи своего дѣйствія, вступаетъ въ холодное и почти безвоздушное пространство холодильника, сгущается, и, встрѣтивъ присутствіе холодной воды, разбѣянной по всему его пространству, окончательно обращается въ капли. При сгущеніи пара и его охлажденіи отдѣляется весь скрытый его теплородъ, который передается водѣ, образующейся въ слѣдствіе охлажденія пара. По мѣрѣ накопленія этой воды на днѣ холодильника, она вмѣстѣ съ воздухомъ выкачивается насосомъ *Л*, который называется *воздушнымъ*. Такъ какъ всякая вода содержитъ въ себѣ большее или меньшее количество воздуха, то этотъ послѣдній выдѣляется изъ воды совершенно, когда вода вступаетъ въ какое нибудь пространство мельчайшими каплями; по этому то въ паровыхъ машинахъ вода впускается въ холодильникъ не иначе, какъ въ видѣ брызговъ. Будучи на—





Фигура 3.



грѣта по охлажденіи пара до  $40^{\circ}$  Реомюра, она поступаетъ на питаніе котла.

И такъ въ машинахъ съ холодильникомъ для совершенія процесса охлажденія пара входятъ еще три части: холодильникъ, воздушный насосъ и насосъ для накачиванія холодной воды. Употребленіе насоса *k* зависитъ отъ мѣстныхъ обстоятельствъ. На паровыхъ машинахъ его нѣтъ потому что вода, вслѣдствіе превосходства давленія атмосферы надъ упругостію охлажденнаго пара, сама входитъ въ холодильникъ по мѣрѣ выкачиванія изъ него воды воздушнымъ насосомъ. Такъ устраиваютъ иногда и въ заводскихъ машинахъ, если вода для охлажденія пара получается непосредственно изъ колодца вблизи машины, и если глубина его не превосходитъ 26 футовъ, т. е. того предѣла, выше котораго вода не можетъ подниматься давленіемъ атмосферы въ безвоздушное пространство.

§ 15. Общій составъ машины и взаимное расположеніе частей ея зависитъ отъ системы. Тѣ изъ нихъ, которыя не имѣютъ холодильника, проще машинъ, имѣющихъ холодильникъ. Онѣ могутъ быть или вертикальныя или горизонтальныя, и движеніе поршня посредствомъ шатуна прямо передается валу маховаго колеса. Въ машинахъ же съ холодильникомъ всегда употребляютъ *коромысло* — посредствующую часть между стержнемъ пароваго поршня и шатуномъ, и къ нему прикрѣпляютъ стержни насосовъ, входящихъ въ составъ этихъ машинъ. Да иначе и быть не можетъ, потому что какое другое расположеніе можетъ быть удобнѣе при употребленіи многихъ насосовъ? По этому усилія многихъ строителей паровыхъ машинъ уничтожить коромысло въ машинахъ съ холодильникомъ до сихъ поръ не увѣнчались успѣхомъ, и машины, построенныя ими



безъ коромысла, нисколько не проще системы, однажды навсегда здраво обдуманной.

Въ последнее время начали въ машинахъ безъ холодильника преимущественно употреблять горизонтальное расположение пароваго цилиндра, и находятъ его лучше вертикальнаго. Дѣйствительно, при вертикальномъ расположеніи весь составъ машины значительно дѣлается высокимъ по мѣрѣ возрастанія силы машины и чрезъ это присмотръ за ними дѣлается не удобнымъ и затруднительнымъ, и кромѣ того весь машинный составъ теряетъ устойчивость отъ помѣщенія грузныхъ частей, какъ напримѣръ маховаго колеса — наверху. Въ горизонтальномъ же расположеніи цилиндра и всей машины нѣтъ ни того, ни другаго изъ этихъ неудобствъ.

Въ машинахъ, работающих съ охлажденіемъ пара, движеніе пароваго поршня происходитъ вслѣдствіе образованія пустоты по другую его сторону и охлажденія пара въ холодильникѣ. Поршень этихъ машинъ можетъ преодолевать значительныя сопротивленія, ему представляемыя, и при небольшой упругости пара, образующагося въ котлѣ. Отъ того машины съ холодильникомъ, въ которыхъ паръ дѣйствуе ть непрерывно, называются машинами *низкаго давленія*. Въ машинахъ же, не имѣющихъ холодильника, движеніе поршня происходитъ вслѣдствіе разности между упругостію пара въ котлѣ и давленіемъ атмосфернымъ. Поршень преодолеваетъ тогда сопротивленіе тѣмъ большее, чѣмъ значительнѣе перевѣсъ давленія пара изъ котла надъ давленіемъ атмосфернымъ; и какъ для полученія пара большей и меньшей упругости, расходуетъ одинаковое количество теплорода, по этому въ этихъ машинахъ употребляютъ пары сколько возможно большей упругости. На этомъ основаніи



всѣ машины безъ холодильника бываютъ *высокаго давленія*.

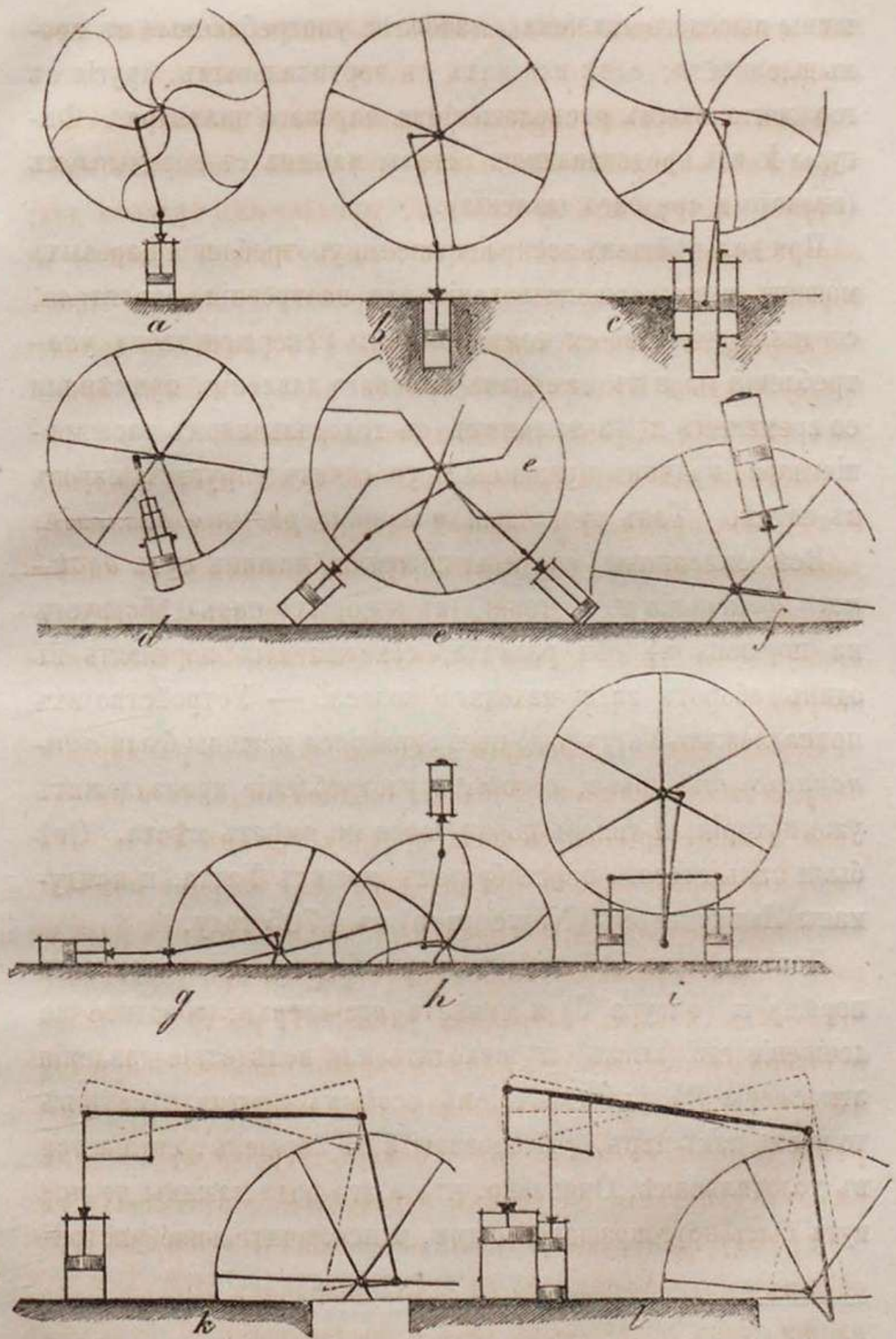
§ 16. Первые паровыя машины были низкаго давленія. Уаттъ первоначально ихъ устроилъ, изыскавъ наилучшую систему ихъ построенія, предложилъ правила для опредѣленія размѣровъ дѣйствующихъ частей машины и первый ввелъ ихъ во всеобщее употребленіе. Эпохою явленія паровыхъ машинъ можно считать 1769 годъ, то время, когда Уаттъ и Бультонъ построили первую машину двойнаго дѣйствія. Прочія системы явились позже.

Машины высококаго давленія получили свое происхожденіе вслѣдствіе примѣненія паровой машины къ движенію поѣздовъ по желѣзнымъ дорогамъ. На паровозахъ нѣтъ никакой возможности употреблять охлажденіе пара, и потому принуждены были въ этомъ случаѣ обойтись безъ холодильниковъ.

Первыя машины высококаго давленія были безъ расширенія пара, и въ отношеніи потребленія топлива составляли приемники далеко не совершенныя противу машинъ Уатта; отъ того въ первое время для заводовъ или фабрикъ машины высококаго давленія устраивались только небольшихъ размѣровъ. Для производства большихъ работъ при употребленіи этихъ машинъ старались уменьшить расходъ топлива меньшимъ потребленіемъ пара въ паровомъ цилиндрѣ при той же его упругости, и употребили такъ называемое *расширеніе паровъ въ цилиндрѣ*. Мейеръ первый прибѣгнулъ къ этой операціи на своихъ паровозахъ, устроенныхъ въ 1844 году; выгодные результаты ея были поводомъ ко всеобщему употребленію его на всѣхъ машинахъ высококаго давленія, какъ подвижныхъ такъ и постоянныхъ.

На чертежѣ 4 представлены для примѣра нѣкоторыя ма-





фигура 4.





шины высокаго давленія, наиболѣе употребляемыя въ промышленности; однѣ изъ нихъ съ вертикальнымъ, другія съ горизонтальнымъ расположеніемъ пароваго цилиндра. Фигуры k и l представляютъ эскизы машинъ съ коромысломъ (низкаго и средняго давленія).

При дальнѣйшемъ распространеніи употребленія паровыхъ машинъ и усовершенствованіи ихъ построенія, строители, соединяя удобство системы Уатта съ совершенствомъ употребленія пара въ машинахъ высокаго давленія, примѣнили со временемъ и къ машинамъ съ холодильникомъ расширеніе пара, причемъ нужно было увеличить упругость паровъ въ котлѣ. Такъ произошли *машины средняго давленія*.

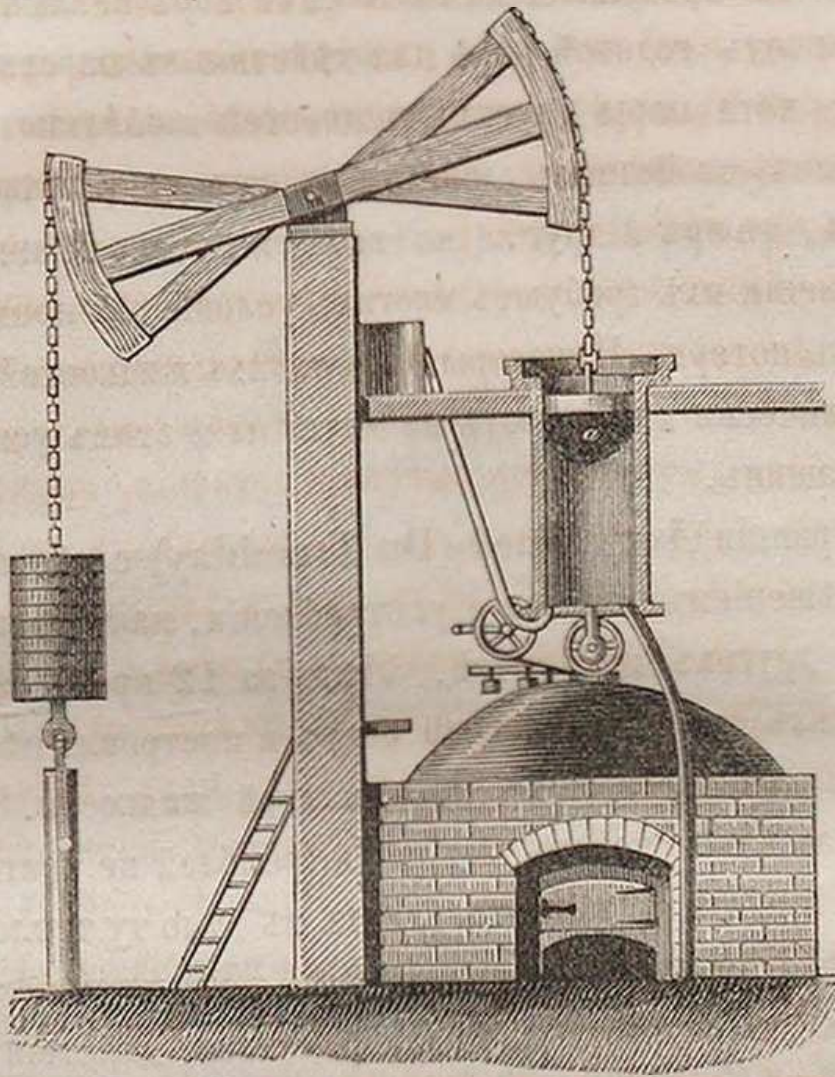
Всѣ описанныя системы паровыхъ машинъ суть *двойнаго дѣйствія* т. е. такія, въ которыхъ паръ дѣйствуетъ на поршень въ оба размаха, совершаемая поршнемъ въ одинъ оборотъ вала маховаго колеса. — Устройство ихъ принадлежитъ Уатту и до него явившіяся машины были *одиночнаго дѣйствія*, которыхъ употребленіе принадлежитъ уже исторіи, и теперь почти вовсе не имѣетъ мѣста. Онѣ были такъ сказать первообразомъ машинъ Уатта, и придуманы Ньюкоменомъ (Newcomen) въ 1705 году.

Паръ въ нихъ дѣйствуетъ только на нижнюю поверхность поршня a (фигура 5) и движетъ его вверхъ; обратное же движеніе его (внизъ) происходитъ или вслѣдствіе давленія атмосферы (\*) или дѣйствіемъ особыхъ противувѣсовъ въ то время какъ паръ, дѣйствовавшій на поршень, сгущается въ холодильникѣ. Очевидно, что этаго рода машины не могутъ быть круговращательными, и исключительное употре-

---

(\*) Отчего эти машины называются еще *атмосферическими*.





фигура 5

бленіе ихъ было и можетъ быть только для исполненія работъ, подобныхъ движенію насосовъ.

Независимо отъ системы или устройства паровыя машины по ихъ употребленію могутъ быть или *постоянныя*, каковы всѣ фабричныя и заводскіе паровыя движители, и *перемѣщающіяся*, дѣйствующія на паровозахъ и пароходахъ (\*).

---

(\*) Не нужно впрочемъ смѣшивать перемѣщающіяся паровыя машины (locomotives) съ переносными (locomobiles). Первые производятъ перемѣщеніе, вторыя только способны перемѣщаться; для первыхъ перемѣщаемость есть цѣль ихъ дѣйствія, для вторыхъ это свойство есть только условіе для удобнѣйшаго ихъ употребленія при временныхъ работахъ.



§ 17. Въ промышленности до сихъ поръ исключительно употребляютъ водяной паръ для дѣйствія въ паровыхъ машинахъ; хотя пары другихъ жидкостей и обладаютъ предвосходнымъ свойствомъ двигателя какъ напр. сѣрнистый углеродъ, эфиръ и друг., но все они очень цѣнны и при употребленіи ихъ требуютъ многихъ условій для предупрежденія ихъ потери. Нѣкоторыя изъ такихъ жидкостей сверхъ того химически дѣйствуютъ на металлы и этимъ ускоряютъ порчу машинъ.

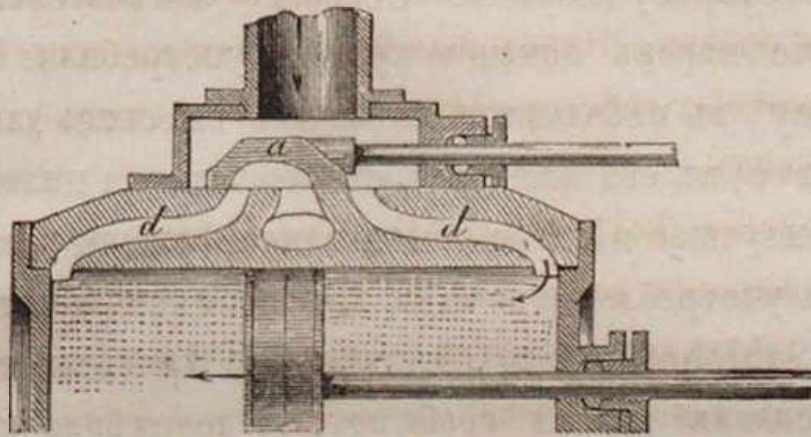
Во Франціи Дютрамблей (Du Tremblay) особенно занимался рѣшеніемъ вопроса о употребленіи, какъ двигателя, паровъ другихъ жидкостей. Лѣтъ за 12 предъ симъ онъ предложилъ для этого сѣрный эфиръ и построилъ нѣсколько машинъ, дѣйствовавшихъ парами этой жидкости. Только для образованія паровъ эфира Дютрамблей не тратитъ нарочнаго теплорода, а употребляетъ въ дѣло ту теплоту, которая уносится въ атмосферу парами, кончившими свое дѣйствіе въ цилиндрѣ. Для одновременнаго дѣйствія паровъ воды и эфира на одну и ту же машину лучше всего соотвѣствовала система паровыхъ машинъ съ двумя равными цилиндрами, (фигура е на чертежѣ 4), которая и была избрана Дютрамблеемъ. Въ одномъ изъ цилиндровъ дѣйствовалъ паръ воды, въ другомъ пары эфира. Водяной паръ, кончившій свое дѣйствіе въ паровомъ цилиндрѣ, приходитъ сперва въ трубчатый котель, наполненный до известной степени жидкимъ эфиромъ, нагрѣвалъ этотъ послѣдній, причемъ онъ испарялся, и потомъ уже вылеталъ въ атмосферу.

Опыты, произведенные надъ одною паровою машиною, дѣйствовавшею *соединенными* парами водяными и эфирными, показали, что эта машина израсходовала на каждую паровую лошадь и въ часъ  $2\frac{3}{4}$  фунта каменнаго угля, тогда



какъ она же самая безъ употребленія эфирныхъ паровъ потребляла въ тоже самое время  $10\frac{3}{4}$  фунт. того же угля (\*).

§ 18. Паропроводною трубою паръ приводится въ паровую камеру, которая сообщается со внутренностію пароваго цилиндра пролетами  $d$  и  $d$ , фигура 6. Паръ впускается въ



фигура 6.

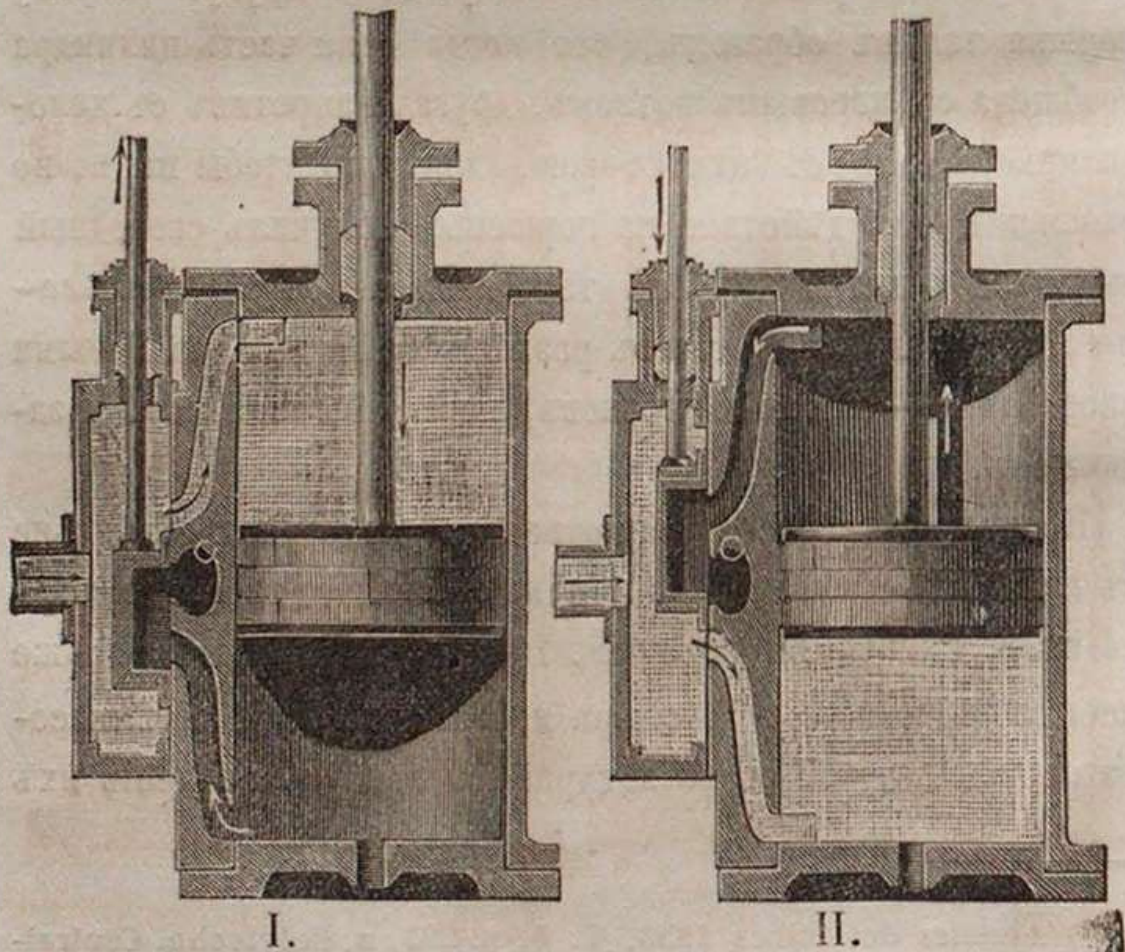
цилиндръ попеременно то по одну, то по другую сторону поршня такимъ образомъ, что когда одна часть цилиндра сообщена съ паровымъ котломъ, другая напротивъ съ холодильникомъ или съ атмосферою, для того чтобы паръ, по окончаніи его дѣйствія на поршень, получилъ свободный выходъ изъ цилиндра. Это такъ называемое *распредѣленіе паровъ* производится въ разныхъ машинахъ различными способами — помощію крановъ, поршней, клапановъ и задвижекъ.

Поршневое распредѣленіе паровъ мало употребительно въ паровыхъ машинахъ по причинѣ большаго тренія, производимаго движеніемъ поршней. Краны употребляются также весьма рѣдко и то только при небольшихъ машинахъ высокаго давленія; они скоро истираются при употребленіи ихъ

(\*) Annales des mines 1853, T. 4, p. 203, и, Polytechn. Centralblatt, 1854, S. 383.



въ нагрѣтомъ состояніи, требуютъ много силы для вращенія ихъ и въ добавокъ всего этого даютъ весьма малый проходъ пару. Въ старыхъ паровыхъ машинахъ (напр. первыхъ устроенныхъ Уаттомъ) употреблялись четверные краны (съ четырьмя отверстіями) для впуска пара по ту и другую сторону поршня. Особенно замѣчательное распределеніе паровъ помощію крановъ употребили: Модслей (Maudsley) въ небольшихъ машинахъ высокаго давленія и Каве (Cavé) въ его машинахъ съ качающимся цилиндромъ. Самое наилучшее и самое обыкновенное распределеніе состоитъ въ употребленіи коробки или задвижки (*tiroir, Slide-valve, Schieberkasten*), фигура 7. При движеніи задвижка своими краями сообщаетъ попеременно внутренность цилиндра помощію пролетовъ то съ паровою каме-

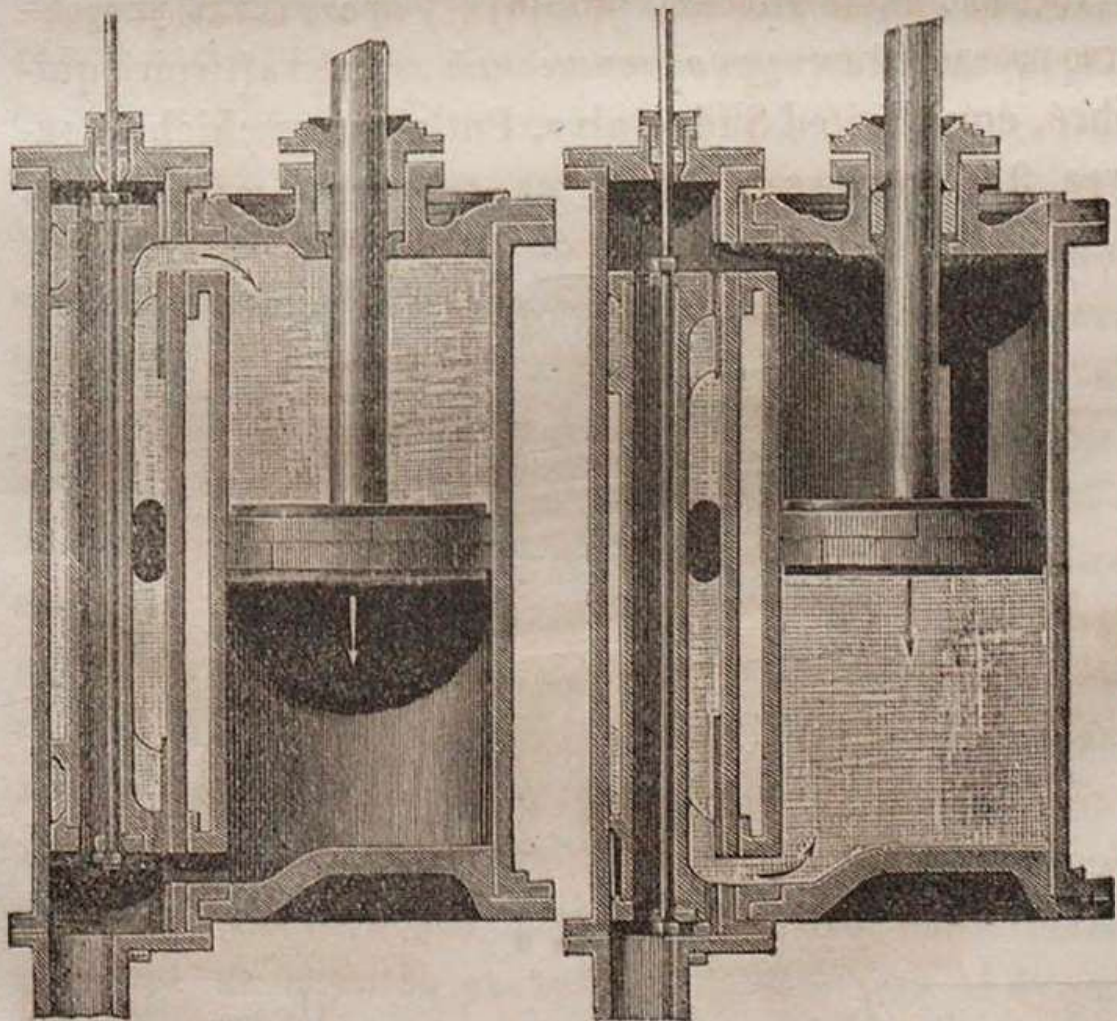


фигура 7.



рою и слѣдовательно съ котломъ, то съ холодильникомъ или съ атмосферою, смотря по системѣ машины. При положеніи задвижки, изображенномъ въ I, парь входитъ въ верхнюю часть цилиндра, давить на поршень и двигать его внизъ, между тѣмъ какъ парь, находящійся по другую сторону поршня (въ нижней части цилиндра) получаетъ свободный выходъ наружу. При положеніи задвижки II парь дѣйствуетъ на нижнюю поверхность поршня, между тѣмъ какъ верхняя часть цилиндра сообщена съ выпускнымъ отверстіемъ.

Въ большихъ машинахъ, въ которыхъ наполненіе пролетовъ при каждомъ ходѣ поршня составляетъ значительную потерю пара, употребляютъ трубчатую коробку,



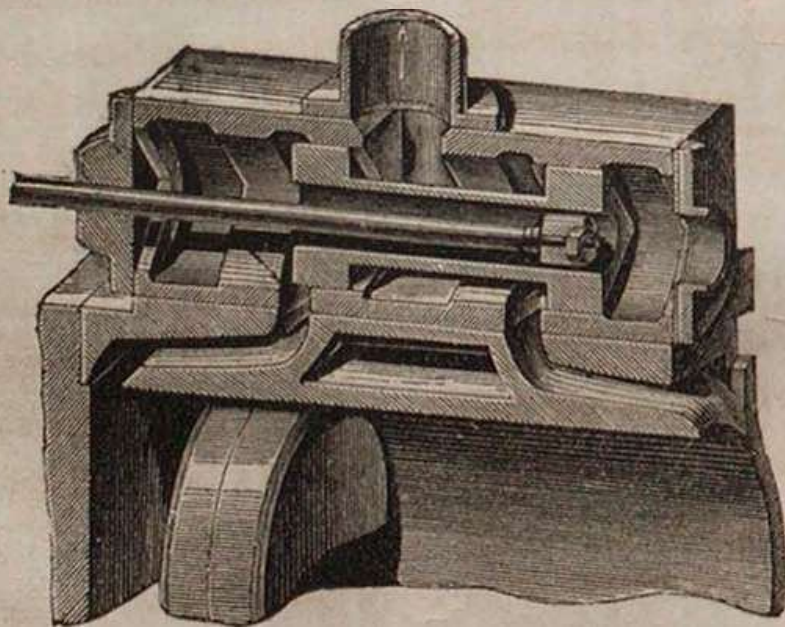
фигура 8.



представленную въ вертикальномъ продольномъ разрѣзѣ на фигурѣ 8. Трубочатая задвижка имѣетъ предъ обыкновенною еще то преимущество, что она, будучи окружена *работающими* паромъ со всѣхъ сторонъ, менѣе представляетъ сопротивленія при ея движеніи, нежели предыдущія. Это сопротивленіе при большихъ машинахъ высокаго давленія и устроенныхъ съ обыкновенною задвижкою (фигура 7) составляетъ потерю работы въ нѣсколько паровыхъ лошадей.

Впрочемъ вслѣдствіе значительной длины своей трубчатая задвижка коробятся, особенно при употребленіи паровъ высокаго давленія, и потому многіе строители совершенно ихъ избѣгаютъ.

Недавно нѣкто Жобень (Jobin) (\*) предложилъ устройство названной имъ *уравновѣшенной* задвижки (*tiroir équilibré, équilibrated Slide-valve, Entlastungsschieber*) фигура 9. Задвижка Жобена въ сущности состоитъ изъ



фигура 9.

(\*) См. «Bulletin de la Société d'Encouragement, T. V, 1858.



двухъ поршней, соединенныхъ пустымъ стержнемъ, составляющимъ съ ними одно цѣлое. Паръ, идущій изъ котла въ цилиндръ, наполняетъ не только пространства по обѣимъ сторонамъ паровой задвижки но и внутренность ее и поэтому давить на нее со всѣхъ сторонъ одинаково. Паръ, вытекающій изъ цилиндра по окончаніи его дѣйствія на поршень, обнимаетъ среднюю часть коробки и не даетъ по этому также никакого боковаго давленія.

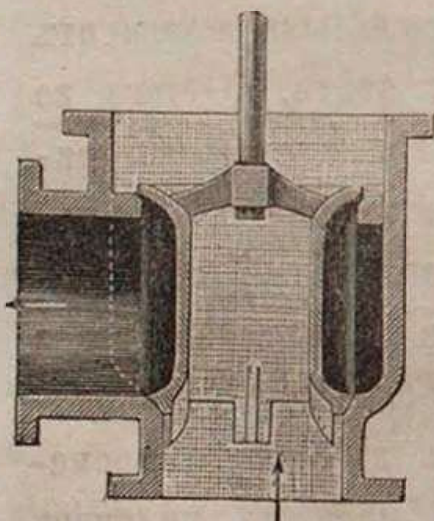
Вообще задвижки, какого бы устройства они ни были, получаютъ движеніе отъ вала паровой машины помощію эксцентрика.

Хотя многіе строители машинъ и придумывали употребить другой какой либо приводъ движенія паровыхъ задвижекъ, потому что эксцентрики вообще расходуютъ дѣйствительно большую часть передаваемого ими усилія на треніе, но для этого назначенія ничто не можетъ быть лучше эксцентрика, дѣйствіе котораго совершенно согласно съ самымъ движеніемъ поршня. Это послѣднее въ машинахъ круговращательныхъ обыкновенно передается мотылю и зависитъ по этому отъ рода движенія этой части. Оттого во всѣхъ паровыхъ машинахъ съ круговращательнымъ движеніемъ (имѣющихъ мотыль) скорость поршня неодинакова отъ начала до конца каждаго хода; она бываетъ въ срединѣ самая наибольшая и въ началѣ равна нулю. Вмѣстѣ съ измѣненіемъ этой скорости измѣняются и объемы, описываемые поршнемъ въ равные промежутки времени. По этому притокъ пара въ цилиндръ долженъ быть соразмѣренъ съ величиною объема, оставаемого поршнемъ для наполненія паромъ; иначе давленіе пара на поршень въ теченіи полного хода не будетъ одинаково.



Эксцентрикъ, установленный на валѣ маховаго колеса подь прямымъ угломъ съ направлениемъ мотыля, совершенно выполняетъ означенное условіе; онъ даетъ такое движеніе задвижкѣ, что она открываетъ паровое окно при началѣ каждаго новаго хода не вдругъ, а постепенно, и притомъ такъ, что паровое окно бываетъ открыто наиболѣе въ то время, когда поршень имѣетъ наибольшую скорость. Въ этомъ то отношеніи распределение пара помощію эксцентрика для машинъ съ круговращательнымъ движеніемъ незамѣнимо никакими другими способами.

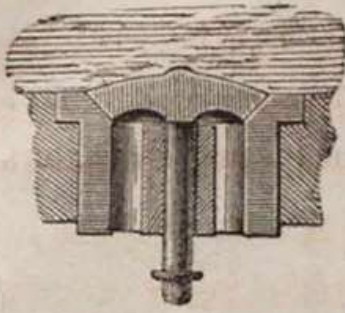
Въ новѣйшее время начинаютъ вводить въ употребленіе распределение паровъ помощію клапановъ, такъ какъ при большихъ машинахъ задвижки должны быть значительно велики, чтобы онѣ могли запираеть съ достаточною точностію, и притомъ открываніе и закрываніе паровыхъ пролетовъ происходитъ въ нихъ очень медленно.



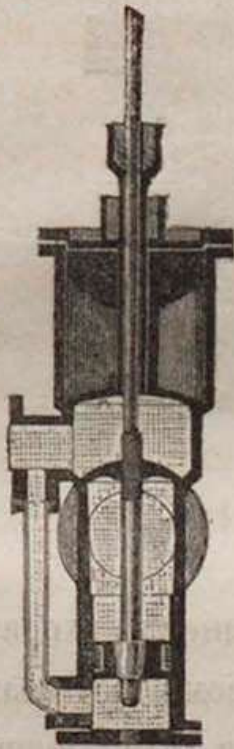
Фигура 10.

Клапаны бываютъ или коническіе или трубчатые. На фигурѣ 10 представленъ двойной трубчатый клапанъ или *о двухъ гнѣздахъ* (*doppelsitzig*); онъ состоитъ изъ трубчататаго тѣла съ обточенными и ошлифованными краями и гнѣзда, на края котораго плотно прилегаетъ ошлифованная поверхность клапана. Въ представленомъ рисункѣ клапанъ показанъ запертымъ; когда онъ посредствомъ стержня будетъ поднятъ, тогда паръ можетъ проходить въ трубу *G* по направленію стрѣлки.

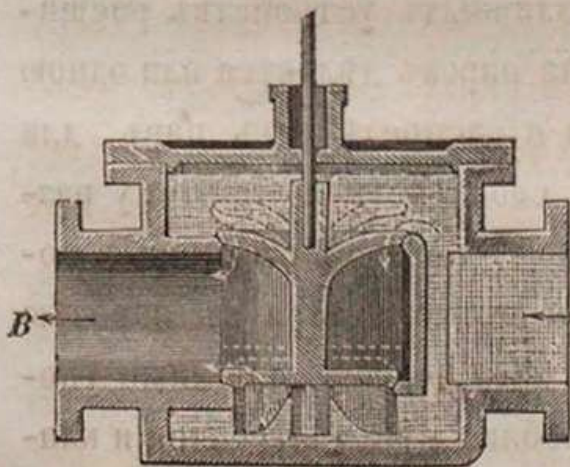




Фигура 11.



Фигура 12.



Фигура 13.

На фигурѣ 11 изображенъ въ вертикальномъ разрѣзѣ простой конической клапанъ. Такъ какъ при большихъ машинахъ высокаго давленія разность давленій по обѣ стороны клапана довольно значительна, поэтому въ нихъ движеніе клапановъ потребляетъ значительную часть полезной работы двигателя. Для облегченія движеній клапановъ устраиваютъ ихъ съ противудѣйствующимъ поршнемъ, двойные и колокольчатые.

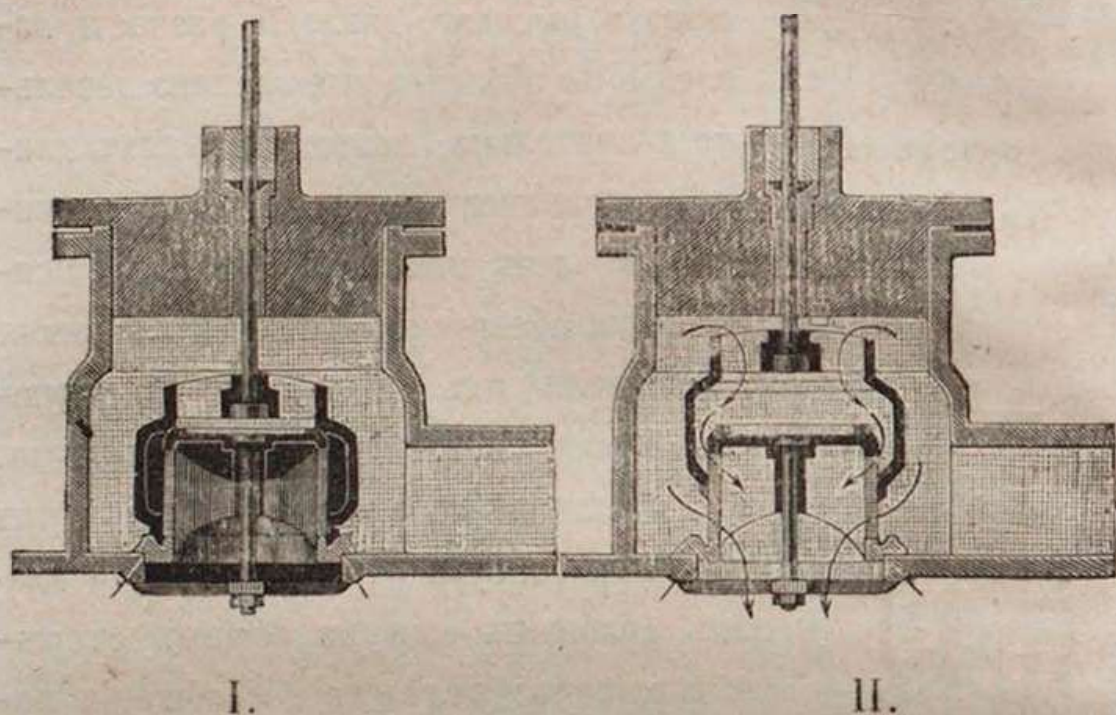
Въ клапанѣ съ противудѣйствующимъ поршнемъ (фигура 12) собственно клапанъ снабженъ еще на общемъ стержнѣ поршнемъ; вслѣдствіе сообщенія посредствомъ трубы паръ давитъ въ одно и то же время на верхнюю поверхность клапана и на нижнюю поверхность поршня, такъ что для поднятія клапана остается только преодолѣть сопротивленіе отъ тренія.

Лучше эта же цѣль достигается устройствомъ *сквознаго клапана* (Laternenventil), фигура 13, состоя-

ащаго изъ двухъ тарелокъ, соединенныхъ въ одно цѣлое сквознымъ цилиндромъ. При поднятіи клапана посредствомъ стержня, паръ, идущій чрезъ *А*, входитъ съ обѣихъ сторонъ открытаго гнѣзда и сообщается съ трубою *В*.



Фигура 14 изображаетъ въ вертикальномъ разрѣзѣ ко-  
локольчатый клапанъ. Въ I онъ закрытъ, во II открытъ;  
дѣйствіе его видно по рисунку и по указаніямъ стрѣлокъ.



Фигура 14.

§ 19. Въ составъ машинъ съ расширеніемъ входятъ еще *расширительные приборы*, посредствомъ которыхъ производится отсѣчка пара на извѣстной части хода поршня, смотря по требуемой степени расширения паровъ. Вообще существуетъ весьма много различныхъ устройствъ расширительныхъ приборовъ; отсѣчка паровъ дѣлается или одною и тою же задвижкою, которая и распредѣляетъ паръ, для чего закраинамъ ея придаютъ соотвѣтствующія этому размѣры, или особенною задвижкою, которой назначеніе состоитъ только въ прекращеніи притока пара въ паровую коробку при извѣстной части хода поршня, или даже употребляютъ затычки въ видѣ пробки. При употребленіи клапановъ расширение паровъ производится только тѣмъ, что клапаны закрываются раньше, нежели поршень кончитъ свой ходъ.



Вообще дѣйствіе пара полною упругостію и расширеніемъ производится въ одномъ и томъ же цилиндрѣ, (всѣ машины съ однимъ паровымъ цилиндромъ). Машины Вульфа и всѣ подобныя имъ (\*) составляютъ въ этомъ отношеніи то исключеніе, что въ нихъ паръ дѣйствуетъ полною упругостію въ одномъ цилиндрѣ, а расширяется (говоря техническимъ слогомъ) въ другомъ.

Чѣмъ болѣе расширяется паръ, тѣмъ достигается большая *степень* его *разширенія*, которою принято называть отношеніе объемовъ окончательнаго къ первоначальному, какой паръ занималъ въ паровомъ цилиндрѣ до прекращенія сообщенія его съ паровымъ котломъ.

§ 20. Работа паровой машины передается иногда непосредственно исполнительному механизму, для движенія котораго она устроена, какъ это мы видимъ на машинахъ паровозныхъ и пароходныхъ; или, по причинѣ преобразованія рода движенія и измѣненія скорости, устраиваютъ посредствующія части, какъ это бываетъ часто при заводскихъ машинахъ. Количество этихъ посредствующихъ частей и ихъ размѣры зависятъ еще отъ протяженія, на которомъ движеніе паровой машины должно быть сообщено исполнительнымъ орудіямъ. Заводскія и фабричныя машины очень часто назначаются для двиганія множества исполнительныхъ или рабочихъ машинъ разной величины, и тогда посредствующія между ними и двигателемъ передаточныя механизмы принимаютъ значительныя размѣры и бываютъ болѣе или менѣе сложны. Они называются общимъ именемъ *приводовъ движенія*.

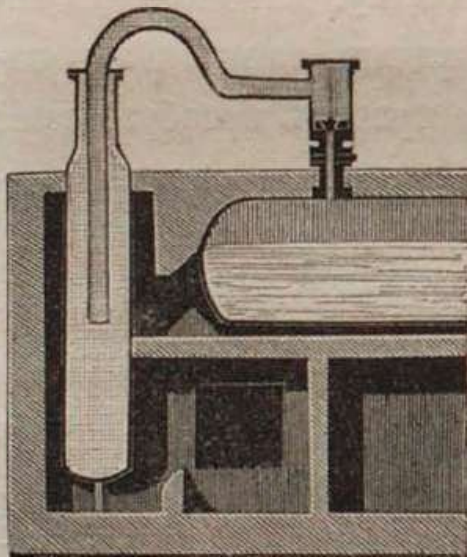
---

(\*) Напр. машины Legavrian et Farinaux, Nillus, Moulfarine и друг.



§ 21. Обыкновенно въ паровыхъ машинахъ водяной паръ употребляется въ *насыщенномъ состояніи*. Въ послѣднее время начали употреблять *перегрѣтый паръ*, получаемый вторичнымъ нагрѣваніемъ, или, лучше сказать, накаливаніемъ насыщеннаго пара. Въ этихъ машинахъ паръ изъ котла проводится паропроводною трубою не прямо въ паровой цилиндръ, для дѣйствія на поршень, а сперва въ металлическій сосудъ, помѣщенный въ топочномъ пространствѣ печи, и подверженный непосредственному дѣйствию пламени. Отсюда уже паръ слѣдуетъ къ мѣсту своего дѣйствія.

Эти такъ называемые *парокалители* (Ueberhitzer) употребляются какъ на постоянныхъ, такъ и на подвижныхъ машинахъ. На фигурѣ 15 представлено изображеніе



фигура 15.

парокалителя Шеньо и Бишо (Chaigneau et Bichon) въ Бордо. Существенную часть его составляетъ металлическій сосудъ, имѣющій сообщеніе посредствомъ трубы съ паровымъ котломъ. Въ этой трубѣ надъ самымъ паровикомъ помѣщенъ клапанъ, открывающійся каждый разъ, какъ упругость пара въ котлѣ превзойдетъ упругость его въ парокалителѣ. Такъ какъ этотъ послѣдній

помѣщается въ топочномъ пространствѣ печи, слѣдовательно онъ воспринимаетъ наисильнѣйшее дѣйствіе пламени. Паръ на пути своемъ въ цилиндръ нагрѣвается сперва въ парокалителѣ, и потомъ уже идетъ для дѣйствія на поршень. Нѣкоторые строители даютъ парокалителямъ спиральную форму для лучшаго дѣйствія на него жара.



Если назовемъ  $W$  объемъ пара, израсходованный поршнемъ машины въ одинъ его размахъ при упругости  $p_0$ , то теоретическая работа пара для расширения  $M$  будетъ

$$T_t = W p_0 (1 + \log. \text{nat. } M).$$

въ одинъ ходъ поршня. Если же этотъ объемъ  $W$  сдѣлается  $W_1$  въ парокалителѣ, безъ измѣненія упругости  $p_0$ , то работа, соответствующая этому объему, будетъ

$$T_{t_1} = W_1 p_0 (1 + \log. \text{nat. } M),$$

и слѣдовательно отношеніе работъ будетъ такое

$$\frac{T_t}{T_{t_1}} = \frac{W p_0 (1 + \log. \text{nat. } M)}{W_1 p_0 (1 + \log. \text{nat. } M)} = \frac{W}{W_1} = \frac{(1 + \alpha t)}{(1 + \alpha t_1)}$$

Для образованія количества паровъ  $\pi W$  потребно количество теплоты

$$C = 630 \pi W,$$

и для измѣненія этого пара въ *перегрѣтый* потребуется количество теплоты:

$$C_1 = 0,847 (t_1 - t) \pi W,$$

принимая относительный теплородъ водянаго пара  $= 0,847$ .

Поэтому отношеніе теплоты, потребляемой перегрѣтымъ паромъ къ теплотѣ, расходуемой при образованіи обыкновеннаго пара, будетъ:

$$\frac{C + C_1}{C} = 1 + \frac{0,847 (t_1 - t)}{630} = 1 + 0,001344 (t_1 - t)$$

и слѣдовательно отношеніе полезнаго дѣйствія паровой машины, дѣйствующей съ перегрѣтымъ паромъ, къ полезному дѣйствию машины, работающей только паромъ обыкновеннымъ, будетъ:

$$\begin{aligned} \frac{K_1}{K} &= \frac{T_{t_1}}{T_t} \cdot \frac{W}{W + W_1} = \frac{1}{1 + 0,001344 (t_1 - t)} \cdot \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t} \\ &= \frac{1 + 0,00367 t_1}{[1 + 0,001344 (t_1 - t)] (1 + 0,00367 t)}, \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

Если взять для примѣра  $t = 120$  и  $t_1 = 300^\circ$ , то



$$\frac{K_1}{K} = \frac{2,001}{1,242 \cdot 1,44} = \frac{2,001}{1,789} = 1,12.$$

Выходитъ, что полезное дѣйствіе паровой машины при употребленіи перегрѣтаго пара 12% болѣе, нежели въ томъ случаѣ, когда машина работаетъ обыкновенными (насыщенными) парами.

Надъ паровымъ котломъ одного французскаго парохода, снабженнымъ парокалителемъ Шеньо и Бишо, были произведены опыты, которые дали слѣдующіе результаты (\*). Сперва машина дѣйствовала около 2 часовъ безъ парокалителя, при чемъ было:

упругость пара въ котлѣ 5,32 атмосферъ,

число оборотовъ вала въ минуту 36,14 и

расходъ угля въ часъ и на одну паровую лошадь  $1\frac{1}{3}$  гектолитра. Потомъ пустили машину въ ходъ при дѣйствіи парокалителя и при этомъ

упругость пара въ котлѣ и парокалителѣ 5,92 атмосферъ, число оборотовъ вала машины въ минуту 38,61 и

расходъ угля въ часъ на одну паровую лошадь 1 гектолитръ поэтому при равномъ количествѣ топлива полезныя дѣйствія машины безъ употребленія парокалителя и съ парокалителемъ относятся какъ

$$\frac{5,32 \cdot 36,14}{1\frac{1}{3}} : \frac{5,92 \cdot 38,61}{1} = 1 : 1,58$$

или другими словами: при одинаковомъ потребленіи горячаго матеріала, машина при употребленіи парокалителя доставила полезное дѣйствіе большее на 58% противу того, когда она работала безъ парокалителя. При другомъ, такимъ же путемъ сдѣланномъ опытѣ, полезное дѣйствіе было увеличено противу обыкновеннаго случая на 69%.

(\*) Le Genie industriel, Fevrier 1856, p. 75.



§ 21 bis. Сѣвероамериканскіе фабриканты Ветердъ (*Wethered*), много занимавшіеся вопросомъ употребленія *перегрѣтаго* пара, убѣдились впрочемъ, что парокалители производятъ чрезмѣрную сухость пара, которая уничтожаетъ всякую смазку въ цилиндрѣ и паровой коробкѣ, и что вслѣдствіе этого движущіяся части машины, подверженныя вліянію пара, получаютъ царапины и скоро истираются.

На этомъ основаніи они предлагаютъ употреблять перегрѣтый паръ не иначе, какъ въ соединеніи съ насыщеннымъ паромъ. Въ машинахъ, ими устроенныхъ, паръ изъ котла идетъ въ одно и то же время и въ паровую коробку и парокалитель, устроенный въ топкѣ. Будучи накаленъ въ этомъ послѣднемъ, паръ вступаетъ особою трубою также въ коробку пароваго цилиндра, гдѣ и встрѣчается съ насыщеннымъ паромъ, приходящимъ непосредственно изъ пароваго котла. Такое употребленіе перегрѣтаго пара должно представить очевидныя выгоды: во первыхъ отъ присутствія насыщеннаго пара избѣгается чрезмѣрная сухость перегрѣтаго, вредно дѣйствующая на существенный составъ машины, и во вторыхъ капли воды, уносимой паромъ изъ котла, отъ дѣйствія на нихъ перегрѣтаго пара обращаются также въ паръ и получаютъ еще сверхъ того ту упругость, какая соотвѣтствуетъ средней температурѣ смѣшанныхъ паровъ, т. е. послѣ смѣшенія перегрѣтаго съ насыщеннымъ.

Такимъ образомъ при соединеніи паровъ насыщеннаго и перегрѣтаго происходитъ взаимное ихъ дѣйствіе одно на другаго и этимъ взаимнымъ дѣйствіемъ объясняется превосходство смѣшанныхъ паровъ предъ каждымъ изъ паровъ, отдѣльно взятыхъ. Перегрѣтый паръ теряетъ свою *чрезмѣрную сухость*; насыщенные же пріобрѣтаютъ большую упругость безъ употребленія нарочнаго топлива.



Въ Парижѣ и Америкѣ были сдѣланы сравнительные опыты съ обыкновенными паровыми машинами и машинами Ветердъ. Во время опытовъ въ зданіи Парижской Выставки машина приводила въ движеніе вентиляторъ. Среднее давленіе пара въ котлѣ при означенныхъ опытахъ было 2,1 атмосферы.

При употребленіи одного насыщеннаго пара число оборотовъ вентилятора въ теченіи 6 часовъ было 10980, количество употребленнаго при этомъ угля было 355 фунтовъ. При употребленіи смѣшанныхъ паровъ (насыщеннаго и перегрѣтаго) въ теченіи такого же промежутка времени число оборотовъ вентилятора было 12970, количество истраченнаго при этомъ угля было 283 фунта.

Сравнивая полезныя дѣйствія машины въ томъ и другомъ случаѣ при одинаковомъ расходѣ горючаго матеріала получимъ слѣдующее отношеніе

$$\frac{10980}{355} : \frac{12970}{283} = 1 : 1,48.$$

т. е. что употребленіе смѣшанныхъ паровъ даетъ при одинаковомъ горючемъ матеріалѣ 48% болѣе полезнаго дѣйствія противу обыкновенныхъ (насыщенныхъ) паровъ. Такимъ же порядкомъ и на томъ же мѣстѣ произведены были опыты съ однимъ *перегрѣтымъ* паромъ и потомъ *смѣшанными* парами, которые доставили слѣдующіе результаты:

При употребленіи одного перегрѣтаго пара во время 3-хъ часоваго опыта число оборотовъ вентилятора было 6430, количество потребленнаго угля 180 фунтовъ, температура пара при входѣ въ цилиндръ 147,7° Цельс. и при выходѣ изъ него 107° Цельс.

При употребленіи смѣшанныхъ паровъ въ теченіи такого же времени число оборотовъ вентилятора было 6680, ко—



личество израсходованнаго при этомъ угля 140 фунтовъ, температура смѣси при входѣ въ цилиндръ 145,5° Цельс. и при выходѣ 102° Цельс.

Поэтому полезныя дѣйствія для обѣихъ означенныхъ случаевъ относятся между собою при одинаковомъ потребленіи горючаго матеріала какъ

$$\frac{6430}{180} : \frac{6680}{140} = 1 : 1,34,$$

такъ что при употребленіи смѣшанныхъ паровъ получилась выгода въ полезномъ дѣйствіи на 34%. Разность температуръ при входѣ и выходѣ пара была въ первомъ случаѣ 40,7°, во второмъ 43,5°; въ послѣднемъ случаѣ паръ терялъ болѣе теплоты, нежели въ первомъ, и это обстоятельство могло бы объяснить, почему употребленіе смѣшанныхъ паровъ выгоднѣе, нежели только перегрѣтаго.

Произведенные въ Америкѣ опыты съ паровыми машинами не только подтвердили приведенные результаты, но показали еще большую выгоду въ полезномъ дѣйствіи противу цифръ здѣсь представленныхъ (\*) (\*\*).

(\*) Cosmos, Revue encyclopédique, Novembre 1855, p. 518.

(\*\*) Также и при другихъ техническихъ употребленіяхъ, какъ напр. для высушиванія, отопленія, выпариванія и проч., смѣшанные пары показали преимущество предъ насыщенными и перегрѣтыми. Въ Механическомъ Институтѣ въ Мариландѣ опытами нашли, что при употребленіи обыкновенныхъ паровъ довели известное количество воды до кипѣнія въ 73 минуты (упругость пара была 10,94 дюйма прусскихъ и температура 106° Цельс.); при употребленіи перегрѣтаго пара, упругость котораго была та же самая и температура 173° Цельс. 80 минутъ, и при употребленіи смѣшанныхъ паровъ Ветердъ, коихъ упругость была 10 прусскихъ дюймовъ и температура 139° Цельс. употребили только 43 минуты.



Наконецъ въ новѣйшее время начали употреблять паровыя машины съ *возобновленными парами*, въ которыхъ паръ, по окончаніи его дѣйствія, нагрѣвается снова и опять употребляется какъ движитель. Сюда принадлежатъ машины Сименса (Siemens), и Сегена (Seguin). Въ нихъ паръ попеременно то накаливается, то приводится къ насыщенію; въ первомъ состояніи онъ дѣйствуетъ какъ движущая сила, во второмъ отнимается отъ него значительная часть упругости для того, чтобы накаленный паръ, дѣйствующій по другую сторону поршня, могъ бы производить механическую работу (\*).

#### IV. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАБОТЫ, ДОСТАВЛЯЕМОЙ ПАРОМЪ ВЪ ПАРОВЫХЪ МАШИНАХЪ.

§ 22. *Презніе способы опредѣленія работы пара.* До Памбура, положившаго основаніе современной теоріи паровыхъ машинъ, употребляли единственный способъ вычисленій, имѣвшій цѣлю опредѣлять только *полезное дѣйствіе* паровой машины по даннымъ ея размѣрамъ и упругости пара въ котлѣ. При этихъ вычисленіяхъ принимали, что упругость пара, работающаго въ цилиндрѣ, равна упругости его въ котлѣ. Но какъ вычисленный на этомъ основаніи результатъ, называемый *теоретическимъ*, былъ всегда больше дѣйствительнаго т. е. *практическаго*; то,

---

(\*) Болѣе подробныя свѣденія о машинѣ Сименса помѣщены въ Cosmos, Revue encyclopédique 1855, также въ Dingler's Polytechn. Journal 1855, и о машинѣ Сегена въ le Genie industriel par Armengaud, T. XIII, 1857.



для получения дѣйствительнаго, теоретическій результатъ помножали на нѣкоторый коэффициентъ, опредѣляемый опытомъ.

Разность между выводами теоретическими и результатами изъ опытовъ, зависитъ главнымъ образомъ отъ разности упругостей паровъ въ котлѣ и цилиндрѣ и тренія составныхъ частей машины.

Тредгольдъ предлагалъ при вычисленіи работы паровыхъ машинъ, помножать упругость пара въ котлѣ на нѣкоторый коэффициентъ, который измѣнялся отъ 0,47 до 0,63, смотря по силѣ и системѣ машины. Въ послѣдствіи наблюденія показали, что способъ Тредгольда не давалъ вѣрныхъ выводовъ, потому что работа, доставляемая машиною, была всегда меньше работы, полученной вычисленіемъ, принимая даже дѣйствительную упругость пара въ цилиндрѣ. По этой причинѣ нѣкоторые писатели предложили потомъ опредѣлять съ помощію коэффициента не упругость пара въ цилиндрѣ, а количество дѣйствія машины. Тогда этотъ общій коэффициентъ исправлялъ и упругость пара въ цилиндрѣ и боту, поглощаемую треніемъ движущихся частей машины.

§ 23. После развилъ мысль этого способа опредѣленія работы паровыхъ машинъ, образовалъ понятія о движеніи и дѣйствіи пара въ цилиндрѣ, и составилъ формулы для выраженія работы паровыхъ машинъ.

Эти формулы выведены слѣдующимъ образомъ: После вычисляетъ сперва работу, какую паръ можетъ произвести при упругости его въ котлѣ и при извѣстной скорости поршня; потомъ полученный выводъ умножаетъ на опредѣленный коэффициентъ и опредѣляетъ работу паровой машины. Другими словами, онъ предлагаетъ *теоретическую* работу пара помножать на нѣкоторый коэффициентъ, кото-



рый долженъ быть опредѣленъ непосредственнымъ опытомъ для каждой системы машины.

Принимая, подобно Понсле, расширение паровъ въ цилиндрѣ по закону Мариотта, имѣемъ слѣдующее выраженіе теоретической работы пара (форм. 15)

$$T_t = p_0 W_0 \left( 1 + \log. \text{hyp.} \frac{1}{p_0} \right) - p' W$$

для одного размаха поршня, или, называя чрезъ  $M$  степень расширения пара  $\frac{1}{p_0}$ , слѣдующаго вида

$$T_t = p_0 W_0 \left( 1 + \log. \text{hyp.} M - \frac{p'}{p_0} M \right) \quad (*) \dots (21)$$

въ пудофутахъ.

Помножая это количество на опредѣленный какой нибудь коэффициентъ  $K$  получаютъ работу, доставляемую валомъ паровой машины т. е. дѣйствительную работу пара, въ одинъ размахъ или одиночный ходъ поршня. Выражая эту работу въ 1 секунду и въ паровыхъ лошадахъ получимъ слѣдующую формулу работы паровой машины

$$N = K \frac{2\mu}{60} \cdot \frac{144}{40} \cdot \frac{p_0 W_0}{15} \left( 1 + \log. \text{hyp.} M - \frac{p'}{p_0} M \right),$$

обозначая при этомъ чрезъ  $\mu$  число оборотовъ вала въ минуту.

Коэффициентъ  $K$ , исправляя погрѣшность, допущенную въ вычисленіи теоретической работы паровой машины, приближаетъ этотъ теоретическій результатъ къ дѣйствительному. Такъ какъ дѣйствительная работа паровой машины опредѣляется непосредственнымъ опытомъ помощію нажима Прони или вообще динамометра, поэтому величина

---

(\*) Ибо  $p' W = \frac{p p_0}{p_0} W_0 M$ .



коэффициента  $K$ , входящего въ формулу работы паровой машины, для каждой системы долженъ быть *выводомъ изъ наблюдений*.

Здѣсь представляемъ таблицу коэффициентовъ  $K$  для разныхъ паровыхъ машинъ, при хорoшемъ содержаніи ихъ (\*).

Система машины.	Сила машины въ паровыхъ лошадахъ.			
	отъ 4 до 8.	отъ 10 до 20.	отъ 30 до 50.	отъ 60 до 100.
Безъ расширенія и безъ холодильника.	0,61	0,70	0,79	0,85
Безъ расширенія съ холодильникомъ . .	0,60	0,67	0,73	0,78
Съ расширеніемъ и безъ холодильника.	0,45	0,58	0,70	0,81
Съ расширеніемъ и холодильникомъ.	0,41	0,52	0,63	0,74

Откуда видно, что *полезная* или *дѣйствительная* работа паровыхъ машинъ увеличивается постепенно съ ихъ силою. И это весьма естественно: для каждой системы машинъ устройство и слѣдовательно составъ и число *тру-*

(\*) Помѣщенные въ этой таблицѣ величины коэффициентовъ полезнаго дѣйствія паровыхъ машинъ, по нашему мнѣнію, не совсѣмъ точны и именно потому, что они вовсе не сообразны съ системами паровыхъ машинъ. По указанію этихъ цифръ слѣдуетъ заключить, что паровыя машины безъ расширенія и безъ холодильника болѣе всѣхъ прочихъ доставляютъ *полезной* работы двигателя, и слѣдовательно совершеннѣе всѣхъ прочихъ системъ, но это заключеніе не вѣрно, и потому нужны болѣе точныя изслѣдованія объ этомъ вопросѣ. Написанныя цифры извлечены нами изъ сочиненія Клауделя: *Formules, tables et renseignements pratiques à l'usage des ingenieurs, des architectes etc. par H. Claudel. Paris 1849.*



щихся частей одно и тоже, какой бы силы ни была рассматриваемая машина. Съ увеличеніемъ силы увеличиваются размѣры машины и слѣдовательно размѣры трущихся частей, но треніе возрастаетъ во все не въ такой степени, какъ увеличивается сила машины. Возьмемъ на примѣръ паровой поршень, какъ главную движущуюся часть, производящую треніе. Представимъ себѣ двѣ машины одинаковой системы, но разныхъ силъ и слѣдовательно неодинаковыхъ размѣрами; отношеніе работъ, доставляемыхъ паромъ при дѣйствіи его на поршни діаметрами  $d_1$  и  $d_2$  въ теченіи одного размаха ихъ, равнаго ходамъ  $l_1$  и  $l_2$  будетъ

$$P_1 : P_2 = P_0 \frac{\pi d_1^2}{4} l_1 : P_0 \frac{\pi d_2^2}{4} l_2 = d_1^2 l_1 : d_2^2 l_2,$$

и отношенія треній ихъ движущихся частей

$$T_1 : T_2 = \pi d_1 l_1 : \pi d_2 l_2 = d_1 l_1 : d_2 l_2,$$

пренебрегая для простоты треніемъ стержня въ сальникѣ.

Изъ этого выходитъ, что съ увеличеніемъ силы машины полезное дѣйствіе ея возрастаетъ пропорціонально квадрату діаметра пароваго поршня, между тѣмъ какъ треніе увеличивается пропорціонально только первой степени этой величины.

Тоже самое и въ прочихъ движущихся частяхъ; при увеличеніи силы и размѣровъ машины, давленіе, происходящее отъ вѣса движущихся частей, и пространство пробѣгаемое трущимися частями, зависятъ отъ размѣровъ машины, которыя въ свою очередь увеличиваются опять тоже пропорціонально только первой степени діаметра пароваго поршня.

Въ представленной таблицѣ коэффициентъ  $K$  опредѣляетъ полезную работу машины только при хорошемъ ихъ содержаніи; при небрежномъ же уходѣ за ними и слѣдовательно



при дурномъ ихъ содержаніи полезная работа двигателя значительно уменьшается.

Главные причины, по которымъ въ паровыхъ машинахъ теряется всегда нѣкоторая часть работы, производимой паромъ, суть: уменьшеніе упругости его при проходѣ изъ котла въ цилиндръ и треніе движущихся частей машины. По этому устройство машины, независимо отъ ея системы, тѣмъ совершеннѣе, чѣмъ въ меньшей степени означенныя потери имѣютъ мѣсто.

§ 24. Многіе писатели, напр. еще очень недавно Добро-правовъ въ его «общей теоріи паровыхъ машинъ», слѣшкомъ нападаютъ на Понсле за невѣрное основаніе его теоріи работы пара, по которому онъ допускаетъ равенство упругостей паровъ въ котлѣ и цилиндрѣ. Не защищая вполне вѣрность его сужденій, мы съ своей стороны скажемъ, что во первыхъ Понсле не создавалъ никакой теоріи дѣйствія пара, которая бы точно рѣшала все вопросы движенія паровыхъ машинъ и представляла бы точную зависимость всехъ обстоятельствъ, участвующихъ въ движеніи машинъ; во вторыхъ онъ, повидимому, вовсе не намѣренъ доказывать существованіе равенства упругостей пара въ котлѣ и паровомъ цилиндрѣ. Понсле и другіе извѣстные писатели о паровыхъ машинахъ очень хорошо видѣли невозможность этаго равенства при устройствѣ машинъ, обыкновенно употребляемыхъ, и убѣдились въ томъ многочисленными опытами (\*). Но какъ вывести зависимость упругости рабо-

---

(\*) Впрочемъ Моренъ въ его сочиненіи «Leçons de mécanique pratique» приводитъ нѣсколько наблюденій надъ упругостію пара въ цилиндрѣ, и результатами ихъ, повидимому ищетъ доказать, что отклоненія упругости пара въ цилиндрѣ отъ упругости его



тающего пара въ цилиндрѣ отъ всѣхъ обстоятельствъ движенія паровыхъ машинъ, весьма трудно, тѣмъ болѣе выразить эту зависимость въ постоянныхъ законахъ; по этому для простоты въ вычисленіи, и, желая дать формулѣ наибольшую простоту, Понсле допустилъ при вычисленіи работы паровыхъ машинъ упругость  $p_0$  пара, работающего въ цилиндрѣ, равною упругости въ котлѣ, и, для исправленія погрѣшности, происходящей отъ такого предположенія въ величинѣ работы паровой машины, употребилъ коэффициентъ, опредѣленный опытами и дѣлающій полученный выводъ по возможности близкимъ къ дѣйствительному.

Опредѣливъ однажды величину коэффициента  $K$  для паровой машины какой нибудь системы при нормальномъ ея ходѣ, и при данныхъ обстоятельствахъ, формула, выведенная Понсле, можетъ служить для приблизительнаго опредѣленія работы паровой машины той же системы по даннымъ ея размѣрамъ, давленію пара и скорости движенія поршня; но помощію означенной формулы не можетъ быть опредѣлена скорость по данному сопротивленію, или наоборотъ— не могутъ быть пріисканы сопротивленіе и скорость, соотвѣтствующія наибольшей полезной работѣ, т. е. наивыгоднѣйшему дѣйствию машины; также не можетъ быть опредѣлена зависимость между испаряемостію котла, сопротивленіемъ, преодолеваемымъ поршнемъ и скоростью сего

---

въ котлѣ *незначительны* — по крайней мѣрѣ въ большей части случаевъ. Если онъ имѣлъ въ виду этимъ довести до того, что въ формулѣ Понсле (22) можно принимать упругость пара въ цилиндрѣ равною упругости его въ котлѣ безъ чувствительной для практическихъ примѣненій погрѣшности, въ такомъ случаѣ сильныя возраженія нѣкоторыхъ противу этаго весьма справедливы.



последняго. Значить въ одной представленной формулѣ еще не заключается теорія работы пара и названіе «теорія коэффициентовъ», приписываемое способу Понсле опредѣленія работы паровой машины, не имѣетъ никакого значенія. Въ крайнемъ случаѣ употребляютъ иногда формулу Понсле для опредѣленія діаметра поршня проектируемой паровой машины по данной силѣ  $N$ , выраженной въ паровыхъ лоша- дяхъ, или полезной работѣ въ пудофутахъ, какую машина должна преодолевать; но размѣры пароваго цилиндра, вы- веденные съ помощію этой формулы, выходятъ весьма ве- лики въ сравненіи съ заданною силою и машина, построен- ная на этихъ результатахъ, представляетъ большій запасъ силы, противу той, какую она дѣйствительно употребляетъ для преодоленія назначеннаго сопротивленія. Однимъ сло- вомъ, формула Понсле даетъ возможность опредѣлять раз- мѣры цилиндра паровой машины по данной силѣ, только въ слѣдствіе сравненія проектируемой машины съ суще- ствующими того же рода и дѣйствующими въ одинако- выхъ съ нею обстоятельствахъ, но не можетъ опредѣлить, какую работу проектируемая машина въ состояніи доста- вить, находясь въ тѣхъ или другихъ обстоятельствахъ, ра- ботая наивыгоднѣйшимъ, или не наивыгоднѣйшимъ обра- зомъ и проч. Всѣ эти вопросы составляютъ предметъ ука- заній теоріи, которой во все не существовало до Памбура.

#### V. СРАВНЕНІЕ ГЛАВНЫХЪ ЧЕТЫРЕХЪ СИСТЕМЪ ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ.

§ 25. Если формула Понсле не рѣшаетъ абсолютно всѣхъ вопросовъ о паровыхъ машинахъ; то по крайней мѣрѣ она можетъ быть употребляема для сравненія различныхъ си-



стемъ паровыхъ машинъ, въ отношеніи полезной работы, доставляемой ими. Для того, чтобы опредѣлить сравнительное достоинство существующихъ паровыхъ машинъ, лучше всего принять за единицу сравненія *количество полезной работы, доставляемой единицею вѣса истраченного горючаго матеріала.*

Раздѣлимъ количество работы, доставляемое какою нибудь паровою машиною въ извѣстное время на количество горючаго матеріала, израсходованнаго въ топкѣ въ тоже время, получимъ работу въ пудофутахъ, доставляемую единицею вѣса топлива напр. 1 пудомъ.

Количество работы, доставляемой какою нибудь паровою машиною, въ единицу времени т. е. въ секунду, выражается слѣдующею формулою (§ 17)

$$N = K \frac{2\mu}{60} \cdot \frac{144}{40} \cdot \frac{p_0 W_0}{13} \left\{ 1 + \log. \text{hyp. } M - \frac{p'}{p_0} M \right\}$$

или 
$$= K \frac{2\mu}{60} \cdot \frac{144}{40} \cdot \frac{p_0 W_0}{13} \left\{ 1 + \log. \text{hyp. } M - \frac{p'}{p_1} M \right\} \quad (23) (*)$$

Количество же топлива, въ пудахъ, израсходованное для образованія извѣстнаго вѣса пара, имѣетъ слѣдующее выраженіе (§ 69)

$$x = \frac{\omega (320 - t')}{b c} \quad (\text{по Реомюру})$$

въ которомъ  $\omega$  вѣсъ пара,  $t'$  температура воды, поступающей въ котель,  $C$  число единицъ теплоты, доставляемое горѣніемъ единицы вѣса (напр. 1 пуда) топлива;  $b$  коэффициентъ полезнаго дѣйствія его, показывающій какая

(\*) Ибо по закону Мариотта  $W : W_0 = p_0 : p'$  откуда

$$M = \frac{p_0}{p'} = \frac{W}{W_0}$$



часть теплоты, развивающейся при горѣніи горючаго матеріала, обращается въ дѣло.

Прилагая это послѣднее уравненіе къ разсматриваемому случаю, вычислимъ вѣсь объема пара

$$\frac{2\mu}{60} \dot{W}_0,$$

израсходованнаго въ секунду въ паровомъ цилиндрѣ для произведенія полезной работы 15 N. Такъ какъ вѣсь пара  $\omega = \pi v$ , или  $= \frac{A p_0 W}{1 + \alpha t}$ , вообще, то въ настоящемъ случаѣ

$$\omega = \frac{A p_0}{1 + \alpha t} \cdot \frac{2\mu}{60} W_0,$$

и слѣдовательно

$$x = \frac{A p_0}{1 + \alpha t} \cdot \frac{2\mu}{60} W_0 \frac{(320 - t')}{b c} \dots \dots \dots (\psi)$$

по этому работа пара отъ единицы вѣса топлива, будетъ, называя чрезъ  $E$  ея величину,

$$E = \frac{K \frac{144}{40} p_0 W_0 \left(1 + \log. \frac{p_0}{p_i} - \frac{p'}{p_i}\right) \dots \dots (23)}{A p_0 W_0 \frac{(320 - t')}{b c (1 + \alpha t)} \dots \dots \dots (\psi)}$$

$$= K \frac{b c}{(320 - t')} \cdot A (1 + \alpha t) \left\{ 1 + \log. \frac{p_0}{p_i} - \frac{p'}{p_i} \right\} \text{ пудофутовъ } (24)$$

Въ этой формулѣ множитель

$$\frac{b c}{(320 - t')} \cdot A$$

независитъ отъ устройства машины и одинаковъ для всѣхъ системъ ихъ, (полагая при этомъ, что и въ машинахъ высокаго давленія, вода поступающая въ котель, нагрѣвается предварительно до такой же температуры, при которой накачивается она питательнымъ насосомъ въ машинахъ съ холодильникомъ). И такъ, оставляя означенный множитель



постояннымъ при всѣхъ машинахъ, и, называя его чрезъ  $D$ , уравненіе (24) приметъ слѣдующій видъ:

$$E = K D (1 + \alpha t) \left\{ 1 + \log. \frac{p_0}{p_1} - \frac{p'}{p_1} \right\} \text{ пудофутовъ (25).}$$

Уравненіе, которымъ можемъ руководствоваться для объясненія условій, при какихъ полезная работа  $E$  можетъ быть наибольшею для данной машины. Такимъ образомъ каждая система паровыхъ машинъ доставляетъ *наибольшую работу  $E$*  при извѣстныхъ только величинахъ  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p'$  и  $t$ , которыя для этого случая можно назвать *наивыгоднѣйшими*. Сдѣлаемъ съ этою цѣлю отдѣльныя примѣненія этихъ формулъ къ каждому роду паровыхъ машинъ.

Во первыхъ для паровыхъ машинъ безъ расширенія и безъ холодильниковъ упругость работающаго пара  $p_0$  постоянна въ теченіи цѣлаго хода поршня (\*) и слѣдовательно  $p_1 = p_0$ ; а давленіе пара, выходящаго изъ пароваго цилиндра въ атмосферу по окончаніи тамъ его дѣйствія, можно принять равнымъ атмосферному т. е.  $p' = 16,28$  фунт. на одинъ квадрат. дюймъ. По этому  $\log. \frac{p_0}{p_1} = 0$ , и формула (25) для настоящаго случая приметъ слѣдующій видъ

$$E_1 = K_1 D_1 (1 + \alpha t) \left( 1 - \frac{16,28}{p_0} \right),$$

откуда видно, что для паровыхъ машинъ безъ холодильниковъ и безъ расширенія пара *наибольшая работа  $E_1$*  соответствуетъ *возможно наибольшей упругости пара  $p_0$  въ котлѣ*, при которой и температура его  $t$  будетъ также наибольшая.

---

(\*) Или правильнѣе выразиться, принимаемъ его постояннымъ въ теченіи цѣлаго хода поршня.



Во вторыхъ, въ машинахъ съ холодильникомъ безъ расширения пара,  $p_0$  также равна  $p_1$  и упругость  $p'$  пара, кончившаго свое дѣйствіе и охлажденнаго въ холодильникѣ, можетъ быть принята не болѣе двухъ фунтовъ на квадратный дюймъ, какъ это бываетъ въ большей части случаевъ существующихъ машинъ, такъ что работа единицы вѣса топлива

$$E_{II} = K_{II} D_{II} (1 + \alpha t) \left(1 - \frac{2}{p_0}\right).$$

Эти машины (Уатта) суть низкаго давленія и работаютъ обыкновенно при весьма малой упругости пара въ котлѣ, которая бываетъ отъ  $1\frac{1}{4}$  до  $1\frac{1}{2}$  атмосферы, такъ что дѣйствительное давленіе пара, за вычетомъ атмосфернаго, составляетъ только  $\frac{1}{4}$  или  $\frac{1}{2}$  атмосферы. Ихъ дѣйствіе тѣмъ выгоднѣе, чѣмъ совершеннѣе происходитъ охлажденіе пара въ холодильникѣ, и слѣдовательно чѣмъ меньшее давленіе существуетъ по другую сторону поршня.

Въ третьихъ для машинъ съ расширеніемъ пара безъ холодильниковъ, упругость *расширеннаго пара*  $p_1$  есть величина переменная и зависитъ отъ степени расширения, устроеннаго въ машинѣ; упругость  $p'$  пара, кончившаго свое дѣйствіе, равна атмосферному давленію, принимая, что паръ свободно вылетаетъ въ атмосферу. Для этихъ машинъ

$$E_{III} = K_{III} D_{III} (1 + \alpha t) \left(1 + \log. \frac{p_0}{p_1} - \frac{16,28}{p_1}\right)$$

и наибольшая работа  $E_{III}$  въ нихъ можетъ быть достигнута, подобно машинамъ перваго рода, только при возможно наибольшей упругости  $p_0$ . Такъ какъ упругость пара  $p_1$  расширеннаго въ цилиндрѣ послѣ отсѣчки, входитъ въ формулу и въ положительные и въ отрицательные члены; по этому нельзя сказать, чтобы *возможно наибольшее расширение*



пара въ цилиндрѣ, соотвѣтствовало *наибольшему полезному дѣйствию машины*. Это потому, что хотя сильное развитіе расширенія пара и доставляетъ наибольшую полезную работу, за то, уменьшая постепенно упругость пара, при концѣ каждаго хода поршня дѣлаетъ ее менѣ давленія отъ сопротивленій, и этимъ замедляетъ движеніе машины въ крайнихъ положеніяхъ поршня.

Наконецъ для машинъ съ расширеніемъ пара и съ холодильникомъ, упругость расширяемаго пара  $p$ , также переменна, какъ и въ машинахъ предыдущихъ, но упругость  $p'$  охлажденнаго пара есть давленіе въ холодильникѣ, и можетъ быть принято равнымъ двумъ фунтамъ на квадратный дюймъ. Выраженіе полезной работы на единицу вѣса израсходованнаго топлива есть для этихъ машинъ

$$E_{iiii} = K_{iiii} D_{iiii} (1 + \alpha t) \left( 1 + \log. \frac{p_0}{p'} - \frac{2}{p'} \right)$$

Отличительное свойство ихъ составляетъ то условіе, что эти машины доставляютъ тѣмъ болѣе полезной работы, чѣмъ болѣе расширяется работающій паръ, и по этому въ нихъ расширеніе пара доводится до крайней степени, сколько только это возможно безъ проигрыша въ другихъ отношеніяхъ. Извлекая наибольшую работу пара, чрезъ наибольшее его расширеніе, не имѣютъ нужды увеличивать первоначальную его упругость, т. е. упругость въ котлѣ, и на этомъ основаніи машины съ холодильникомъ и расширеніемъ пара дѣйствуютъ весьма хорошо при *среднемъ давленіи* пара т. е. при упругости его отъ  $2\frac{1}{2}$  до  $4\frac{1}{2}$  атмосферъ.

Подставляя въ каждое изъ написанныхъ уравненій работы  $E_I$ ,  $E_{II}$ ,  $E_{III}$  и  $E_{iiii}$ , наивыгоднѣйшія величины,  $p_0$ ,  $p$ , и  $p'$ , соотвѣтствующія наибольшему полезному дѣйствию каждаго рода паровыхъ машинъ, можно вычислить въ пудо-



футахъ численныя величины этого полезнаго дѣйствія и принять ихъ за единицу сравненія *главныхъ четырехъ системъ* паровыхъ машинъ.

Такимъ образомъ получимъ слѣдующія выводы:

Система машины.	Упру- гость пара въ котлѣ.	Степень расшире- нiя пара.	Полезное дѣй- ствiе въ пудо- футахъ.
Безъ расширенiя и безъ холодильника. . . . .	4 (*)	1	1,27 $K_1 D$
Безъ расширенiя съ хо- лодильникомъ. . . . .	$1\frac{1}{2}$	1	1,30 $K_{II} D$
Съ расширенiемъ безъ холодильника. . . . .	6	4	2,71 $K_{III} D (**)$
Съ расширенiемъ и хо- лодильникомъ. . . . .	3	6	3,78 $K_{IV} D$

Численныя выводы этой таблицы ясно приводятъ къ слѣдующимъ заключенiямъ:

1) Машины безъ расширенiя пара и безъ холодильника составляютъ наигрубѣйшiе прiемники работы пара, и потому

(\*) Въ машинахъ этой системы рѣдко употребляютъ пары въ 6 или даже 5 атмосферъ, потому что упругость паровъ, кончившихъ свое дѣйствiе, производитъ при каждомъ обратномъ ходѣ поршня значительное противодѣйствiе его движенiю, особенно, если выходъ паровъ изъ цилиндра въ атмосферу не совсѣмъ свободенъ.

(\*\*) Машины паровозныя и всѣ тѣ, въ которыхъ паръ выпускаютъ въ атмосферу выдувными трубочками, давленiе  $p_1$  пара, находящагося по другую сторону поршня, бываетъ всегда больше атмосфернаго и оттого полезное дѣйствiе этихъ машинъ менѣе означеннаго въ таблицѣ и вычисленнаго для машинъ, дѣйствующихъ естественною тягою, въ которыхъ выходъ паровъ изъ цилиндра не стѣсненъ малыми размѣрами пароотводовъ.



не должны быть вовсе устраиваемы, исключая развѣ только тѣхъ случаевъ въ небольшихъ машинахъ, гдѣ для простоты устройства ихъ жертвуютъ излишними расходами горючаго матеріала, не составляющаго ощутительныхъ издержекъ при малыхъ машинахъ.

2) Единственное достоинство, дѣлающее машины Уатта общеупотребительными, есть малая упругость работающаго пара, потому они и называются машинами низкаго давленія. Относительно всѣхъ удобствъ, происходящихъ отъ употребленія пара малой упругости, машины Уатта превосходятъ всѣ прочія системы. Но какъ паръ дѣйствуетъ безъ отсѣчки во весь ходъ поршня, по этому эти машины расходуютъ, сравнительно говоря, слишкомъ много пара и требуютъ бѣльшаго, противу машинъ съ расширеніемъ, количества воды для охлажденія пара, окончившаго свое дѣйствіе, и это составляетъ ихъ неудобство, вслѣдствіе котораго нынѣ во всѣхъ случаяхъ, гдѣ возможно употребить охлажденіе пара, употребляются машины средняго давленія, т. е. съ расширеніемъ.

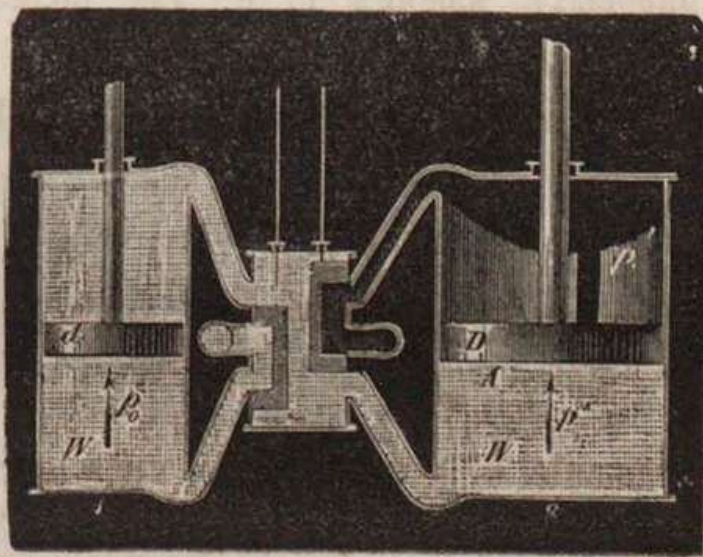
3) Во всѣхъ же тѣхъ случаяхъ, гдѣ нѣтъ никакой возможности употребить охлажденіе пара, машины безъ холодильника съ расширеніемъ заступаютъ мѣсто машинъ съ холодильниками. Они хотя выгодны въ отношеніи полезной работы, ими доставляемой, но требуютъ очень высокой упругости пара въ котлѣ, и потому употребленіе этихъ машинъ сопряжено со всѣми неудобствами и даже опасностями, сопровождающими употребленіе пара высокой упругости.

4) Машины съ расширеніемъ пара и холодильникомъ между всѣми существующими системами составляютъ наиблагоднѣйшія. Они не требуютъ слишкомъ большой упругости пара, и, расходуя меньшее количество паровъ, про-



тиву машинъ Уатта, употребляютъ и меньше воды для охлажденія его.

§ 26. Особенное устройство машинъ съ расширеніемъ пара и холодильникомъ представляютъ машины Вульфа, въ которыхъ паръ дѣйствуетъ въ двухъ цилиндрахъ—въ одномъ изъ нихъ полною упругостію, а въ другомъ расширеніемъ. Приложимъ формулу Понеле къ этому роду машинъ и опредѣлимъ какое преимущество представляютъ они предъ машинами того же рода, но въ которыхъ дѣйствіе пара полною упругостію и расширеніемъ производится въ одномъ цилиндрѣ. Паръ, окончивши дѣйствіе въ первомъ цилиндрѣ переходитъ во второй, въ которомъ работаетъ расширеніемъ по мѣрѣ постепеннаго увеличенія объема, описываемаго поршнемъ *A* (фигура 16). Назовемъ объемъ, описываемый



фигура 16.

поршнемъ перваго цилиндра въ одинъ размахъ его, чрезъ *u*, а описываемый поршнемъ втораго цилиндра чрезъ *W*. Известно, что работа, соотвѣтствующая приращенію объема упругой жидкости вълѣдствіе давленія, производимаго частичными силами, выражается произведеніемъ изъ величины



давления, производящего расширение жидкости на приращение объема, въ опредѣленный промежутокъ времени.

Примѣняя это опредѣленіе къ пару, замѣтимъ, что дѣйствіе частичныхъ силъ, проявляющееся въ расширеніи пара, происходитъ отъ дѣйствія теплорода, слѣдовательно увеличивается съ температурою самого пара, и измѣряется его упругостію. По этому для пара разсматриваемая работа частичныхъ силъ можетъ быть выражена произведеніемъ упругости его на приращеніе объема въ извѣстное время. Такимъ образомъ, если  $w$  есть первоначальный объемъ пара, работающаго на поршень полною упругостію въ цѣлый его ходъ, т. е. равенъ  $\frac{\pi d^2}{4} l$ , и  $p$  упругость этого пара, то работа частичныхъ силъ, соотвѣтствующая приращенію  $dw$  въ одно мгновеніе будетъ  $p dw$ . Для періода же движенія паровыхъ машинъ т. е. для полного размаха поршня эта работа будетъ соотвѣтствовать увеличенію первоначальнаго объема  $w$  до окончательнаго  $W$  и будетъ равна.

$$\int_w^W p dw$$

Поэтому выраженіе *полной работы* пара въ одинъ размахъ поршней для машинъ разсматриваемаго устройства, получимъ слѣдующій видъ:

$$p_0 \frac{\pi d^2}{4} l + \int_w^W p dw - p' \frac{\pi D^2}{4} L \dots \dots (26)$$

гдѣ упругость  $p$  пара окончательно расширеннаго, до объема  $W$  и равная  $p$ , можетъ быть опредѣлена въ зависимости



отъ первоначальной упругости  $p_0$ , по закону Мариотта, въ силу котораго

$$p_1 : p_0 = w : W, \dots \dots \dots (\delta)$$

откуда

$$p_1 = p_0 \frac{w}{W}$$

Подставимъ теперь это выраженіе упругости  $p_1$  во второй членъ выраженія (26) получимъ

$$\int_w^W p_1 dw = \int_w^W p_0 \frac{w}{W} dw = p_0 w \log. \text{hyp.} \frac{W}{w}, \text{ или}$$

$$= p_0 w \log. \frac{p_0}{p_1} \left( \text{по пропорціи } (\delta) \right)$$

Слѣдовательно работа, доставляемая паромъ въ машинахъ этого рода, въ одинъ размахъ поршней, есть

$$p_0 \frac{\pi d^2}{4} l + p_0 \frac{\pi d^2}{4} \left( \log. \text{hyp.} \frac{p_0}{p_1} - p_1 \frac{\pi D^2}{4} L \right) \text{ или}$$

$$p_0 \frac{\pi d^2}{4} l \left( 1 + \log. \text{hyp.} M - \frac{p_1}{p_0} M \right), \quad (27) \quad (*)$$

выраженіе тоже самое, какое имѣли и для машинъ съ однимъ цилиндромъ. Выходить изъ этого, что употребленіе двухъ цилиндровъ (съ цѣлю расширенія пара), вопреки мнѣнію нѣкоторыхъ, не увеличиваетъ полезнаго дѣйствія двигателя,

$$(*) \text{ Ибо } \frac{p_0}{p_1} = M, \text{ и } p_1 \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{p_0 \frac{\pi d^2}{4} l \cdot p_1 \frac{\pi D^2}{4} L}{p_0 \frac{\pi d^2}{4} l} =$$

$$= p_0 \frac{\pi d^2}{4} l \cdot \frac{p_1}{p_0} M,$$

такъ какъ чрезъ  $M$  назвали степень расширенія пара т. е.

$$\frac{\pi D^2}{4} L$$

$$\frac{\pi d^2}{4} l$$



и слѣдовательно количество работы, доставляемой расширеніемъ пара *не зависитъ отъ формы сосуда и его измѣненій, но только отъ разности объемовъ* окончательно полученнаго паромъ послѣ расширенія и начальнаго, который онъ занималъ до расширенія, дѣйствовавъ полною упругостію.

#### VI. ДВИЖЕНІЕ ПАРА ОТЪ КОТЛА КЪ ЦИЛИНДРУ.

§ 27. Паръ, при движеніи его изъ котла въ цилиндръ, терпитъ двѣ потери: во первыхъ охлажденіе его отъ дѣйствія наружнаго воздуха на стѣнки паропроводныхъ трубъ и потерю нѣкоторой части его плотности, когда онъ входитъ изъ меньшей средины въ большую, напр. изъ паропроводной трубы въ цилиндръ. Нѣкоторые писатели полагаютъ, что движеніе пара въ паропроводныхъ трубахъ, имѣющихъ не одинаковое живое сѣченіе по всей ихъ длинѣ, вредно потому, что при этомъ *теряется часть живой силы пара*, подобно тому, какъ это бываетъ при движеніи газовъ. По нашему мнѣнію такое предположеніе не можетъ имѣть вѣрнаго примѣненія къ пару, какъ къ жидкости, упругой въ высшей степени. Скорѣе же сжатые размѣры срединъ, по которымъ течетъ паръ, и движеніе его по срединамъ различныхъ измѣреній не выгодны въ томъ отношеніи, что при всякомъ измѣненіи формы паровой струи и потомъ ея разсѣянніи въ большемъ пространствѣ, какъ это бываетъ при входѣ пара въ цилиндръ, плотность пара значительно уменьшается и вмѣстѣ съ нею его упругость. Впрочемъ такъ или иначе, но чтобы паръ сохранялъ сколько можно въ большей степени упругость, полученную имъ въ котлѣ, нужно представлять движенію струи его возможно одина-



ковое живое сѣченіе. На этомъ основаніи діаметры паропроводныхъ трубъ и паровыхъ оконъ въ цилиндрахъ должны быть въ опредѣленномъ, не превосходящемъ извѣстныхъ предѣловъ, отношеніи къ діаметру пароваго цилиндра; въ этомъ можно руководствоваться безчисленными примѣрами построенныхъ уже машинъ, замѣчательныхъ наибольшимъ полезнымъ дѣйствіемъ. При большемъ живомъ сѣченіи движущагося пара, или, другими словами, при большемъ діаметрѣ паропроводныхъ трубъ упругость пара менѣе страдаетъ отъ охлажденія, потому что при большемъ объемѣ струя движущагося пара представляетъ, сравнительно, меньшую поверхность соприкасання съ стѣнками трубы и слѣдовательно съ наружнымъ воздухомъ. Между тѣмъ встрѣчается мало машинъ, въ которыхъ это обстоятельство было бы соблюдено согласно съ приведенными здѣсь указаніями. Строители паровыхъ машинъ, паропроводнымъ трубамъ даютъ обыкновенно діаметръ около  $\frac{1}{6}$  и  $\frac{1}{8}$  діаметра пароваго цилиндра; намъ случалось видѣть и такія машины, въ которыхъ паровые пролеты и окна имѣли площадь не болѣе какъ  $\frac{1}{80}$  или  $\frac{1}{90}$  часть площади пароваго поршня.

Моренъ, въ его сочиненіи: «*Leçons de mécanique pratique, 3 partie, des machines à vapeur,*» изложилъ довольно замѣчательную теорію движенія пара, и выводитъ причины разности упругостей паровъ въ котлѣ и цилиндрѣ. Разсужденія его приводятъ къ тому заключенію, что эта разность *пропорціональна* слѣдующимъ величинамъ: *плотности пара, квадрату скорости поршня и четвертой степени отношенія между діаметрами пароваго цилиндра и паропроводныхъ трубъ.*

Такъ какъ съ плотностію пара возрастаетъ и его упругость, поэтому *разность упругостей паровъ въ котлѣ*



*и цилиндръ*, сравнительно говоря, при всѣхъ прочихъ одинаковыхъ обстоятельствахъ, *больше въ машинахъ высокаго, нежели въ машинахъ низкаго давленія*. Далѣе выводъ Морена приводитъ къ слѣдующему разсужденію о размѣрахъ паропроводныхъ трубъ: что для наименьшей разности между означенными упругостями, *отношеніе діаметровъ пароваго цилиндра и паропроводныхъ трубъ* должно быть *пропорціоально* въ свою очередь *плотности пара и квадрату скорости поршня*. Слѣдовательно въ машинахъ высокаго давленія діаметръ паропроводныхъ трубъ долженъ быть, сравнительно говоря, больше нежели въ машинахъ низкаго давленія, потому что плотность употребляемаго пара больше. По этой же причинѣ и въ паровозахъ, въ которомъ поршень движется часто съ наибольшею скоростію, діаметръ паропроводныхъ трубъ весьма значителенъ.

Для того, чтобы защитить внѣшнюю поверхность паропроводныхъ трубъ и цилиндра отъ дѣйствія наружнаго воздуха, производящаго охлажденіе пара, одѣваютъ ее слоємъ матеріаловъ изъ худыхъ проводниковъ теплорода какъ напр. войлоками, рубленой соломой и проч. и обшиваютъ потомъ деревомъ. Или дѣлаютъ паровые цилиндры съ двойными стѣнками и въ промежутокъ между ними пропускаютъ паръ, когда онъ течетъ изъ котла въ паровой цилиндръ для дѣйствія на поршень.

## VII. ТЕОРІЯ ПАМБУРА.

§ 28. Мы видѣли, что формула Понселе можетъ только служить для приблизительнаго опредѣленія полезнаго дѣй-



ствія данной паровой машины, по извѣстнымъ ея размѣрамъ, давленію пара и скорости движенія поршня; но не можетъ быть опредѣлена скорость, по данному сопротивленію, или на оборотъ, не могутъ быть пріисканы сопротивленіе и скорость, соотвѣтствующія наибольшей полезной работѣ т. е. наивыгоднѣйшему дѣйствію машины. Далѣе не можетъ быть найдена испаряемость котла для даннаго полезнаго сопротивленія, или полезной работы, какую машина должна доставить; наконецъ не можетъ быть опредѣлена наивыгоднѣйшая степень расширенія пара. Всѣ эти вопросы должны входить въ область теоріи и могутъ быть рѣшены помощію уравненій, выведенныхъ по ея указаніямъ.

Положивъ прочное основаніе теоріи паровыхъ машинъ, Памбуръ въ то же время вывелъ общую зависимость между количествомъ расходуемаго пара, преодолеваемымъ сопротивленіемъ и скоростью движенія поршня.

Производя въ 1834 и 1835 годахъ опыты надъ паровозами Манчестерско—Ливерпульской желѣзной дороги, которые въ то время были безъ расширенія, Памбуръ нашелъ, что упругость паровъ въ цилиндрахъ во все не равна и не пропорціональна упругости ихъ въ котлѣ. Подобные же результаты были получены при его же опытахъ надъ водокачальными машинами города Брайтона и опытахъ Генвуда надъ различными Корнваллійскими машинами. Какъ Памбуръ такъ и Генвудъ, вслѣдствіе произведенныхъ ими опытовъ, пришли къ тому непреложному заключенію, что упругость пара *всегда равна сопротивленію, противопоставляемому поршнемъ*. Этотъ выводъ и былъ первымъ основаніемъ при созиданіи Памбуромъ его теоріи паровыхъ машинъ.

Въ сочиненіи Памбура *Théorie des machines à vapeur* показаны опыты, произведенные имъ съ цѣлію открыть за-



конъ измѣненія упругости пара въ цилиндрѣ во время движенія поршня. Опыты ясно показали, что паръ, при проходѣ чрезъ всѣ части машины, какъ то: паропроводныя трубы, коробки, золотники, цилиндръ, не сохраняетъ постоянной температуры, полученной имъ въ котлѣ, и что сверхъ того пары, проходя по всѣмъ означеннымъ срединамъ во все время сообщенія котла съ цилиндромъ, стремятся всегда къ точкѣ насыщенія. Кромѣ того, Памбуръ повѣрилъ предположенія Навье при тѣхъ же опытахъ и узналъ, что законъ измѣненія упругостей паровъ въ зависимости отъ занимаемыхъ ими объемовъ, весьма близокъ къ предположенію этого ученаго (§ 7 bis.)

§ 29. Зависимость между всѣми условіями, входящими въ вопросъ о паровыхъ машинахъ, выведена Памбуромъ изъ двухъ началъ: во первыхъ, что работа пара, передаваемая поршнемъ, расходуется *вся* на преодоленіе полезныхъ и вредныхъ сопротивленій, дѣйствующихъ по другую сторону поршня и что паръ, образующійся въ паровикѣ, *весь* расходуется въ паровомъ цилиндрѣ. Теорія опредѣляетъ зависимость между всѣми условіями, входящими въ вопросъ о паровыхъ машинахъ, только для *нормальнаго хода* машины, т. е. такого, при которомъ всѣ части ея приняли *обыкновенную* скорость, при которой движитель въ состояніи преодолевать представляемое ему сопротивление. Нормальное же движеніе машинъ можетъ быть только въ такомъ случаѣ когда при извѣстной скорости (обыкновенной) работа силъ, приложенныхъ къ неизмѣняемой системѣ матеріальныхъ точекъ для каждаго періода равна нулю. Слѣдовательно, прилагая это къ паровымъ машинамъ выходитъ, что въ нихъ нормальное движеніе можетъ быть только тогда, если работы движителя и сопротивленій взаимно уравниваются



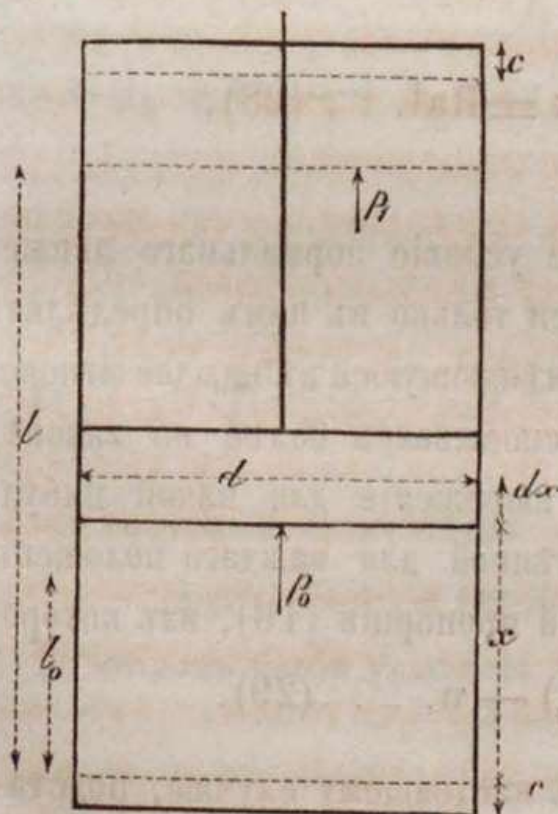
въ каждый періодъ движенія машины. <sup>3</sup>Изобразимъ теперь это условіе нормальнаго движенія паровой машины уравне-ніемъ. Для этого означимъ чрезъ  $a$  площадь и чрезъ  $l$  ходъ пароваго поршня,  $p_0$  упругость пара въ цилиндрѣ, суще-ствующую во все время сообщенія цилиндра съ паровымъ котломъ,  $p'$  давленіе пара на единицу площади со стороны холодильника или атмосферы. Разсматривая общій случай движенія паровыхъ машинъ, мы представимъ нормальное движеніе для машинъ съ расширеніемъ пара.

Полная работа пара, дѣйствующаго на паровой поршень, равна суммѣ работъ: той, которую онъ производитъ дѣй-ствуя полною упругостію, и работы, доставляемой паромъ послѣ прекращенія сообщенія пароваго цилиндра съ котломъ.

Работа пара полною упругостію будетъ равна

$$p_0 a l_0,$$

принимая что упругость  $p_0$  остается постоянною во все



время притока пара изъ котла въ цилиндръ. Послѣ отсѣчки упругость пара не постоянна; она измѣняется въ каждое мгновеніе, такъ что называя чрезъ  $p_x$  упру-гость пара въ какое нибудь положеніе поршня  $x$ , рабо-та, соответствующая этому положенію и для бесконечно малаго промежутка времени въ которое онъ проходитъ пространство  $dx$ , будетъ

$$p_x a dx.$$

Фигура 17.



Для всей же остальной части хода поршня  $l - l_0$  работа пара будетъ

$$\int_{l_0}^l p_x a dx. \dots (a)$$

И такъ вся работа пара съ одной стороны поршня въ цѣлый одиночный размахъ его будетъ

$$p_0 a l_0 + \int_{l_0}^l p_x a dx. \dots (b).$$

Называя чрезъ  $R$  сопротивленіе всѣхъ полезныхъ и вредныхъ противудѣйствій съ другой стороны поршня на единицу площади, и уравнивая работу, произведенную этимъ сопротивленіемъ  $R$  въ теченіи всего хода поршня  $l$ , работѣ пара (b), получимъ уравненіе

$$p_0 a l_0 + \int_{l_0}^l p_x a dx = R a l, \dots (28),$$

выражающее вышеупомянутое условіе нормального движенія паровой машины. Остается только въ немъ опредѣлить переменную величину  $p_x$ , измѣняющуюся въ каждое мгновеніе при движеніи поршня. Основываясь болѣе на законѣ, открытомъ Навье, найдемъ выраженіе для какой нибудь упругости пара  $p_x$ , переменной для каждаго положенія поршня  $x$ , помощію извѣстной пропорціи (16), изъ которой

$$p_x = \frac{V_0}{V_x} (p + p_0) - p. \dots (29).$$

Прилагая это уравненіе къ настоящему случаю, подставимъ вмѣсто объемовъ  $V_0$  и  $V_x$  обозначаемые ими объемы,



а  $(l_0 + c)$  и а  $(x + c)$ ,  
соотвѣтствующіе полному ходу поршня  $l$  и части его  $x$ .  
Тогда уравненіе (28) приметъ слѣдующій видъ:

$$p_x = \frac{l_0 + c}{x + c} (n + p_0) - n, \dots (29 \text{ bis})$$

въ которомъ  $p_0$  есть упругость работающаго пара, пока  
еще не прекращено сообщеніе цилиндра съ котломъ. Вста-  
вляя во второй членъ уравненія (а) выведенную величину  
для упругости  $p_x$  и интегрируя полученное количество бу-  
демъ имѣть постепенно

$$\begin{aligned} \int_{l_0}^l p_x dx &= a \int_{l_0}^l p_x dx = a \int_{l_0}^l \left\{ \frac{l_0 + c}{x + c} (n + p_0) - n \right\} dx = \\ &= a (l_0 + c) (n + p_0) \int_{l_0}^l \frac{dx}{x + c} - an \int_{l_0}^l dx = \\ &= a (l_0 + c) (n + p_0) \log. \frac{l + c}{l_0 + c} - an (l - l_0) \dots (*) \end{aligned}$$

(\*) Ибо

$$\int_{l_0}^l \frac{dx}{x + c} = \int_{l_0}^l \frac{d(x + c)}{x + c} = \int_{l_0}^l d \left\{ \log. (x + c) \right\} = \int_{l_0}^l \log. (x + c),$$

а это выраженіе можетъ быть обращено въ слѣдующее:

$$\log. (l + c) - \log. (l_0 + c) = \log. \frac{l + c}{l_0 + c}$$

Во второмъ членѣ уравненія

$$\int_{l_0}^l dx = l - l_0$$



и въ уравненіи (28)

$$p_0 a l_0 + a (l_0 + c) (n + p_0) \log. \frac{l_0 + c}{l_0} - a n (1 - l_0) = \\ = R a l. \dots \dots (30)$$

Взявъ изъ него два члена  $p_0 a l_0 + a n l_0$  и преобразовывая ихъ, будемъ имѣть

$$a l_0 (n + p_0).$$

Умноживъ и раздѣливъ это количество на вводную величину  $(l_0 + c)$  получимъ

$$a l_0 (n + p_0) \frac{l_0 + c}{l_0} = a (l_0 + c) (n + p) \frac{l_0}{l_0 + c}$$

Слѣдовательно уравненіе (30) можно изобразить слѣдующимъ образомъ

$$a (l_0 + c) (n + p_0) \left\{ \frac{l_0}{l_0 + c} + \log. \frac{l_0 + c}{l_0} \right\} - a n l_0 = R a l (31)$$

все количество дѣйствія машины, преодоляющее полезныя и бесполезныя сопротивленія, въ одинъ размахъ или одиночный ходъ поршня.

§ 30. Изъ этаго перваго условія неминуемо проистекаетъ другое, что въ паровыхъ машинахъ, при нормальномъ ихъ движеніи, количество пара, образующееся въ котлѣ въ каждое мгновеніе необходимо должно расходоваться *все* въ паровомъ цилиндрѣ, иначе работа движителя будетъ по прошествіи каждаго разсматриваемаго мгновенія превосходить работу сопротивленій, и скорость машины должна неизбежно измѣняться.

Если это и предъидущее условія существуютъ, только тогда можно вывести зависимость между всѣми величинами, входящими въ вопросъ о паровой машинѣ.

Назовемъ чрезъ  $S$  объемъ воды, испаряющейся въ котлѣ въ 1 секунду, то объемъ пара, полученный изъ этаго



объема воды при упругости  $p_0$  будетъ

$$V = \frac{m}{n + p_0} S,$$

который долженъ расходоваться въ цилиндрѣ въ теченіи того же промежутка времени т. е. 1 секунды.

Мы уже говорили, что въ паровыхъ цилиндрахъ движеніе поршня устраивается всегда такъ, что онъ при началѣ и концѣ своего хода не доходитъ до крышки или до дна цилиндра для того, чтобы въ этихъ промежуткахъ помѣстить отверстія паровыхъ пролетовъ, сообщающихъ цилиндръ съ коробкою, и для избѣжанія ударовъ поршня объ основаніи цилиндра.

При каждомъ ходѣ поршня паръ наполняетъ собою вмѣстимость цилиндра, паровой пролетъ и зазоръ, т. е. пространство между поршнемъ и основаніемъ цилиндра. Когда же поршень начинаетъ обратный ходъ, пары эти вылетаютъ въ атмосферу или въ холодильникъ. Слѣдовательно называя чрезъ  $c$  часть высоты цилиндра, соответствующую такъ называемому зазору, въ каждый одиночный размахъ поршня расходуется объемъ пара

$$a (l_0 + c);$$

если въ 1 секунду поршень дѣлаетъ  $\mu$  двойныхъ размаховъ, соответствующихъ полному обороту вала машины, то объемъ пара, расходуемаго въ цилиндрѣ въ 1 секунду, будетъ при машинахъ двойнаго дѣйствія

$$2 a (l_0 + c) \frac{\mu}{60}, \text{ или}$$

$$a (l_0 + c) \frac{v}{1},$$

такъ какъ пространство  $\frac{2\mu}{60}$  l. пробѣгаемое поршнемъ въ 1



секунду, составляет его скорость, откуда

$$\frac{2\mu}{60} = \frac{v}{1}.$$

Теперь получим *выраженіе* разсматриваемаго условія

$$S \frac{m}{n + p_0} = a (l_0 + c) \frac{v}{1} \dots \dots \dots (32)$$

§ 31. Это уравненіе можетъ послужить намъ для опредѣленія *скорости поршня*  $v$  въ зависимости отъ всѣхъ прочихъ обстоятельствъ движенія паровой машины. Сдѣлавъ перемѣщеніе въ множителяхъ этаго уравненія, получимъ

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{m}{n + p_0} \cdot \frac{1}{l_0 + c}, \dots \dots \dots (33)$$

т. е. что скорость поршня, будучи пропорціональна объему испаряемой воды въ котлѣ, уменьшается съ увеличиваніемъ упругости пара  $p_0$  въ цилиндрѣ. И дѣйствительно, по мѣрѣ того, какъ сопротивленія, представляемыя поршню, начинаютъ увеличиваться во время хода машины, скорость поршня уменьшается, тогда какъ давленіе пара на поршень будетъ больше потому, что оно всегда равно сопротивленію, преодолѣваемому поршнемъ (уравн. 31).

Но выведенное уравненіе (32) не можетъ быть въ такомъ видѣ употреблено для опредѣленія скорости поршня проектируемой машины, потому что въ уравненіе входитъ упругость пара въ цилиндрѣ  $p_0$ , которой величина неизвѣстна.

Основываясь на отношеніи между упругостію пара въ цилиндрѣ и сопротивленіемъ, преодолѣваемымъ поршнемъ, выраженнымъ уравненіемъ (30), употребимъ это послѣднее для преобразованія уравненія (32), которое выразитъ тогда скорость поршня въ зависимости не отъ упругости пара  $p_0$  въ цилиндрѣ, а отъ сопротивленія  $R$ , которое во всякомъ



случаѣ уже извѣстно. Сперва назовемъ для краткости мно-  
жителя

$$\frac{l_0}{l_0 + c} + \log. \frac{l + c}{l_0 + c}$$

чрезъ  $k$ , тогда въ уравненіе

$$a (l_0 + c) (n + p_0) \left( \frac{l_0}{l_0 + c} + \log. \frac{l + c}{l_0 + c} \right) - nal = Ral,$$

или

$$a (l_0 + c) (n + p_0) k - anl = Ral.$$

На мѣсто множителя  $(n + p_0)$  подставимъ равную ему ве-  
личину

$$\frac{Sml}{av (l_0 + c)},$$

и получимъ

$$a (l_0 + c) k \frac{Sml}{a (l_0 + c) v} - anl = Ral,$$

или по сокращеніи

$$\frac{Smkl}{v} - anl = Ral,$$

откуда окончательно скорость поршня

$$v = \frac{Smk}{a (n + R)} \dots \dots \dots (34)$$

въ зависимости отъ испаряемости котла  $S$ , сопротивленія  $R$ , преодолеваемого машиною и степени расширенія пара. Такимъ образомъ при данномъ устройствѣ машины, и при извѣстныхъ  $S$  и  $R$ , помощію этой формулы можно опредѣ-  
лить скорость поршня  $v$ . Остается теперь только раз-  
смотреть, изъ какихъ элементовъ состоитъ сопротивленіе  $R$ , преодолеваемое поршнемъ при его движеніи.

§ 32. Полное сопротивленіе  $R$ , преодолеваемое порш-  
немъ, есть сумма многихъ частныхъ сопротивленій, ка-



ковы — *противудѣйствіе пара*, остающагося по другую сторону поршня, и выходящаго въ атмосферу или холодильникъ; *сопротивленіе полезное*, составляющее цѣль и предметъ работы движителя; *сопротивленія безполезныя*, зависящія отъ физическаго состава машины и неизбѣжныя при всякомъ движеніи тѣлъ вѣсомыхъ; наконецъ въ перемѣщающихся машинахъ, каковы паровозныя, еще сопротивленіе воздуха движенію поѣзда.

Давленіе паровъ по другую сторону поршня бываетъ различно смотря по системѣ машины. Въ машинахъ съ холодильникомъ это давленіе весьма мало въ сравненіи съ упругостію работающаго пара, и составляетъ около  $1\frac{1}{2}$ —2 фунтовъ на квадратный дюймъ. Между тѣмъ какъ въ машинахъ безъ холодильника, оно не бываетъ никогда менѣе атмосфернаго, и нерѣдко превышаетъ его отъ причинъ, соединенныхъ съ устройствомъ машины.

Назовемъ давленіе паровъ, кончившихъ свое дѣйствіе, чрезъ  $p$  (на единицу площади поршня) и чрезъ  $g$  давленіе, также на единицу площади, отъ полезнаго сопротивленія, представляемаго обработываніемъ продукта.

Безполезныя сопротивленія движенію поршня составляютъ: треніе составныхъ частей машины и приводовъ и сопротивленіе воздуха движенію ихъ. Чтобы двигать паровой поршень и всѣ остальные части машины, когда машина расцѣплена съ приводами, нужна нѣкоторая сила, равная тренію ея частей. Назовемъ это треніе чрезъ  $f$ . Для движенія приводовъ отдѣльно отъ частей машины нужна нѣкоторая сила  $f_1$ . Теперь если машину сцѣпить съ приводами, то давленія въ движущихся частяхъ машины увеличатся пропорціонально  $f_1$ , такъ что треніе въ нихъ будетъ не  $f$ , а  $f + \alpha f_1$ , и слѣдовательно для преодоленія треній



машины, пущенной въ ходъ съ приводами, но порожемъ, нужна сила

$$f + f_1 (1 + \delta),$$

гдѣ  $\delta$  коэффициентъ тренія частей машины. Далѣе, когда исполнительные механизмы съ ихъ производствомъ работъ будутъ сѣвлены съ приводами движеній, то давленія а слѣдовательно и тренія частей машины и приводовъ, увеличатся. Допуская, что означенное приращеніе тренія пропорціонально давленію  $r$  отъ полезныхъ сопротивленій, найдемъ согласно съ предъидущимъ, что для преодоленія сопротивленій  $r$  и треній, отъ нихъ зависящихъ, нужна сила

$$r + \delta r + \delta' r = r (1 + \delta + \delta') = r (1 + \Delta).$$

гдѣ  $\delta'$  коэффициентъ тренія приводовъ, а

$$\Delta = \delta + \delta'.$$

Наконецъ для преодоленія противудѣйствія  $Q$  воздуха и треній, отъ него зависящихъ, нужна сила.

$$Q (1 + \delta + \delta') = Q (1 + \Delta).$$

Треніе маховаго колеса можно опредѣлять вмѣстѣ съ частями машинами и отдѣльно.

Всѣ означенныя сопротивленія, и полезныя и бесполезныя, передаются поршню. Предполагая, что ихъ давленія рассчитаны на единицу площади поршня, получимъ выраженіе полного сопротивленія  $R$  въ слѣдующемъ видѣ:

$$R = p + f + f_1 (1 + \delta) + (r + Q) (1 + \Delta) \dots \dots (35).$$

§ 33. Подставляя теперь на мѣсто сопротивленія  $R$  равную ему величину въ уравненіе (34) скорости поршня, получимъ

$$v = \frac{mSk}{a \{ p + f + f_1 (1 + \delta) + (r + Q) (1 + \Delta) \}} \dots \dots (36)$$



уравненіе, опредѣляющее скорость поршня въ величинахъ, зависящихъ только отъ устройства машины и котла.

Имѣя какую нибудь машину, назначенную для извѣстной работы, и зная размѣры котла, приготовляющаго паръ для дѣйствія ея, слѣдовательно по извѣстнымъ  $S$  и  $m$ ,  $k$ ,  $a$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $f$ ,  $f_1$ ,  $\delta$ ,  $\delta'$ ,  $g$ ,  $Q$  можно опредѣлить скорость  $v$ , съ которою поршень можетъ преодолевать назначенное для него полезное сопротивленіе  $g$  (\*). Точно также этимъ уравненіемъ можно пользоваться и въ тѣхъ случаяхъ, когда по даннымъ размѣрамъ паровой машины и скорости движенія ея поршня желаютъ найти испаряемость  $S$  и слѣдовательно размѣры котла, или отыскать полезное сопротивленіе  $g$ , которое въ состояніи преодолѣть машина при извѣстныхъ ея размѣрахъ и данной ея скорости.

§ 34. *Полезное дѣйствіе машины при данныхъ ея размѣрахъ и скорости поршня.* Изъ уравненія (36) скорости поршня можно вывести, сдѣлавъ надлежащія преобразованія, величину давленія преодолеваемого поршнемъ при скорости его  $v$

$$ag = \frac{mSk}{a(1 + \Delta)} - \frac{a}{(1 + \Delta)} \left\{ (n + p + f + f_1(1 + \delta)) \right\}. \quad (37)$$

въ машинахъ постоянныхъ, и

$$ag = \frac{mSk}{v(1 + \Delta)} - \frac{a}{(1 + \Delta)} \left\{ n + p + f + f_1(1 + \delta) + \right. \\ \left. + Q(1 + \Delta) \right\} \dots \dots \dots (37 \text{ bis.})$$

въ подвижныхъ—уравненія, обнаруживающія, что поршень

---

(\*) Въ постоянныхъ или фабричныхъ машинахъ сопротивленіемъ воздуха  $Q$  можно пренебречь по его незначительности.



какой нибудь машины, преодолеваетъ сопротивление, *обратно пропорціональное* его скорости.

Умноживъ объ части уравненія на скорость поршня  $v$  получимъ уравненіе *работы пара* въ секунду,

$$agr = \frac{mSk}{(1 + \Delta)} - \frac{av}{(1 + \Delta)} \left\{ n + p + f + f_1(1 + \delta) \right\},$$

или

$$agr = \frac{mSk - av(n + p + f + f_1(1 + \delta))}{1 + \Delta}, \dots (38)$$

изъ котораго видно, что скорость поршня  $v$  входитъ въ отрицательные члены, такъ что *полезная работа*  $agr$ , которую машина въ состояніи произвести при данныхъ своихъ размѣрахъ, будетъ *наибольшею при наименьшей скорости поршня*.

Разсматривая составъ этого уравненія, не трудно замѣтить, что работа пара, соответствующая нормальному движению, *обуславливается устройствомъ котла и машины*, независимо отъ упругости пара въ котлѣ. По этому *нормальная работа* машины не можетъ быть увеличена безъ измѣненія устройства или одной какой либо части, или всего организма пріемника. Нормальная упругость также опредѣляется системою машины и котла и не можетъ быть увеличена или уменьшена безъ того, чтобы движеніе машины оставалось *нормальнымъ*. Стало бытъ для данной машины и котла паръ можетъ производить только *опредѣленную работу* при нормальномъ движеніи движущихся частей машины.

§ 35. *Испаряемость котла*. Изъ того же уравненія (36) скорости поршня выведемъ величину испаряемости котла



$$S = \frac{av(n + p + f + f_1(1 + \delta) + (r + Q)(1 + \Delta))}{mk}, \dots (39)$$

и получимъ уравненіе, изъ котораго видно, что величина  $S$ , прямо пропорціональная размѣрамъ машины и скорости движенія поршня, содержится въ обратномъ содержаніи съ степенью расширенія пара, такъ что при возможно большемъ расширеніи пара, испаряемость котла будетъ наименьшая. Такъ какъ въ свою очередь размѣры машины имѣютъ тѣсную связь съ ея сложностію, слѣдовательно съ сложностію машины увеличивается и испаряемость котла  $S$ .

§ 36. Всѣ вышеизложенныя уравненія выведены только для *нормальнаго* хода машины, при которомъ она побѣждаетъ обыкновенное сопротивленіе. Но, кромѣ обыкновенной работы, всякая машина должна быть въ состояніи преодолевать бѣльшія сопротивленія, могущія встрѣтиться во время ея дѣйствія, такъ напр. въ заводскихъ машинахъ сопротивленіе можетъ увеличиться отъ прибавленія лишняго исполнительнаго механизма или рабочей машины; въ подвижныхъ же, именно — въ паровозахъ, сильное давленіе вѣтра, подъемъ и скатъ увеличиваютъ сопротивленіе, побѣждаемое машиною; и наконецъ въ пароходахъ ходъ судна противу сильнаго теченія воды, необходимость увеличить скорость движенія парохода въ нѣкоторыхъ обстоятельствахъ и проч. На всѣ таковыя сопротивленія машина должна имѣть *запасъ* силы и въ случаѣ надобности доставить большую работу противу обыкновенной. Чтобы судить, въ какой степени преодолѣніе такихъ препятствій возможно для извѣстной машины, опредѣлимъ.

*Условія возможно наибольшаго полезнаго дѣйствія данной машины. Наивыгоднѣйшая скорость поршня.* Разсматривая уравненіе (37) или (37 bis) видно, что всякая



машина при данныхъ ея размѣрахъ, преодолеваетъ наибольшій грузъ при наименьшей скорости поршня. Наименьшая же величина этой скорости можетъ быть только въ такомъ случаѣ (уравненіе (33) или (34)), когда упругость пара, работающаго въ цилиндрѣ, будетъ возможно наибольшая, для которой предѣльная величина есть, разумѣется, *упругость, существующая въ котлѣ*. И такъ, если допустимъ, что равенство между упругостями паровъ въ котлѣ и цилиндрѣ *можетъ* имѣть мѣсто, то, подставляя въ формулу (33) вмѣсто  $p$  упругость пара въ котлѣ  $P$ , получимъ выраженіе *наименьшей скорости поршня*  $v'$

$$v' = \frac{mS}{n + P} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{l_0 + c} \dots \dots \dots (40)$$

*Наибольшее полезное сопротивленіе, преодолеваемое поршнемъ*. Подставляя въ свою очередь величину наименьшей скорости поршня въ уравненіе работы пара (37) или (37 bis), получимъ выраженіе *наибольшаго полезнаго сопротивленія*, какое только можетъ преодолевать поршень данной машины. Назовемъ это наибольшее сопротивленіе чрезъ  $ar'$ , то

$$ar' = \frac{mSk}{v' (1 + \Delta)} - \frac{a}{(1 + \Delta)} (n + p + f + f_1 (1 + \delta))$$

или

$$= \frac{a}{(1 + \Delta)} \left\{ \frac{k (l_0 + c) (n + P)}{1} - (n + p + f + f_1 (1 + \delta)) \right\} (41)$$

для машинъ постоянныхъ, и

$$ar' = \frac{a}{(1 + \Delta)} \left\{ \frac{k (l_0 + c) (n + P)}{1} - (n + p + f + f_1 (1 + \delta) + Q (1 + \Delta)) \right\} \dots (41 \text{ bis})$$

для машинъ подвижныхъ.



*Наибольшая полезная работа, доставляемая данною машиною.* Помножая, подобно предыдущему, объ- части выведенныхъ сейчасъ уравненій на величину наименьшей скорости поршня  $v'$ , получимъ выраженіе возможно наибольшей полезной работы данной паровой машины, размѣры которой извѣстны

$$ar'v' = \frac{mSk}{v' (1 + \Delta)} - \frac{a}{(1 + \Delta)} (n + p + f + f_1(1 + \delta))$$

или, подставляя на мѣсто  $v'$  ея выраженіе (40)

$$ar'v' = \frac{Sm}{(1 + \Delta)} \left\{ k - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \right\} \dots (42)$$

для машинъ постоянныхъ или заводскихъ, и

$$ar'v' = \frac{Sm}{(1 + \Delta)} \left\{ k - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta) + Q(1 + \Delta)}{n + P} \right\} (42bis)$$

для машинъ подвижныхъ, подверженныхъ еще сопротивленію воздуха.

Судя по составу этихъ послѣднихъ уравненій слѣдуетъ заключить, что *наибольшая работа* машины опредѣляется не размѣрами пароваго цилиндра и не скоростью движенія поршня, а только *упругостію пара въ котль*, при данномъ расширеніи пара и извѣстной испаряемости котла. Слѣдовательно наибольшая работа данной машины можетъ быть увеличена до такой степени, на сколько *возможно* увеличить упругость паровъ, работающихъ въ цилиндрѣ.

*Наивыгоднѣйшая испаряемость котла* (\*). Изъ уравненія наивыгоднѣйшей скорости поршня (40) выведемъ выраженіе *испаряемости котла*, соотвѣтствующей

---

(\*) Всѣ обстоятельства, входяція въ эти уравненія, и соотвѣтствующія наибольшему полезному дѣйствию  $ar'v'$  называются въ теоріи *наивыгоднѣйшими*.



возможно-наибольшему полезному дѣйствию машины и обозначимъ эту наивыгоднѣйшую испаряемость котла чрезъ  $S'$  то

$$S' = \frac{av' (n + P) (l_0 + c)}{ml} \dots \dots \dots (43)$$

Сравнивая формулы наивыгоднѣйшей скорости поршня и наивыгоднѣйшей испаряемости котла, соответствующихъ возможно-наибольшему полезному дѣйствию машины, съ формулами тѣхъ же вопросовъ, но выведенныхъ для обыкновенной (нормальной) полезной работы, доставляемой машиною при нормальномъ ея ходѣ, замѣчаемъ, что при увеличеніи полезнаго сопротивленія, (при чемъ машина выходитъ каждый разъ изъ нормальнаго своего положенія), скорость машины, постепенно уменьшается и болѣе или менѣе приближается къ *предѣльно наименьшей*, представляемой уравненіемъ (40). Уравненіе же это обнаруживаетъ въ свою очередь, что по мѣрѣ уменьшенія скорости поршня, т. е. замедленія хода машины, при увеличеніи сопротивленій, упругость пара въ цилиндрѣ должна постоянно увеличиваться, приближаясь къ предѣльной величинѣ ея, т. е. упругости пара въ котлѣ. Такъ какъ эта послѣдняя есть предѣль наибольшей упругости, какую паръ можетъ имѣть въ цилиндрѣ, поэтому возможно наибольшее сопротивленіе  $ar'$  и возможно наибольшая полезная работа машины  $ar'v'$ , представляемая уравненіями (41) и (42), суть предѣльныя, для извѣстной упругости пара  $p$  въ котлѣ.

Дѣлая приблизительныя вычисленія помощію предложенныхъ формулъ, можно замѣтить, что при увеличеніи полезнаго сопротивленія, или полезной работы, доставляемой машиною, не столько восрастаетъ испаряемость котла, какъ упругость пара въ цилиндрѣ. И это совершенно справедли-



во потому, что для какого нибудь котла, испарительная способность его постоянна при надлежащемъ горѣнїи топлива на рѣшеткѣ, и не можетъ быть увеличена безъ измѣненїя формы или размѣровъ котла. Между тѣмъ, какъ упругость пара въ цилиндрѣ можетъ быть измѣнена безпрестанно при дѣйствїи уравнительнаго клапана.

§ 37. *Наивыгоднѣйшая степень расширенїя пара.*  
 Предъидущїя формулы выражаютъ условїя наибольшаго полезнаго дѣйствїя *данной* машины, слѣдовательно для опредѣленнаго расширенїя пара, будетъ ли это расширенїе наивыгоднѣйшее или не наивыгоднѣйшее. Слѣдовательно всѣ эти формулы представляютъ только сравнительное, обусловливаемое устройствомъ машины, наибольшее полезное ея дѣйствїе. *Неопредѣленно наибольшее* же или *безусловно-наибольшее полезное дѣйствїе* паровой машины опредѣляется степенью расширенїя пара, которая въ этомъ случаѣ называется *наивыгоднѣйшею*. Такимъ образомъ машина при извѣстномъ ея устройствѣ и данныхъ размѣрахъ, доставляя въ нѣкоторыхъ случаяхъ *возможно-наибольшее полезное дѣйствїе*, можетъ иногда и недоставлять еще *неопредѣленно-наибольшаго* полезнаго дѣйствїя, которое могло бы имѣть мѣсто при устройствѣ машины, болѣе совершенномъ. Наибольшее полезное дѣйствїе, изображаемое означенными предъидущими формулами, и разсматриваемое въ зависимости отъ устройства машины, можно назвать *ограниченнымъ* или *обусловленнымъ полезнымъ дѣйствїемъ* машины; *неопредѣленно-наибольшее* же есть *абсолютно-возможно-наибольшее* полезное дѣйствїе машины или *возможно наибольшее полезное дѣйствїе пара* при данной упругости его, и извѣстной испаряемости котла. И такъ, разсуждая теперь о дѣйствїи двигателя неза-



виеимо отъ устройства машины, опредѣлимъ наивыгоднѣйшую степень расширения пара, дѣйствующаго въ цилиндрѣ.

Въ уравненіи (42) видно, что наибольшая работа  $ag'v'$  зависитъ, кромѣ испаряемости котла  $S$ , еще отъ множителя

$$k = \frac{l_0}{l_0 + c} \left\{ \frac{n + p + f + f_1 (1 + \delta)}{n + P} \right\} \text{ или}$$

$$\frac{l_0}{l_0 + c} + \log. \frac{l_0 + c}{l_0 + c} - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1 (1 + \delta)}{n + P} \quad (44)$$

Такъ какъ величины  $l$  и  $l_0$  (полнаго хода поршня и высоты впуска пара въ цилиндръ) входятъ и съ положительнымъ и съ отрицательнымъ знакомъ въ множитель уравненія (42), то между всѣми возможными величинами  $l$  и  $l_0$ , т. е. между всѣми *возможными* степенями расширения пара, непременно существуетъ такая, которая соотвѣтствуетъ возможно наибольшему полезному дѣйствию работы  $ag'v'$ . Чтобы найти эту наивыгоднѣйшую степень расширения пара, нужно взять производную функцію отъ множителя (44), заключающаго въ себѣ величину  $l_0$ , и положить ее равною нулю, т. е.

$$d \left\{ \frac{l_0}{l_0 + c} + \log. \text{nat.} \frac{l_0 + c}{l_0 + c} - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1 (1 + \delta)}{n + P} \right\} = 0$$

Произведя для этаго дѣйствительное дѣйствіе дѣленія подъ первымъ членомъ  $\frac{l_0}{l_0 + c}$ , получимъ, вмѣсто предъидущаго уравненія, такое

$$d \left\{ 1 - \frac{c}{l_0 + c} + \log. \frac{l_0 + c}{l_0 + c} - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1 (1 + \delta)}{n + P} \right\} = 0 \quad (*)$$

(\*) Ибо  $\frac{l_0}{l_0 + c} = 1 - \frac{c}{l_0 + c}$



Беремъ послѣдовательно производныя функции отъ каждо-  
го члена — будемъ имѣть

$$d \left\{ 1 - \frac{c}{l_0 + c} + \log. \frac{1 + c}{l_0 + c} - \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \right\} =$$

$$= - \frac{c}{(l_0 + c)^2} + \frac{1}{l_0 + c} - \frac{l_0}{(l_0 + c)^2} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} = 0 (*).$$

Или что все равно

$$\frac{c}{(l_0 + c)^2} - \frac{1}{l_0 + c} + \frac{l_0}{(l_0 + c)^2} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} = 0.$$

Умножимъ обѣ части уравненія на  $(l_0 + c)^2$  получимъ

$$c - (l_0 + c) + l_0 \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} = 0,$$

откуда будемъ имѣть

$$\frac{l_0}{l} = \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \dots \dots \dots (45)$$

(\*) Такъ какъ производныя функции отъ всѣхъ входящихъ  
переменныхъ величинъ суть: а)  $d(1) = 0$ ;

$$b) d \left( \frac{c}{l_0 + c} \right) = c \times d \left( \frac{1}{l_0 + c} \right) = c \times d(l_0 + c)^{-1} =$$

$$= c \times (l_0 + c)^{-1-1} = c \times (l_0 + c)^{-2} = c \times \frac{1}{(l_0 + c)^2} = \frac{c}{(l_0 + c)^2}.$$

$$c) d \left\{ \log. \frac{1 + c}{l_0 + c} \right\} = \frac{d \left( \frac{1 + c}{l_0 + c} \right)}{\frac{1 + c}{l_0 + c}} = d \left\{ \frac{1 + c}{l_0 + c} \right\} \cdot \frac{l_0 + c}{1 + c} =$$

$$= \frac{1 + c}{(l_0 + c)^2} \cdot \frac{l_0 + c}{1 + c} = \frac{1}{l_0 + c}.$$

$$d) \left\{ d \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \right\} =$$

$$= \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \cdot d \left\{ \frac{l_0}{l_0 + c} \right\} =$$

$$= \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \cdot \left( - \frac{l_0}{(l_0 + c)^2} \right) = - \frac{n + p + f + f_1(1 + \delta)}{n + P} \cdot \frac{l_0}{(l_0 + c)^2}.$$



уравненіе *наивыгоднѣйшаго расширенія пара*, изъ котораго видно, что отношеніе  $\frac{l_0}{l}$  зависитъ окончательно отъ системы машины, т. е. будетъ ли она съ холодильникомъ или безъ холодильника.

Сдѣлавъ нѣкоторыя соображенія легко убѣдиться, что въ машинахъ средняго давленія, въ которыхъ паръ работаетъ съ расширеніемъ и потомъ охлаждается, расширеніе пара можетъ быть больше, (говоря разумѣется сравнительно) нежели въ машинахъ, не имѣющихъ холодильника. Дѣйстви-тельно подставивъ въ уравненіе (45) величины, допускаемыя въ практикѣ для обѣихъ системъ машинъ и считаемыя за крайнія, найдемъ отношенія  $\frac{l_0}{l}$  или расширенія паровъ въ цилиндрѣ, для того и другаго случая. Числа яснѣе обнаружатъ, въ какихъ системахъ машинъ расширеніе паровъ можетъ быть развито въ небольшихъ предѣлахъ.

§ 38. *Трѣніе паровыхъ машинъ*. Чѣмъ машина сложнѣе, тѣмъ болѣе расходуется работы двигателя на трѣніе движущихся частей ея; сложность же въ свою очередь зависитъ отъ системы, слѣдовательно данною системою опредѣляется собственное ей количество трѣнія. Такимъ образомъ машины съ холодильникомъ, въ составъ которыхъ входитъ больше движущихся частей, тратятъ на трѣніе работы двигателя болѣе, нежели машины, устроенныя безъ холодильника.

Опредѣлить трѣніе какой нибудь машины *вычисленіемъ* почти не возможно, и по сложности расчетовъ, и по неуловимости многихъ обстоятельствъ, сопровождающихъ это явленіе. По этому опредѣляютъ этотъ вопросъ *опытами* для каждаго рода машинъ, и полученные результаты при-



нимаютъ за норму для всѣхъ прочихъ, но той же только системы. Къ сожалѣнію наука о паровыхъ машинахъ такъ бѣдна учеными изслѣдованіями, что и на этотъ предметъ нѣтъ точныхъ выводовъ для всѣхъ системъ существующихъ машинъ. Всѣ опыты, какъ только были произведены по сіе время Уаттомъ и нѣкоторыми другими, ограничиваются исключительно машинами его системы, т. е. двойнаго дѣйствія съ холодильникомъ безъ разширенія. Памбуръ въ своемъ сочиненіи «*Théorie des machines à vapeur* (pages 260, 366 и 367) принимаетъ такую же величину тренія и для всѣхъ другихъ системъ машинъ, какая опредѣлена Уаттомъ; но вѣроятно онъ допускаетъ это только для машинъ одинаковаго устройства съ системою Уатта, потому что треніе, ствойственное машинамъ этого рода, можетъ быть допущено для весьма немногихъ. Машины же высокаго давленія, далеко разнствующія отъ машинъ Уатта, на вѣрно не поглащаютъ столько работы на треніе своихъ частей, и вопросъ этотъ требуетъ особеннаго разсмотренія и подтвержденія опытомъ.

Наблюденія для отысканія количества тренія паровыхъ машинъ могутъ быть произведены на слѣдующихъ разсужденіяхъ.

Вникая въ сущность уравненія (41) возможно наибольшаго полезнаго дѣйствія машины

$$ag' = \frac{a}{(1+\Delta)} \left( \frac{k(l_0 + c)(n + P)}{1} - n + p + f + f, (1 + \delta) \right)$$

видно, что для всякой упругости  $P$  пара въ котлѣ существуетъ соотвѣтствующее ему возможно наибольшее полезное сопротивленіе  $ag'$ , такъ что всякое полезное сопротивленіе можетъ быть возможно — наибольшимъ, если уменьшать упругость пара въ котлѣ  $P$  до такой степени, какъ это воз-



можно. Пусть машина будет отцѣплена отъ приводовъ, и уменьшимъ упругость пара въ котлѣ до того, чтобы она только могла поддерживать движеніе машины *порожнемъ*; то эта упругость, которую назовемъ чрезъ  $P_2$ , будетъ соответствовать наибольшему полезному сопротивленію  $ar' = 0$ . Подставимъ въ уравненіе (41) возможно наибольшаго полезнаго дѣйствія машины вмѣсто  $P$  упругость  $P_2$  и сдѣлавъ  $ar' = 0$  и  $f_1 = 0$ , получимъ

$$f = (n + P_2) k \frac{l_0 + c}{1} - n - p - Q(1 + \Delta) \dots (46)$$

величину *трения*  $f$  машины, движущейся *порожнемъ*.

Для машинъ же безъ расширенія,

$$f = (n + P_2) \frac{l_0}{l_0 + c} \cdot \frac{l_0 + c}{l_0} - n - p - Q(1 + \Delta), \text{ или}$$

$$f = P_2 - p - Q(1 + \Delta).$$

Для машинъ заводскихъ  $Q = 0$ , и потому для нихъ въ первомъ случаѣ

$$f = (n + P_2) K \frac{l_0 + c}{l_0} - n - p, \dots \dots \dots (46 \text{ bis})$$

и во второмъ

$$f = P_2 - p.$$

Изъ уравненія (46) можно получить также *все* сопротивленіе, дѣйствующее въ означенномъ случаѣ на машину.

Оно будетъ равно для единицы площади поршня

$$p + f + Q(1 + \Delta) = (n + P_2) k \frac{l_0 + c}{1} - n \dots (47).$$

Подобнымъ же образомъ можно опредѣлить *трение приводовъ*, когда машина пущена съ приводами, но не *преодолевая никакого полезнаго груза*. Производя опытъ совершенно такъ же, какъ и въ первомъ случаѣ, и измѣ-



ривъ упругости пара въ котлѣ  $P_3$ , и выходящаго изъ цилиндра  $p$ , вставимъ эти величины въ уравненіе (41). Тогда будемъ имѣть, при чемъ разумѣется  $ag' = 0$ , слѣдующее общее выраженіе тренія приводовъ:

$$f + f_1(1 + \varepsilon) = (n + P_3) k \frac{l_0 + c}{l} - n - p - f - Q(1 + \Delta); \dots (48)$$

и для машинъ безъ расширенія

$$f_1(1 + \varepsilon) = P_3 - p - f - Q(1 + \Delta).$$

Для машинъ заводскихъ  $Q = 0$ , и слѣдовательно для нихъ въ первомъ случаѣ

$$f_1(1 + \varepsilon) = (n + P_3) k \frac{l_0 + c}{l} - n - p - f. \dots (48 \text{ bis})$$

и во второмъ

$$f_1(1 + \varepsilon) = P_3 - p - f.$$

Изъ уравненія (48) можно получить также *сумму всѣхъ бесполезныхъ сопротивленій*, на единицу площади поршня т. е.

$$p + f + f_1(1 + \varepsilon) + Q(1 + \Delta) = k \frac{l_0 + c}{l} (n + P_3) - n. \dots (49)$$

Чтобы опредѣлить *добавочное сопротивленіе*  $\varepsilon$ , для этого поставимъ машину въ такое положеніе, чтобы при ея движеніи упругость пара была наименьшая для преодоленія извѣстнаго груза. Такъ какъ  $\varepsilon$  выражаетъ прибавочное сопротивленіе отъ *полезнаго сопротивленія*  $ag$ , преодолеваемого машиною, по этому опыту долженъ былъ производимъ вмѣстѣ съ исполнительными механизмами.

Вопросъ можетъ быть рѣшенъ двоякимъ путемъ: или оставивъ неизмѣнною упругость пара въ котлѣ, увеличимъ полезный грузъ, преодолеваемый машиною до того, чтобы она могла только быть въ движеніи; или, если машина на-



значена всегда преодолевать определенное постоянное сопротивление, понизимъ упругость пара въ котлѣ до того, чтобы машина, преодолевая предназначенное ей полезное сопротивление, могла двигаться такъ, чтобы при малѣйшемъ уменьшеніи упругости пара, она остановилась.

Въ томъ и другомъ случаѣ для означенныхъ упругостей пара въ котлѣ, преодолеваемое сопротивление будетъ возможно наибольшее. Назовемъ найденное такимъ образомъ *возможно наибольшее* сопротивление для упругости пара  $P_3$  чрезъ  $ar_2$ , то уравненіе (41) для настоящаго случая преобразуется въ слѣдующее:

$$ar_2 = \frac{a}{(1+\Delta)} \left\{ \frac{k (l_0+c) (n+P_3)}{1} - (n+p+f+f_1(1+\delta) + Q(1+\Delta)) \right\}$$

откуда

$$r_2 (1+\Delta) = (n+P_3) k \frac{l_0+c}{1} - (n+p+f+f_1(1+\delta) + Q(1+\Delta)) \quad (50)$$

Чтобы теперь выведеннымъ уравненіемъ можно было пользоваться при отысканіи которой нибудь изъ величинъ  $r_2$  и  $\Delta$ , или обѣихъ вмѣстѣ, можно сперва пренебречь величинами  $\Delta r_2$  и  $\Delta Q$ , и тогда приблизительно

$$r'_2 = (n+P_3) k \frac{l_0+c}{1} - (n+p+f+f_1(1+\delta) + Q)$$

которое будетъ болѣе искомаго.

Вставляя эту приближенную величину  $r'_2$  въ уравненіе (50) и опредѣляя отсюда  $\Delta'$  имѣемъ приблизительно:

$$\Delta' = \frac{(n+P_3) k \frac{l_0+c}{1} - (n+p+f+f_1(1+\delta))}{r'_2 + Q} - 1$$

которое будетъ менѣе искомаго.



Вставляя потомъ эту величину  $\Delta$  въ уравненіе (50) и опредѣляя оттуда  $г'$  имѣемъ съ большею точностію количество

$$г' = \frac{((n + P_3)) k \frac{l_0 + c}{1} - (n + p + f + f_1 (1 + \delta) + Q (1 + \Delta))}{1 + \Delta}$$

которое будетъ также болѣе искомаго.

Продолжая дѣлать подобныя поправки, будемъ получать для  $г'$  и  $\Delta$  величины болѣе и болѣе приближающіяся къ искомымъ.

Наконецъ изъ уравненія

$$\Delta = \delta + \delta'$$

найдемъ

$$\delta = \Delta - \delta'.$$

Всѣ вышеозначенные расчеты выведены для общаго случая паровыхъ машинъ т. е. съ холодильникомъ. Для машинъ безъ холодильника уравненіе (50) приметъ слѣдующій видъ:

$г_1 (1 + \Delta) = P_3 - (p + f + f_1 (1 + \delta) + Q (1 + \Delta))$   
изъ котораго, произведя подобныя же работы, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, получимъ

$$\Delta = \frac{P_3 - (p + f + f_1 (1 + \delta))}{г_1 + Q} г - 1.$$

Для машинъ заводскихъ  $Q = 0$ , и потому для нихъ имѣемъ

$$г_1 (1 + \Delta) = (n + P_3) k \frac{l_0 + c}{1} - ((n + p + f + f_1 (1 + \delta)))$$

откуда по предыдущей методѣ съ помощію опыта опредѣлимъ также  $г'$  и  $\Delta$ .

Большую часть вышеизложенныхъ опытовъ удобно производить тогда, когда машина кончила свои дневныя работы.



Понятно, что для машинъ той же системы, величины  $p$ ,  $f$  и  $\delta$  должны быть одинаковы, такъ что опредѣливъ ихъ по изложенному способу для одной какой нибудь машины, на-примѣръ высокаго давленія, средней сложности устройства, для всѣхъ машинъ того же рода, эти величины можно принять за вѣрныя для вычисленій.

Величины же  $f_1$  и  $\Delta$  могутъ быть различны и для машинъ той же системы, смотря по большей или меньшей сложности ихъ приводовъ.

Во всѣхъ паровозахъ, движеніе поршня передаютъ движущему валу непосредственно; слѣдовательно въ нихъ количество  $f + f_1 (1 + \delta)$  должно разсматривать, какъ одну величину.

Въ пароходахъ существуетъ тоже самое; паровые поршни посредствомъ шатуновъ дѣйствуютъ прямо на валы гребныхъ колесъ или винта.

Поэтому для паровозовъ и пароходовъ уравненія (48) и (50), полагая въ нихъ для краткости,

$$f + f_1 (1 + \delta) = F$$

принимаютъ видъ

$$F = k \frac{l_0 + c}{l} (n + P_3) - (n + p + Q (1 + \Delta)) \dots (51)$$

$$r' (1 + \Delta) = k \frac{l_0 + c}{l} (n + P_3) - (n + p + F + Q (1 + \Delta)) \dots (52)$$

откуда по правиламъ вышеизложеннымъ, найдемъ  $F$ ,  $\Delta$  и  $r'$ , когда наблюденіями опредѣлены  $P_2$  и  $p$ .

На основаніи вышеупомянутыхъ наблюденій Уатта и другихъ надъ нѣкоторыми паровыми машинами, принимаютъ, что треніе ихъ обратно пропорціонально діаметру  $d$  пароваго поршня, и опытами нашли, что при  $d = 2,75$  русскихъ



футовъ, оно равно 0,83 рус. фунтамъ давленія на одинъ квадратн. дюймъ площади поршня.

Поэтому, для опредѣленія тренія  $f$  органовъ паровой машины Уатта съ двойнымъ дѣйствіемъ имѣемъ вообще

$$f = \frac{333}{d} \dots \dots \dots (53) (*)$$

гдѣ діаметръ  $d$  пароваго цилиндра выраженъ въ русскихъ футахъ, а  $f$  въ русскихъ фунтахъ на одинъ квадратн. футъ площади поршня.

Для опредѣленія величины  $\delta$  Памбуромъ были произведены опыты надъ паровозами о четырехъ свободныхъ колесахъ и найдено имъ, что для этихъ машинъ

$$\delta = 0,14.$$

Эти указанные нами опыты суть единственные, произведенные по настоящее время съ цѣлю опредѣлить собственное треніе паровыхъ машинъ. Надъ машинами другихъ системъ никакихъ не было произведено опытовъ, изъ которыхъ можно было бы вывести треніе ихъ составныхъ частей, такъ что при рѣшеніи этихъ вопросовъ, остается довольствоваться выводами изъ опытовъ Уатта. Но полученные такимъ образомъ результаты будутъ несовсѣмъ точны, и не вполне удовлетворять требованіямъ отъ науки со стороны практическихъ ея примѣненій.

---

(\*) Théorie des machines à vapeur. Pambour 1844, p. 311.



## ГЛАВА II.

### ТЕОРІЯ ДВИЖЕНІЯ ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ

---

#### I. РАЗЛИЧНЫЕ РОДЫ ДВИЖЕНІЙ МАШИНЪ ВООБЩЕ; НЕОБХОДИМОСТЬ И ВЫГОДЫ РАВНОМѢРНАГО ДВИЖЕНІЯ.

§ 39. При движеніи всякой машины, какъ неизмѣняемой системы матеріальныхъ точекъ, скорость движущихся частей ея можетъ во все время дѣйствія или быть постоянною, или измѣняться въ предѣлахъ болѣе или менѣе обширныхъ; въ первомъ случаѣ движеніе будетъ *равномерное*, во второмъ *переменное*.

Смотря по тому, увеличивается ли постепенно скорость движущихся частей машины, или уменьшается, или наконецъ измѣняется постоянно въ извѣстныхъ предѣлахъ въ каждый послѣдовательный промежутокъ времени, переменное движеніе можетъ быть или *ускоренное*, или *ускоренное*, или *периодическое*. Разсмотримъ теперь вообще при какихъ обстоятельствахъ можетъ быть тотъ или другой родъ движенія машины.



По закону живыхъ силъ для неизмѣняемой системы матеріальныхъ точекъ, *разность живыхъ силъ* для разсматриваемаго промежутка времени должна быть равна алгебраической суммѣ работъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на систему, и слѣдовательно суммою этихъ работъ опредѣляется родъ движенія машины. Напишемъ общее выраженіе разности живыхъ силъ для какой либо машины, разсматриваемой какъ неизмѣняемую систему матеріальныхъ точекъ:

$$\frac{\Sigma m v^2}{2} - \frac{\Sigma m v_0^2}{2} = \Sigma \int_0^t F df + \Sigma \int_0^t Q dq + \Sigma \int_0^t R dr \pm PH. . (54)$$

для цѣлаго промежутка времени  $t$ . Въ этомъ извѣстномъ выраженіи

первый членъ первой половины представляетъ живую силу движущихся частей машины, соотвѣтствующую окончательной скорости  $v$ , въ концѣ разсматриваемаго промежутка времени  $t$ ;

второй членъ есть живая сила движущихся частей машины, соотвѣтствующая начальной скорости ихъ  $v_0$ , въ началѣ разсматриваемаго промежутка времени  $t$ .

$\Sigma F df$  есть вся работа двигателя, дѣйствующаго съ силою  $F$  на пространствѣ  $df$ , соотвѣтствующемъ одному мгновению, и

$$\Sigma \int_0^t F df$$

вся работа двигателя въ цѣлый промежутокъ времени  $t$ .

$\Sigma Q dq$  изображаетъ всю работу полезныхъ сопротивленій (для побѣжденія которыхъ назначается двигатель) дѣйствующихъ съ напряженіемъ  $Q$  на нѣкоторомъ простран-



ствѣ  $dq$ , соответствующемъ одному мгновению,

$$\int_0^t Qdq$$

есть сумма этихъ работъ для цѣлаго промежутка времени  $t$ .

$\sum Rdr$  есть сумма работъ всѣхъ бесполезныхъ сопротивлений, какъ напр. ударовъ, треній, случайныхъ сгибаній частей машины и проч., изъ которыхъ каждое отдѣльно выражено чрезъ  $R$ , при дѣйствіи его на пространство  $dr$ , соответствующемъ одному мгновению,

$$\int_0^t Rdr$$

есть сумма этихъ работъ для цѣлаго промежутка времени  $t$ ,

$PH$  есть сумма работъ, доставляемыхъ опусканіемъ и подниманіемъ движущихся частей машины, въ которой чрезъ  $P$  названа сумма вѣсовъ этихъ частей, и чрезъ  $H$  общая высота, на которую центры тяжести движущихся частей машины поднимаются или опускаются. Эту работу называютъ часто *работою тяжести вертикально движущихся частей машины*.

Если въ разсматриваемый промежутокъ времени  $t$  алгебраическая сумма работъ двигателя и сопротивленій равна нулю, тогда разность живыхъ силъ будетъ равна также нулю и слѣдовательно  $v_0 = v$  и машина имѣетъ равномерное движеніе. При этомъ замѣтимъ, что работа тяжести  $PH$  можетъ быть иногда въ пользу двигателя, иногда можетъ дѣйствовать какъ сопротивленіе; по этому членъ  $PH$  въ уравненіи



разности живыхъ силъ входитъ и съ положительнымъ и съ отрицательнымъ знакомъ и для этого промежутка времени  $t$  равенъ нулю, потому что во время движенія машины различныя части ея и повышаются и понижаются.

Если же въ означенный промежутокъ времени алгебраическая сумма работъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на машину, какъ на систему матеріальныхъ точекъ, не равна нулю, въ такомъ случаѣ разность живыхъ силъ по окончаніи промежутка времени  $t$  будетъ положительная или отрицательная, смотря по тому, алгебраическая сумма работъ всѣхъ силъ, входящихъ въ уравненіе, будетъ больше или меньше нуля. При этомъ для извѣстной массы  $\Sigma m$  движущихся частей машины, отъ величины живой силой въ концѣ времени  $t$  зависитъ скорость движенія  $v$ , которая и должна быть въ разсматриваемомъ случаѣ больше или меньше первоначальной скорости  $v_0$ . Если послѣ каждаго послѣдовательнаго промежутка времени  $t$  окончательная скорость  $v$  всегда больше начальной,  $0$ ; тогда существуетъ *движеніе ускоренное*, въ обратномъ случаѣ — *укошенное*.

Слѣдовательно родъ движенія какой либо машины зависитъ только отъ дѣйствія на нее силъ. Во всѣхъ промышленныхъ машинахъ безпредѣльно ускоренное, или безпредѣльно укошенное движеніе быть не можетъ; всѣ приращенія или уменьшенія скорости при движеніи машины могутъ быть только въ опредѣленныхъ границахъ, выходя изъ которыхъ, движеніе можетъ производить выработку продукта не въ надлежащемъ качествѣ, въ меньшемъ количествѣ, а иногда не вышолнять требуемыхъ условій скорости.

По этому въ промышленныхъ машинахъ если нѣтъ равномернаго движенія, такъ движеніе въ нихъ можетъ быть только *переменное*, при которомъ скорость движущихся



частей машины то увеличивается, то уменьшается. Разсмотримъ теперь все обстоятельства при переменномъ движеніи машины, при которомъ все силы, дѣйствующія на нее, работаютъ не одинаково въ теченіе всего промежутка времени  $t$ , и при которомъ по этому алгебраическая сумма работъ всехъ силъ неравна нулю для времени  $t$ . Въ этомъ случаѣ *работа двигателя* должна по уравненію (54)

$$\int_0^t Fdf = \int_0^t Qdq + \int_0^t Rdr \pm PH + \frac{\Sigma mv_0^2}{2} - \frac{\Sigma mv^2}{2}. \quad (55)$$

расходоваться кромѣ сопротивленій, назовемъ *необходимыхъ* т. е.

$$\int_0^t Qdq \text{ и } \int_0^t Rdr,$$

еще на приращеніе (отрицательное или положительное) скорости машины или на побѣжденіе инерціи частей машины при всякомъ измѣненіи скорости. Замѣтимъ, что при каждомъ увеличеніи или уменьшеніи скорости проявляется сила инерціи, влѣдствіе которой увеличиваются давленія въ мѣстахъ соединенія движущихся частей машины и, пропорціонально этому давленію, треніе всехъ этихъ частей.

Такимъ образомъ по уравненію (55) при увеличившемся членѣ

$$\int_0^t Rdr$$

работа

$$\int_0^t Fdf$$



должна быть также больше, и этот *излишекъ будетъ бесполезною потерей работы двигателя*, или обратно, при одинаковой работѣ двигателя въ переменномъ движеніи машины, двигатель преодолеваетъ меньшее полезное сопротивление, нежели въ томъ случаѣ, когда скорость въ теченіе всего извѣстнаго времени оставалась бы *постоянною*. Для этого послѣдняго случая, то есть постоянной скорости, которая имѣетъ мѣсто только при равномерномъ движеніи, уравненіе (54) равно нулю, и работа двигателя расходуется только на побѣжденіе необходимыхъ сопротивленій, то есть

$$\int_0^t Fdf = \int_0^t Qdq + \int_0^t Rdr \dots \dots (56).$$

Уравненіе (56) есть выраженіе такого движенія машины, при которомъ двигатель работает *наивыгоднѣйшимъ образомъ*, т. е. доставляетъ *наибольшее полезное дѣйствіе*.

Прилагая все сказанное къ паровымъ машинамъ, видимъ, что *наивыгоднѣйшее дѣйствіе машины* независимо отъ свойствъ пара, можетъ быть только при равномерномъ движеніи, котораго условія выражены уравненіемъ (56).

Предметъ всей вышеизложенной теоріи паровыхъ машинъ состоитъ въ вопросѣ — извлечь изъ двигателя наибольшую работу; изложеніе настоящей главы касается экономіи той работы, которая доставляется двигателемъ при наивыгоднѣйшихъ условіяхъ его дѣйствія. Изъ вышесказанныхъ разсужденій слѣдуетъ заключить, что наименьшее треніе, поглощаемое движеніемъ машины, можетъ быть только при совершенно равномерномъ движеніи ея, въ кото-



ромъ для каждаго мгновенія, или безконечно малаго промежутка времени скорость остается постоянною.

Въ заключеніе прибавимъ, что кромѣ потѣри работы двигателя, неравномѣрность движенія дѣйствуетъ вредно и на прочность машины. Понятно, что вмѣстѣ съ увеличиваніемъ давленія во всѣхъ соединеніяхъ движущихся частей, ускоряется *истираніе* трущихся поверхностей, немедленно проявляются зазоры и вмѣстѣ съ ними удары или толчки. Тогда необходимо представляется двѣ крайности — или частая починка машины, соединенная съ усиленною внимательностью за ея положеніемъ или постепенное растройство, исходъ котораго можетъ быть совершенная негодность машины; дѣйствительно, многія части, которыя при спокойномъ движеніи могли бы прослужить долгое время, при дѣйствіи на нихъ ударовъ, или даже сильныхъ давленій, гнутся, ломаются и замѣтно приходятъ къ разрушенію, т. е. къ порчѣ и утратамъ всякаго рода.

## II. родъ движенія паровыхъ машинъ; теорія мотылей.

§ 40. Равномѣрное движеніе машинъ доставляетъ, какъ мы видѣли, многостороннія выгоды; но въ практикѣ совершенно равномѣрное движеніе, въ которомъ бы скорость оставалась постоянною *для каждаго мгновенія*, невозможно и именно потому, что силы, участвующіе въ движеніи машины, дѣйствуютъ не постоянно, а слѣдовательно не бываетъ и динамическаго равновѣсія ихъ; если же они и измѣняются одинаково, когда на примѣръ въ паровой машинѣ распредѣляютъ работу двигателя сообразно съ работою сопротивленій, все таки измѣненія эти и уравновѣшиваніе



силъ происходитъ не вполнѣ *одновременно*, и слѣдовательно во всякомъ случаѣ измѣненія скорости въ большей или меньшей степени имѣютъ мѣсто. Въ паровыхъ машинахъ разныхъ системъ встрѣчаются различныя явленія, вслѣдствіе которыхъ не достигается равномерное движеніе, и поэтому мы разсмотримъ отдѣльно машины съ попеременнымъ прямолинейнымъ и круговращательнымъ движеніемъ.

Машины съ попеременнымъ прямолинейнымъ движеніемъ, примѣръ какихъ представляютъ машины Корнваллійскія, устраиваютъ почти исключительно для движенія насосовъ. Единообразіе движенія какъ пріемника работы двигателя, такъ и исполнительныхъ механизмовъ, есть единственная причина равномерности движенія машинъ этого рода. Инерція, пріобрѣтаемая движеніемъ массивнаго ихъ коромысла, изглаживаетъ всѣ измѣненія скорости, происходящія вслѣдствіе разширенія пара, которое въ машинахъ этой системы употребляется въ самыхъ обширныхъ предѣлахъ, такъ что оно часто бываетъ устраиваемо на одной десятой хода поршня, чего никогда нѣтъ въ машинахъ съ круговращательнымъ движеніемъ. При началѣ каждаго новаго размаха (вверхъ или внизъ) паръ долженъ преодолѣть значительную инерцію пароваго поршня и коромысла, чтобы дать имъ новое движеніе, и въ это то время давленіе пара на поршень бываетъ наибольшее, потому что онъ тутъ дѣйствуетъ полною упругостію. По прекращеніи же сообщенія цилиндра съ паровикомъ начинается расширеніе пара, при чемъ давленіе на поршень постепенно уменьшается, между тѣмъ какъ инерція поршня, коромысла и другихъ частей, пріобрѣтаетъ наибольшую величину, не перестаетъ дѣйствовать хотя постепенно уменьшаясь во весь размахъ коромысла. И такъ въ теченіи всего хода поршня распредѣляется дѣйствіе силъ



одинаково, такъ что алгебраическая сумма работъ силъ

$$\frac{\Sigma mv^2}{2} - \frac{\Sigma mv_0^2}{2} = \Sigma \int_0^t Fdf + \Sigma \int_0^t Qdq + \Sigma \int_0^t Rdr \pm PH$$

можетъ быть принята равною нулю, и слѣдовательно въ каждый промежутокъ времени существуетъ болѣе или менѣе одинаковая скорость и слѣдовательно достаточная равномерность движенія. Это равенство существуетъ даже и для тѣхъ промежутковъ времени, когда скорость пароваго поршня равна нулю, какъ это бываетъ при началѣ и концѣ хода поршня, потому что и исполнительное орудіе (поршень водянаго насоса) въ это время также не имѣетъ никакой скорости.

Здѣсь слѣдовательно равномерность движенія (разумѣется равномерность условная, возможная) происходитъ вслѣдствіе постоянно одинаковаго измѣненія работы движителя и работы сопротивленій, такъ что динамическое равновѣсіе этихъ силъ существуетъ для каждаго положенія поршней. Главнымъ органомъ постоянного равновѣсія есть коромысло, движеніе котораго умѣряетъ всѣ ускоренія и замедленія скорости, которыя и могли бы случаться при нарушеніи равенства работъ движителя и сопротивленія.

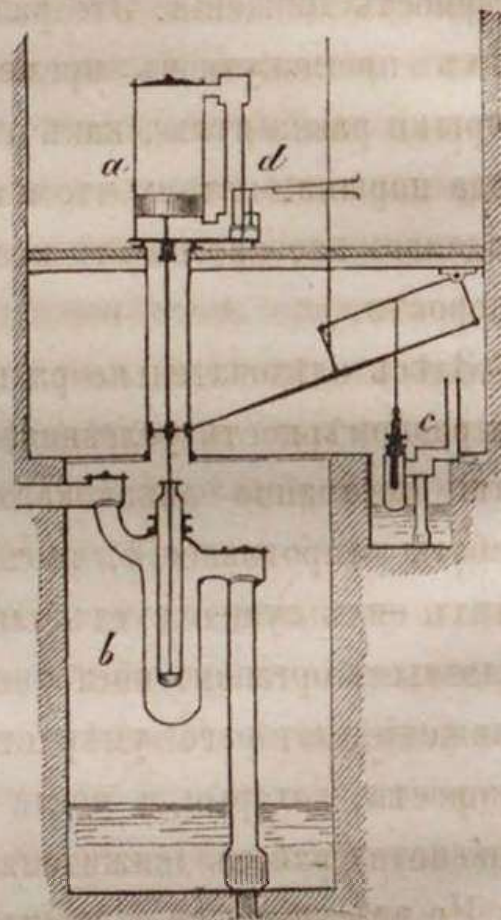
Но разсуждая со стороны экономіи можно сказать, что равномерность въ такой степени, какая доставляется массивностію коромысла, не есть необходимость или главный вопросъ при дѣйствіи насосовъ, между тѣмъ какъ она пріобрѣтается съ чувствительною потерею работы движителя на треніе, увеличиваемое движеніемъ коромысла. По этому въ последнее время нашли употребленіе этой части излишнимъ и въ видахъ уменьшенія тренія, во многихъ новѣй-



шихъ водоподъемныхъ паровыхъ машинахъ коромысло уничтожено, такъ что движеніе пароваго поршня непосредственно передается общимъ стержнемъ поршню водянаго насоса. Примѣрами такихъ машинъ могутъ служить: описанныя Мартеномъ въ *Civil Engineer and Architect's Journal*, Septembre, 1856, page 305, и водокачальныя машины, построенныя Риттингеромъ въ Вегвановѣ (Wegwanow) въ Богеміи. (*Dingler's Polytechnisches Journal*, Band CXLIX Seite 242, 1858). Фигура 18 представляетъ эскизъ существенныхъ частей подобныхъ машинъ (\*).

Во всѣхъ круговращательныхъ машинахъ прямолинейное попеременное движеніе поршня преобразуется *помощію мотыля* въ круговое непрерывное, и потому родъ движенія этихъ машинъ зависитъ отъ движенія мотыля, передающаго работу движителя.

Чтобы судить о движеніи всѣхъ этихъ машинъ и степени равномерности ихъ хода, рассмотримъ подробнѣе теорію дѣйствія мотылей и ходъ ихъ движенія *независимо отъ вліянія маховаго колеса*.



фигура 18

(\*) Въ прилагаемомъ эскизѣ *a* означаетъ паровой цилиндръ, *b* водяной насосъ, *c* питательный насосъ, *d* парораспределительный приборъ.



§ 41. *Теорія мотылей двойнаго дѣйствія* (\*). Въ паровыхъ машинахъ мотыль и поршень такъ связаны между собою, что ихъ движенія зависятъ одно отъ другаго, и совершенно тождественны, съ тою только разницею, что поршень имѣетъ движеніе по прямой линіи, между тѣмъ какъ шипъ мотыля по окружности круга. Какъ при движеніи поршня есть два конечныя положенія, въ которыхъ скорость его равна нулю, сообразно этому и въ движеніи мотыля существуютъ такія же два положенія, въ которыхъ скорость *можетъ быть равною* нулю. По этому движеніе мотыля не есть равномерное, а слѣдовательно и работа, передаваемая имъ, не одинакова въ теченіи цѣлаго оборота. Движеніе мотыля имѣетъ такое вліяніе на движеніе поршня, что скорость сего послѣдняго неостается постоянною въ теченіи всего хода, какъ это бываетъ при машинахъ съ попеременнымъ прямолинейнымъ движеніемъ, а измѣняется отъ начала до конца хода поршня, и при томъ такъ, что самая наибольшая бываетъ въ срединѣ хода, и потомъ опять уменьшается къ концу хода поршня, сообразно съ уменьшеніемъ проекціи проходимаго шипомъ пространства на направленіе дѣйствія движущей силы, передаваемой шатуномъ.

Для изученія движенія мотылей приложимъ подобно предъидущему общее уравненіе количества движенія

---

(\*) Мотыли могутъ быть *одиночнаго* или *двойнаго дѣйствія*, смотря по тому, передаютъ ли они работу поршня тоже одиночнаго или двойнаго дѣйствія; т. е. сила двигателя, передаваемая ими, дѣйствуетъ ли въ полный оборотъ вала, или только въ полуоборотъ его. Паровыя машины съ круговымъ движеніемъ современнаго устройства всѣ двойнаго дѣйствія.



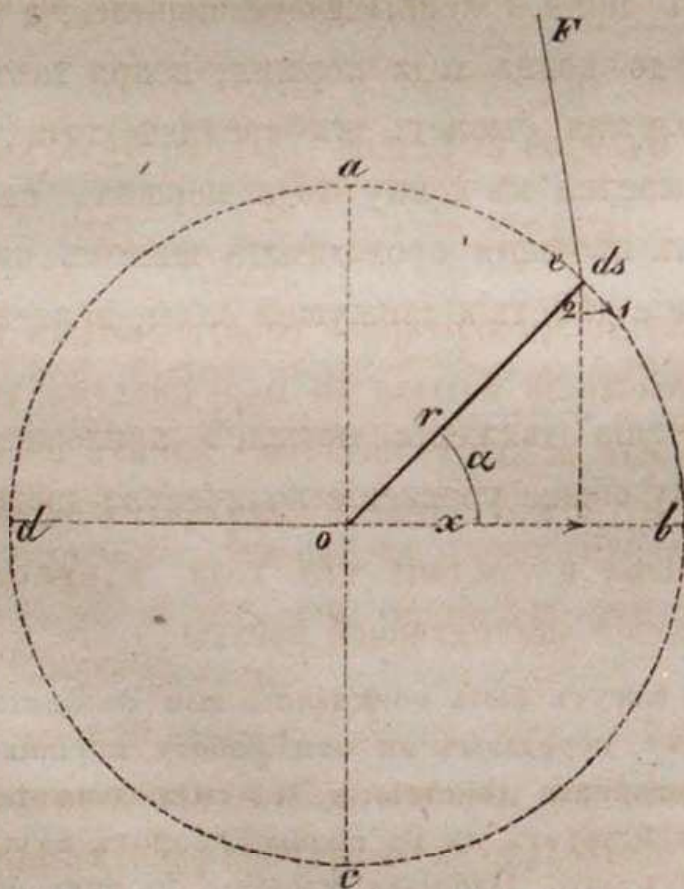
$$\sum m v dv = \sum F df + \sum Q dq + \sum R dr \pm PH$$

для одного мгновения, и разность живыхъ силъ

$$\frac{\sum m v^2}{2} - \frac{\sum m v_0^2}{2} = \sum \int_0^t F df + \sum \int_0^t Q dq + \sum \int_0^t R dr \pm PH$$

для цѣлаго промежутка времени  $t$ , и разсмотримъ можетъ ли существовать равномерное движеніе при дѣйствіи мотыля *независимо отъ вліянія маховаго колеса.*

Разберемъ всѣ силы, дѣйствующія при передачѣ и преобразованіи работы движителя, въ каждое мгновеніе, и входящія въ написанныя уравненія. Принимая работу *полезныхъ* и *вредныхъ сопротивленій постоянными* для цѣлаго даже промежутка времени  $t$ , и работу отъ вѣса мотыля  $P$ , дѣйствующаго въ одинъ полуоборотъ какъ сопротивление, а въ другой въ пользу движителя, намъ остается



Фигура 19.



въ означенныхъ уравненіяхъ только изслѣдовать членъ  $\Sigma Fdf$ , выражающій работу двигателя.

Такъ какъ работа его, передаваемая мотылемъ, измѣняется въ каждое мгновеніе, по этому выведемъ величину этой работы для каждаго послѣдовательнаго положенія шипа мотыля во время его движенія. Съ этою цѣлю изобразимъ величину *элементарной работы мотыля* т. е. для каждаго мгновенія, и возьмемъ какое нибудь положеніе шипа мотыля, напр. въ точкѣ *e*. Назовемъ давленіе шатуна въ точкѣ *e* чрезъ *F* и примемъ, для простоты въ вычисленіяхъ, направленіе этаго давленія перпендикулярнымъ къ плечу *ob* въ положеніяхъ, соотвѣтствующихъ наибольшей элементарной работѣ мотыля.

Отъ дѣйствія силы *F* точка *e* проходитъ въ одно мгновеніе пространство *ds*, такъ что элементарная работа мотыля для положенія *e* будетъ равна произведенію силы *F* на перемѣщеніе

$$c2 = ds \cdot \cos 2c1 = ds \frac{x}{r}, \text{ т. е. будетъ равна}$$

$$Fds \frac{x}{r} \dots \dots \dots (57)$$

Это выраженіе элементарной работы мотыля есть общее для всѣхъ положеній мотыля по окружности, такихъ какъ *e*. Возьмемъ изъ всѣхъ возможныхъ такихъ положеній четыре — *a*, *b*, *c* и *d*, соотвѣтствующія конечнымъ положеніямъ поршня и срединѣ его хода, и приложимъ сюда общее выраженіе элементарной работы

$$Fds \frac{x}{r}$$

Во первыхъ, въ точкахъ *a* и *c* проэція перемѣщенія  $x=0$ , и слѣдовательно элементарная работа движущей силы равна



$$Fds \cdot \frac{0}{r} = 0; \dots (1)$$

въ точкахъ *b* и *d*, въ которыхъ проекція перемѣщенія *x* имѣетъ наибольшую величину и равна *r*, элементарная работа силы *F* есть

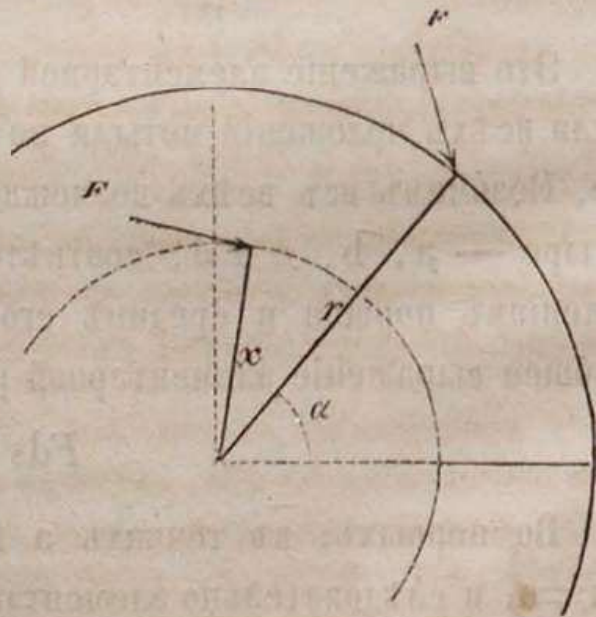
$$Fds \cdot \frac{r}{r} = Fds \dots \dots \dots (2)$$

Оба выраженія (1) и (2) представляютъ наименьшую и наибольшую элементарныя работы силы *F*, имѣющія мѣсто въ точкахъ *a*, *b*, *c* и *d*. По мѣрѣ удаленія шипа отъ положенія *a*, элементарная работа мотыля постепенно увеличивается до тѣхъ поръ, пока въ точкѣ *b* она сдѣлается наибольшою, равною *Fds*. Когда же шипъ оставляетъ положеніе *b*, элементарная работа его, вмѣстѣ съ проекцію перемѣщенія *x*, постепенно уменьшается, пока въ точкѣ *c* сдѣлается равною нулю. Во вторую половину оборота измѣненія идутъ такимъ же порядкомъ.

Все эти промежуточные элементарныя работы, между крайними или предѣльными, можно изобразить нѣкоторою среднею элементарною работою, т. е. такою, которая будучи постоянною въ полный оборотъ мотыля, произведетъ работу, равную суммѣ элементарныхъ работъ, такихъ какъ

$$F \cdot ds \frac{x}{r}.$$

Чтобы дать себѣ понятіе о величинѣ этой средней элементарной работѣ, передаваемой мотылю тою же дви-



фигура 20.



жущею силою  $F$ , вообразимъ, что эта сила  $F$  дѣйствуетъ не подъ угломъ  $\alpha$  подобно предъидущему, а покасательной къ окружности движенія мотыля, только уже не плечомъ  $g$ , а нѣкоторымъ  $x$  меньшимъ  $g$ . Такъ что сила  $F$  будетъ постоянна и по величинѣ и по направленію, и работа ея въ полный оборотъ мотыля будетъ равна суммѣ работъ той же силы  $F$ , но дѣйствующей прямолинейно, т. е.

$$F \cdot 2\pi x = F \cdot 4g \text{ откуда}$$

$$x = \frac{F4g}{F2\pi} = \frac{2g}{\pi} = 0,637 \text{ г. } (*)$$

Слѣдовательно сила  $F$ , дѣйствуя на ту же ось плечомъ мо-

(\*) Авторъ «Общей теоріи паровыхъ машинъ и паровозовъ съ новыми изслѣдованіями 1858», излагаетъ между прочимъ удивительный софизмъ о дѣйствіи мотылей (страница 375 и 376). Вычисливъ работу мотыля въ одинъ его оборотъ и найдя ее равною  $F \cdot 4g$ , онъ говоритъ тотчасъ же: «но если бы движитель дѣйствовалъ съ постояннымъ напряженіемъ  $F$  всегда по направленію касательной къ окружности, описываемой шиномъ мотыля, то работа  $F$  при одномъ оборотѣ мотыля была бы  $F2\pi g$ ». Изъ отношенія этихъ двухъ работъ

$$\frac{4Fg}{F2\pi g} = \frac{2}{\pi} = 0,637$$

заключаетъ, что болѣе чѣмъ одна треть работы движителя теряется отъ того только, что онъ принужденъ дѣйствовать съ помощію шатуна и мотыля.

Да позволено будетъ спросить почтеннаго автора: какую работу доставляетъ поршень въ паровыхъ машинахъ въ два его размаха или одинъ полный оборотъ мотыля? Кажется эта работа равна  $F2l$  или  $F4g$ . Какъ же нослѣ этаго, шатунъ, передавая работу движителя по касательной (?) произведетъ работу  $F \cdot 2\pi g$  или приблизительно  $F6g$ , дѣйствуя плечомъ  $x = 0,673 \text{ г}$ ?

По нашему убѣжденію число 0,637 г выражаетъ величину радіуса или плеча  $x$ , которымъ должна дѣйствовать та же сила  $F$ , сдѣлавшись постоянною и по величинѣ и по направленію.



тыля равнымъ 0,637 г и постоянно по касательной круга, описываемаго движеніемъ шина этого мотыля, произведетъ такую же работу, какая будетъ доставлена силою же  $F$ , но дѣйствующею такъ, какъ обыкновенно бываетъ въ паровыхъ машинахъ двойнаго дѣйствія.

И такъ при дѣйствіи мотыля, элементарныя работы силы  $F$  будутъ слѣдующія:

	наибольшая	средняя	наименьшая
	$F.ds$	$0,637Fds$	0.
или	1	0,637.	0.
	1,57	1.	0.

Цыфры эти показываютъ ясно, въ какой степени дѣйствіе мотылей неправильно.

И такъ выходитъ, что работа движителя, передаваемая мотылемъ, измѣняется въ цѣлый оборотъ вала отъ нуля до величины  $Fds$ , между тѣмъ какъ сопротивленіе, приложенное въ точкѣ окружности вращенія первой передаточной части, можетъ быть разсматриваемо постояннымъ даже въ цѣлый промежутокъ времени. По этому въ уравненіи количества движенія

$$\sum mvdv = \sum Fdf + \sum Qdq + \sum Rdr \pm PdH,$$

алгебраическая сумма работъ движителя и сопротивленій *не равна* нулю для каждаго мгновенія и слѣдовательно равномернаго движенія для машинъ круговращательныхъ при этихъ условіяхъ быть не можетъ. Скорость шина мотыля будетъ въ теченіи всего оборота постоянно измѣняться, смотря по тому, работа ли сопротивленій превосходитъ работу движителя, или на оборотъ.

Но замѣчая, что все измѣненія скорости движенія мотыля происходятъ въ теченіи цѣлаго оборота вала однимъ и тѣмъ же порядкомъ, и при томъ въ одинаковой степени



для тѣхъ же положеній мотыля, увидимъ, что валъ паровой машины, слѣдую движению мотыля, имѣетъ *періодическое движеніе* и при томъ *постоянное*, т. е. такое, въ которомъ всѣ части машины, приходя по окончаніи періода движенія въ прежнее положеніе, принимаютъ ту же скорость, съ которою они начали оконченный періодъ. Въ движеніи мотыля періодъ движенія (\*) есть цѣлый оборотъ его, потому что съ каждымъ новымъ оборотомъ начинаются опять тѣже измѣненія работы движителя и тѣже измѣненія скорости движенія вала, и кромѣ того, всѣ части машины, коихъ центры тяжести во время движенія ихъ, то поднимаются, то опускаются, по окончаніи оборота вала возвращаются въ то же положеніе, изъ котораго вышли, такъ что работа вѣса частей, попеременно движущихся въ вертикальномъ направленіи, для цѣлаго оборота мотыля или полного періода движенія паровой машины равна нулю.

И такъ выходитъ, что передача работы движителя въ круговращательныхъ паровыхъ машинахъ, помощію мотыля, предоставленная сама себѣ безъ участія какой либо вводной части машины, можетъ имѣть только постоянное періодическое движеніе, допускающее наибольшую и наименьшую скорости, въ предѣлахъ болѣе или менѣе обширныхъ. По мѣрѣ того, какъ предѣлы, между которыми происходятъ колебанія скорости, становятся болѣе и болѣе ограниченны, постоянно періодическое движеніе можетъ постепенно приближаться къ равномерному, потому что при маломъ измѣ-

---

(\*) Въ періодическомъ движеніи то пространство, въ которомъ совершаются всѣ измѣненія скорости разсматриваемаго тѣла, называется *періодомъ движенія*.



ненія скорости уклоненія наибольшей и наименьшей отъ нормальной сдѣлаются нечувствительны.

III. СПОСОБЫ КЪ ДОСТИЖЕНІЮ РАВНОМѢРНАГО ДВИЖЕНІЯ ВЪ ПАРОВЫХЪ МАШИНАХЪ, ПРЕОДОЛѢВАЮЩИХЪ ВСЕГДА ОДИНАКОВОЕ СОПРОТИВЛЕНІЕ.

§ 42. Въ практикѣ равномѣрное движеніе достигается, какъ увидимъ ниже, *введеніемъ новыхъ частей* въ составъ машины, которые въ свою очередь тоже потребляютъ большую или меньшую часть работы движителя на треніе во время ихъ движенія, такъ что здѣсь, какъ и вездѣ, всякое достиженіе совершенства въ одномъ отношеніи неизбѣжно сопряжено съ потерей въ другомъ. Чѣмъ первоначальный составъ машины, т. е. составъ существенныхъ только частей ея представляетъ большую неравномѣрность въ движеніи, тѣмъ съ большими потерями работы движителя сопряжено достиженіе равномѣрнаго движенія, и слѣдовательно съ большими расходами на употребленіе движителя. По этому въ практикѣ для избѣжанія излишнихъ расходовъ на введеніе равномѣрнаго движенія и дѣлая содержаніе движителя по возможности выгоднымъ, въ паровыхъ машинахъ довольствуются и такимъ періодическимъ движеніемъ, которое представляетъ терпимую для извѣстнаго рода промышленныхъ работъ *степень равномѣрности* хода машины.

Въ каждой фабрикаціи или во всякой промышленной работѣ измѣненія скорости движенія машины, т. е. наибольшая и наименьшая скорости, могутъ быть допущены только *въ извѣстныхъ предѣлахъ*, при которыхъ произ-



водство какой либо промышленной работы только и может быть ведено *выгодно*, т. е. безъ порчи обрабатываемаго продукта или безъ потери напрасно полезной работы двигателя. Предѣлы, между которыми можетъ быть допущено въ практикѣ уклоненіе наибольшей или наименьшей скорости машины отъ *средней* или *обыкновенной*, соотвѣтствующей нормальному ходу машины, опредѣляются отношеніемъ означенной *средней* скорости къ разности между наибольшею и наименьшею скоростями, которое называется *степенью равномерности хода машины*.

Назовемъ чрезъ  $\omega_2$  наибольшую угловую скорость вращенія вала паровой машины,  $\omega_1$  — наименьшую и  $\Omega$  — среднюю, то въ различныхъ случаяхъ практики можетъ быть допущено только *известное отношеніе*

$$n = \frac{\Omega}{\omega_2 - \omega_1},$$

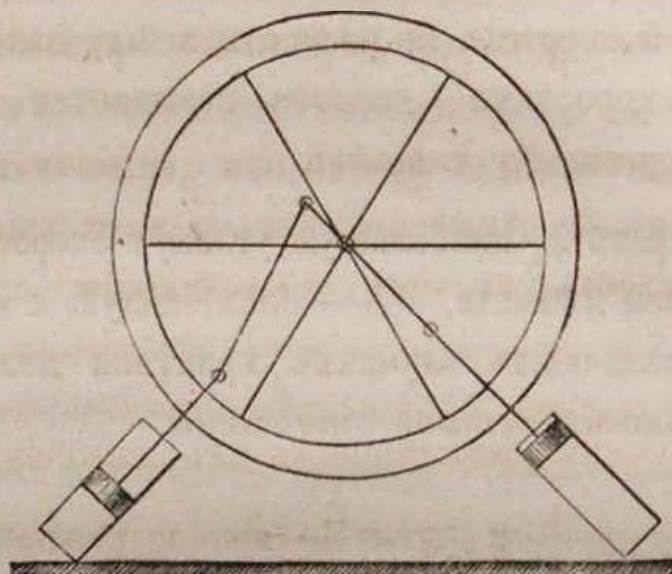
требуемое даннымъ производствомъ работы. Слѣдующія степени равномерности хода машины  $n$  должны быть соблюдены при исполненіи разныхъ механическихъ работъ, основываясь на указаніяхъ практики:

при движеніи плющильныхъ валковъ допускаются легко измѣненія скоростей, если разность между  $\omega_2$  и  $\omega_1$ , составляетъ даже  $\frac{1}{4}$  или  $\frac{1}{3}$  средней угловой скорости, въ лѣсопильняхъ, мукомольныхъ мельницахъ, насосахъ и др. величина  $n$  должна быть 25,

для приведенія въ движеніе кузнечныхъ молотовъ  $n = 20$ ; для пряденія же требуется большая степень равномерности хода машины  $n$ , которая принимается отъ 35 до 50 для среднихъ номеровъ и отъ 50 до 60 для приготовленія высокихъ номеровъ пряжи, выше 60-го.

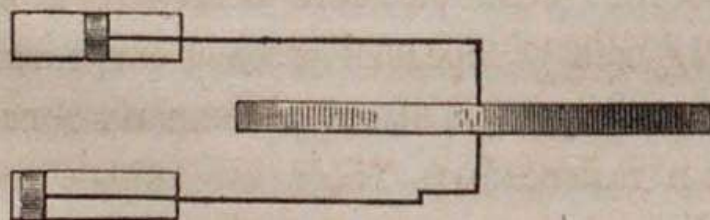


§ 43. *Двойные и тройные мотыли.* Во первыхъ для достиженія надлежащей степени равномерности движенія, устраиваютъ въ паровыхъ машинахъ *двойные мотыли*, въ которыхъ на одинъ и тотъ же шипъ дѣйствуютъ силы отъ двухъ поршней, коихъ цилиндры расположены подь прямымъ угломъ (фигура 21); или употребляютъ двѣ отдѣль-



фигура 21.

ныя машины, дѣйствующія на два мотыля, расположенныя на одномъ и томъ же валѣ подь прямымъ угломъ, (фигура 22) и дѣйствительно, *двойные мотыли или два*



фигура 22.

*мотыля*, расположенные подь прямымъ угломъ одинъ къ другому представляютъ большую, противъ одиночныхъ,



степени равномерности хода, какъ видно изъ слѣдующаго сравненія ихъ элементарныхъ работъ

наибольшая	средняя	наименьшая
1,414	1,274	1.
1,107	1.	0,783;

но весьма не много такихъ случаевъ, гдѣ бы степень равномерности хода, ими доставляемая, была достаточна безъ употребленія маховика для успѣшнаго производства работы.

Принимая измѣненія скоростей при движеніи этихъ мотылей въ такомъ же отношеніи, какъ и измѣненія передаваемыхъ ими работъ, получимъ по уравненію

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\Omega}{n},$$

слѣдующую степень равномерности ихъ движенія

$$n = \frac{1}{1,107 - 0,783} = 3, \text{ (приблизительно)}$$

которая далеко не удовлетворяетъ употребленію почти ни въ одной изъ вышеупомянутыхъ промышленныхъ работъ.

Оттого употребленіе машинъ съ двойными или съ двумя мотылями имѣетъ мѣсто только въ тѣхъ случаяхъ, гдѣ, не употребляя маховика, можно воспользоваться инерціею составныхъ частей машины, или исполнительнаго механизма, или наконецъ посторонними вліяніями. Напримѣръ разсматриваемыя системы паровыхъ машинъ могутъ быть употреблены весьма удачно и доставлять требуемую степень равномерности хода, безъ содѣйствія маховаго колеса, для движенія мельничныхъ жернововъ, коихъ инерція при ихъ вращеніи значительно устанавливаетъ равномерность хода. Сюда же принадлежатъ паровыя машины паровозовъ и пароходовъ, живая сила которыхъ, раждающаяся влѣдствіе



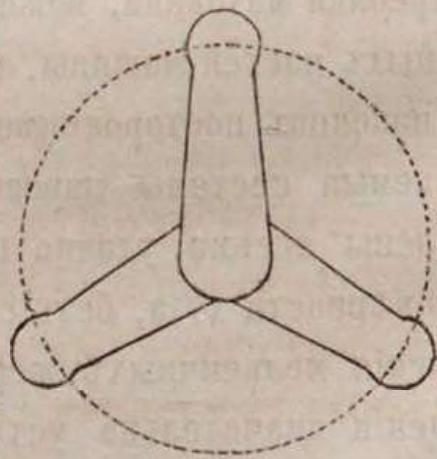
движенія огромной массы поѣзда, или всего пароходнаго корпуса, представляетъ превосходный маховикъ для какой угодно степени равномерности.

Одно изъ главныхъ условій, по которому машины съ двумя мотылями необходимы для пароходовъ и паровозовъ, составляетъ *отсутствіе мертвой точки*, т. е. отсутствіе такихъ положеній мотыля (одиночнаго) въ которыхъ поршень безъ содѣйствія посторонней инерціи не можетъ производить никакого дѣйствія.

Дѣйствительно въ положеніяхъ а и с (фигура 19) работа движителя равна нулю, между тѣмъ какъ сопротивленіе приложенное по окружности передаточнаго колеса, дѣйствуетъ въ цѣлый оборотъ вала одинаково, и слѣдовательно въ означенныя положенія мотыля, которыя получили названіе мертвыхъ точекъ *движенія быть не можетъ*.

Такъ могло бы случиться при началѣ хода машины, когда она должна еще преодолѣть инерцію всего поѣзда или всего парохода; въ эти минуты, когда живая сила только что начинающаго двигаться поѣзда или парохода, равна нулю, слѣдовательно когда сопротивленіе представляемое поршню машины бываетъ наибольшее, одиночный мотыль въ мертвыхъ его положеніяхъ не произвелъ бы никакого движенія.

Употребленіемъ трехъ мотылей, расположенныхъ подъ равными углами одинъ къ другому, какъ показываетъ рисунокъ, можно бы достигнуть еще большей степени равномерности движенія, но какъ



фигура 23.



изготовленіе колѣнчатыхъ валовъ съ тройными мотылями довольно затруднительно, по этому при паровыхъ машинахъ они употребляются весьма рѣдко; да и кромѣ того, построеніе паровой машины съ тремя мотылями составляетъ почти тоже самое, что и построеніе трехъ отдѣльныхъ машинъ съ одиночными мотылями, или съ однимъ мотылемъ.

§ 44. *Необходимость въ употребленіи маховаго колеса въ паровыхъ машинахъ.* Чтобы изыскать источники для достиженія наибольшей степени равномерности движенія, требуемой многими промышленными производствами, для этаго сдѣлаемъ элементарный разборъ причинъ неправильнаго или неравномернаго хода машинъ.

По уравненію разности живыхъ силъ (54) равномерное движеніе, какъ мы уже говорили, можетъ быть только при динамическомъ равновѣсіи всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на машину, вслѣдствіе котораго алгебраическая сумма работъ всѣхъ этихъ силъ равна нулю для разсматриваемаго промежутка времени. Но, чтобы это условіе могло существовать, нужно, чтобы силы движителя и сопротивленія, приложенныя къ одной точкѣ, слѣдовательно при равныхъ пространствахъ, *дѣйствовали постоянно* въ цѣлый разсматриваемый промежутокъ времени. Мы видѣли также, что при движеніи мотыля, сила движителя, дѣйствуетъ не постоянно въ цѣлый оборотъ, и слѣдовательно вотъ первая причина неравномерности хода паровыхъ машинъ. Вообще сила можетъ дѣйствовать постоянно т. е. такъ, чтобы работа ея не была равна нулю ни въ одно мгновеніе, только при такомъ движеніи, въ которомъ скорость движущихся частей постоянна во все время движенія.

Это же можетъ быть *только при круговращательномъ движеніи* всѣхъ частей машины. Но какъ въ паровыхъ ма-



шинахъ даже первая часть, воспринимающая дѣйствіе пара, т. е. поршень, уже не имѣетъ круговращательнаго движенія, и скорость ея измѣняется отъ нуля до обыкновенной, по этому и во всемъ составѣ машины остаются слѣды попеременнаго движенія.

И такъ равномерное движеніе можетъ имѣть мѣсто только въ такой машинѣ, которая состоитъ исключительно изъ частей круговращающихся. Если же въ составѣ машины вошли части съ прямолинейнымъ возвратнымъ движеніемъ, такія какъ поршень, то можно въ нѣкоторыхъ случаяхъ дать машинѣ такое устройство, чтобы въ составѣ ея вошло больше круговращательныхъ частей, нежели съ возвратнымъ движеніемъ и этимъ ослабить болѣе или менѣе вліяніе попеременно движущихся частей машины на движеніе общаго ея состава. Чтобы ощутительнѣе вывести вліяніе круговращающихся и попеременно движущихся (\*) частей машины на движеніе общаго состава ея, выразимъ количества движенія частей круговращающихся и попеременно движущихся *отдѣльно*, въ общемъ уравненіи количества движенія машинъ, которое имѣетъ слѣдующій видъ:

$$\sum mvdv = \sum Fdf + \sum Qdq + \sum Rdr \pm PdH \dots (58)$$

для бесконечно малаго промежутка времени.

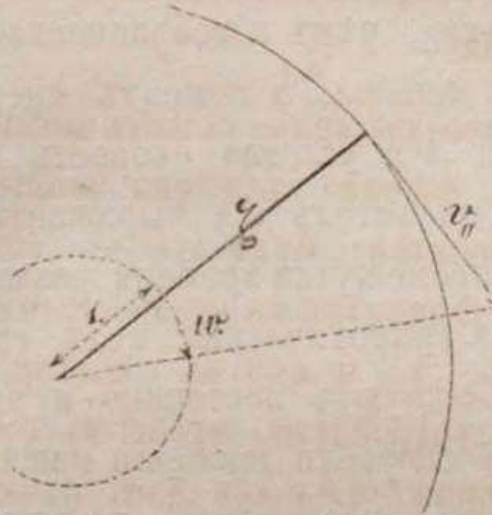
Назовемъ чрезъ  $v$ , скорость движенія частей попеременно—движущихся, чрезъ  $v_{\omega}$ , скорость точки на окружности частей круговращающихся и чрезъ  $\omega$  угловую ихъ скорость, то

---

(\*) Имѣющихъ прямолинейное возвратное движеніе.



$$\begin{aligned} \sum m v dv &= \sum m v_1 dv_1 + \sum m v_{11} dv_{11}, \text{ или} \\ &= \sum m v_1 dv_1 + \sum m \zeta^2 \omega d\omega, \\ \text{такъ какъ } v_{11} &= \zeta \omega \text{ и } dv_{11} = \zeta d\omega \end{aligned}$$



Фигура 24.

Подставляя въ уравненіе количества движенія вмѣсто  $\sum m v dv$  равныя ей величины, получимъ

$$\sum m v_1 dv_1 + \sum m \zeta^2 \omega d\omega = \sum F df + \sum Q dq + \sum R dr \pm P dH,$$

откуда

$$\sum m \zeta^2 \omega d\omega = \sum F df + \sum Q dq + \sum R dr \pm P dH - \sum m v_1 dv_1. \quad (59)$$

Назовемъ алгебраическую сумму работъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на машину, какъ на систему матеріальныхъ точекъ, неразрывно между собою связанныхъ, для безконечно малаго времени  $dt$  т. е.

$\sum F df + \sum Q dq + \sum R dr \pm P dH - \sum m v_1 dv_1$   
 чрезъ  $dS$ , и сумму моментовъ инерціи круговращательныхъ частей машины,  $\sum m \zeta^2$  относительно оси ихъ вращеній чрезъ  $A$ , уравненіе (59) приметъ слѣдующій видъ

$$A \omega d\omega = dS \dots \dots \dots (60)$$

Оно выражаетъ въ немногихъ знакахъ всю зависимость между инерціею круговращательныхъ частей и динамическимъ равновѣсіемъ силъ, дѣйствующихъ на машину.



Выведа изъ этого уравненія величину приращенія скорости

$$d\omega = \frac{dS}{A\omega} \dots \dots \dots (61)$$

получаемъ такое заключеніе, что приращеніе скорости  $d\omega$  будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ алгебраическая сумма работъ всѣхъ силъ будетъ меньше, а моментъ инерціи круговращательныхъ частей  $A$  и угловая скорость ихъ  $\omega$  больше. Другими словами числитель  $dS$  выражаетъ для каждаго безконечно малаго промежутка времени разность между работами двигателя и сопротивленій; если силы двигателя и сопротивленій дѣйствуютъ постоянно и при томъ такъ, что при нормальной скорости движенія машины работа двигателя равна работѣ сопротивленій, то разность ихъ  $dS$  и приращеніе скорости  $d\omega$  будутъ равны нулю и машина будетъ имѣть постоянную скорость, имѣть движеніе равномерное.

Если же при движеніи машины для каждаго мгновенія, работа двигателя и сопротивленій не равны между собою, какъ это бываетъ при передачѣ движенія помощію мотылей, то числитель  $dS$  будетъ имѣть какую нибудь величину больше или меньше нуля, смотря по тому, работа двигателя больше или меньше работы сопротивленія и слѣдовательно приращеніе скорости  $d\omega$  будетъ какая нибудь численная величина. Если она положительная, то скорость машины будетъ постепенно возрастать до тѣхъ поръ, пока числитель  $dS$  не будетъ равенъ нулю; если же она отрицательная, то скорость машины уменьшается, и будетъ постоянно уменьшаться до тѣхъ поръ, пока работа сопротивленій будетъ превосходить работу двигателя. Чѣмъ алгебраическая сумма  $dS$  будетъ больше, т. е. чѣмъ непостояннѣе дѣйствуютъ силы двигателя и сопротивленій,



тѣмъ приращеніе скорости  $d\omega$  будетъ больше, и наибольшая и наименьшая скорости будутъ болѣе уклоняться отъ средней или нормальной. Такимъ образомъ величина этаго *приращенія*  $d\omega$  *опредѣляетъ степень равномерности движенія машины.*

Въ паровыхъ машинахъ передача работы двигателя посредствомъ мотыля весьма не постоянна; мы видѣли, что, въ теченіи каждаго оборота маховаго колеса, она измѣняется отъ самой наибольшей своей величины до нуля и обратно. Такимъ образомъ въ точкахъ *a* и *c* (фигура 19) работа двигателя равна нулю, разность  $dS$  будетъ для этого мгновенія отрицательная и приращеніе скорости  $d\omega$  будетъ имѣть наибольшую величину съ отрицательнымъ знакомъ. Точно также въ положеніяхъ *b* и *d* работа двигателя *F* будетъ больше работы сопротивленій и машина получитъ ускоренное движеніе вслѣдствіе наибольшей величины  $d\omega$  съ положительнымъ знакомъ. И такъ выходитъ, что въ паровыхъ машинахъ съ круговращательнымъ движеніемъ величина алгебраической суммы  $dS$  не бываетъ равна нулю для каждаго мгновенія, и слѣдовательно, чтобы движеніе паровыхъ машинъ по возможности приблизить къ равномерному, т. е. приращеніе скорости  $d\omega$  сдѣлать незначительною, остается, для уменьшенія дроби  $\frac{dS}{A\omega}$ , увеличить ея знаменателя  $A\omega$ , т. е. увеличить моментъ инерціи круговращающихся частей и угловую ихъ скорость. Для настоящаго случая нѣтъ другаго средства увеличить моментъ инерціи круговращательныхъ частей, какъ ввести въ составъ паровой машины новую круговращательную часть, придать ей значительные размѣры, при которыхъ она имѣла бы достаточный моментъ инерціи и сообщить ей наибольшую скорость.



Такимъ образомъ составилось понятіе о *необходимости* употребленія *маховаго колеса*, какъ одной изъ существенныхъ частей постоянныхъ паровыхъ машинъ.

IV. ОПРЕДѢЛЕНІЕ ВѢСА МАХОВАГО КОЛЕСА ДЛЯ ПАРОВЫХЪ МАШИИЪ.

§ 45. Если возьмемъ написанное нами уравненіе количества движенія (59) для цѣлаго промежутка времени  $t$ , выражающаго полный періодъ движенія машины, получимъ разность живыхъ силъ

$$\frac{A(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2} = \sum_0^t Fdf + \sum_0^t Qdq + \sum_0^t Rdr - \frac{\sum mv^2}{2} + \frac{\sum mv_0^2}{2} \dots \dots (62)$$

Назовемъ чрезъ  $\Omega$  среднюю и нормальную угловую скорость, то

$$\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \text{ или} \\ \omega_1 + \omega_2 = 2\Omega \dots \dots (1)$$

и сверхъ того

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\Omega}{n} \dots \dots (2)$$

Перемноживъ уравненія (1) и (2) будемъ имѣть

$$\omega_2^2 - \omega_1^2 = \frac{2\Omega^2}{n}$$

Подставимъ теперь это выраженіе разности квадратовъ скоростей въ уравненіе живыхъ силъ, получимъ

$$\frac{A\Omega^2}{n} = \sum Fdf + \sum Qdq + \sum Rdr - \frac{\sum mv^2}{2} + \frac{\sum mv_0^2}{2} \dots (63)$$



Назовемъ какъ и прежде сумму работъ всеѣхъ силъ, дѣйствующихъ на систему паровой машины во время  $t$  чрезъ  $S$  будемъ имѣть

$$A \frac{\Omega^2}{n} = S \dots \dots (64)$$

Употребляя это окончательное уравненіе для опредѣленія момента инерціи избранной нами круговращательной части при извѣстныхъ обстоятельствахъ движенія, выведемъ величину ея

$$A = \frac{Sn}{\Omega^2} \dots \dots (65)$$

Зная  $S$ ,  $\Omega$  и требуемую степень равномерности движенія машины  $n$ , по роду фабрикаціи опредѣлимъ  $A$ , моментъ инерціи маховаго колеса.

Но какъ чрезъ  $A$  мы назвали моментъ инерціи  $\sum m \zeta^2$ , то, называя чрезъ  $P$  вѣсъ маховика и  $R$  радіусъ его, получимъ для настоящаго случая

$$A = \frac{P}{g} R^2$$

и, подставивъ это выраженіе момента инерціи маховаго колеса въ уравненіе (65), будемъ имѣть

$$\frac{P}{g} R^2 = \frac{nS}{\Omega^2}, \text{ откуда } P = \frac{gnS}{R^2 \Omega^2},$$

или

$$P = \frac{gnS}{V^2} \dots \dots (66)$$

(такъ какъ  $R\Omega = V$ ).

Изъ этой формулы видно, что вѣсъ маховика зависитъ отъ трехъ главныхъ обстоятельствъ: степени равномерности хода машины, динамическаго равновѣсія силъ, дѣйствующихъ на систему машины, и скорости маховика.

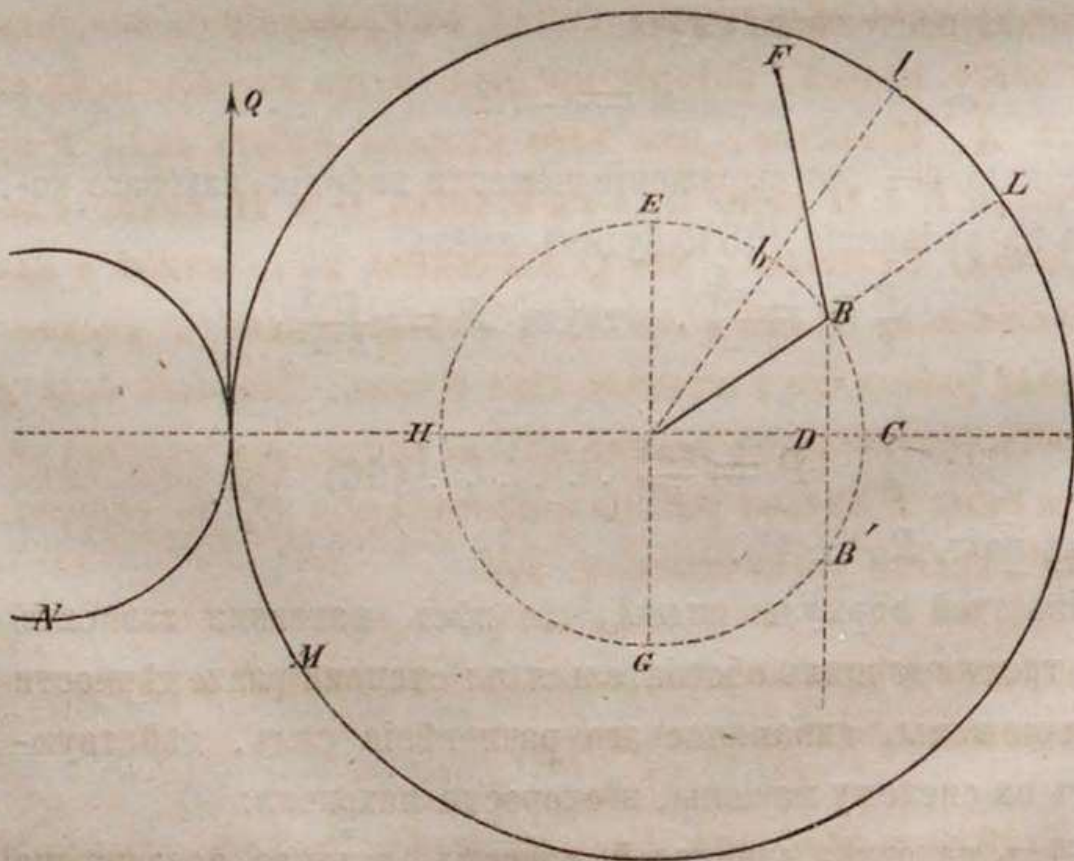
Вѣсъ маховика для такой машины, которая подвержена дѣйствию измѣняющихся силъ, будетъ больше, нежели въ



томъ случаѣ, если работы двигателя и сопротивленій остаются во все время постоянными; и обратно, для машинъ, вращающихся съ большею скоростію, вѣсъ маховика будетъ менѣе и уменьшается въ обратномъ отношеніи съ скоростію его движенія. Наконецъ, независимо отъ этихъ двухъ обстоятельствъ, маховикъ долженъ быть тѣмъ массивнѣе, чѣмъ бѣольшая равномерность хода требуется отъ машины свойствомъ продукта, для обработки котораго назначается двигатель.

Чтобы въ практикѣ можно было пользоваться этимъ уравненіемъ, нужно опредѣлить величину алгебраической суммы работъ всѣхъ силъ, дѣйствующихъ на машину т. е. сумму  $S$ .

§ 46. *Опредѣленіе вѣса маховаго колеса для мотыля двойнаго дѣйствія.* Такъ какъ вѣсъ постоянныя па-



Фигура 25.



ровыя машины работают посредствомъ одиночныхъ мотылей двойнаго дѣйствія, слѣдовательно работа, передаваемая мотылемъ отъ поршня вала маховаго колеса, и работа, передаваемая мотылю со стороны всѣхъ сопротивленій, дѣйствующихъ на машину, въ теченіи полнаго періода ея движеній представляетъ сумму работъ движителя и сопротивленій, изображаемую буквою  $S$  въ предъидущихъ уравненіяхъ.

И такъ, для опредѣленія величины  $S$ , для полнаго періода движенія машины, разсмотримъ дѣйствіе силъ, во время движенія мотыля. Пусть  $AB$  изображаетъ одиночный мотыль паровой машины,  $F$  движущую силу, передаваемую поршнемъ,  $Q$  сопротивленіе, противопоставляемое отъ всѣхъ полезныхъ и вредныхъ сопротивленій.

Разсматривая машину въ движеніи, пренебрежемъ инерціею прочихъ движущихся частей, въ сравненіи съ инерціею маховаго колеса, которое предполагается насаженнымъ на валъ  $A$ . Извѣстно, что элементарная работа силы  $F$  въ точкахъ  $E$  и  $G$  равна 0, а въ точкахъ  $C$  и  $H$  самая наибольшая. Положимъ, что  $Q$  неизмѣнно по величинѣ и направленію въ цѣлый оборотъ, а слѣдовательно и элементарная работа его постоянно одна и таже. Скорость вала  $A$  будетъ безпрестанно перемѣняться. Когда элементарная работа силы  $F$  больше работы сопротивленія  $Q$ , то скорость вала  $\omega$  будетъ увеличиваться, ибо

$$d\omega = +$$

и сдѣлается наибольшею, когда работы силъ  $F$  и  $Q$  будутъ равны между собою т. е. когда

$$d\omega = 0$$

Вслѣдъ за тѣмъ при уменьшающейся работѣ движущей силы, скорость машины будетъ уменьшаться т. е.

$$d\omega = -$$



и будетъ наименьшею, когда работы силъ  $F$  и  $Q$  вторично сдѣлаются равными между собою. Все это повторится при каждомъ оборотѣ вала  $A$ , а слѣдовательно будетъ измѣняться и скорость маховаго колеса. Нужно опредѣлить вѣсь и размѣры его такія, чтобы наибольшая и наименьшая скорости вала разнились весьма мало между собою.

Очевидно, что при періодическомъ движеніи машины работа силы  $F$  въ цѣлый оборотъ должна быть равна работѣ силы  $Q$ ; если бы она была больше, то скорость машины, послѣ каждаго оборота, возрастала бы, а если бы работа силы  $F$  была менѣе работы сопротивленія  $Q$ , то движеніе не могло бы вовсе существовать.

Пусть  $r = AB$  выражаетъ плечо мотыля, то работа силы  $F$  въ цѣлый оборотъ равна

$$F \cdot 4r.$$

Работа сопротивленія  $Q$ , дѣйствующаго касательно къ колесу  $M$ , котораго радіусъ  $R$ , равна.

$$Q \cdot 2nR,$$

и стало быть  $F \cdot 4r = Q \cdot 2nR$ , откуда

$$Q = \frac{2Fr}{\pi R} = F \frac{2r}{\pi R}; \dots \dots \dots (67)$$

Для опредѣленія положеній мотыля, соотвѣтствующихъ наибольшей и наименьшей скорости вала и маховаго колеса, положимъ, что шишъ мотыля находится въ точкѣ  $E$ ; тутъ элементарная работа силы  $F = 0$ . Потомъ работа движущей силы увеличивается, но какъ въ первыя мгновенія она менѣе работы  $Q$ , то скорость машины уменьшается и будетъ наименьшею, когда шишъ придетъ въ нѣкоторую точку  $B$ , гдѣ элементарныя работы силъ  $F$  и  $Q$  равны между собою.



Элементарная работ<sup>а</sup> силы  $F$  выражается

$$F \frac{ds}{r} \cdot x;$$

а элементарная работа силы  $Q$  будетъ

$$Q \frac{ds}{r} \cdot R,$$

ибо точка приложенія сопротивленія  $Q$  пробѣжитъ по окружности  $M$  дугу

$$lL = ds \frac{R}{r}$$

Изъ равенства этихъ работъ

$$F \frac{ds}{r} x = Q \frac{ds}{r} R,$$

опредѣлимъ положеніе шипа мотыля, соответствующее *наименьшей* скорости, т. е. найдемъ величину  $x$ .

Преобразовывая его получимъ

$$\frac{ds}{r} (Fx - Qr) = 0,$$

и слѣдовательно для наименьшей скорости

$$x = R \frac{Q}{F}, \text{ но}$$

$$Q = F \frac{2r}{\pi R}, \text{ то } x = F \frac{2rR}{F\pi R} = \frac{2r}{\pi} = 0,637 \text{ r.}$$

Когда шипъ оставитъ точку  $B$ , тогда элементарная работа силы сдѣлается болѣе работы сопротивленія и, значить, скорость машины начнетъ увеличиваться; въ точкѣ  $C$  элементарная работа силы  $F$  будетъ имѣть наибольшую величину; далѣе эта работа будетъ постепенно уменьшаться, но скорость вала все еще будетъ возрастать и сдѣлается наибольшею, когда шипъ займетъ нѣкоторое положеніе  $B'$ , гдѣ элементарныя работы силъ  $F$  и  $Q$  будутъ равны между собою. Поэтому положеніе точки  $B'$ , опредѣлится по тому

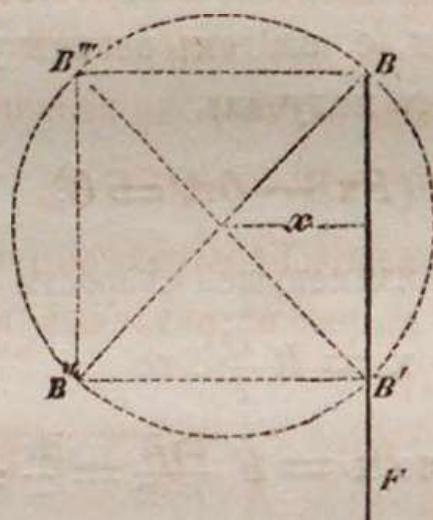


же самому условию, какъ и точки  $B$ , т. е. по уравненію

$$F \frac{ds}{r} x = Q \frac{R}{r} ds$$

откуда для *наибольшей* скорости  $x = 0,637 r$ . Стало быть обѣ точки  $B$  и  $B'$  наименьшей и наибольшей скорости вала  $A$  и маховаго колеса находятся на одной хордѣ  $BB'$  перпендикулярной къ  $AC$ . Изъ этого выходитъ, что по окружности, описываемой шипомъ мотыля, находятся четыре точки, соотвѣтствующія наибольшимъ и наименьшимъ скоростямъ.

Теперь понятно, что условіе  $x = 0,637 r$  существуетъ при четырехъ положеніяхъ шипа мотыля въ точкахъ  $B$ ,  $B'$ ,  $B''$  и  $B'''$ ; что когда величина  $x$  станетъ увеличиваться,



Фигура 26.

т. е. становится болѣе  $\frac{2r}{\pi}$ ; тогда скорость машины тоже увеличивается, т. е.

$$d\omega = +$$

и наоборотъ при  $x$  меньшемъ  $\frac{2r}{\pi}$  приращеніе скорости

$$d\omega = - .$$

Если въ уравненіе

$$F \frac{ds}{r} x = Q \frac{ds}{r} \cdot R \text{ подставимъ}$$



$$F \frac{2r}{\pi R} = Q, \text{ получимъ}$$

$$F \frac{ds}{r} x - F \frac{2ds}{\pi} = 0 \text{ или}$$

$$F \cdot \frac{ds}{r} \left( x - \frac{2r}{\pi} \right) = 0 \dots (68)$$

уравненія , изъ которыхъ очевидна зависимость работы силы  $F$  отъ величины проэкции  $x$ .

Чтобы опредѣлить помощію уравненія (66) вѣсь махового колеса для уравниванія движенія, передаваемого валу мотылемъ двойнаго дѣйствія , нужно найти величину  $S$  для разсматриваемаго промежутка времени. Такъ какъ  $S$  выражаетъ алгебраическую сумму работъ всѣхъ силъ дѣйствующихъ и сопротивляющихся, взятую въ извѣстный промежутокъ времени т. е. отъ наибольшей до наименьшей скорости (для настоящаго случая), то величина суммы

$$s = F \cdot BB' - QEGE',$$

гдѣ  $BB'$  и  $EGE'$  выражаютъ пространство, пройденное точкою приложеній силы въ разсматриваемый нами промежутокъ времени (фиг. 27).

$$\text{Но } BB' = 2BC, \text{ и } BC = \sqrt{AB^2 - 0,637^2 AB^2},$$

$$\text{или } = \sqrt{r^2 - 0,637^2 r^2}, \text{ слѣдовательно}$$

$$2BC = 2r \sqrt{1 - 0,637^2}$$

$$2BC = 2r \cdot 0,7712 = 1,5424 r,$$

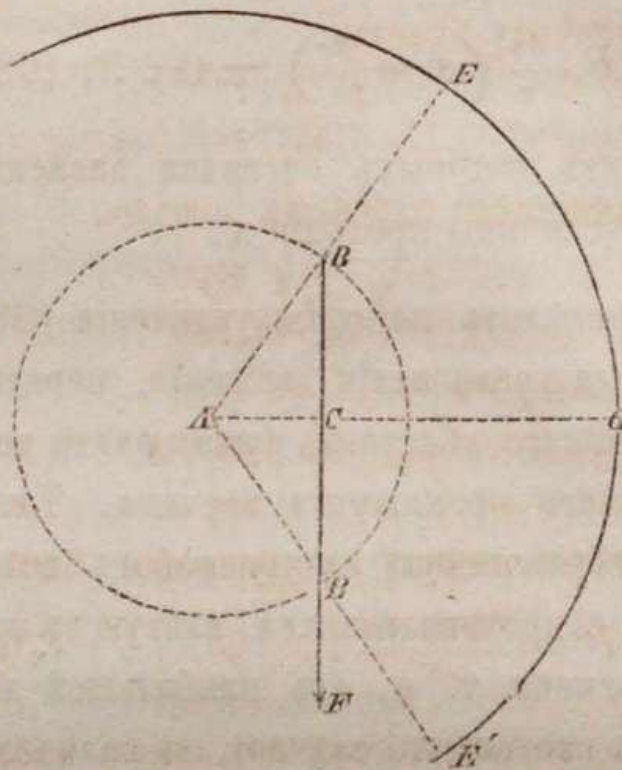
по этому

$$FBB' = 1,5424Fr.$$

Для опредѣленія работы сопротивленія  $Q \cdot EGE'$  вычислимъ дугу  $EGE'$  по извѣстной хордѣ. Съ этою цѣлію построимъ прямоугольный треугольникъ, котораго катеты



были бы 0,637 и 0,7712. Уголь  $BAC$  будетъ почти  $50,5^\circ$ ; слѣдовательно уголь  $BAB'$  будетъ почти  $101^\circ$ , и



фигура 27.

дуга  $EGE'$  :  $2\pi R = 101 : 360$ , откуда

$$EGE' = 2\pi R \frac{101}{360} = 0,5611 \pi R.$$

Работа сопротивленія =  $Q \cdot 0,5611 \pi R$ , или

$$= F \frac{2r}{\pi R} \cdot 0,5611 R\pi$$

$$= 0,5611 F2r.$$

И такъ работа

$$S = 1,5424 F\Gamma - 0,5611 F2r, \text{ или}$$

$$= F\Gamma (1,5424 - 1,1222) = 0,4202 F\Gamma.$$

Слѣдовательно вѣсь обода колеса

$$P = \frac{gn \cdot 0,4202 F\Gamma}{v^2} \dots \dots \dots (69)$$

Выразимъ теперь силу  $F$  въ паровыхъ лошадяхъ, число коихъ представляетъ собою работу движителя. Такъ какъ



работа силы въ полный оборотъ вала равна

$$F \cdot 4r,$$

и если валъ произведетъ  $\mu$  оборотовъ въ минуту, то работа силы  $F$  въ секунду будетъ

$$\frac{F \cdot 4r\mu}{60},$$

и окончательно число паровыхъ лошадей

$$N = \frac{F \cdot 4r\mu}{60 \cdot 15}$$

условіе, изъ котораго

$$Fr = \frac{15 \cdot 60 \cdot N}{4\mu}$$

Подставивъ эту величину въ уравненіе (69) получимъ

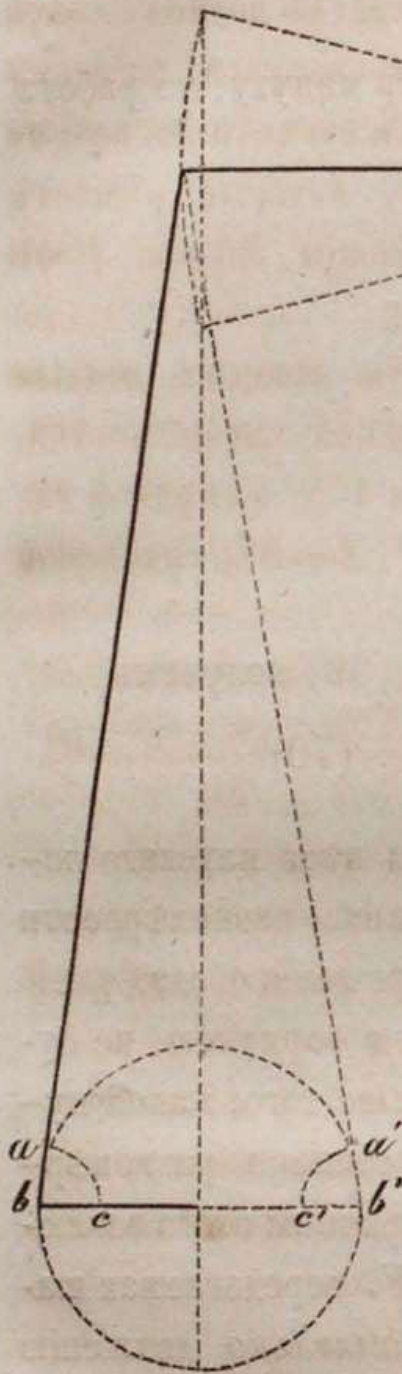
$$P = \frac{3048 Nn}{\mu V^2} \dots \dots \dots (70)$$

Выраженіе теоретической величины вѣса маховаго колеса для данной силы и данной степени равномерности хода машины при извѣстной скорости вращенія обода.

§ 47. Результаты, доставляемые этою формулою, не будутъ точны, и вѣсъ обода будетъ меньше того, какой нуженъ *дѣйствительно* для требуемой степени равномерности хода машины т. е. п. Главныя причины этого заключаются въ томъ, что во первыхъ сила  $F$ , передаваемая шатуномъ мотылю, дѣйствуетъ *не параллельно* движенію поршня, какъ это было допущено въ § 41, а всегда подъ нѣкоторымъ угломъ болѣе или менѣе острымъ, смотря по длинѣ шатуна, и чѣмъ шатунъ *короче*, говоря сравнительно, тѣмъ бôльшая погрѣшность имѣетъ мѣсто въ представленной формулѣ (70) и тѣмъ результаты ея менѣе близки къ дѣйствительности. Во вторыхъ, что въ машинахъ съ коромысломъ этотъ уголъ, подъ которымъ дѣйствуетъ давленіе



шатун  $a$  на шипъ мотыля, не есть одинаковъ для обоихъ



фигура 28.

противополож-  
ныхъ положе-  
ній шипа  $b$  и  
 $b'$  (фигура 28),  
какъ это бы-  
ваетъ въ маши-

нахъ безъ коромысла, и слѣдова-  
тельно элементарныя работы мо-  
тыля въ машинахъ съ коромысломъ  
будутъ болѣе или менѣе различаться  
отъ соотвѣтствующихъ элементар-  
ныхъ работъ мотыля, рассмотренныхъ  
въ § 41, и разность эта будетъ тѣмъ  
ощутительнѣе, чѣмъ шатунъ ко-  
роче. Въ третьихъ, сила  $F$  во всѣхъ  
предъидущихъ разсужденіяхъ при-  
нята постоянною во весь ходъ порш-  
ня, какъ это бываетъ только въ ма-  
шинахъ безъ расширения.

При машинахъ же съ расшире-  
ніемъ сила  $F$  будетъ измѣняться во  
весь оборотъ вала и въ формулѣ  
(69) вмѣсто постоянной величины  $F$   
должна быть взята сумма измѣняю-

щихся давленій, производимыхъ паромъ на поршень въ  
промежутокъ времени отъ наибольшей до наименьшей ско-  
рости. Но какъ точныя вычисленія движущей силы для  
каждаго случая въ практикѣ, т. е. для разныхъ размѣровъ  
шатунъ проектируемой машины и различныхъ расширеній  
пара въ цилиндрѣ, весьма сложны и сверхъ того разно-



образны, по этому нѣтъ возможности представить цѣлый рядъ общаго хода вычисленій вѣса маховика для всѣхъ возможныхъ случаевъ практики, тѣмъ болѣе не возможно дать общей формулы для всѣхъ рѣшеній этого вопроса; по этому мы ограничиваемся здѣсь предложеніемъ извѣстнаго, весьма удачно придуманнаго, способа Морена, который рѣшаетъ настоящій вопросъ графически (\*) помощію эюры. Вотъ въ чемъ состоитъ его способъ.

Развернемъ окружность, описываемую концемъ мотыля въ прямую линію и раздѣлимъ ее на равное число частей, напр. 20. Каждая часть 1—2, 2—3 и т. д. на прямой линіи будетъ соответствовать дугѣ 1—2', 2—3'', описанной



фигура 29.

концемъ мотыля въ каждое мгновеніе. Такъ какъ работа движущей силы въ каждое мгновеніе есть,

$$F \cdot ds \cdot \cos \alpha \quad (\S 41),$$

то, проведя перпендикуляры изъ точекъ дѣленія и отложивъ на нихъ величины моментовъ

$$F \cdot \cos \alpha,$$

соответствующихъ положеніямъ мотыля въ точкахъ 1, 2', 3''... получимъ окончательно площадь, ограниченную съ одной стороны прямою 1—21 а съ

(\*) Leçons de mécanique pratique, 3-e partie.



другой кривою линією  $1\ a\ c'11\ a''\ c'a''' 21$ . Численная величина этой площади представить намъ величину работы, произведенной силою  $F$  въ полный оборотъ вала маховаго колеса. Съ другой стороны сопротивление  $Q$  произведетъ въ полный оборотъ маховаго колеса работу

$$Q \cdot 2\pi R = F4r.$$

Построивъ на томъ же чертежѣ такой прямоугольникъ, котораго основаніе бы было окружность, описанная концемъ мотыля, а высота — постоянный моментъ сопротивленій

$$Q = \frac{R}{r},$$

получимъ площадь, численная величина которой выразитъ работу, произведенную сопротивленіемъ  $Q$  и будетъ сверхъ того равна площади, ограниченной кривою.

Изъ чертежа также видно, что наибольшая и наименьшая скорость занимаютъ четыре положенія, соотвѣтствующія тѣмъ моментамъ, когда элементарныя работы дѣйствующей силы  $F$  и сопротивленія  $Q$  равны между собою. Избытокъ площади, ограниченной кривою отъ  $a$  до  $a'$  съ одной стороны и прямою съ другой, показываетъ перевѣсъ работы движущей силы надъ работою сопротивленія. Значитъ, положеніе точки  $a$  соотвѣтствуетъ наибольшей скорости, и обратно недостатокъ площади ограниченной прямою  $a' - a''$  и двумя кривыми  $a' 11$  и  $11 a''$  выражаетъ, что работа сопротивленія превосходитъ работу движущей силы и слѣдовательно положеніе точки  $a''$  соотвѣтствуетъ наименьшей скорости.

И такъ, вычисливъ наибольшую разность между площадями, выражающими избытокъ работы силы дѣйствующей, надъ работою сопротивленія, принимаютъ эту разность за алгебраическую сумму  $S$ , выражаютъ ее числомъ паровыхъ



лошадей и получают вѣсь обода маховика по формулѣ (70), которой можно дать слѣдующій общій видъ

$$P = K \frac{nN}{\mu V}, \dots \dots \dots (71)$$

гдѣ  $K$  есть всегда большое число, выраженное цѣлыми числами.

Въ предстоящей таблицѣ представлены численныя величины коэффициента  $K$  для разныхъ системъ паровыхъ машинъ.

Цифры этой таблицы ясно свидѣтельствуютъ въ какой степени расширеніе паровъ въ цилиндрѣ имѣетъ вліяніе на равномерность движенія машины, вслѣдствіе чего величина коэффициента  $K$ , и слѣдовательно вѣсь маховика  $P$ , для большихъ степеней расширенія долженъ быть значительно больше. Это обстоятельство, между прочимъ, составляетъ одну изъ тѣхъ причинъ, по которымъ въ практикѣ и не допускаютъ слишкомъ высокихъ расширеній пара. Обыкновенно въ машинахъ съ круговращательнымъ движеніемъ, имѣющихъ маховое колесо, самое наибольшее расширеніе есть 6, т. е. сообщеніе пароваго котла съ цилиндромъ прекращается не ранѣе, какъ на  $\frac{1}{6}$  хода поршня.



Система машины.		Коефици. формулы.				
Безъ расширенія съ холодильникомъ или безъ холодильника.	Съ коромысломъ.	Безконечный шатунъ . . . . .	3020,55			
		Шатунъ въ 6 разъ болѣе мотыля.	3397,74			
		Шатунъ въ 5 разъ болѣе мотыля.	3593,33			
		Шатунъ въ 4 раза болѣе мотыля.	2489,11			
	Безъ коромысла, шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля. . . . .	3634,80				
Машины съ однимъ цилиндромъ, при 5 атмосферахъ давленія пара, съ расширеніемъ и холодильникомъ	Съ коромысломъ и расширеніемъ на	на $\frac{1}{3}$ хода поршня	4682,34			
		» $\frac{1}{4}$ » »	4952,02			
		» $\frac{1}{5}$ » »	5097,95			
		» $\frac{1}{6}$ » »	5267,47			
		» $\frac{1}{7}$ » »	5404,75			
		» $\frac{1}{8}$ » »	5492,11			
	Безъ коромысла, съ расширеніемъ на $\frac{1}{5}$ хода поршня. .	4332,57				
Машины съ качающимся цилиндромъ, Каве (фиг d на черт. 4) при 5 атмосферахъ упругости пара, съ холодильникомъ и расширеніемъ на $\frac{1}{3}$ хода поршня.		4837,43				
Машины системы Вульфа съ расширеніемъ и холодильникомъ, съ коромысломъ. Шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	Расширеніе	4 $\frac{1}{2}$ только въ большемъ цилиндрѣ. . . .	3612,70			
		7 $\frac{1}{2}$ начинающаеся на $\frac{2}{3}$ хода поршня малаго цилиндра. . . . .	3920,15			
Машины съ однимъ цилиндромъ высокаго давленія, съ расширеніемъ безъ холодильника.	Пять атмосферъ давленія пара.	Съ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	на $\frac{1}{2}$ хода поршня	4602,19		
			» $\frac{1}{3}$ » »	5320,90		
		Шесть атмосферъ давленія пара.	Съ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	расширеніе начинающ.	» $\frac{1}{4}$ » »	5991,96
					» $\frac{1}{5}$ » »	6650,34
					на $\frac{1}{3}$ хода поршня	4591,27
					» $\frac{1}{2}$ » »	4533,55
					» $\frac{1}{5}$ » »	5166,78
					» $\frac{1}{4}$ » »	5793,77
		Безъ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	расширеніе начинающ.	» $\frac{1}{3}$ » »	6301,49	
				» $\frac{1}{6}$ » »	6923,21	
Безъ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.		Безъ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	5588,37			
Съ качающимся цилиндромъ, Каве и расш. на $\frac{1}{2}$		» »	4739,47			
Машины безъ расширенія, безъ коромысломъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля.	Одиночный мотыль.	Одиночный мотыль.	3634,80			
		Два мот. или двойн. мот.	995,34			
		Три мот. или тройн. мот.	270,20			
Машины съ расширеніемъ и холодильникомъ; шатунъ въ 5 разъ длиннѣе мотыля; расширеніе на $\frac{1}{5}$ хода поршня.	Одиночный мотыль.	Одиночный мотыль.	4952,54			
		Два мот. или двойн. мот.	1182,15			
		Три мот. или тройн. мот.	427,24			



V. ВОЗСТАНОВЛЕНІЕ РАВНОМѢРНАГО ДВИЖЕНІЯ МАШИНЫ ПРИ  
ИЗМѢНЯЮЩЕМСЯ СОПРОТИВЛЕНІИ.

§ 48. Въ предъидущихъ разсужденіяхъ разсмотрѣны способы къ достиженію равномѣрнаго движенія только для такого случая, когда машина преодолеваетъ всегда одинаковое сопротивленіе — случая весьма рѣдкаго въ практикѣ. Все промышленныя машины, находясь въ различныхъ обстоятельствахъ движенія, передаютъ или потребляютъ работу двигателя въ большемъ или меньшемъ количествѣ, при чемъ можетъ измѣняться или усиліе, съ которымъ побѣждается предоставляемое сопротивленіе, или пространство, на которомъ это дѣйствіе совершается. Фабричныя или заводскія паровыя машины, назначаемыя для приведенія въ движеніе нѣсколькихъ рабочихъ снарядовъ и исполнительныхъ механизмовъ, двигаютъ не всегда одно и тоже количество рабочихъ машинъ, а въ нѣкоторыхъ случаяхъ при одномъ и томъ же числѣ ихъ преодолеваютъ не всегда одинаковое сопротивленіе, представляемое выработкою продуктовъ. Пароходныя и паровозныя машины часто находятся въ подобныхъ же обстоятельствахъ; локомотивъ не всегда тянетъ одинаковый поѣздъ, не всегда по одинаковому уклону подъема или ската дороги и сверхъ того часто движется при тѣхъ же обстоятельствахъ не съ одною и тою же скоростію. На пароходѣ двигатель расходуетъ не одинаковое количество работы во всехъ тѣхъ случаяхъ, когда судно плыветъ по теченію воды, или идетъ противу нея, когда несетъ тотъ или другой грузъ, и наконецъ двигаясь съ тою или другою скоростію, какъ это бываетъ въ военныхъ судахъ. А еще



случайныя сопротивленія, напр. препятствіе движенію отъ дѣйствія вѣтра и т. п?

Такимъ образомъ въ уравненіи живыхъ силъ

$$\frac{\Sigma mv^2}{2} - \frac{\Sigma mv_0^2}{2} = \Sigma \int_0^t Fdf + \Sigma \int_0^t Qdq + \Sigma \int_0^t Rdr \pm PH,$$

прилагая его къ движенію паровыхъ машинъ, ни въ какомъ случаѣ нельзя пріинимать членъ

$$\Sigma \int_0^t Qdq$$

постояннымъ во все время  $t$ ; а поэтому выходитъ опять, что разность живыхъ силъ для каждаго промежутка времени, не будетъ равно нулю и равномерное движеніе не возможно.

И такъ всѣ способы, разсмотрѣнные выше, и служащіе для достиженія равномернаго движенія паровыхъ машинъ, теперь оказываются недостаточными и слѣдовательно устройство паровой машины, составленное изъ элементовъ выказанныхъ выше условій, должно быть еще пополнено. Недостатокъ этотъ обнаруживается въ отсутствіи въ составѣ паровой машины такого органа, который бы *распредѣлялъ работу двигателя съ работою сопротивленій* безъ потери работы двигателя. Такъ какъ при измѣняющемся сопротивленіи, когда оно становится болѣе или менѣе *обыкновеннаго* (нормальнаго), машина выходитъ въ обоихъ случаяхъ изъ нормальнаго движенія, поэтому работа пара въ это время бываетъ *наибольшая* для дѣйствующей упругости.

Въ теоріи Памбура мы видѣли (формулы (42) и (42 bis)), что наибольшая работа паровой машины опредѣляется



упругостию пара въ цилиндрѣ, и величиною коэффициента  $k$ , т. е. степенью расширенія паровъ въ цилиндрѣ. И такъ, измѣняя сообразно сопротивленію упругость работающаго пара въ машинахъ безъ расширенія, или, прекращая входъ пара въ цилиндръ на большей или меньшей части хода поршня въ машинахъ съ расширеніемъ—въ обоихъ случаяхъ достигнемъ искомыхъ результатовъ. Посмотримъ, какъ это выполняется машиною при томъ или другомъ ея устройствѣ.

Такъ какъ, разсуждая по закону Мариотта, упругости паровъ, наполняющихъ не одинаковыя пространства, обратно пропорціональны объемамъ; поэтому упругости ихъ обратно пропорціональны количествамъ паровъ, наполняющихъ равные объемы. И такъ если мы въ паровой цилиндрѣ, объемъ котораго остается для данной машины одинъ и тотъ же, будемъ впускать паръ въ большемъ или меньшемъ количествѣ (по вѣсу), то упругости ихъ будутъ въ обратномъ отношеніи къ впускаемымъ въ цилиндръ количествамъ паровъ.

Далѣе, какъ количество паровъ, вытекающихъ какимъ бы то ни было отверзтіемъ изъ пароваго котла, зависитъ главнымъ образомъ отъ площади отверзтія выхода, при одинаковомъ давленіи, поэтому измѣненіе упругости пара, впускаемаго въ цилиндръ, достигается только измѣненіемъ площади отверзтія. Съ этою цѣлію кранъ, клапанъ, регистръ, однимъ словомъ приборъ, посредствомъ котораго производится выпусканіе паровъ изъ котла, устраивается въ зависимости, или отъ внѣшняго управленія (какъ это въ паровозахъ и пароходахъ), или отъ движенія самой машины (во всѣхъ заводскихъ или фабричныхъ производствахъ).

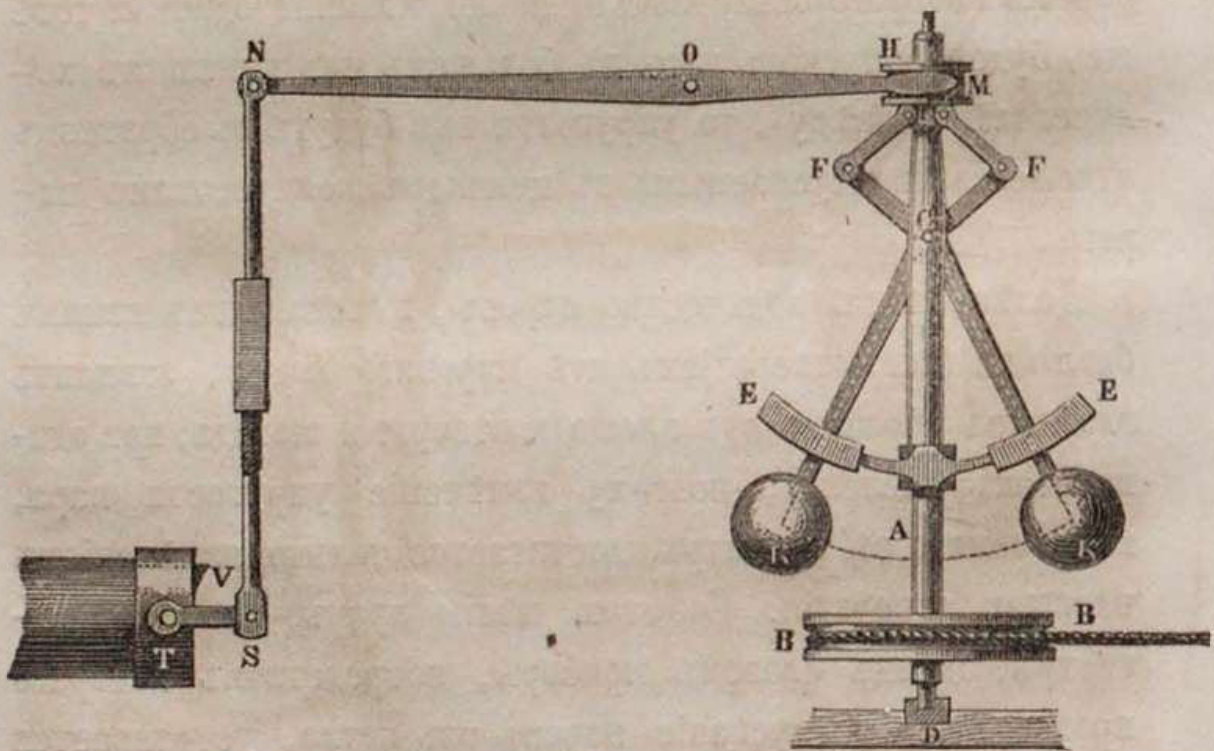


Въ машинахъ съ расширеніемъ устраиваются приборы для *переменнаго расширения паровъ*, которые бываютъ различны въ разныхъ машинахъ, и которые тоже или состоятъ подь нарочнымъ надзоромъ, или получаютъ дѣйствіе отъ общаго состава машины.

Въ описаніяхъ паровозовъ и пароходовъ можно найти многіе приборы и устройства переменнаго расширения паровъ и судить объ отправленіи ихъ назначеній.

§ 49. Для постояннаго отправленія означенныхъ дѣйствій въ машинахъ постоянныхъ употребляютъ *коническій маятникъ* или такъ называемый регуляторъ, основанный на качаніи шаровъ.

Первоначальное устройство его принадлежитъ Уатту, и остается до сихъ поръ еще въ наибольшемъ употребленіи.



фигура 30.

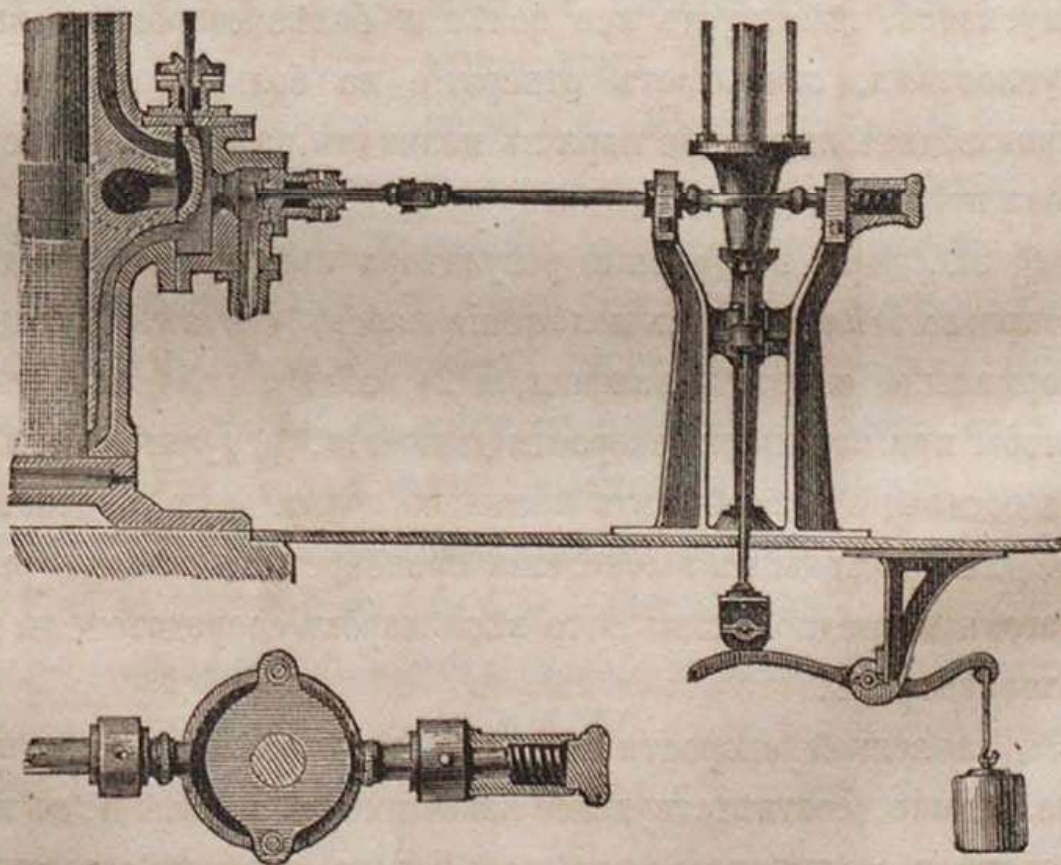
Существенную часть (фигура 30) его составляютъ шары *K, K* которые вращаясь вмѣстѣ со стержнемъ *A* бываютъ



подвержены дѣйствию центробѣжной силы, зависящей отъ ихъ вѣса и скорости вращенія. Если скорость машины и слѣдовательно скорость вращенія самаго регулятора поддерживается постоянною во все время производства работы, то шары и соединенная съ ними муфта *M* находятся на одной высотѣ, паръ впускается въ цилиндръ въ одинаковомъ количествѣ и движитель производитъ одинаковую работу.

Если же при движеніи машины скорость ея измѣняется, то шары, будучи подвержены дѣйствию большей или меньшей центробѣжной силы, опускаются или понижаются, и каждый разъ приводятъ въ движеніе муфту *M*, которая помощью рычаговъ *HNST* измѣняетъ положеніе *уравнительнаго клапана V* въ паропроводной трубѣ, и вмѣстѣ съ нимъ площадь живаго сѣченія, оставляемаго для прохода пара.

Въ машинахъ съ расширеніемъ муфту *M* регулятора сое-



Фигура 31.



двигаютъ часто съ приборомъ для расширенія паровъ, такъ что въ такихъ машинахъ не упругость пара, а степень его расширенія измѣняется сообразно съ величиною полезныхъ сопротивленій. На фигурѣ 31 изображенъ расширительный приборъ Мейера (Meyer) приводимый въ дѣйствіе отъ муфты регулятора. Муфта здѣсь имѣетъ двѣ коническія противоположныя выпуклости, суживающіяся постепе къ низу; онѣ при вращеніи регулятора толкаютъ обнимая ихъ кольцо и запираютъ при каждомъ обратномъ ход поршня круглое отверстіе пароваго пролета посредствомъ пробки. Чѣмъ быстрѣе машина и регуляторъ вращаются, тѣмъ муфта *M* выше поднимается, выпуклости ея, дѣйствуя узкими нижними частями, открываютъ отверстіе на меньшее время и слѣдовательно прекращеніе паровъ въ цилиндрѣ дѣлается раньше. При медленномъ движеніи машины муфта, опускаясь, дѣйствуетъ все болѣе и болѣе широкими выпуклостями, открываетъ отверстіе на большее время, и производитъ впусканіе пара въ цилиндръ на большей части хода поршня.

§ 50. При построеніи регулятора представляются два вопроса: 1) опредѣлить положеніе шаровъ, соотвѣтствующее нормальной скорости машины, и 2) найти такой вѣсъ ихъ, чтобы при измѣненіи скорости движенія, регуляторъ былъ въ состояніи возстановить прежнюю нормальную скорость,

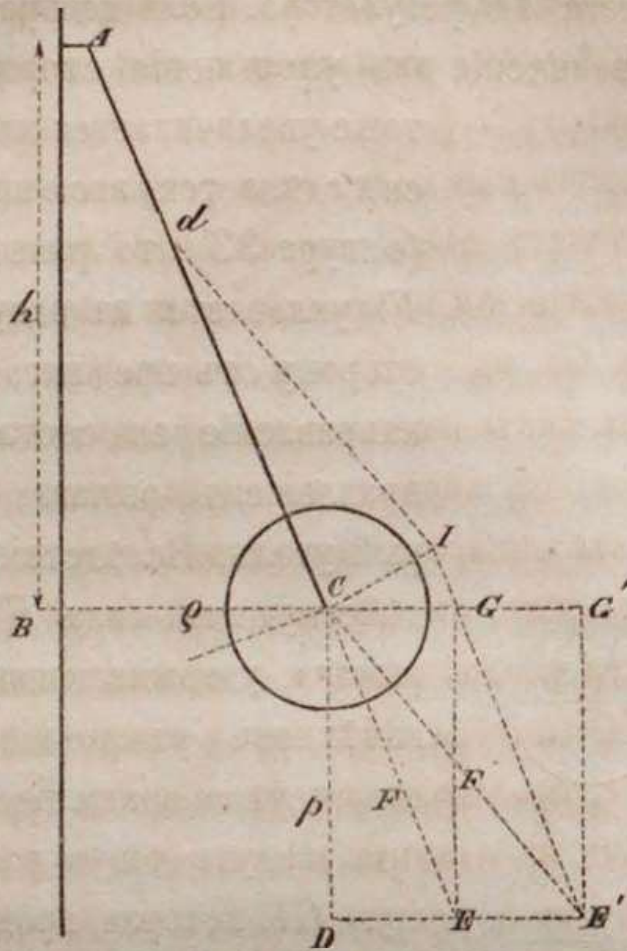
Для простоты въ вычисленіи пренебрежемъ вѣсомъ рычаговъ и предположимъ, что вѣса шаровъ сосредоточены въ ихъ центрахъ.

Для всякой скорости машины шары имѣютъ извѣстное положеніе, соотвѣтствующее какой нибудь высотѣ  $h$ , въ которомъ и остаются до тѣхъ поръ, пока равнодѣйствующая  $F$  силъ: центробѣжной  $C$ , и вѣса шара  $p$ , находится на про-









фигура 33.

величина центробѣжной силы будетъ

$$C = \frac{P}{g} s \omega^2 \quad (*)$$

и въ предъидущей пропорціи будемъ имѣть

$$h : s = p : \frac{P}{g} s \omega^2,$$

откуда  $h = \frac{g}{\omega^2} \dots \dots \dots (72)$

т. е., что *высота стоянія шаровъ*  $h$  не зависитъ ни отъ вѣса шаровъ регулятора, ни отъ длины рычаговъ, а только отъ *угловой скорости* вращенія регулятора. Вліяніе напряженія тяжести  $g$  такъ не значительно, что въ практикѣ имъ можно пренебречь безъ ощутительной погрѣшности.

(\*)  $g$  — напряженіе силы тяжести.



И такъ *положеніе шаровъ* при нормальной скорости машины, опредѣляется *только угловою скоростью* вращенія регулятора.

Второй вопросъ при построеніи регулятора состоитъ въ опредѣленіи такого вѣса шаровъ, чтобы регуляторъ, или правильнѣе коническій маятникъ, при измѣненіи скорости машины былъ бы въ состояніи возстановить нормальную скорость. Такъ какъ для движенія уравнительнаго клапана муфта *M* вмѣстѣ съ шарами, то опускается, то поднимается; по этому вѣсъ шаровъ въ одномъ случаѣ дѣйствуетъ какъ движущая сила, въ другомъ какъ сопротивленіе. Дѣйствительно, при увеличившейся скорости машины центробѣжная сила *C* (фигура 34) кромѣ сопротивленія со стороны муфты *M*, производимаго вращеніемъ уравнительнаго клапана, должна преодолѣть противодѣйствіе вѣса шара *p*, отъ котораго въ тоже время зависитъ величина центробѣжной силы. Слѣдовательно вѣсъ шара долженъ быть такой, чтобы онъ, производя центробѣжную силу, достаточную для преодоленія сопротивленія со стороны муфты *M* представлялъ бы въ тоже время по возможности наименьшее сопротивленіе отъ собственнаго вѣса. Выведемъ теперь величину вѣса шара *p* въ зависимости отъ вышесказанныхъ обстоятельствъ.

При подниманіи шаровъ проявляется сопротивленіе отъ муфты, которое разложится поровну на оба рычага регулятора. Каждое изъ этихъ сопротивленій, приложенное къ точкѣ *C*, назовемъ чрезъ *q*. Слѣдовательно при подниманіи шара къ вѣсу его *p* присоединится еще сопротивленіе отъ муфты *q*, которое въ центрѣ тяжести *B* шара будетъ равно

$$q \cdot \frac{b}{a}$$







$$p + q \frac{b}{a} : C' = h' : \rho_1,$$

$$\text{Но } h' = \frac{g}{\omega^2} \text{ и } C' = \frac{p}{g} \rho_1 \omega_2^2$$

для наибольшей скорости машины  $\omega_2$ , когда шары подняты; по этому

$$p + q \frac{b}{a} : \frac{p}{g} \rho_1 \omega_2^2 = \frac{g}{\omega^2} : \rho_1 \dots \dots \dots (1)$$

Изъ этого уравненія можно бы опредѣлить вѣсъ шара  $p$  такой, чтобы онъ въ состояннн былъ при дѣйствнн центробѣжной силы преодолѣть сопротивленіе муфты, но въ пропорцію входитъ еще неопредѣленная величина наибольшей угловой скорости  $\omega_2$ , которую слѣдуетъ выразить въ зависимости отъ нормальной.

Для этого назовемъ чрезъ  $\Omega$  среднюю или нормальную угловую скорость регулятора,  $\omega_1$  наименьшую, и  $\omega_2$  наибольшую, то

$$\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} = \Omega, \text{ или } \omega_2 + \omega_1 = 2\Omega \dots \dots \dots (2).$$

Регуляторъ долженъ такъ дѣйствовать, чтобы допускаемая имъ наибольшая и наименьшая скорости машины различались между собою только въ извѣстныхъ предѣлахъ т. е., чтобы

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\Omega}{n} \dots \dots \dots (3)$$

о чемъ мы уже говорили въ § 42.

Сложивъ уравненія (2) и (3) получимъ

$$2\omega_2 = 2\Omega + \frac{\Omega}{n}, \text{ или}$$

$$2\omega_2 = \Omega \left( 2 + \frac{1}{n} \right),$$

откуда наибольшая скорость

$$\omega_2 = \Omega \left( 1 + \frac{1}{2n} \right) k_2 = \Omega \dots$$



Произведя надъ тѣми же уравненіями дѣйствіе вычитанія, будемъ имѣть для *наименьшей* скорости

$$\omega_1 = \Omega \left( 1 - \frac{1}{2n} \right) = k_1 \omega$$

Слѣдовательно въ пропорцію (1) вмѣсто  $\omega_2$  можно подставить ея выраженіе въ нормальной скорости  $k_2 \Omega$  и тогда получимъ

$$p + q \frac{b}{a} : \frac{p}{g} \rho_1 k_2^2 \Omega^2 = \frac{g}{\omega^2} : \rho_1$$

откуда вѣсъ шара

$$p = q \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{(k_2^2 - 1)} \dots (73) (*)$$

достаточный для того, чтобы при увеличивающейся скорости машины, центробѣжная сила могла бы поднять шары и передвинуть муфту на надлежащую высоту.

Такъ какъ чрезъ  $k_2$  назвали мы для краткости множителя  $\left( 1 + \frac{1}{2n} \right)$ , то,

$$k_2^2 = \left( 1 + \frac{1}{2n} \right)^2 = 1 + 2 \frac{1}{2n} + \frac{1}{4n^2}$$

Пренебрегая членомъ  $\frac{1}{4n^2}$  какъ величиною малою, можно принять величину  $k_2$  равною  $1 + \frac{1}{n}$  (\*\*\*) и слѣдовательно безъ ощутительной для практическихъ вычисленій погрѣшности

(\*) Ибо  $\omega$  и  $\Omega$  имѣютъ одно и тоже значеніе.

(\*\*) Если взять даже наименьшую величину  $n$  степени равномерности хода машины, какая бываетъ напр., при насосахъ, лѣсопиляхъ и другихъ, т. е. 25, то и для этого случая  $\frac{1}{4n^2} = \frac{1}{2500}$ . Для прядильныхъ машинъ, при которыхъ  $n = 50$ , величина  $\frac{1}{4n^2} = \frac{1}{10000}$ .



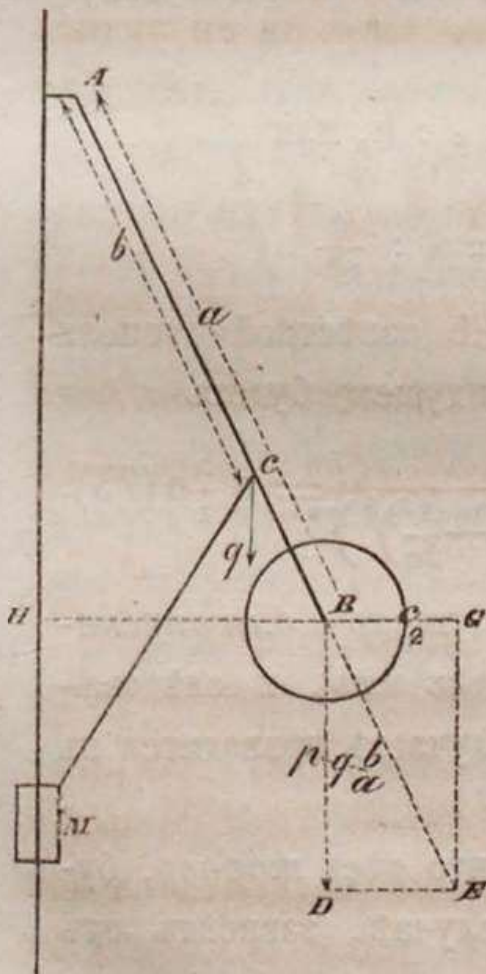
вѣсъ каждаго шара конического маятника можно выразить формулою

$$p = q \frac{b}{a} \cdot n \dots \dots \dots (74).$$

Этотъ вѣсъ будетъ достаточенъ для того, чтобы онъ, при увеличивающейся скорости машины, возстановилъ нормальную, которая была нарушена уменьшеніемъ сопротивленія. Опредѣленіе вѣса каждаго шара конического маятника для того случая, когда скорость машины уменьшается, можетъ быть сдѣлано подобнымъ же образомъ. Когда шаръ опускается отъ дѣйствія своего вѣса при уменьшившейся скорости машины, то при этомъ вѣсъ шара долженъ преодолѣть сопротивленіе муфты *M*, такъ что въ моментъ опусканія шара, сила, приложенная въ центрѣ *B* и производящая

это опусканіе, будетъ для каждаго шара не вѣсъ его *p*, а вѣсъ, уменьшенный сопротивленіемъ отъ муфты, приложеннымъ въ центрѣ тяжести шара.

Если принять, что муфта, какъ при поднятіи ея, такъ и при опусканіи, оказываетъ одинаковое сопротивленіе, и если разложить это сопротивленіе поровну на оба рычага, величина каждой составляющей силы въ точкѣ *C* будетъ какъ и въ предыдущемъ случаѣ *q*. Въ центрѣ же шара приложенное усиліе будетъ  $q \frac{b}{a}$ , и слѣдовательно



фигура 35.

сила, опускающая шаръ будетъ



для каждого изъ нихъ

$$p = q \frac{b}{a}.$$

И такъ силы, дѣйствующія на шары въ промежутокъ времени отъ нормальной скорости машины  $\omega$  до наименьшей  $\omega_1$  будутъ

$$\text{центробѣжная сила } C_2 = \frac{p}{g} \rho \omega_2^2 = \frac{p}{g} \rho k_2^2 \omega^2$$

$$\text{и сила тяжести } p = q \frac{b}{a}.$$

Такъ какъ въ этотъ промежутокъ времени, въ который скорость машины не сдѣлалась еще наименьшею, шары еще не опускаются; то равнодѣйствующая двухъ означенныхъ силъ еще находится на продолженіи рычага, и слѣдовательно изъ подобія двухъ треугольниковъ  $AHB$  и  $BDE$  получимъ пропорцію

$$\frac{p}{g} \rho k_2^2 \omega^2 : p = q \frac{b}{a} = \rho : h, \text{ или}$$

$$\frac{p}{g} \rho k_2^2 \omega^2 : p = q \frac{b}{a} = \rho : \frac{g}{\omega^2}$$

откуда вѣсъ шара, соответствующій извѣстной степени равномерности хода  $n$  подобно предъидущему будетъ

$$p = q \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{(1-k_2^2)} = q \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{1}{2n}\right)^2\right)} = q \frac{b}{a} n \quad (75).$$

Выходитъ, что какъ для подъема, такъ и для опусканія шаровъ нуженъ одинаковой вѣсъ ихъ, и слѣдовательно рѣшеніе вопроса для двухъ случаевъ приводится къ рѣшенію только одного.

Изъ формулъ (74) и (75) видно, что вѣсъ шаровъ, будучи одинаковъ въ томъ и другомъ случаѣ, зависитъ отъ слѣдующихъ обстоятельствъ:



величины сопротивленія, оказываемаго муфтою при ея перемѣщеніи;

отношенія  $\frac{b}{a}$  рычага регулятора къ части его  $a$ ,

и степени равномерности хода машины  $n$ .

§ 51. Въ приведенныхъ расчетахъ не принято въ соображеніе *треніе въ мѣстахъ соединенія движущихся частей* регулятора и слѣдовательно вѣсъ шаровъ, опредѣляемый формулами (74) и (75), будетъ недостаточенъ для того, чтобы произвести перемѣщеніе муфты во-время и на надлежащую высоту. Вообще, чтобы регуляторъ производилъ свое дѣйствіе немедленно послѣ того, какъ наибольшая или наименьшая скорость машины достигла крайняго своего предѣла, нужно, чтобы движенію шаровъ представлялось только одно противодѣйствіе муфты; если же въ шарнирахъ есть значительное треніе, тогда шары, коихъ вѣса разсчитаны по предложеннымъ формуламъ, будутъ подниматься или опускаться нѣсколько позже и регуляторъ не будетъ имѣть надлежащей чувствительности.

По этому пространство времени между тѣмъ мгновеніемъ, когда скорость машины только что начинаетъ выходить изъ нормальнаго положенія и мгновеніемъ, въ которое шары примутъ соотвѣтствующее перемѣщеніе, опредѣляетъ *чувствительность регулятора*.

Если же регуляторъ, работающій при какой нибудь машинѣ, не удовлетворяетъ требуемой степени равномерности движенія, обусловливаемой свойствомъ вырабатываемаго продукта, и допускаетъ при движеніи машины наибольшей и наименьшей скоростямъ выходить изъ предѣловъ, какія могутъ быть только терпимы при извѣстной фабрикаціи, тогда онъ негоденъ, и долженъ быть исправленъ. Подоб-



ныя неточности чаще всего случаются при новыхъ регуляторахъ, когда ихъ только что приравниваютъ къ известному ходу машины, повѣряя дѣйствіе ихъ непосредственнымъ наблюденіемъ.

Недостаточная чувствительность регулятора имѣетъ мѣсто по той причинѣ, что при вычисленіи вѣса шаровъ для проектируемой машины весьма трудно съ точностію опредѣлить сопротивленіе отъ муфты, соединенною системою рычаговъ съ уравнительнымъ клапаномъ. Обыкновенно дѣлается такъ, что для известной степени равномерности хода машины  $n$  и при данныхъ размѣрахъ рычага  $b$  и  $a$  берутъ наибольшую величину приблизительно вычисленнаго сопротивленія  $q$ , и получаютъ вѣсъ шаровъ  $p$ . Потомъ при испытаніи регулятора на мѣстѣ его дѣйствія пригоняютъ вѣсъ шаровъ его такъ, чтобы при движеніи машины допускалось отклоненіе скоростей не болѣе, какъ въ требуемыхъ предѣлахъ.

§ 52. Впрочемъ, не смотря на всеобщее употребленіе регулятора Уатта, дѣйствіе его не вполне точно. Чтобы убѣдиться въ этомъ, разсмотримъ всѣ явленія, происходящія при измѣненіи скорости машины. Представимъ себѣ, что эта скорость, постоянно увеличиваясь, достигла своей предѣльной величины  $t$ , е. наибольшей скорости  $\omega_2$  и что при этой скорости шары регулятора поднялись на соответствующую высоту. Такъ какъ въ промежутокъ времени отъ поднятія шаровъ до возстановленія въ движеніи машины нормальной скорости центробѣжная сила, поднимающая шары, возрастаетъ еще болѣе, ибо при той же еще угловой скорости радіусъ  $\rho$  вращенія шаровъ дѣлается больше; по этому шары поднимаются слишкомъ много, т. е. болѣе надлежащаго и закрываютъ уравнительнымъ клапаномъ отверз-



тіе паропроводной трубы болѣе, нежели сколько нужно для возстановленія нормальной скорости машины и вмѣсто того, чтобы немедленно по поднятіи шаровъ получить нормальную ея скорость, она переходитъ ее и даже часто впадаетъ въ наименьшую скорость.

Точно также при уменьшающейся скорости машины шары, опускаясь все болѣе и болѣе до возстановленія въ машинѣ нормальной скорости, открываютъ слишкомъ много уравнительный клапанъ, и впускаютъ въ цилиндръ паровъ въ количествѣ, большемъ противу надлежащаго.

Понятно теперь, что при такой неточности дѣйствія регулятора Уатта машина будетъ не тотчасъ возвращаться въ нормальное положеніе, а послѣ нѣсколькихъ колебаній крайнихъ ея скоростей. Слѣдовательно регуляторъ Уатта допускаетъ всегда ненормальнымъ скоростямъ машины т. е. наибольшей и наименьшей, уклоняться отъ нормальной въ большей степени, нежели сколько терпимо производимою фабрикаціею и на какую степень равномерности хода разсчитаны размѣры его шаровъ, короче сказать, регуляторъ Уатта не вполне чувствителенъ.

По этому съ давняго времени многіе механики и строители паровыхъ машинъ занимались улучшеніемъ этой части, и нѣкоторыми изъ нихъ были придуманы разные прибавочные приборы, съ цѣлію задерживать слишкомъ большое поднятіе или опусканіе шаровъ. Но всѣ подобныя дополненія и измѣненія мелочны, составляютъ предметъ практической части построенія машинъ, и не могутъ быть введены въ область теоріи паровыхъ машинъ.

§ 53. Анализируя погрѣшность въ дѣйствіи регулятора Уатта и замѣчая, что она вкрадывается только по той причинѣ, что съ угловою скоростью вала машины, а слѣдо-



вательно и вала регулятора, измѣняется и радіусъ вращенія шаровъ, отъ котораго зависитъ величина центробѣжной силы, Франке (Frankе) предпринялъ сдѣлать *уголъ поднятія шаровъ независимымъ отъ угловой скорости*, и слѣдовательно высоту стоянія шаровъ постоянною для всякой скорости вращенія регулятора, нормальной и не нормальной. Вотъ разсужденія, на которыхъ основано имъ устройство его регулятора.

Назовемъ вѣсъ каждаго шара чрезъ  $p$ ,  $\rho$  радіусъ вращенія обоихъ шаровъ и  $\omega$  — угловую скорость регулятора, то центробѣжная сила, дѣйствующая на шары во время ихъ вращенія, будетъ:

$$\frac{p}{g} \rho \omega^2, \text{ или } \frac{p}{g} a \cdot \sin \alpha \omega^2,$$

ибо (фигура 36),  $\rho = a \cdot \sin \alpha$ , гдѣ  $a$  длина рычага регулятора.

Обѣ силы — центробѣжная  $C$  и вѣсъ шаровъ  $p$  могутъ быть разложены каждая на двѣ: касательную  $GF$  и по направленію рычага  $АН$ . Для нормальнаго положенія машины, когда шары ни опускаются, ни поднимаются, силы, дѣйствующія по касательной  $FG$  въ ту и другую сторону рычага  $АС$  будутъ равны, т. е.

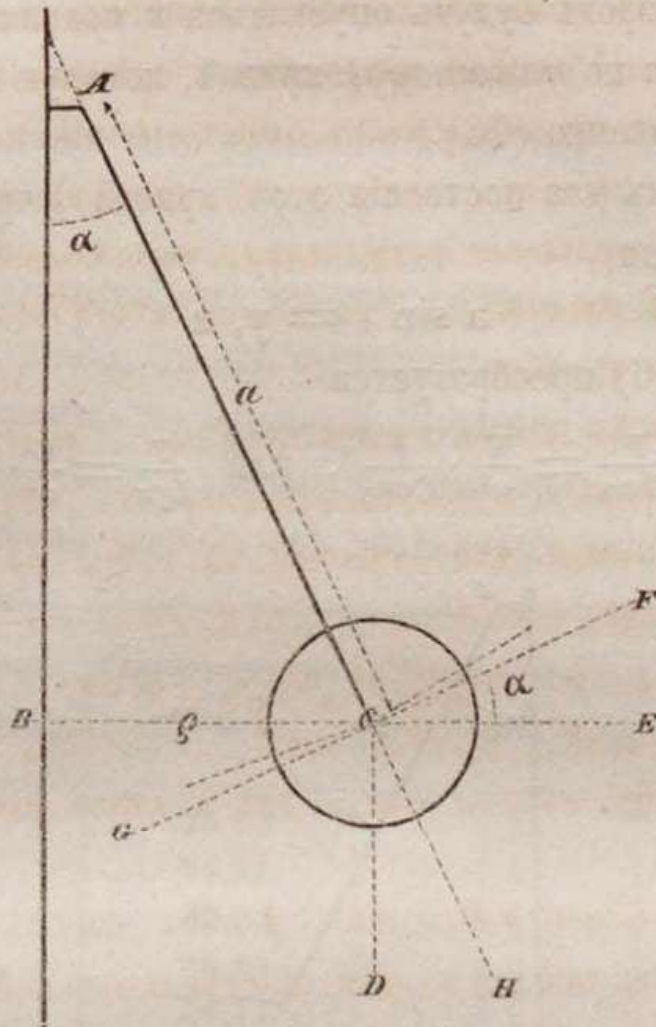
$$p \sin \alpha' = \frac{p}{g} a \sin \alpha \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha, \text{ откуда}$$

$$\omega^2 = \frac{g}{a \cdot \cos \alpha} \dots \dots \dots (76),$$

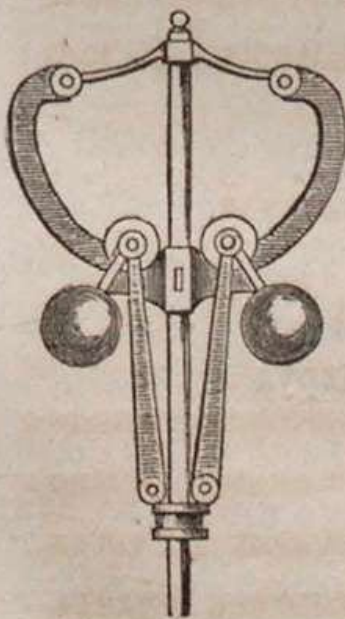
т. е., чтобы угловая скорость вращенія регулятора *оставалась неизмѣнною* при измѣненіи скорости машины, нужно величину  $a$  сдѣлать переменною вмѣстѣ съ угломъ  $\alpha$ ; тогда взаимное отношеніе этихъ двухъ обстоятельствъ будетъ такое



$$a = \frac{g}{\omega^2 \cos \alpha} \dots \dots \dots (77)$$



фигура 36.



фигура 37.

изъ уравненія (76). Такъ и сдѣлано въ регуляторѣ Франке: по мѣрѣ того, какъ шары, отъ дѣйствія центробѣжной силы скользятъ (на блочкахъ) по направляющимъ (фигура 37) длина рычага измѣняется съ каждымъ новымъ положеніемъ шаровъ и при томъ такъ, что съ увеличеніемъ угла подъема  $\alpha$ , которое бываетъ только въ промежутокъ времени отъ измѣненія угловой скорости регулятора до перемѣщенія муфты, увеличивается и длина рычага  $a$ .



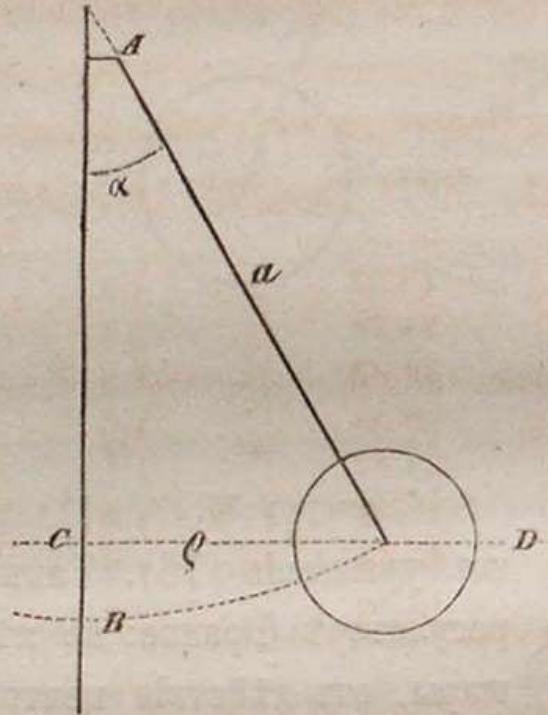
По формѣ уравненія (77) видно уже, что съ измѣненіемъ  $a$ , центры шаровъ будутъ опускаться и подниматься не по дугѣ круга, а по *нѣкоторой* кривой, которую можно отыскать по уравненію (76).

Обозначимъ для постоянія этой кривой  $\rho$  чрезъ  $y$  и  $BC$  чрезъ  $x$ , тогда

$$a \sin \alpha = y, \text{ и}$$

уравненіе (76) преобразуется

$$\frac{y}{\sin \alpha} = \frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}, \text{ или } \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{g}{\omega^2}.$$



Фигура 38.

Но какъ  $\operatorname{tang} \alpha = \frac{dx}{dy}$ , слѣдовательно

$$\frac{g}{\omega^2} = \frac{y \cdot dy}{dx}. \text{ Дифференцируя}$$

$$\frac{g}{\omega^2} \int dx = \int y dy; \text{ отсюда}$$

$$y^2 = \frac{2g}{\omega^2} \cdot x.$$



Если назвать  $\frac{2g}{\omega^2}$  чрезъ  $p$ , то

$$y = \sqrt{p \cdot x}$$

а это выраженіе есть уравненіе параболы, коея параметръ равенъ  $\frac{2g}{\omega^2}$ .

Итакъ выходитъ, что искомое условіе въ построеніи регулятора Франке, будетъ выполнено, когда движеніе шаровъ совершается по параболѣ. Помощію означеннаго уравненія составлена слѣдующая таблица параметровъ для параболъ движенія шаровъ при различныхъ скоростяхъ.

Число оборотовъ въ секунду.	Параметръ въ дюймахъ.	Число оборотовъ въ секунду.	Параметръ въ дюймахъ.
0,5	78,23	1,3	11,57
0,6	54,33	1,4	9,96
0,7	39,92	1,5	8,70
0,8	30,55	1,6	7,64
0,9	24,13	1,7	6,77
1,0	19,59	1,8	6,06
1,1	16,18	1,9	5,43
1,2	13,59	2,0	4,88

Назовемъ теперь чрезъ  $Q$  сопротивленіе, представляемое муфтою при подъемѣ ея или при опусканіи. Это сопротивленіе разложится на два плеча регулятора; пусть каждое изъ нихъ, приложенное въ центрѣ тяжести шара, будетъ  $q$ . Составляющая сила этаго сопротивленія по касательной, будетъ дѣйствовать при подъемѣ шаровъ *отрицательно*, при опусканіи ихъ *положительно*.

Пусть  $\frac{\omega}{n}$  самая малая разность измѣненія угловой скорости, то будемъ имѣть изъ уравненія (76) слѣдующее:



$$\frac{p}{g} \sin \alpha = \frac{p}{g} a \sin \alpha \left( \omega \pm \frac{\omega}{n} \right)^2 \cos \alpha \mp q \sin \alpha,$$

Или:

$$p \cdot \sin \alpha \frac{p}{g} a \cdot \sin \alpha \left( \omega^2 + 2\omega \frac{\omega}{n} + \left( \frac{\omega}{n} \right)^2 \right) \cos \alpha \mp q \sin \alpha.$$

Выпустимъ изъ этаго уравненія величину  $\left( \frac{\omega}{n} \right)^2$  какъ весьма малую и вычтемъ изъ него уравненіе (76), будемъ имѣть:

$$\frac{p}{g} \cdot a \sin \alpha 2\omega \frac{\omega}{n} \cos \alpha \mp q \sin \alpha = 0.$$

уравненіе, показывающее *вліяніе сопротивленія q* на чувствительность регулятора.

Изъ этаго же уравненія получимъ

$$q = \frac{p}{g} \cdot a \cdot 2\omega \frac{\omega}{n} \cdot \cos \alpha \dots \dots (78).$$

Подставляя на мѣсто *a* выраженіе (77) будемъ имѣть

$$q = \frac{p}{g} \cdot \frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot 2\omega \frac{\omega}{n} \cdot \cos \alpha.$$

Или

$$q = p 2\omega \cdot \frac{1}{\omega \cdot n} = \frac{2}{n} \cdot p \dots \dots (79).$$

Или называя чрезъ *P* вѣсъ обоихъ шаровъ,

$$q = \frac{4}{n} \cdot P, \dots \dots (80)$$

и обратно

$$n = \frac{4}{q} P, \dots \dots (80 \text{ bis}).$$

откуда слѣдуетъ, что чувствительность этаго регулятора *вовсе не зависитъ отъ угловой скорости шаровъ или ихъ положенія*, также и отъ величины параболы.

Нѣкоторые съ цѣлю достигнуть совершенной чувствительности въ устройствѣ регуляторовъ, предлагали устраи-



вать водяные, основанные на дѣйствіи поплавковъ, погруженныхъ въ воду. Обыкновенно употребляютъ для этого нагнетательный насосъ, который получаетъ движеніе отъ вала паровой машины и доставляетъ воду въ какой нибудь сосудъ, налитый водою, и выпускающій ее чрезъ отверстіе въ опредѣленномъ количествѣ. Если машина начинаетъ ходить съ большею или меньшею, противу нормальной, скоростью, насосъ доставляетъ больше или меньше воды, противу вытекаемаго количества ея, и уровень по этому измѣняется или повышаясь или понижаясь противу обыкновеннаго, движеніе поплавка передается окончательно уравнительному клапану. Но какъ насосы принадлежатъ къ числу тѣхъ механизмовъ, за точное и исправное дѣйствіе которыхъ можно менѣе всего ручаться, по этому всѣ таковыя устройства и не имѣли успѣха.



## ГЛАВА III.

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ И СГУЩЕНИЕ ПАРОВЪ.

#### I. ТЕОРІЯ НАВЫГОДНѢЙШАГО УПОТРЕБЛЕНІЯ ТОПЛИВА ВЪ ПЕЧАХЪ ПАРОВЫХЪ КОТЛОВЪ.

§ 54. Чтобы топливо, какъ источникъ теплорода, было употреблено съ наибольшою пользою, т. е., чтобы оно доставило *наибольшее полезное дѣйствіе*, не достаточно одного только достиженія совершеннаго процесса горѣнія, при которомъ впрочемъ только и возможно извлечь изъ топлива весь такъ сказать *запасъ теплоты*. Нужно еще, чтобы теплородъ, полученный при горѣніи, былъ какъ можно болѣе употребленъ въ дѣло, смотря по назначенію. Только при этихъ условіяхъ горючій матеріалъ и можетъ быть употребленъ *навыгоднѣйшимъ образомъ*. Объяснимъ въ какой степени оба эти условія имѣютъ вліяніе одно на другое. Напримѣръ, бываетъ, что котель, построенный самымъ наилучшимъ образомъ, и способный воспринимать въ



наибольшей степени дѣйствующую на него теплоту, не доставляетъ такого количества паровъ, какое должно бы быть получено, судя по количеству расходуемаго топлива. Дѣйствительно, какъ бы ни былъ хорошъ котель, но если онъ вмазанъ въ такую печь, устройство которой не удовлетворяетъ вполнѣ извлеченію наибольшей теплоты при горѣніи, то нельзя получить хорошихъ результатовъ. Точно также и наоборотъ, при наилучшей печи дурно построенный котель, неспособный воспринимать всего дѣйствія теплоты, развивающейся при совершенномъ сгораніи топлива, не доставитъ надлежащаго количества паровъ и часть образующейся теплоты, оставаясь не переданною испаряемой водѣ, будетъ оставаться недѣятельною. Отъ того, въ какой степени при данномъ устройствѣ котла и печи выполнимы эти условія происходитъ, что котель доставляетъ иногда большее, иногда меньшее полезное дѣйствіе. Въ различныхъ случаяхъ примѣненій и въ различныхъ обстоятельствахъ дѣйствія паровыхъ котловъ не въ одинаковой степени выполняются условія наивыгоднѣйшаго горѣнія и совершеннаго употребленія образовавшагося теплорода. Вообще котлы постоянныхъ паровыхъ машинъ (заводскихъ и фабричныхъ) доставляютъ большее количество паровъ при одинаковыхъ обстоятельствахъ, нежели перемѣщающихся машинъ, потому что условія горѣнія и передачи теплорода выполняются совершеннѣе. Дѣйствительно, положеніе котловъ перемѣщающихся машинъ — паровыхъ, паровозныхъ и переносныхъ, ощутительно страдаетъ въ отношеніи процесса парообразованія: сильное вліяніе холоднаго воздуха на всю поверхность котла и искусственная тяга, неизбежная при условіи перемѣщаемости, производятъ то, что отдѣляющійся при горѣніи теплородъ частію не вполнѣ развивается отъ несовер-



шеннаго сгаранія, частію теряется наружу, будучи уносимъ пламенемъ и газами изъ пламенныхъ ходовъ въ дымовую трубу при весьма высокой температурѣ. Оттого котлы эти, хотя по устройству ихъ и способны хорошо воспринимать теплородъ, но значительно уступаютъ прочимъ котламъ въ полезномъ дѣйствіи.

§ 55. Для полученія паровъ въ большомъ видѣ употребляютъ единственный источникъ теплорода, это горѣніе тѣлъ. Вещества, наиболѣе употребительныя по дешевизнѣ, какъ горючіе матеріалы, суть: дрова, каменный уголь и коксъ; употребляются иногда — торфъ и горючіе газы.

Горѣніе тѣлъ совершеннѣе, чѣмъ большее количество теплорода получается при этомъ процессѣ, и какъ изъ приблизительныхъ вычисленій, подтверждаемыхъ дѣйствительными явленіями, выходитъ, что наибольшее количество теплоты выдѣляется только въ томъ случаѣ, когда при горѣніи образуется углекислота, при чемъ теплоты выдѣляется вдвое болѣе, нежели при образованіи одной только окиси углерода, по этому совершенное сгараніе топлива можетъ быть только при высшей степени окисленія углерода, т. е. только при образованіи углекислоты.

Слѣдовательно первое условіе наивыгоднѣйшаго употребленія топлива есть *достаточный притокъ свободнаго воздуха*, не потерявшаго еще кислородъ.

При втеканіи воздуха въ тонку въ большемъ количествѣ противу надлежащаго потребнаго для образованія углекислоты, температура горѣнія можетъ понизиться отъ вліянія температуры холоднаго воздуха. Пониженная температура не будетъ соотвѣтствовать точкѣ образованія углекислоты, и въ такомъ случаѣ продуктомъ горѣнія будетъ окись углерода, а не углекислота. По этому самому для совершеннаго



процесса горѣнія топлива вредно вообще всякое обстоятельство, могущее понизить температуру пламени. Напр., испареніе воды изъ топлива, когда оно сыро, т. е. когда употребляется невысушеннымъ предварительно и не освобожденнымъ слѣдовательно отъ гигроскопической воды. Дѣйствительно, вода, находящаяся въ сыромъ топливѣ, должна быть испарена тѣмъ же самымъ теплородомъ, который развивается при процессѣ горѣнія этого топлива.

Охлажденіе пламени бѣльшимъ противу надлежащаго, количествомъ воздуха бываетъ еще при всякомъ томъ случаѣ, когда для нагрузки топки или промѣшиванія топлива на рѣшеткѣ отворяютъ топочную дверцу печи. Такъ какъ выдѣленіе воды изъ горящаго топлива происходитъ на счетъ температуры пламени, дѣйствующаго въ печи, поэтому всякое образованіе паровъ при горѣніи уменьшаетъ полезное дѣйствіе топлива. Это обстоятельство тѣмъ опаснѣе, что паръ, выдѣлившійся изъ топлива, бываетъ нагрѣтъ на счетъ того же теплорода всегда выше точки его образованія, напр. до  $150^{\circ}$  и даже до  $200^{\circ}$ . Цельсія.

Какую пользу послѣ этого можно ожидать отъ пропуска водянago пара подъ рѣшотку, какъ нѣкоторые предлагали, или отъ употребленія воды на днѣ зольника. Эти со- вѣты предлагаются и принимаются въ той надеждѣ, что паръ, при вступленіи его въ мѣсто горѣнія при дѣйствіи воз- вышенной температуры, разложится на составныя части свои, изъ которыхъ водородъ будетъ сгарать съ кислоро- домъ воздуха, а кислородъ воды послужитъ къ усиленію горѣнія. Между тѣмъ какъ въ дѣйствительности вода въ парообразномъ состояніи, приходя сперва къ той части то- почнаго пространства, въ которой температура еще не слишкомъ высока, не можетъ при этой температурѣ разло-



житься, и вмѣсто того, чтобы, какъ говорятъ, паръ могъ *сграть*, онъ только самъ нагрѣвается еще до температуры все большей и большей, и слѣдовательно увеличиваетъ этимъ еще болѣе постороннее потребленіе теплоты, существующей въ печи.

Скорѣе же можно достигнуть бѣльшаго полезнаго дѣйствія пара въ пирометрическомъ отношеніи, пропуская его на поверхность пламени, температура котораго бываетъ вообще довольно достаточна для того, чтобы могло произойти разложеніе воды, а главное, что этимъ способомъ теченіе пара можетъ быть произведено безъ всякаго соприкосновенія съ топливомъ, которое въ обратномъ случаѣ *сырѣетъ*, будучи проникаемо парами воды, и послѣ должно быть опять высушено теплородомъ горѣнія. Многія наблюденія и опыты надъ сжиганіемъ паровъ въ пламени показали существенную пользу, и въ печахъ паровыхъ котловъ оно можетъ быть однимъ изъ наилучшихъ употребленій пара, кончившаго свое дѣйствіе. Эта операція доставляетъ значительное сбереженіе горючаго матеріала, которое простиралось въ нѣкоторыхъ случаяхъ до 35% и даже до 40%.

Изъ всего этаго слѣдуетъ, что въ отношеніи питанія точки наибольшая температура горѣнія топлива можетъ имѣть мѣсто только при доставленіи къ мѣсту горѣнія такого количества воздуха, которое было бы достаточно для совершеннаго сгорания составныхъ частей топлива и при всемъ томъ не было бы излишне, потому что излишекъ воздуха, не участвуя въ горѣніи, долженъ быть все таки нагрѣтъ до температуры, существующей въ топкѣ. Выполненіе этаго условія въ практикѣ для всего времени производства суточныхъ работъ такъ трудно, по причинѣ множества обстоятельствъ имѣющихъ на это вліяніе, что оно составляетъ почти



совершенную невозможность. Употребленіе измѣняющейся тяги, когда паровику предстоитъ доставлять не всегда одинаковое количество паровъ; неравномѣрность нагрузки свѣжаго горючаго матеріала; впусканіе холоднаго воздуха въ топочное пространство во время дѣйствія печи, неодинаковость теченія воздуха сквозь колосники въ разные періоды горѣнія топлива съ одной стороны, производятъ не одинаковую степень горѣнія и слѣдовательно не одинаково соотвѣтствуютъ условіямъ наивыгоднѣйшаго дѣйствія топлива. Съ другой стороны, частое употребленіе сыраго топлива, испареніе воды на днѣ зольника и проч. производятъ неминуемо пониженіе температуры пламени въ печи и этимъ уменьшаютъ даже то полезное дѣйствіе топлива, которое и было бы достигнуто при устраненіи этихъ обстоятельствъ.

Поэтому то въ практикѣ очень рѣдко извлекается изъ топлива все количество теплоты, составляющее какъ бы запасъ полезнаго его дѣйствія.

§ 56. Самыя лучшія печи, какія были только построены для разныхъ отраслей промышленности, не доставляютъ того теплорода при горѣніи топлива, какое количество показываютъ теоретическія вычисленія, предполагающія, что всѣ составныя части топлива, способныя горѣть, соединяются съ кислородомъ воздуха въ наибольшей пропорціи и не остаются не участвовавшими въ процессѣ горѣнія. Напримѣръ рассмотримъ обыкновенное устройство топокъ паровыхъ котловъ. Вообще употребляемыя топки паровыхъ котловъ принадлежатъ къ пламеннымъ печамъ и слѣдовательно снабжены рѣшеткою для помѣщенія топлива и питанія горѣнія. Эти топки можно разсматривать состоящими изъ трехъ главныхъ частей: *зольника*, въ которомъ находится



чистый воздухъ, нужный для горѣнія, *рѣшетки*, на которой лежитъ топливо и чрезъ которую проходитъ воздухъ, и находящагося надъ рѣшеткою *пространства*, для отдѣленія горючихъ газовъ, закрываемаго топочною дверцею, чрезъ которую накладывается свѣжій горючій матеріалъ.

Во время дѣйствія топки сперва происходитъ сухая перегонка горючаго матеріала. Отдѣляющіеся при этомъ газы сгораютъ при достаточномъ доступѣ воздуха въ воду и углекислоту, дѣйствіемъ пламени отдѣляющагося отъ горящаго уже топлива и подъ вліяніемъ котораго обыкновенно находятся свѣжія зарядки горючаго матеріала. Единовременное горѣніе топлива во всей массѣ бываетъ уже послѣ нѣкотораго промежутка времени, когда брошенный на рѣшетку свѣжій горючій матеріалъ довольно разгорѣлся. Для прибавленія свѣжаго топлива на рѣшетку, открываютъ дверцу и разстилаютъ какъ можно ровнѣе на поверхности раскаленнаго угля тонкій слой свѣжаго горючаго матеріала. При этомъ независимо отъ охлаждающаго дѣйствія значительнаго объема холоднаго воздуха, втекающаго во время открыванія дверцы, верхній слой холоднаго топлива препятствуетъ отраженію жара на стѣнки нагрѣваемаго котла; жаръ, сосредоточенный между колосниками и этою холодною корою свѣжаго горючаго матеріала, доводитъ золу до расплавленія и производитъ образованіе шлаковъ, которые осаждаются на колосникахъ и препятствуютъ движенію сквозь нихъ воздуха. Слѣдовательно въ промежутокъ времени, болѣе или менѣе продолжительный послѣ прибавленія на рѣшетку свѣжаго горючаго матеріала, процессъ горѣнія и слѣдовательно нагрѣваніе котла какъ бы приостанавливаются. При всякой новой нагрузкѣ количество топлива на рѣшеткѣ увеличивается, между тѣмъ, какъ доступъ воздуха сильно умень-



шается и далеко не соответствует условіямъ совершеннаго сгоранія топлива; что въ эти моменты горѣніе топлива происходитъ въ неблагопріятныхъ обстоятельствахъ: дымъ и пары, отдѣляющіеся въ большомъ количествѣ отъ свѣжихъ зарядокъ, брошенныхъ на рѣшетку, служатъ тому яснымъ доказательствомъ. Если бы нагруженіе точки производилось постепенно и притомъ такъ, чтобы топливо предъ воспламененіемъ его постепенно такъ сказать подготовлялось къ горѣнію дѣйствіемъ жара, существующаго уже въ печи, тогда изъ топлива навѣрное извлекалось бы большее количество теплоты. Устройвъ распредѣленіе топлива на рѣшетоку такимъ образомъ, чтобы горѣніе было сосредоточено только въ извѣстномъ мѣстѣ, къ которому новый матеріалъ можно было подвигать по мѣрѣ его подготовленія, чрезъ это достигли бы лучшихъ результатовъ.

При этомъ условіи жаръ горящаго топлива дѣйствовалъ бы на свѣжій горючій матеріалъ не вдругъ, а постепенно, сухая возгонка летучихъ частей свѣжаго топлива производилась бы медленнѣе и совершеннѣе, прерываніе лучистой теплоты было бы избѣгнуто и выдѣляющіеся изъ топлива газы, проходя надъ пламенемъ раскаленнаго уже горючаго матеріала, постепенно нагрѣвались бы и сгорали.

Замѣтимъ еще, что при обыкновенныхъ топкахъ способъ прохода воздуха вовсе не благопріятствуетъ совершенному сгоранію топлива. Съ одной стороны надобно согласиться, что отношеніе количества кислорода къ количеству азота втекающаго атмосфернаго воздуха уменьшается при вступленіи сего послѣдняго въ соприкосновеніе съ различными слоями угля; съ другой стороны также неопровержимо, что пространство надъ горючимъ матеріаломъ бываетъ обыкновенно наполнено уже болѣе или менѣе нестараемыми газами



и паромъ. Сгораніе частицъ угля и горючихъ газовъ въ этомъ пространствѣ, не смотря на то, что температура и потребное количество кислорода имѣютъ мѣсто, будетъ все таки уже трудно, потому что путь, по которому этотъ кислородъ долженъ идти, совершенно не соотвѣтствуетъ условіямъ сгоранія.

Очевидно, что процессъ сгоранія долженъ бы удасться лучше, если бы атмосферный воздухъ принялъ путь отъ не-сгорѣвшей части топлива къ той, которая уже находится раскаленномъ состояніи. Тогда воздухъ при увеличившемся нагрѣваніи смѣшивался бы лучше съ образующимися въ печи газами и частицами угля, и эти послѣднія при проходѣ чрезъ раскаленные части воспламенялись бы и совершенно сгорали. Хотя этотъ послѣдній принципъ кажется съ перваго взгляда самымъ естественнымъ для совершеннаго сгоранія каменнаго угля, все таки онъ до сихъ поръ не получилъ еще всеобщаго употребленія для всѣхъ горючихъ матеріаловъ. Причины этому очень просты: во первыхъ, трудно вообще отвыкають отъ всего давно введеннаго и всѣми употребляемаго, во вторыхъ точки, основанныя на этомъ началѣ, обходятся дороже, по крайней мѣрѣ тѣ изъ нихъ, которыя достигаютъ болѣе или менѣе удовлетворительныхъ результатовъ.

§ 57. Видимымъ слѣдствіемъ несовершеннаго горѣнія топлива есть *отдѣленіе дыма*, который можно разсматривать какъ смѣсь горючихъ газовъ, мельчайшихъ частицъ угля и водяныхъ паровъ. По химическимъ изслѣдованіямъ горючіе газы дыма состоятъ изъ окиси углерода, креозота древесноуксусной кислоты и другіе могли бы еще служить горючимъ матеріаломъ, между тѣмъ, какъ при обыкновенныхъ печахъ они употребляются только для образованія тяги.



Количество теплоты, которое могло быть получено при сгорании горючих газовъ дыма, составляетъ одну изъ потерь, вслѣдствіе которыхъ не извлекается въ печахъ все количество теплоты, заключающееся въ топливѣ. Образование дыма въ печахъ паровыхъ котловъ потому еще вредно, что онъ осаждается въ видѣ сажи на стѣнки пароваго котла и, какъ худой проводникъ теплоты, препятствуетъ скорой передачѣ ея испаряемой водѣ и пару. Газы, не передавая совершенно всей теплоты, должны вылетать чрезъ дымовую трубу въ атмосферу при весьма высокой температурѣ.

Для избѣжанія отдѣленія дыма какъ явленія, непріятнаго для общественной жизни, потомъ съ цѣлю извлечь изъ него пирометрическое полезное дѣйствіе, и наконецъ вслѣдствіе разныхъ мѣръ правительствъ мануфактурныхъ государствъ, техники съ давняго времени обратили вниманіе на этотъ предметъ. Вообще положено было множество трудовъ и издержекъ для рѣшенія этого вопроса и исторія привилегій въ Англіи постоянно повторяетъ усовершенствованія и проекты разныхъ дымогарныхъ печей и топокъ. Всѣ они, имѣя одну цѣль—избѣжаніе дыма, идутъ къ этому разными путями; одни изъ нихъ имѣютъ предметомъ сжигать дымъ, если онъ уже *образуется въ печи*, а другіе ищутъ предупредить самое образованіе его, чрезъ отстраненіе всѣхъ обстоятельствъ, могущихъ ему благоприятствовать. Мы въ настоящемъ изложеніи ограничимся разсмотрѣніемъ только тѣхъ дымогарныхъ устройствъ, которые въ примѣненіи къ паровымъ котламъ, принесли существенную пользу, и всеобщему употребленію которыхъ обѣщаетъ ихъ удобопримѣнимость, или практичность въ исполненіи. Последнее замѣчаніе высказано нами потому, что во многихъ предложенныхъ и даже устроенныхъ дымогарныхъ печахъ или вовсе



не обращено вниманія на извлеченіе изъ дыма, какъ горячаго вещества, полезнаго дѣйствія, или извлекается только частію.

Изъ произведеній, можетъ быть, неимовѣрныхъ усилій разныхъ техниковъ, состязавшихся въ рѣшеніи вопроса о дымосожиганіи, видно, что большая часть ихъ заботилась только о видимомъ, оставляя существенное послѣднимъ. Отъ того для промышленныхъ предпріятій, въ которыхъ экономія и достиженіе всевозможныхъ выгодъ составляетъ первое условіе для успѣха производства, весьма не многіе могутъ быть приняты за годныя. Замѣтимъ вообще, что въ рѣшеніи этого вопроса столько разногласій, что нѣтъ возможности составить одну какую нибудь теорію на твердыхъ основаніяхъ, и поэтому предметъ этотъ требуетъ еще особенно спеціальнаго изученія.

Съ цѣлію показать, какими разнообразными путями достигали уничтоженія дыма въ печахъ паровыхъ котловъ, мы представляемъ для сличенія тѣ начала, на которыхъ основаны дѣйствія и устройства большей части проектовъ, предложенныхъ въ разное время.

§ 58. Если просмотрѣть безчисленныя привиллегіи, взятыя на устройство дымосожиганія, то окажется, что по крайней мѣрѣ три четверти ихъ основываются на проведеніи свѣжаго воздуха позади рѣшетки; укажемъ для примѣра на печь Галя (Gall), помѣщенную въ Политехническомъ Журналѣ Динглера за 1856 годъ. Но только этотъ путь, предоставленный самъ себѣ, совершенно невѣренъ; многіе прибѣгали къ нему въ видахъ доставить кислородъ пламени, отдѣляющемуся съ рѣшетки, и этимъ способствовать сгоранію еще не сгорѣвшихъ частей дыма. Но вспомнимъ, что изслѣдованія Пекле (Peclet) надъ газами мно-



гихъ печей показали присутствіе въ нихъ болѣе 10% кислорода, слѣдовательно понятно, что недостатокъ кислорода, какъ причина отдѣленія дыма, имѣеть мѣсто только въ самыхъ рѣдкихъ случаяхъ. Въ печахъ дымогарныхъ, устроенныхъ на этомъ началѣ, сдѣланы особыя каналыцы позади рѣшетки для прохода туда свѣжаго воздуха извнѣ. Дѣлая надъ этими печами наблюденія и переставляя рѣшетку такъ, чтобы воздухъ могъ приходиться туда въ недостаточномъ количествѣ, можно замѣтить, что воздухъ, всасываемый дѣйствіемъ тяги, избереть преимущественно путь чрезъ эти особыя воздухопроводные каналы, и такимъ образомъ произойдетъ тоже самое, что бываетъ и при открытой топочной дверцѣ,—т. е. останавливается совсѣмъ или частію теченіе воздуха чрезъ рѣшетку и вмѣстѣ съ тѣмъ самое сгораніе топлива.

Если въ устроенныхъ уже печахъ съ воздухопроводными каналами и достигается уменьшеніе дыма, то это происходитъ болшею частію отъ того, что дымъ разжижается чистымъ воздухомъ и дѣлается чрезъ это менѣе замѣтнымъ. Можно представить себѣ, сколько при этомъ бесполезно нагрѣтаго воздуха улетаетъ въ дымовую трубу. При ограниченной площади нагрѣванія котла происходитъ чрезъ это кромѣ того еще та невыгода, что большее количество не столь нагрѣтыхъ газовъ на короткомъ пути недостаточно можетъ передать свою теплоту нагрѣваемому тѣлу, и потому вылетаетъ въ дымовую трубу при высокой температурѣ. Поэтому совершенно ясно, что паровозы, при ихъ сравнительно малой площади нагрѣва и при короткомъ пути, который должны пробѣгать газы при проходѣ въ дымовую трубу, могутъ быть съ выгодою нагрѣваемы только коксомъ, дающимъ сильный калильный жаръ. Передача теплоты на-



грѣваемому тѣлу происходитъ, какъ извѣстно, тѣмъ скорѣе, чѣмъ больше разность температуръ. (\*)

Въ послѣднее время мысль сжигать дымъ чрезъ смѣшеніе его съ свѣжимъ воздухомъ такъ развита, что нѣкоторые основали на ней теорію, по которой совершенное сгораніе топлива, и слѣдовательно наибольшее полезное дѣйствіе его, можетъ быть достигнуто только путемъ *обращенія твердаго топлива въ газы*, которые уже, какъ горючій матеріалъ, сжигаются въ соприкосновеніи съ чистымъ воздухомъ. Эта теорія послужила основаніемъ къ проектированію такъ называемыхъ *газовыхъ печей*, которыхъ появленіе принадлежитъ весьма недавнему времени (\*\*).

Ихъ можно разсматривать состоящими изъ трехъ главныхъ частей. Въ одной части употребляемый горючій матеріалъ при недостаточномъ доступѣ воздуха обращается въ газы; въ другой производится смѣшеніе этихъ газовъ съ чистымъ воздухомъ и ихъ воспламененіе; наконецъ въ третьей уже употребляются воспламененные и частію сгорѣвшіе газы для дѣйствія по назначенію. Польза такого способа сжиганія горючихъ матеріаловъ состоитъ главнымъ образомъ въ томъ, что онъ даетъ возможность употреблять всякій горючій матеріалъ, даже такой, который при обыкно-

---

(\*) Фербернъ (Fairbairn) впрочемъ увѣряетъ, что пропусканіемъ свѣжаго воздуха въ пламенные ходы чрезъ каналы, устроенные позади рѣшетки и имѣющіе площадь сѣченія  $\frac{1}{115}$  площади рѣшетки, получали по крайней мѣрѣ  $12\frac{1}{2}\%$  сбереженія топлива.

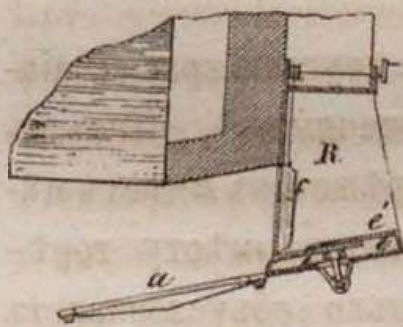
(\*\*) Для того, чтобы познакомить читателей съ системою газовыхъ печей и ихъ дѣйствіемъ, предлагаемъ описаніе одной изъ такихъ, помѣщенное въ Schweizerische Polytechnische Zeitschrift, 1856, Bd. 1. S. 93.



венной топкѣ вовсе не можетъ быть употребимъ, напр. самый мелкій уголь, угольный мусоръ, древесные обрѣзки, стружки, опилки, сухіе спавшіе древесные листья, кора и проч. (\*)

§ 59. Другой путь, уже совершенно отоптанный, состоитъ въ равномерномъ доставленіи горючаго матеріала въ топку. Отправленіе этого дѣйствія хотя и можетъ быть выполнено ловкимъ кочегаромъ, умѣющимъ подкладывать топливо часто, малыми количествами, равномерно и безъ потери времени, но работа такого рода весьма утомительна и требуетъ постоянной внимательности со стороны рабочаго. Поэтому въ настоящемъ случаѣ, какъ и во всѣхъ подобныхъ, прибѣгли къ употребленію снарядовъ, приводимыхъ въ движеніе механическою силою.

Въ отношеніи самодѣйствующаго *питанія*, такъ сказать, *топки* замѣчательно устройство, предложенное (W. Uate), которое мы здѣсь на фигурѣ 39 представляемъ какъ образецъ.



фигура 39.

Рѣшетка *a* устроена неподвижно, но наклонена нѣсколько взадъ, такъ что горючій матеріалъ (уголь), брошенный на нее спереди, распределяется по ней съ достаточною ровностію. *K* воронка или ящикъ, въ которомъ помѣщается уголь предъ

(\*) Въ Политехническомъ Журналѣ Динглера (томъ CXLVII, стр. 276) помѣщено описаніе замѣчательнаго регенератора газовой печи, построеннаго Бофюмэ (Beaufumé). Паровой котелъ, дѣйствующій этою печью, производитъ 10 фунтовъ пара на каждый фунтъ потребляемаго каменнаго угля.



поступленіемъ его въ печь; *f* топочная дверца, удобно поднимающаяся помощію рукоятки *b*. *A* паровой котелъ. Подъ каждою дверцею находится механизмъ, состоящій изъ задвижки *g*, движущейся между досками *e* и *e'* взадъ и впередъ, такъ что между дверцею *f* и задвижкою *g* образуется по временамъ отверстіе, чрезъ которое горючій матеріалъ пропускается на рѣшетку. Движеніе задвижки *g* происходитъ отъ переменнаго вращенія вала *c*, приводимаго въ движеніе отъ паровой машины.

Съ тою же цѣлію, т. е. достигнуть равномернаго распределенія горючаго матеріала на рѣшеткѣ, предлагали нѣкоторые, напр. *Stanley, Collier* и другіе сперва пропускать уголь сквозь вальцы для размельченія его на куски и потомъ дѣйствіемъ крыльевъ, посаженныхъ на валъ, получающемъ движеніе отъ паровой машины, разбрасывать раздробленный уголь ровнымъ слоемъ по всей рѣшеткѣ. Но механизмы, устроенные для этого, были сложны, дороги, требовали большой внимательности отъ рабочаго и не имѣли обширнаго употребленія.

Болѣе удачное примѣненіе получили круглыя вращающіяся рѣшетки и такъ называемыя безконечныя (\*). Какъ въ тѣхъ, такъ и въ другихъ подвижность рѣшетокъ имѣетъ цѣлію переносить свѣжій горючій матеріалъ къ мѣсту горѣнія въ такой постепенности, какъ только обусловиваетъ это и самое горѣніе уже воспламенившагося топлива, и возгонка летучихъ частей свѣжаго, находящагося еще подъ

---

(\*) Изъ круглыхъ вращающихся рѣшетокъ замѣчательна рѣшетка Мульфарины (*Mulfarine*), которой изображеніе и описаніе находятся въ «*Publication industriel des machines, outils et appareils, par M. Armengaud aîné, tome VII, Paris 1856.*»



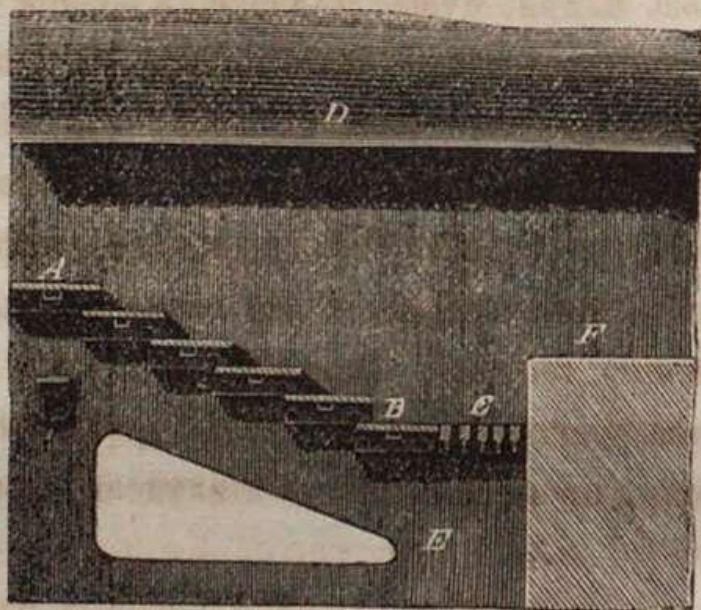
непосредственнымъ вліяніемъ жара, отдѣляющагося отъ горѣнія. По мѣрѣ того, какъ свѣжій горючій матеріаль, поступающій на рѣшетку съ одного конца печи, претерпѣваетъ химическое дѣйствіе сухой перегонки, движеніемъ рѣшетки постепенно приближается къ мѣсту горѣнія, гдѣ онъ воспламеняется и потомъ окончательно уже сгораетъ. Между тѣмъ, какъ дымъ и горючіе газы, отдѣляющіеся отъ этого топлива, какъ бы подготовляющагося къ горѣнію, при проходѣ сквозь пламя, существующее въ задней части топки, также воспламеняются при вліяніи сильнаго жара и сгораютъ. Таково дымогарное свойство этихъ топокъ съ подвижными или движущимися рѣшетками. Подвижныя рѣшетки имѣютъ существенное предъ другими совершенство въ томъ отношеніи, что свѣжій уголь, поступающій въ топку изъ воронки или просто чрезъ топочную дверцу, не препятствуетъ горѣнію раскаленнаго уже угля, чрезъ что не прерывается въ топкѣ процессъ горѣнія и слѣдовательно нагрѣваніе котла.

Безконечныя подвижныя рѣшетки состоятъ изъ колосниковъ, расположенныхъ поперегъ топки и устроенныхъ такъ, что они движутся подобно безконечному полотну, натянутому на два параллельные вала. Есть много способовъ приведенія колосниковъ этихъ рѣшетокъ въ движеніе, но все они болѣе или менѣе сложны и слѣдовательно подвержены частымъ порчамъ. На нѣкоторыхъ англійскихъ фабрикахъ приняты въ употребленіе безконечныя рѣшетки Джукса (*J. Juckes in Islington*), описанныя въ *Repertory of Patent-Inventions*, May 1856, p. 423.

Для порошкообразнаго и спекающагося горючаго матеріала, въ особенности для землистаго бураго угля и песчанаго каменноугольнаго мусора, лучше всего *ступенчатая рѣ-*



шетка (фигура 39). Она отличается отъ обыкновенной тѣмъ, что здѣсь колосники состоятъ изъ широкихъ (около 8 дюймовъ) желѣзныхъ полосъ, расположенныхъ въ видѣ ступеней, поднятыхъ одна надъ другою на  $1\frac{1}{2}$  или  $2\frac{1}{2}$  дюйма. *AB* на представленномъ чертежѣ есть самая эта рѣшетка, *C* обыкновенная, состоящая изъ небольшого числа колосниковъ (5 или 6) и устраиваемая въ задѣ печи для того, чтобы на ней скоплялись остатки горѣнія и шлакъ; *D* паро-



фигура 40.

вой котель, *E* зольникъ и *F* порогъ. Подобное устройство даетъ возможность придавать колосникамъ довольно значительную поверхность, что весьма важно для мелкаго угля, который ложится на каждомъ изъ колосниковъ въ видѣ насыпи, принимая естественный уголъ откоса (ската). При этомъ разумѣется уклонъ рѣшетки долженъ соответствовать большей или меньшей крупности угля. Воздухъ здѣсь проходитъ также между колосниками и слѣдовательно движется горизонтально, такъ что при сильной тягѣ онъ еще способствуетъ перемѣщенію угля съ одной ступени рѣшетки на другую. На поровогахъ много этому помогаетъ трясеніе во



время поѣзда; на постоянныхъ машинахъ употребляютъ иногда искусственное сталкиваніе. Впрочемъ свѣжій уголь при насыпаніи его (изъ дверцы *A*) достаточно самъ надавливаетъ на слѣдующіе за нимъ ряды и этимъ производитъ постепенное перемѣщеніе послѣднихъ къ мѣсту совершеннаго сгоранія. Колосники обыкновенной рѣшетки *C* устраиваютъ иногда подвижными, вращающимися около оси *f* для того, чтобы рѣшетку можно было по временамъ разгружать.

Если уклонъ или подъемъ рѣшетки выбранъ сообразно съ угломъ естественнаго откоса употребляемаго горючаго матеріала, если самый матеріалъ довольно однороднаго зерна, если соблюдаютъ наконецъ совершенно однообразное питаніе рѣшетки, то можно быть увѣрену въ достиженіи хорошихъ результатовъ, почти совершеннаго сгоранія безъ отдѣленія дыма. Такъ какъ горючій матеріалъ на его пути внизъ постепенно нагревается до температуры воспламененія, температура не понижается до такой степени, чтобы могло произойти образованіе сажи. Если о ступенчатыхъ рѣшеткахъ встрѣчаемъ не вездѣ одинаковые отзывы, то это зависитъ отъ двухъ обстоятельствъ: во первыхъ должна быть очень значительная тяга для того, чтобы она была достаточна для переноса частицъ угля отъ одной ступени на другую; во вторыхъ площадь горѣнія топлива въ этихъ рѣшеткахъ должна быть значительно больше, чѣмъ при плоскихъ, чего вѣроятно не выполняли. При соблюденіи этого послѣдняго условія избѣгается частая чистка рѣшетки, сопряженная съ потерей угля, падающаго въ зольникъ отъ перемѣшиванія и не совершенно еще сгорѣвшаго. Сверхъ того при малыхъ ступенчатыхъ рѣшеткахъ во время ихъ чистки сильный жаръ скопляется внизу и вредно дѣйствуетъ на нижнюю плоскую рѣшетку.



Недостаточная чистота каменного угля здѣсь менѣе вредитъ процессу сгоранія, нежели при обыкновенныхъ рѣшеткахъ, потому что шлаки скопляются на плоской рѣшеткѣ или даже на нижней ступени и не препятствуетъ теченію воздуха между верхними слоями.

Французскій горный инженеръ де-Марсилли (de Marsilly), производившій нарочные опыты для опредѣленія достоинства ступенчатыхъ рѣшетокъ, получилъ при сжиганіи каменного угля въ топкѣ одного пароваго котла слѣдующіе результаты:

Когда были произведены опыты.	Продолжительность опытовъ.	Количество сгорѣшаго угля въ пудахъ.	Количество испаренной воды въ куб. футахъ.	Количество воды, обращенной въ паръ однимъ фунтомъ каменного угля.
8-го Января 1855.	Отъ 1 часа 36 минутъ до 5 час. 47 мин. (4 часа и 11 минутъ).	24,1	88,62	0,09
9-го Января.	Отъ 8 часовъ и 5 минутъ до 6 час. 45 мин. вечера (10 часовъ 40 минутъ).	58,5	203,20	0,08
10-го Января (весьма холодный день).	Отъ 9 часовъ 55 минутъ до 5 час. 15 минутъ (8 часовъ 20 минутъ).	49	163,55	0,082
			кубич.	футы.

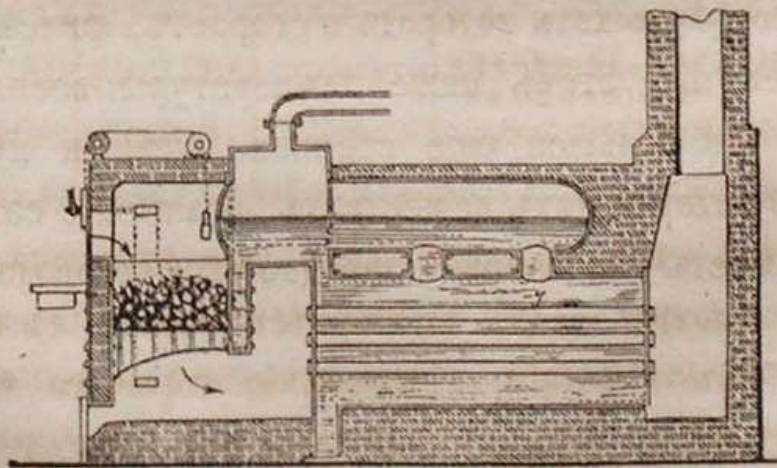
Многіе изъ тѣхъ, которые ввели уже ступенчатые рѣшетки въ употребленіе, отзываються весьма съ выгодной стороны о ихъ дѣйствіи. Сбереженіе горючаго матеріала составляетъ около 30% противу обыкновенныхъ рѣшетокъ, при употребленіи разумѣется одинакаго топлива. Въ по-



слѣднее время онѣ входятъ болѣе и болѣе въ употребленіе при такихъ топливахъ, какъ напр. худшіе сорта каменнаго угля, который имѣть лучшаго качества не всегда возможно по его дороговизнѣ, особенно за границую, и употребляютъ эти рѣшетки именно съ цѣлю облегчить доступъ воздуха въ горнѣ.

При спекающемся каменномъ углѣ ступенчатая рѣшетка неупотребительна по причинѣ тѣстообразнаго вида, принимаемаго массою въ раскаленномъ ея состояніи.

§ 60. Третій путь, къ сожалѣнію только въ рѣдкихъ случаяхъ примѣнимый, но весьма точный и практичный, есть обратное направленіе тяги въ отношеніи положенія воспламененнаго и свѣжаго слоевъ горючаго матеріала, т. е. при горизонтальной рѣшѣткѣ воздухъ идетъ не снизу вверхъ, какъ это бываетъ при обыкновенныхъ печахъ, а сверху внизъ. При этомъ текущій воздухъ на пути своемъ къ рѣшѣткѣ проходитъ черезъ свѣжій горючій матеріалъ, просушиваетъ его, нагрѣвается при этомъ самъ постепенно, ведетъ наконецъ выдѣлившіеся газы и пары черезъ раскаленный слой горящаго угля и уничтожаетъ ихъ тамъ дѣйствіемъ воспламененія. Въ X томѣ «Genie industriel de M. Armengaud aîné», стр. 113 (1855 года), описано



Фигура 41.



устройство печи съ обращенною тягою, построенной Жоржемъ для трубчатого цилиндрическаго котла (фигура 41).

Извѣстное устройство печей фарфоровыхъ фабрикъ, аппарата Дюмери (Dumery), также нѣкоторыя старыя англійскія конструкціи, въ особенности примѣняемыя къ каминамъ, принадлежатъ сюда же. Аппаратъ Дюмери очень дѣйствительный, но сложенъ и дорогъ для всеобщаго употребленія (\*).

§ 61. Наконецъ еще способъ сжиганія дыма, едва ли не лучшій изъ всѣхъ и практически, кажется, наиболѣе удобопримѣнимый, есть употребленіе предварительной точки (Vorfeuerung). Удивительно, что безконечное число разъ повторяемый опытъ осажденія сажи пламенемъ горячей свѣчи на холодномъ тѣлѣ не могъ раньше найти своего примѣненія къ теоріи сжиганія топливъ. Извѣстно также, что если совершенно исправная масляная лампа, стеариновая или восковая свѣча съ свѣтлымъ пламенемъ, даже спиртовая лампа, горящая крѣпкимъ виннымъ спиртомъ, приходитъ въ соприкосновеніе съ холоднымъ тѣломъ, напр. съ поверхностію обыкновеннаго ножеваго клинка, съ поверхностію сосуда, наполненнаго водою, то прежде, нежели произойдетъ совершенное стораніе, сперва осаждается на нихъ сажа, потому что хотя водородъ и сгораетъ, но температура понижается при этомъ ниже температуры воспламененія углерода. Въ большей еще степени, нежели при этихъ кислородъ содержащихъ веществахъ, осажденіе сажи естественно имѣеть мѣсто при углеродистыхъ водородахъ, отдѣ-

---

(\*) Онъ описанъ въ «Bulletin de la Société d'Encouragement», Novembre 1835, page 771.



ляющихся при сухой перегонкѣ каменного угля и другихъ горючихъ матеріаловъ.

Послѣ этого можно ли удивляться, если паровикъ, находящійся непосредственно надъ топкою, производитъ образованіе сажи и дыма. Паровозы, нагрѣваемые каменнымъ углемъ, производятъ огромное количество дыма именно только потому, что топочная камера со всѣхъ сторонъ окружена водою. Точно также и кирпичныя печи, пока кирпичи холодны и еще сыры, бываютъ причиною отдѣленія сильнаго дыма и сажи; это же самое бываетъ тогда, когда печь горитъ тлѣющимъ огнемъ. Слѣдовательно въ печахъ паровыхъ котловъ образованіе сажи и дыма составляетъ явленіе уже свойственное, и потому способъ, состоящій *въ предварительномъ сжиганіи*, представляетъ самый естественный путь обратить образующійся уже дымъ въ пламя прежде, нежели онъ дойдетъ до мѣста своего дѣйствія на нагрѣваемую поверхность.

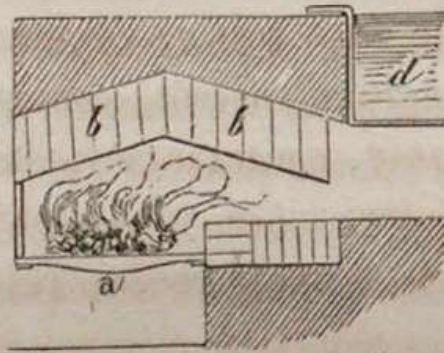
Далѣе нѣкоторые замѣтили, что въ печахъ, въ которыхъ продукты горѣнія проходятъ между сильно нагрѣтыми камнями, не бываетъ и слѣдовъ дыма даже и не при совершенномъ горѣніи, т. е. при недостаточномъ теченіи воздуха. Устройство печи, предлагаемое техникомъ Зильберманомъ (*Dingler's Polytechnisches Journal Bd. VXXXIX S. 81*), въ которомъ пламя должно идти чрезъ множество трубокъ изъ огнеупорной глины, прежде, нежели оно будетъ дѣйствовать на нагрѣваемую поверхность, основано на этомъ началѣ.

Хотя его устройство оказывается не совсѣмъ удобнымъ по причинѣ легко лопающихся и засоряющихся золою трубокъ и задерживанія тяги чрезъ проходъ воздуха сквозь эти трубки, мысль же нисколько не теряетъ чрезъ это своего достоинства,



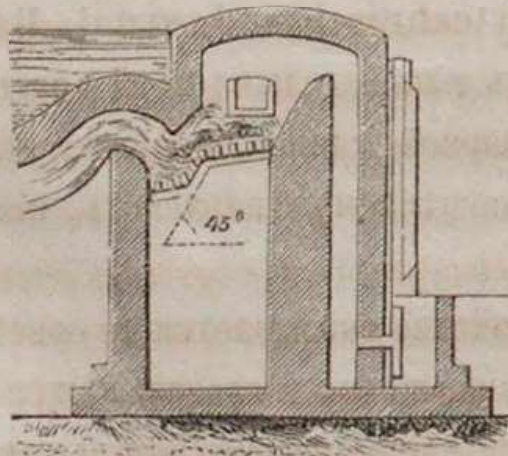
потому что основана на ясныхъ доказательствахъ, и не должна быть оставлена безъ примѣненія, болѣе удачнаго.

Нѣкто въ Германіи достигъ недавно превосходныхъ результатовъ, устроивъ надъ обыкновенною топкою сперва восходящій, а потомъ нисходящій сводъ, такъ что продукты горѣнія должны проходить между нисходящимъ сводомъ и порогомъ. Пламя, поднимающееся съ рѣшетки *a* (фигура 42), нагрѣваетъ сильно сводъ *b*, и между тѣмъ какъ оно принуждено сильно сжиматься подъ нисходящимъ сводомъ *b'* сжигаетъ дымъ совершенно. Такъ какъ пламя нѣсколько



фигура 42.

отражается внизъ, этимъ избѣгается чувствительно вредное дѣйствіе сажи на поверхность *h*. Дѣйствіе представленнаго простаго устройства топки превосходно. Даже въ моментъ



фигура 43.



подбрасыванія свѣжаго каменнаго угля не отдѣляется ни- сколько дыма.

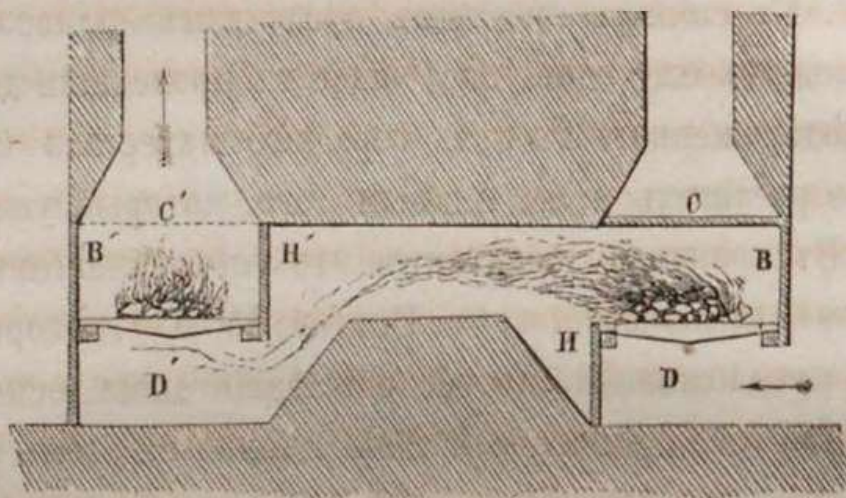
Ванделеръ, устроившій подобную же печь (фигура 43) въ Вульвическомъ арсеналѣ (Англіи), получилъ тоже хорошіе результаты. Вообще сжиманіе пламени въ *пороги*, устраиваемомъ позади рѣшетки, приводитъ частицы дыма въ ближайшее соприкосновеніе съ раскаленными газами, т. е. пламенемъ, и чрезъ это соприкосновеніе доводитъ дымъ до воспламененія.

§ 62. Къ самымъ простымъ средствамъ дымосожиганія принадлежитъ еще одно, состоящее въ проведеніи дыма отъ вновь подброшеннаго въ печь горючаго матеріала и начинающаго разлагаться, въ пламень того, который уже разгорѣлся. Въ практикѣ достигается это употребленіемъ *двойныхъ соединенныхъ топокъ*. Виттей (Witty), который былъ первый предложившій способъ сожиганія дыма, основывалъ устройство его дымогарной печи именно на этомъ началѣ. Онъ далъ обыкновенной рѣсеткѣ наклонное по длинѣ положеніе, такъ что задняя сторона была ниже передней. Горючій матеріалъ находился на болѣе возвышенной части рѣшетки, подвигался внизъ постепенно по мѣрѣ его прогорания, между тѣмъ какъ на передней концѣ рѣшетки поступалъ опять свѣжій уголь. Продукты сухой перегонки этого свѣжаго угля, въ смѣшеніи съ втекающимъ въ печь воздухомъ, текутъ надъ раскаленнымъ углемъ и сгораютъ. Устройства дымогарныхъ печей Чентера (Chanter), Тенбрейка (Tenbrinck), Галля (Hall), Бюсоньера (Buzonpière) и др. относятся сюда же. Замѣтимъ между прочимъ, что опыты, произведенные Тенбрейкомъ надъ его топкою, дали замѣчательные результаты: паровой котель, вмазанный въ печь съ устройствомъ топки по системѣ Тенбрейка,



производить отъ 6 до 6, 25 фунтовъ пара однимъ фунтомъ каменнаго угля, между тѣмъ какъ при обыкновенной рѣшеткѣ тотъ же котель и въ той же печи давалъ только отъ 4, 4 до 5, 2 фунт. на каждый фунтъ угля.

Бюсоньеръ достигаетъ дымосожиганія такимъ устройствомъ печи, въ которомъ продукты сухой перегонки съ одной рѣшетки попеременно пропускаются сквозь рѣшетку другой (фигура 44). *И* и *И* двѣ подвижныя задвижки, дѣй-



фигура 44.

ствующія такъ, что въ одно время бывають закрыты зольникъ *D* и топочная дверца *B'*, между тѣмъ какъ зольникъ *D'* и топочная дверца *B* открыты. Дымъ одного очага сожигался здѣсь тѣмъ, что онъ проходилъ чрезъ рѣшетку и горящее топливо втораго очага. На этомъ началѣ было построено много дымогарныхъ печей; но вообще дѣйствія ихъ оказались неудовлетворительны. Неудача этого способа должна быть приписана тому, что огонь перваго очага самъ потреблялъ такъ много кислорода, что его потомъ не доставало уже для сгорания дыма, такъ что огонь втораго очага нерѣдко потухалъ даже въ самомъ началѣ горѣнія. Дѣйствительно, анализируя этотъ вопросъ, непременно придешь



къ заключенію, что успѣхъ дымосожиганія, и слѣдовательно сбереженіе топлива, въ печахъ этого рода, сомнительны, и мы не останавливаемся болѣе на изслѣдованіи этого принципа, потому что перечень разныхъ устройствъ Чен-тера, Галля и подобныхъ имъ не повлечетъ къ развитію идеи: достаточно одного или двухъ примѣровъ для того, чтобы судить, какую степень совершенства представляетъ разсматриваемый принципъ.

Во избѣжаніе неудачи дѣйствія этихъ печей предложено было пропускать дымъ сквозь металлическую трубу, подверженную непосредственному дѣйствію пламени, при чемъ предполагалось воспламенить дымъ вслѣдствіе сильнаго его раскаленія. Когда потомъ узнали, что сгораніе дыма въ этомъ случаѣ было не полное, а только частію, придумали пропускать къ сильно нагрѣтому дыму свѣжій воздухъ, чтобы доставить этимъ большее количество кислорода къ мѣсту горѣнія. Но и тутъ успѣхъ не удался, потому что притокъ свѣжаго воздуха понижалъ температуру пламени даже до того, что нѣкоторыя составныя части дыма, именно уксусная кислота и окись углерода, не могли воспламеняться. Употребивъ предварительное нагрѣваніе впускаемаго воздуха, увидѣли наконецъ, что недостигаемое ими и въ этомъ случаѣ сжиганіе дыма должно быть приписано малому соприкасанію между собою частицъ дыма и свѣжаго воздуха.

Весь этотъ хотя краткій обзоръ цѣлаго ряда наблюденій приводитъ къ тому непреложному заключенію, что для совершеннаго сгоранія дыма и вообще всѣхъ газообразныхъ горючихъ матеріаловъ недостаточно одного только доступа кислорода въ надлежащемъ количествѣ, нужно еще дѣйствіемъ механическаго перемѣшиванія приводить дымъ въ возможно лучшее соприкасаніе съ кислородомъ воздуха. И такъ, что-



бы достигнуть сгорания газовъ, нужно сперва употребить чисто механической процессъ, состоящей въ сильномъ перемѣшиваніи частицъ газовъ съ частицами воздуха, потому что это перемѣшиваніе есть необходимое условіе послѣдующаго химическаго соединенія. Пропусканіе воздуха и газовъ сквозь множество малыхъ отверстій самымъ существеннымъ образомъ достигаетъ этой цѣли. Въ какой бы части печи ни было произведено впусканіе воздуха, процессъ совершеннаго сгорания дыма и газовъ можетъ быть достигнуть одинаково совершенно, лишь бы только температура смѣси воздуха и газовъ не была ниже той, при которой газы способны еще воспламеняться, т. е. 800° Фар. или 430° Цельсія.

Фэрбернъ въ Манчестерѣ достигаетъ дымосожиганія въ печахъ паровыхъ котловъ также употребленіемъ *двухъ огней*; но, вмѣсто того, чтобы пропускать газы и дымъ, отдѣляющіеся съ одного очага, сквозь рѣшетку другаго, онъ только соединяетъ оба эти тока въ общемъ пламенномъ ходѣ и этимъ приводитъ ихъ въ взаимное соприкосновеніе. Печи его паровыхъ котловъ состоятъ изъ двухъ отдѣльныхъ топковъ, дѣйствующихъ во время производства работъ такимъ образомъ, что въ одну изъ нихъ свѣжее топливо забрасывается въ то время, когда на другой рѣшеткѣ оно уже совершенно разгорѣлось. Газы и дымъ первой топки, встретившись съ пламенемъ второй, воспламеняются, и этимъ достигается процессъ дымосожиганія.

§ 63. Всѣ приведенные примѣры дымогарныхъ печей, устроенныхъ или предложенныхъ разными техниками, основаны на теоріи, допускающей возможность воспламенять дымъ и слѣдовательно сжигать его. Но есть нѣкоторыя ученія, не совсѣмъ лишенныя основательности, которыя



совершенно отвергаютъ основныя начала вышеупомянутой теоріи. Напримѣръ Дюмери (M. Dumery) (\*) положительно говоритъ, что если и возможно сжигать дымъ, уже однажды образовавшійся въ нечи, но эта операція не представляетъ никакой выгоды въ отношеніи экономіи горючаго матеріала, потому что для воспламененія дыма нужно, по его трудносожигаемости, израсходовать больше теплоты, нежели сколько получится отъ его горѣнія. По этому мнѣнію, составленному Дюмери о горѣніи газовъ, все такъ называемыя *газовыя печи* не могутъ доставить существенной пользы въ употребленіи топлива. И хотя уже съ давняго времени признано за лучшее средство сжигать газы въ смѣшеніи ихъ съ чистымъ воздухомъ, или воспламенять ихъ дѣйствіемъ кислорода при болѣе или менѣе высокой температурѣ, но до сихъ поръ еще весьма неудовлетворительно рѣшенъ вопросъ: въ какой степени увеличивается сбереженіе топлива чрезъ совершенное сгораніе даже всехъ продуктовъ горѣнія, и можетъ ли сжиганіе дыма составить операцію, доставляющую несомнѣнныя выгоды?

По нашему мнѣнію, слабая сторона всехъ существующихъ и предложенныхъ устройствъ для сожиганія газовъ состоитъ именно въ томъ, что въ нихъ сожигаются газы съ воздухомъ испорченнымъ, то есть потерявшимъ нѣсколько кислорода, и смѣшаннымъ съ не-горючими газами, — другими словами, съ смѣсью, которая по составу своему не можетъ быть удобосгораемою. Многія неудачи въ достиженіи удовлетворительныхъ результатовъ при сожиганіи дыма происходили еще и потому, что это сожиганіе было произ-

---

(\*) Bulletin de la Société d'Encouragement, Novembre, 1835, page 771.



водимо не одинаково какъ въ формѣ, мѣстѣ, числѣ отдѣльныхъ процессовъ, такъ и различныхъ по температурѣ, скорости и давленію газовъ, а еще болѣе потому, что сжигали газы часто въ большемъ количествѣ противу надлежащаго, неправильно и безъ всякихъ извѣстныхъ данныхъ.

Дюмери между прочимъ говоритъ еще слѣдующее: «Между всѣми состояніями, въ которыхъ горючіе матеріалы могутъ доставлять при горѣніи наибольшее полезное дѣйствіе, газообразное есть самое невыгодное. И это потому, что условія, при которыхъ совершенное сгораніе газообразныхъ горючихъ матеріаловъ можетъ быть достигнуто, такъ тѣсны, что можно даже сомнѣваться въ успѣхѣ употребленія газовъ въ большемъ видѣ, какъ горючаго матеріала, въ видахъ извлеченія наибольшаго полезнаго дѣйствія.»

Вѣроятно этотъ фактъ былъ основною причиною, которая произвела употребленіе печей съ *обращенною тягою*. Въ этихъ печахъ свѣжіе уголья бросаются на раскаленные; теплородъ послѣднихъ производитъ сухую перегонку первыхъ, и тяга производитъ движеніе газовъ чрезъ массу раскаленнаго горючаго матеріала, прежде, чѣмъ они достигнутъ нагрѣваемой поверхности. Производимое этимъ способомъ сгораніе есть совершенное; но въ печахъ этого рода потеряно *лучистое отраженіе* теплоты. Чтобы воспользоваться лучеиспусканіемъ теплорода и чтобы газы шли ихъ естественнымъ путемъ, Летестю (Letestu) въ 1844 и потомъ Бокилонъ (Boquillon) въ 1849 г. придумали устраивать рѣшетку, вращающуюся на двухъ горизонтальныхъ шипахъ (Dingler's Polytechn. Journal Bd. CXXXIX S. 23).

Когда въ цилиндрической рѣшѣткѣ уголь обратился уже въ коксъ, при чемъ отворяютъ дверцу и бросаютъ на го-



рячій коксъ зарядку свѣжаго угля, тогда запирають печь и даютъ сдѣлать ей полъ-оборота, такъ что уголья, находившіеся вверху, обращаются внизъ.

Жаръ, отдѣляющійся отъ кокса, дистилируетъ каменный уголь, котораго газы, подобно тому, какъ бываетъ при обращенной тягѣ, должны проходить чрезъ раскаленную массу и сгорать. Впрочемъ эти вращающіяся рѣшетки не могутъ доставлять безпрерывнаго дѣйствія обращеннаго пламени. Прежде, нежели поступитъ новая зарядка, предъидущая должна совершенно выдистилироваться, и если аппаратъ очень скоро вертится, то происходитъ дымъ. До сихъ поръ это замѣчательное устройство ограничивается только топками для домашняго употребленія. Съ намѣреніемъ достигнуть этой же цѣли, Кеттлеръ (Cuttler) въ Лондонѣ еще въ 1815 г. предложилъ устройство печи, въ которой подвиганіе свѣжаго горючаго матеріала было снизу вверхъ, и въ верхнемъ слоѣ происходило сгораніе топлива.

Въ послѣднее время докторъ Арнодтъ (Arnott) въ Лондонѣ улучшилъ устройство печи Кеттлера и сдѣлалъ ее пригодною для практическаго употребленія (*Dingler's Polytechnisches Journal Bd. CXXXIII S. 194*). Его печи, построенныя съ цѣлію производить медленное и продолжительное сгораніе, дали очень хорошіе результаты.

§ 64. Сообщеніе теплоты, развивающейся при горѣніи, поверхности котла происходитъ въ большей части случаевъ двоякимъ образомъ: сперва чрезъ отраженіе лучей горящаго топлива и потомъ чрезъ сообщеніе теплорода отъ горячихъ газовъ, соприкасающихся съ поверхностію котла, при движеніи ихъ влѣдствіе тяги.

Первый случай составляетъ самую дѣятельную передачу теплоты, потому что она тѣмъ быстрѣе, чѣмъ больше раз-



ность температуръ. Поэтому самымъ естественнымъ образомъ топочная камера должна быть помещаема внутри самаго паровика или по крайней мѣрѣ окружена со всѣхъ сторонъ водою, какъ это устраивается въ паровозныхъ и пароходныхъ котлахъ. Въ этомъ отношеніи конструкціи котловъ, наиболѣе употребляемыя для постоянныхъ машинъ, менѣе совершенны: въ нихъ лучистый теплородъ горѣнія ощутительно теряется на нагрѣваніе каменной кладки печи.

Нагрѣваніе стѣнокъ котла пламенемъ *черезъ соприкосновение* производитъ въ процессѣ парообразования дѣйствіе слабѣе того, какое замѣчается въ части котла, заключающей топку, и это потому, что температура пламени, которое есть ничто иное, какъ раскаленные газы по мѣрѣ удаленія его отъ мѣста горѣнія постепенно уменьшается отъ вліянія нагрѣваемыхъ стѣнокъ котла, сравнительно болѣе холодныхъ, такъ что, пройдя нѣкоторое пространство въ пламенныхъ ходахъ или трубкахъ, раскаленные газы гаснутъ и на остальной части ихъ движенія являются уже въ видѣ дыма, нагрѣваніе которымъ составляетъ наислабѣйшее дѣйствіе.

Отъ устройства печи и скорости движенія пламени зависитъ непосредственно то, какая часть нагрѣваемой поверхности паровика подвержена непосредственному дѣйствію пламени. Чѣмъ совершеннѣе происходитъ горѣніе топлива въ печи, тѣмъ болѣе возвышенная температура существуетъ въ топочномъ пространствѣ, и слѣдовательно тѣмъ болѣе отдѣляется пламени, тѣмъ на большую часть поверхности котла дѣйствуетъ оно и тѣмъ сильнѣе происходитъ процессъ парообразования. Такъ какъ пламенность горѣнія топлива, какого бы рода это послѣднее ни было, зависитъ



отъ температуры, существующей въ печи, поэтому, чтобы пламя дѣйствовало на большемъ протяженіи и соприкасалось съ наибольшою поверхностію нагрѣва паровика, нужно держать въ печи наибольшую температуру. Если назовемъ чрезъ  $C$  количество единицъ теплоты, отдѣляющееся при горѣніи единицы вѣса горючаго матеріала,  $O$  объемъ дыма, взятой при  $0^0$  и произведенной единицею вѣса горючаго матеріала,  $\varphi'$  и  $\tau_2$  плотность и температура газовъ, исходящихъ съ рѣшетки, то для единицы вѣса топлива количество теплоты, заключающееся въ продуктахъ горѣнія, т. е.  $\varphi' \cdot O \cdot \tau_2$ , должно быть равно всей теплотѣ, развивающейся при горѣніи,  $4C$ , откуда можно вывести температуру пламени

$$\tau_2 = \frac{4C}{\varphi O} \dots \dots (81)$$

въ зависимости отъ объема дыма и слѣдовательно отъ объема впускаемаго въ топку воздуха. Изъ формулы видно, что наибольшая температура пламени  $\tau_2$ , при которой парообразование можетъ быть *наисильнѣйшее*, будетъ при наименьшемъ объемѣ  $O$  свѣжаго воздуха, притекающаго къ мѣсту горѣнія. Слѣдовательно горѣніе въ печахъ паровыхъ котловъ доставитъ *наибольшее полезное дѣйствіе* въ процессѣ парообразования только при такомъ количествѣ свѣжаго воздуха, которое соотвѣтствовало бы въ одно и то же время и совершенному сгоранію горючаго матеріала и возможно наибольшей температурѣ пламени.

§ 65. Независимо отъ температуры раскаленныхъ газовъ и скорости ихъ движенія, совершенная передача теплоты газовъ нагрѣваемой водѣ въ паровикахъ можетъ быть только при *наивыгоднѣйшей формѣ* каналовъ, по которымъ движется пламя. Для того, чтобы *всѣ слои* движущагося пламени



производили нагрѣваніе соприкасающихся съ ними поверхностей, каналы и дымовые ходы изъ всѣхъ геометрическихъ фигуръ должны имѣть въ этомъ отношеніи наивыгоднѣйшую, представляющую наибольшій периметръ при наименьшей площади, и при томъ въ такомъ отношеніи, чтобы всѣ слои пламени сближались какъ можно болѣе съ нагрѣваемой поверхностію. Очевидно, что форма круга менѣе всего соответствуетъ этому, и, не смотря на то, мы вездѣ ее встрѣчаемъ: въ пламенныхъ ходахъ паровыхъ котловъ, дымовыхъ трубкахъ (паровозы), трубахъ, проводящихъ паръ для отопленія помѣщеній, холодильныхъ спираляхъ перегонныхъ аппаратовъ и пр. Все это упускается изъ виду при изысканіи легчайшихъ способовъ исполненія построенія и часто приносится въ жертву экономіи въ первоначальныхъ расходахъ.

Степень передачи теплоты стѣнками паровика нагрѣваемой жидкости, въ немъ находящейся, зависитъ много еще отъ толщины и качества стѣнокъ, подверженныхъ дѣйствию жара, также отъ положенія ихъ относительно теченія пламени.

Такимъ образомъ тонкіе листы металла скорѣе передаютъ теплоту и слѣдовательно производятъ болѣе успешное парообразованіе; также при одинаковой толщинѣ листовъ мѣдь обладаетъ большею способностію теплопроводности, и слѣдовательно паропроизводительности, нежели желѣзо. Такъ какъ пламя, по относительной его легкости противу атмосферы, имѣетъ всегда движеніе вверхъ, поэтому оно лучше передаетъ теплоту верхнимъ частямъ, нежели внизъ или въ боковыя стороны.

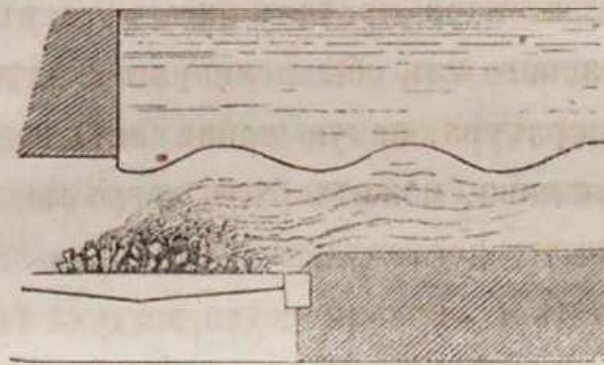
Вслѣдствіе вывода изъ многихъ простыхъ наблюденій, можно положить, что степень нагрѣванія стѣнокъ пламе-



немъ находится въ тѣсной зависимости отъ величины угла, образуемаго пересѣченіемъ направленія движенія пламени съ плоскостію положенія стѣнки (\*).

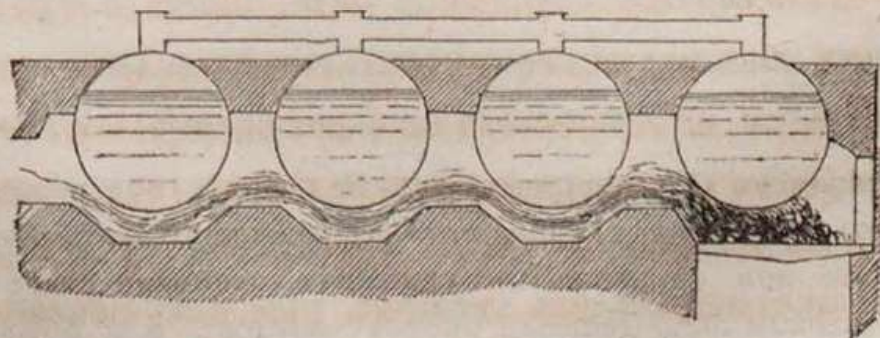
Замѣчено также, что пламенные трубки при одинаковыхъ размѣрахъ и при одинаковомъ качествѣ металла, будучи

(\*) Въ этомъ отношеніи замѣчательно измѣненіе, сдѣланное недавно *Пирсомъ* (Pierce) въ формѣ дна паровиковъ, изображенной на фиг. 63. Дно паровика сдѣлано волнообразнымъ и попе-



фигура 63.

регъ теченія пламени, которое отъ этого постоянно дѣйствуетъ подъ нѣкоторымъ угломъ на дно котла и не скользитъ по его поверхности, двигаясь параллельно, какъ во всѣхъ обыкновенныхъ случаяхъ. Весьма близка къ этому мысль строителей машинъ Гопкинсона и Копса (Hopkinson and Copes), которые предлагаютъ при употребленіи нѣсколькихъ паровыхъ котловъ, располагать ихъ поперегъ теченія пламени съ общей для всѣхъ ихъ рѣшетки, какъ видно изъ фигуры 64.



фигура 64.



расположены горизонтально, какъ въ паровозахъ, производятъ больше паровъ противу трубокъ вертикальныхъ, какъ напр. въ вертикальныхъ трубчатыхъ котлахъ.

Паровые котлы обыкновенно дѣлаются изъ гладкаго листового (котельнаго) желѣза. Отчего бы не употребить для этаго желѣза съ шероховатою поверхностію, приготавливая разумѣется такой матеріалъ особымъ способомъ — нарочною вальцовкою желѣза. Такъ какъ шероховатая поверхность тѣла способна воспринимать и отражать болѣе теплорода, поэтому котель, сдѣланный изъ такого желѣза, произвелъ бы больше пара противу котла такихъ же размѣровъ, но сдѣланнаго изъ обыкновеннаго желѣза (\*).

§ 66. Температура, какую принимаетъ воздухъ въ точкѣ при горѣніи топлива, можетъ быть легко вычислена изъ количества теплоты, доставляемой единицею вѣса топлива, которую назовемъ  $C$ , и количества воздуха  $O$  (по объему), требуемаго для совершеннаго сгоранія топлива. Принимая теплоемкость воздуха, которую назовемъ чрезъ  $\theta$ , равную  $\frac{1}{4}$  теплоемкости воды, и называя чрезъ  $\varphi = 0,086$  фунтовъ вѣсъ кубическаго фута воздуха, то

$$C = \theta O \varphi (\tau_2 - \tau_0) = \frac{1}{4} \cdot 0,086 O (\tau_2 - \tau_0)$$
 ( $\tau_2$  — температура воздуха въ точкѣ,  $\tau_0$  температура воздуха, приходящаго въ точку), и слѣдовательно

$$\tau_2 = \frac{4 C}{0,086 O} + \tau_0 = 46,5 \frac{C}{O} + \tau_0 \dots (82)$$

---

(\*) Монгомери (Montgomery) въ Нью-Йоркѣ построилъ, уже нѣсколько лѣтъ назадъ, много котловъ изъ шероховатаго желѣза. Его котлы при одинаковыхъ условіяхъ занимали вдвое менѣ мѣста и стоили 30% дешевле противу котловъ изъ обыкновеннаго желѣза.



Пусть  $z$  будет температура газовъ въ какомъ либо мѣстѣ ихъ теченія по дымовымъ ходамъ котла,  $Y$  величина поверхности нагрѣва, считая до разсматриваемаго положенія точки, и  $\chi$  количество теплоты, передаваемое водѣ однимъ квадратнымъ футомъ площади нагрѣва котла въ 1 секунду при 1 градусѣ разности температуръ, то количество теплоты, соотвѣтствующее безконечно малой поверхности нагрѣва  $dY$  и разности температуръ  $z - \tau$ , будетъ

$$\chi (z - \tau) dY = - \theta O_{\varphi} dz \text{ и по этому}$$

$$Y = - \frac{\theta Y_{\varphi}}{\chi} \int \frac{dz}{z - \tau} = - \frac{\theta O_{\varphi}}{\chi} \log. \text{ nat. } (z - \tau) + \\ + \text{Const.} \dots (83)$$

Для  $Y = 0$  температура  $z = \tau_2$  и для  $Y = G$  (вся поверхность нагрѣва)  $z = \tau_1$ , поэтому

$$G = \frac{\theta O_{\varphi}}{\chi} \cdot \log. \text{ nat. } \left( \frac{\tau_2 - \tau}{\tau_1 - \tau} \right), \dots \dots (84)$$

и искомая температура раскаленныхъ газовъ при входѣ ихъ въ дымовую трубу

$$\tau_1 = \tau + (\tau_2 - \tau) e^{-\frac{\chi G}{\theta O_{\varphi}}} \dots \dots (85).$$

Слѣдовательно теплота, уносимая газами въ дымовую трубу,

$$C = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_2 - \tau_0} C = \frac{\tau - \tau_0 + (\tau_2 - \tau) e^{-\frac{\chi G}{\theta O_{\varphi}}}}{\tau_2 - \tau_0} C, \dots \dots (86).$$

Если теперь въ топкѣ при горѣннн топлива развивается теплота  $C$ , дѣйствующая на стѣнки котла, и чрезъ тягу въ дымовой трубѣ еще горячіе газы уносятъ съ собою въ атмосферу количество теплоты  $C_1$ , то *степень дѣйствія* пароваго котла какой либо системы можетъ быть лучше всего выражена отношеніемъ теплоты, воспринимаемой стѣнками



котла, для передачи ей нагреваемой въ немъ водѣ, ко всей теплотѣ, доставляемой извѣстнымъ горючимъ матеріаломъ при горѣніи его въ топкѣ. Обозначимъ это отношеніе чрезъ  $L$ , то степень дѣйствія пароваго котла получитъ выраженіе слѣдующаго вида:

$$L = \frac{C - C_1}{C} = 1 - \frac{C_1}{C} = \left( \frac{\tau_2 - \tau}{\tau_2 - \tau_0} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\chi G}{\theta O \varphi}} \right),$$

или, такъ какъ  $\tau_2 - \tau_0$  равно также  $\frac{C}{\theta O \varphi}$ , то

$$L = \left( 1 - \frac{\tau - \tau_0}{\tau_2 - \tau_0} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\chi G}{\theta O \varphi}} \right) \\ = \left( 1 - (\tau - \tau_0) \frac{\theta O \varphi}{C} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\chi G}{\theta O \varphi}} \right) \dots \dots \dots (87).$$

Полагая для примѣра  $\tau_2 - \tau_0 = 1200$  (по Цельсію), то написанное сейчасъ уравненіе можетъ принять слѣдующій простѣйшій видъ:

$$L = \left( 1 - \frac{\tau - \tau_0}{1200} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\chi G}{\theta O \varphi}} \right).$$

Подставляя сюда

$$\varphi = \frac{1}{4} \cdot 0,086 = 0,0215.$$

$$\chi = 0,0007 \text{ и}$$

$$\frac{G}{O} = \frac{60 \cdot 60}{22} \text{ g} = 163 \text{ g}$$

гдѣ  $g$  выражаетъ величину площади нагрева, доставляющей въ часъ 1 фунтъ пара, получимъ

$$L = \left( 1 - \frac{\tau - \tau_0}{1200} \right) \left( 1 - e^{-\frac{5,3g}{\theta O \varphi}} \right)$$

взявъ напр. для  $\tau - \tau_0 = 120^\circ$ ,

$$L = 0,9 \left( 1 - e^{-\frac{5,3g}{\theta O \varphi}} \right)$$



Принимая, что 1 квадратный футъ площади нагрѣва паровыхъ котловъ производитъ среднимъ числомъ въ 1 часъ 4 фунта пара, т. е., дѣлая  $g = 1/4$ , получимъ

$$L = 0,9 (1 - e^{-1,33}) = 0,9 (1 - 0,2645) = 0,66;$$

сдѣлавъ теперь поверхность нагрѣва вдвое больше, т. е. полагая  $g = 1/2$ , получимъ

$$L = 0,9 (1 - e^{-2,66}) = 0,9 (1 - 0,093) = 0,81;$$

наконецъ обратно, уменьшивъ поверхность нагрѣва противу перваго случая, вдвое, т. е. полагая  $g = 1/8$ , будемъ имѣть

$$L = 0,9 (1 - e^{-0,665}) = 0,9 (1 - 0,514) = 0,9 \cdot 0,486 = 0,44$$

Отсюда теперь слѣдуетъ заключить, что для достиженія успѣшнѣйшаго парообразованія нужно увеличивать поверхность нагрѣва пароваго котла какъ можно больше.

Если принять температуру  $\tau$ , существующую въ паровомъ котлѣ, равную  $140^\circ$  (по Цельсию), то температура горячихъ газовъ при входѣ ихъ въ дымовую трубу будетъ для перваго изъ предъидущихъ случаевъ

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau + (\tau_2 - \tau) e^{-1,33} \\ &= 140 + 1060 \cdot 0,2645 = 140 + 280 = 420^\circ, \end{aligned}$$

во второмъ случаѣ

$$\tau_1 = 140 + 1060 \cdot 0,093 = 140 + 99 = 239^\circ$$

и наконецъ въ третьемъ

$$\tau_1 = 140 + 1060 \cdot 0,514 = 140 + 545 = 685^\circ,$$

т. е., что чѣмъ поверхность нагрѣва котла больше, тѣмъ газы и пламя, по окончаніи дѣйствія ихъ на нагрѣваемую поверхность, при меньшей температурѣ входятъ въ дымовую трубу, и тѣмъ слѣдовательно меньше теплоты теряется въ атмосферу чрезъ тягу.



Естественно, температуры эти имѣютъ большое вліяніе на необходимые размѣры дымовой трубы, и если при малой температурѣ  $\tau$ , газовъ при входѣ ихъ въ трубу, какая выходитъ во второмъ изъ означенныхъ случаевъ, размѣры трубы будутъ малы для произведенія требуемой тяги, тогда нужно будетъ употребить вентиляторъ какъ вспомогательное средство (см. статью профессора Zeuner, помѣщенную въ «Civilingenieur» Bd. 4.)

## II. ТЕОРІЯ ПАРООБРАЗОВАНІЯ.

§ 67. *Количество теплорода, потребное для образованія единицы вѣса пара.* Теплородъ измѣняетъ объемъ и состояніе тѣлъ. Какое бы то ни было тѣло при нагреваніи расширяется, не измѣняя своего состоянія; потомъ, если повышеніе температуры тѣла перейдетъ нѣкоторые предѣлы, тогда представляется другое явленіе: отъ дальнѣйшаго дѣйствія теплорода измѣняется уже не температура, а состояніе тѣлъ. Переходъ тѣлъ изъ одного состоянія въ другое сопровождается всегда поглощеніемъ или отдѣленіемъ теплорода. Твердые тѣла при плавленіи, а жидкія при испареніи поглощаютъ теплородъ. Для объясненія этого явленія допускаютъ, что теплородныя атмосферы атомовъ всякаго тѣла могутъ быть увеличиваемы только до нѣкотораго предѣла. При дальнѣйшемъ нагреваніи теплородъ соединяется съ атомами тѣлъ, въ нѣкоторомъ опредѣленномъ количествѣ, *химически*. Какъ скоро вся масса тѣла приняла другой видъ, теплородная атмосфера ея атомовъ снова подвергается такимъ измѣненіямъ, которыя могутъ быть обнаруживаемы термометромъ. Такимъ образомъ, вода, нагрѣтая до точки



кипѣнія, при дальнѣйшемъ нагрѣваніи, не обнаруживаетъ болѣе дѣйствія на нее теплорода повышеніемъ температуры и, переходя въ парообразное состояніе, поглощаетъ теплородъ скрыто, который уносится паромъ. Если назвать  $t$  температуру кипѣнія воды, и  $a$  количество скрытаго теплорода, поглощаемаго *единицею* вѣса воды, то для полученія пара при температурѣ кипѣнія воды и при начальной (атмосферной) упругости изъ единицы вѣса воды при  $0^\circ$  потребно  $t + a$  единицъ теплорода.

Въ котлахъ паровыхъ машинъ упругость пара измѣняется отъ 1,1 до 10 атмосферъ. Разсмотримъ теперь, сколько теплорода потребно для полученія водянаго пара при упругостяхъ выше атмосферной.

По мнѣнію Уатта, подтвержденному опытами Шарпа, Клемана Дезорма и новѣйшими наблюденіями Памбура, для полученія пара какой бы ни было температуры *потребно одно и то же количество теплорода*. Они допускаютъ, что единица вѣса воды при переходѣ въ парообразное состояніе требуетъ при высшей температурѣ менѣе скрытаго теплорода, нежели при низшей. Притомъ количество скрытаго теплорода измѣняется съ температурою такъ, что сумма количествъ скрытаго и явнаго теплорода всегда одинакова и равна 520 единицамъ (считая по термометру Реомюра).

По мнѣнію же Соутерна, Понсле и др., вода при переходѣ въ паръ поглощаетъ при всякой упругости одно и то же количество скрытаго теплорода, такъ что при какойнибудь температурѣ  $t$  единица вѣса водянаго пара содержитъ  $440 + t$  единицъ теплорода (считая по термометру Реомюра).



Памбуръ говоритъ, что для приготовления данной массы пара въ котлахъ паровыхъ машинъ потребно при всякой температурѣ пара одно и то же количество топлива, разумѣется въ котлахъ одинаковой системы.

Законы Уатта и Соутерна не подтверждаются одинаково, ни тотъ, ни другой, новѣйшими опытами Реньо. Съ измѣненіемъ температуры и скрытый, и явный теплороды водянаго пара измѣняются, какъ можно видѣть изъ слѣдующей таблицы, полученной Реньо съ помощію опытовъ:

Упругость пара въ миллиметрахъ (mm) и атмосферахъ (atm).	Температура $T$ пара.		Все количество $x$ теплорода, потребнаго для полученія водянаго пара, въ единицахъ.	
	По Цельсію.	По Реомюру.	По Цельсію.	По Реомюру.
9,16 mm	10	8	610	588
0,224 atm	63	50,4	625	500
1 atm	100	80	637	509,6
13,625 atm	195	156	666	532,6

Слѣдующая формула

$$x = A + BT \dots \dots \dots (88)$$

предложенная Реньо, представляетъ довольно вѣрно результатъ всѣхъ опытовъ, имъ предпринятыхъ для опредѣленія количества  $x$ . Опредѣляя  $A$  и  $B$  по двумъ послѣднимъ опытамъ предъидущей таблицы, находимъ, что

$$A = 485,2; \quad B = 0,305,$$



и слѣдовательно

$$x = 485,2 + 0,305 T, \dots (88 \text{ bis})$$

гдѣ  $T$  температура въ градусахъ Реомюра. Замѣтимъ, что  $A = 485,2$  есть количество теплорода, которое отдѣляетъ паръ, насыщаемый при  $0^{\circ}$ , обращаясь въ воду при  $0^{\circ}$ , и  $B = 0,305$  есть теплоемкость паровъ, т. е. количество теплоты, потребное для повышенія температуры насыщеннаго пара на  $1^{\circ}$ , сжимая его притомъ такъ, чтобы онъ оставался всегда при насыщеніи.

Изъ предъидущей таблицы видно также, что количество  $x$  увеличивается почти отъ 510 до 533 единицъ теплорода Реомюра, когда упругость пара измѣняется отъ 1 до  $13\frac{1}{2}$  атмосферъ. Средняя величина  $x = 521,5$  близка къ 520 и мало разнится отъ предѣльныхъ величинъ  $x$ . Поэтому 520 можно принять, безъ ощутительной для практическихъ приложеній погрѣшности, за число единицъ теплорода, потребное для приготовленія водянаго пара въ котлахъ паровыхъ машинъ при всякой температурѣ.

И такъ, мнѣніе Клемана Дезорма и опыты Реньо приводятъ окончательно къ тому заключенію, что для полученія пара потребно всегда одно и то же количество теплорода, а слѣдовательно количество топлива, будетъ ли паръ высокаго или низкаго давленія.

Если въ котлы паровыхъ машинъ вода поступаетъ при температурѣ  $t'$ , то для обращенія единицы вѣса ея въ паръ потребно  $520 - t'$  единицъ теплоты.

§ 68. *Количество топлива потребляемое въ печахъ паровыхъ котловъ.* Въ этихъ печахъ какъ и во всѣхъ, не весь теплородъ, развивающійся при горѣніи топлива, производитъ полезное дѣйствіе: нѣкоторая часть его теряется бесполезно. Потеря эта зависитъ отъ устройства печи и котла,



и для существующихъ составляетъ отъ  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{3}$  всего теплорода, доставляемаго топливомъ. Такимъ образомъ, если единица вѣса (напр. пудъ) топлива доставляетъ, сгорая,  $C$  единицъ теплоты, то на испареніе воды въ паровыхъ котлахъ достается только  $bC$  единицъ теплоты (\*). Поэтому для получения  $\omega$  пудъ пара потребно

$$x = \frac{\omega (520 - t')}{bC} \text{ пудъ топлива (89).}$$

Разные горючіе матеріалы, сгорая, доставляютъ не одинаковое количество теплорода, и по свойствамъ своимъ каждый изъ нихъ требуетъ особенныхъ условій касательно устройства печи, при которыхъ и можетъ быть только извлечено наибольшее количество теплорода. Расходъ топлива будетъ только въ томъ случаѣ *наименьшимъ*, когда возможно наибольшее количество теплоты будетъ употреблено въ дѣло, т. е., когда потеря теплоты въ печи будетъ только крайняя.

Формулою (89) можно опредѣлять также и количество пара, доставляемое даннымъ количествомъ топлива, сдѣлавъ только слѣдующее преобразование :

$$\omega = x \frac{bC}{(520 - t')} \dots \dots \dots (90)$$

Единица же вѣса топлива доставитъ

$$\omega' = \frac{bC}{(520 - t')} \dots \dots \dots (91)$$

вѣсовыхъ единицъ (пудъ) пара.

Въ своемъ мѣстѣ, при описаніи различныхъ системъ паровыхъ котловъ, мы покажемъ, какое количество  $\omega'$  паровъ

---

(\*) Обозначая дроби  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$  вообще чрезъ  $b$ .



доставляет единица вѣса какого нибудь топлива въ различныхъ котлахъ паровыхъ машинъ.

Изъ предъидущихъ формулъ также видно, что полезное дѣйствіе топлива увеличивается съ температурою воды, поступающей въ котель. Въ машинахъ съ холодильникомъ питательные насосы накачиваютъ въ котель воду, образовавшуюся чрезъ охлажденіе пара въ холодильникѣ и имѣющую температуру около  $40^{\circ}$  Реомюра. Въ хорошо устроенныхъ машинахъ безъ холодильника предварительно нагреваютъ воду предъ тѣмъ, какъ она посылается въ котель. Этому достигаютъ иногда, проводя питательную трубу по дымовымъ ходамъ котловой печи; а большею частію употребляютъ для этого особые аппараты, въ которыхъ вода нагревается или теплотомъ пара, кончившаго свое дѣйствіе, или жаромъ пламени и газовъ, выходящихъ изъ дымовыхъ ходовъ печи въ дымовую трубу. Чѣмъ больше нагревается вода предъ тѣмъ, какъ она вступаетъ въ котель, т. е., чѣмъ больше  $t'$  въ формулѣ (89), тѣмъ меньше расходуется топлива для окончательнаго обращенія воды въ паръ, т. е. тѣмъ больше количество  $\omega$ .

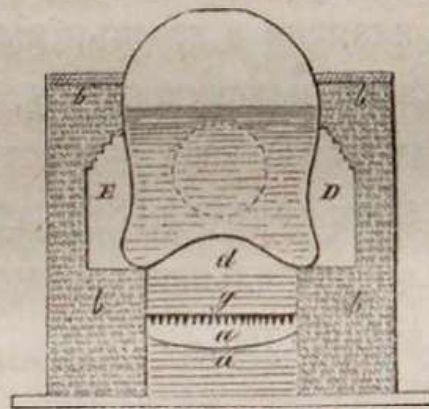
### III. РАЗЛИЧНЫЯ СИСТЕМЫ УПОТРЕБЛЯЕМЫХЪ ПАРОВЫХЪ КОТЛОВЪ.

Смотря по тому, для приготовленія какихъ паровъ котлы назначены, сіи послѣдніе могутъ быть низкаго или высокаго давленія. Первые должны доставлять наибольшее количество паровъ, между тѣмъ какъ отъ котловъ высокаго давленія преимущественно требуется наибольшая прочность для сопротивленія давленію паровъ.



§ 69. Наивыгоднѣйшая форма котловъ, приготовляющихъ пары *низкаго давленія*, есть бесспорно сундучная, съ плоскими, или даже нѣсколько вогнутыми поверхностями; такую форму мы дѣйствительно и находимъ у всѣхъ котловъ *низкаго давленія*, которые въ первый разъ были устроены Уаттомъ, почему и носятъ его имя. Правила, предложенныя Уаттомъ для построения его паровиковъ, такъ хороши, что форма котловъ, ихъ размѣры, устройство печи и проч. и до сихъ поръ опредѣляются съ помощію данныхъ, выведенныхъ изъ обширной его практики въ построеніи машинъ.

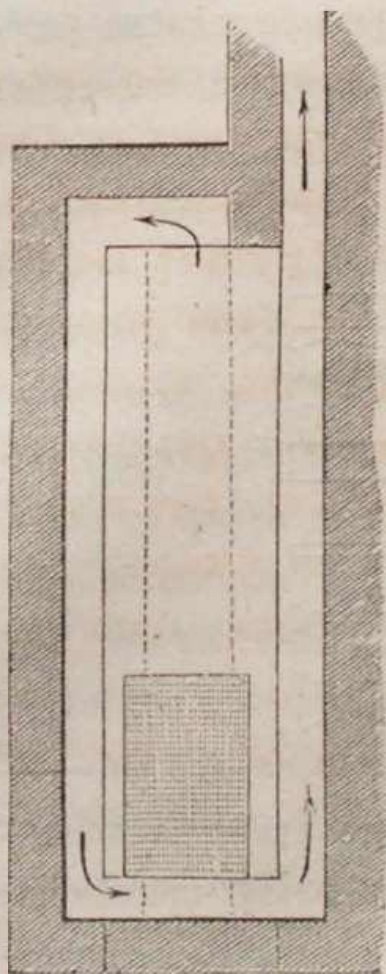
Чертежъ 45 представляетъ вертикальный поперечный разрѣзъ печи и котла системы Уатта.



фигура 45.

Пламя и горячіе газы, образующіеся въ горну *d*, пробѣгаютъ сначала первый дымовой ходъ, потомъ позади котла, поднявшись вверхъ, поворачиваются влѣво, идутъ вдоль его бока *b*, огибаютъ переднюю грань котла, откуда, поворотивъ вправо, направляются вдоль его бока *D* и наконецъ выходятъ въ дымовую трубу. На фигурѣ 46 весьма ясно представлены (въ планѣ) дымовые ходы, устроиваемые въ печахъ котловъ Уатта.





Фигура 46.

Нагрѣвательную поверхность его составляютъ днище и вогнутыя части боковыхъ стѣнокъ.

Въ большихъ котлахъ Уатта нагрѣваніе массы воды чрезъ периметральныя поверхности котла медленно, и потому, съ цѣлію выиграть въ парообразованіи и въ топливѣ, устраиваютъ внутри внутренней дымовой ходъ, какъ показано на фигурѣ 45 пунктиромъ.

Прежде дѣлали боковыя стѣны и днище этихъ котловъ плоскими; Уаттъ далъ имъ вогнутую форму и чрезъ это достигнулъ двойкой выгоды: увеличилъ нагрѣвательную поверхность котла и усилилъ сопротивленіе стѣнокъ его давленію паровъ,

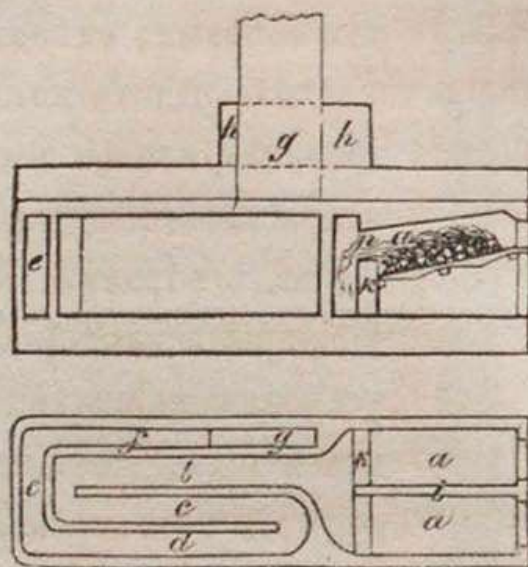
отъ котораго въ котлахъ съ плоскими поверхностями происходило нерѣдко выдавленіе стѣнокъ наружу.

На чертежѣ 47 представленъ котелъ низкаго давленія для пароходовъ въ вертикальномъ продольномъ разрѣзѣ и горизонтальномъ чрезъ пламенные ходы. Весь котелъ и топка металлическіе. Рѣшетка наклонена внутрь печи для того, чтобы топливо не высыпалось изъ горна при килевой качкѣ парохода. Газы, отдѣляющіеся отъ горящаго топлива, переходя чрезъ стѣнку *k*, идутъ послѣдовательно по дымовымъ ходамъ *b*, *c*, *d*, *e* и *f* и потомъ выходятъ въ атмосферу чрезъ трубу *g*.

§ 70. Все котлы *высокаго давленія* имѣютъ цилиндрическую форму, какъ наилучшую для сопротивленія высокой



упругости паровъ (\*). Но форма цилиндра не совсѣмъ удобна воспринимать дѣйствіе пламени, соприкасающагося съ



фигура 47.

его внѣшнюю поверхность, и кромѣ того свойство цилиндрическихъ фигуръ мало говоритъ въ пользу примѣненія ихъ къ котламъ: цилиндръ при наибольшей вмѣстимости представляетъ наименьшую поверхность—свойство, несообразное съ назначеніемъ котловъ. Вмѣстимость котла не составляетъ перваго условія и всегда должна уступать его нагревательной поверхности. Котлы тѣмъ выгоднѣе, чѣмъ при меньшихъ размѣрахъ въ состояніи произвести наибольшее количество паровъ. Поэтому-то, оставляя для котловъ высокаго давленія форму цилиндра, увеличиваютъ другими средствами ихъ способность воспринимать

(\*) Впрочемъ ничто не мѣшаетъ употреблять цилиндрическіе котлы и для небольшой упругости паровъ, какъ это бываетъ иногда при большихъ паровыхъ машинахъ низкаго давленія. Бѣольшая способность парообразования этихъ котловъ сравнительно съ сундучными производить то, что они при тѣхъ же условіяхъ занимаютъ значительно менѣе мѣста.



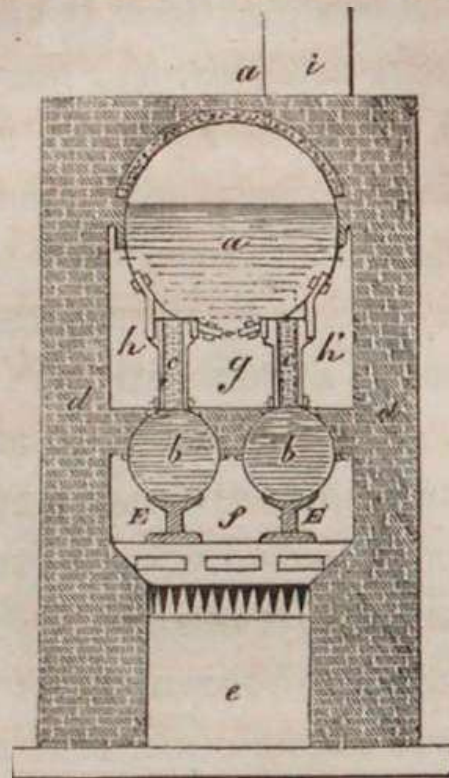
въ большей степени дѣйствиіе пламени. Вопросъ этотъ строителями котловъ рѣшенъ не одинаково. Правда, что все измѣненія, сдѣланныя въ разное время въ цилиндрическихъ котлахъ, имѣли цѣлю увеличить ихъ *нагрѣвательную поверхность*; но способъ достиженія этой цѣли различенъ. Напримѣръ, Вульфъ, желая освободить самый котелъ отъ вліянія сильнаго пламени и тѣмъ сохранить долѣе его прочность, придѣлалъ къ котлу вспомогательныя части, назначая ихъ для сильнаго кипяченія находящейся въ нихъ воды; эти части, названныя *кипятильниками*, имѣютъ видъ двухъ трубъ, соединенныхъ съ внутреннимъ пространствомъ самаго котла, и налиты водою совершенно. Онѣ помѣщаются внизу котла и бываютъ подвержены, какъ передовыя части дѣйствию перваго сильнѣйшаго пламени, идущаго съ рѣшетки; вода, нагрѣваемая въ этихъ кипятильникахъ выше точки ея кипѣнія, выдѣляетъ паръ въ верхнюю часть котла. Самый же котелъ не въ состояніи произвести большаго количества паровъ и служить болѣе парохранилищемъ, нежели дѣятельною частію; оттого вульфовы котлы наполняются водою только до половины и паровое пространство составляетъ *половину всей вмѣстимости паровика*.

Фигура 48 представляетъ котелъ Вульфа въ поперечномъ вертикальномъ разрѣзѣ.

Когда котелъ въ ходу, пламя и горячіе газы дѣйствуютъ сперва на кипятильники *b, b* по всей ихъ длинѣ; потомъ, поднявшись вверху позади кипятильниковъ, они идутъ въ дымовой ходъ *g*; дошедши до передняго основанія котла, раздѣляются они на два тока: одинъ изъ нихъ идетъ въ дымовой ходъ *h*, а другой въ *h'*; достигши до другаго основанія котла, они соединяются и выходятъ въ дымовую трубу *i*.

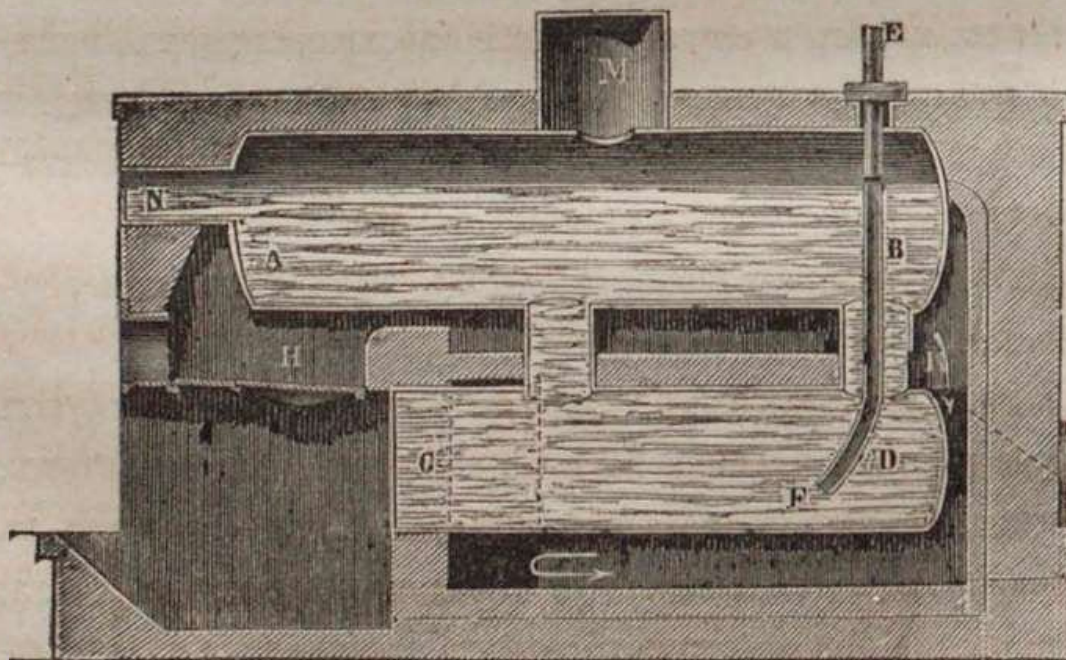
Не нужно смѣшивать котлы, снабженныя нагрѣвательны-





Фигура 48.

ми трубами (фигура 49), съ котлами, устроенными съ кипятильниками.



Фигура 49.

Хотя тѣ и другіе высокаго давленія, но въ устройствѣ и дѣйствіи прибавочныхъ частей ихъ есть существенная раз-



ность. Кипятильники помещаются надъ рѣшеткою и воспринимаютъ слѣдовательно первое дѣйствіе пламени, въ то время, какъ самый котелъ нагревается уже послѣ; нагревательныя же трубы, помещаемыя ниже рѣшетки, обогреваются горячими газами уже при проходѣ ихъ въ дымовую трубу, т. е. по окончаніи ихъ дѣйствія на поверхность котла. Фигура 49 представляетъ вертикальный разрѣзъ пароваго котла съ нагревательными трубами. *AB* паровой котелъ, *CD* нагревательная труба (*Vorwärmer*) и *EF* питательная трубка.

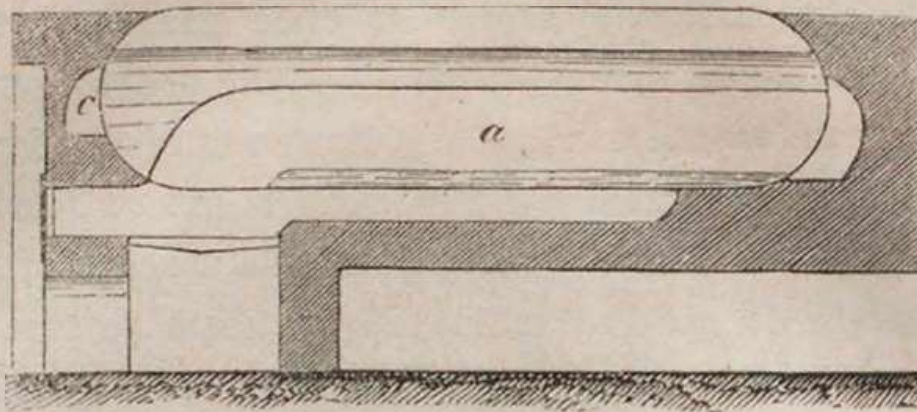
Кипятильники предназначены по своему положенію воспроизводить пары, нагревательныя трубы, напротивъ того, служатъ только для предварительнаго нагреванія воды, поступающей въ котелъ. Въ томъ отношеніи, что температура воды, поступающей въ котелъ, не имѣетъ вліянія на температуру воды въ самомъ котлѣ и слѣдовательно на самый процессъ парообразованія, котламъ этимъ справедливо отдаютъ преимущество предъ котлами съ кипятильниками.

Другіе строители, избѣгая сложность котловъ Вульфа, происшедшую вслѣдствіе употребленія кипятильниковъ и увеличивающую ихъ цѣнность, увеличиваютъ нагревательную поверхность котловъ высокаго давленія *внутренними дымовыми ходами*. Для этого внутри котла помещаютъ обыкновенно одну или двѣ трубы, чрезъ которыя проходятъ пламя и газы. Этимъ способомъ не только увеличивается нагревательная поверхность котла, но и достигается парообразованіе въ сильной степени, т. е. достигается *наибольшая испаряемость котла*.

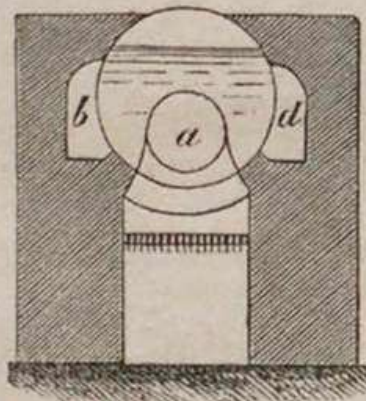
Фигуры 50 и 50 bis представляютъ подобный котелъ съ одною внутреннею дымовою трубою *а а*. Пламя съ рѣшетки идетъ сперва по этой трубѣ, потомъ заворачиваетъ налѣво,



идеть по боковому пламенному ходу *b*, обходить конец



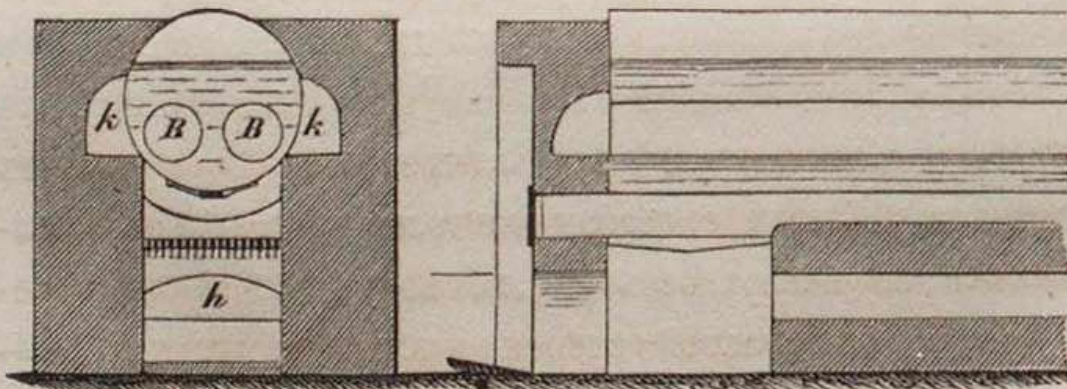
фигура 30.



фигура 30 bis.

котла спереди чрезъ *c*, входить въ дымовой ходъ *d* и изъ него уже въ трубу.

На фигурахъ 31 и 31 bis представленъ котель высокаго давленія съ двумя внутренними пламенными ходами и



фигура 31.

фигура 31 bis.

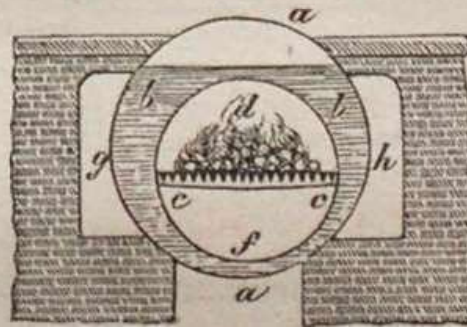
съ расположеніемъ дымовыхъ ходовъ отличнымъ отъ предъидущаго. Пламя идетъ сперва подъ котломъ, потомъ, раздѣ-



ляясь по двумъ внутреннимъ ходамъ *ВВ*, идетъ напередъ, и изъ нихъ вступаютъ каждый въ прилежащій ему дымовой ходъ *k* и *к*, которые соединяются въ концѣ печи въ одинъ каналъ, идущій въ дымовую трубу.

Превосходно дѣйствуютъ котлы съ *внутреннею топкою*, составляющіе какъ бы частный случай устройства котловъ съ внутренними пламенными ходами. Начало свое они получили въ Корваллисѣ, отъ чего и называются иногда корваллійскими. Дороговизна каменнаго угля причиною того, что тамошніе инженеры всеми возможными мѣрами заботятся объ экономіи топлива, и нигдѣ употребленіе пара не доведено до такой степени совершенства и выгоды, какъ въ Корваллисѣ. Оттуда котлы съ *внутреннею топкою* распространились почти всюду.

На чертежѣ 52 представленъ корваллійскій котель.



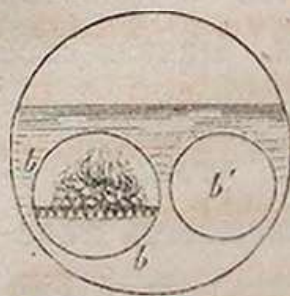
Фигура 52.

Горнъ расположенъ въ трубѣ *ВВ*, которая раздѣляется рѣшеткою *с*, *с* на двѣ половины: верхняя *d* составляетъ горнъ, а нижняя *f* зольникъ. Въ томъ мѣстѣ, гдѣ оканчивается рѣшетка, зольникъ отдѣляется отъ остальной части трубы *ВВ* вертикально кирпичною стѣнкою, возвышающеюся до рѣшетки. Пламя и горячіе газы идутъ сперва вдоль трубы *ВВ*, потомъ, поворотивъ въ одинъ изъ боковыхъ ходовъ, на примѣръ въ *g*, возвращаются къ топкѣ, и, прошедши надъ



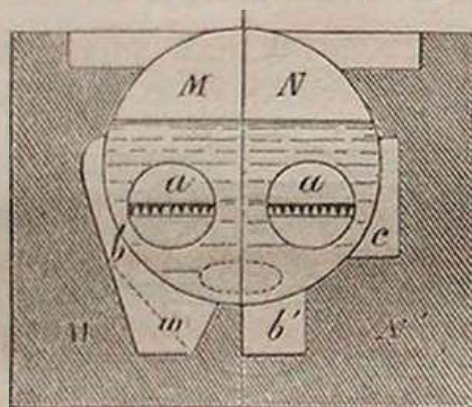
котломъ, входятъ во второй боковой ходъ  $h$ , изъ котораго позади котла выходятъ въ дымовую трубу.

Иногда кромѣ трубы  $b$ , въ которой устроена топка, вдоль котла пропущена еще другая труба  $b'$ , какъ представлено на чертежѣ 53. Пламя изъ трубы  $b$  выходитъ въ другую трубу  $b'$ , потомъ въ дымовые ходы и наконецъ въ трубу.



фигура 53.

Котлы системы Ферберна отличаются отъ сейчасъ описанныхъ тѣмъ, что въ нихъ устраиваются *два внутреннія топки*, помещаемыя въ каждомъ отдѣльномъ пламенномъ ходѣ. Чертежъ 54 представляетъ котель Ферберна съ двумя различными пламенными



фигура 54.

ходами. По изображенію  $MM'$  съ лѣвой стороны, пламя идетъ отъ рѣшетки  $a$  взадъ котла, потомъ выходитъ въ каналъ  $b$  и идетъ впередъ, заворачиваетъ въ правый такой же пламенный ходъ (на рисункѣ онъ упущенъ), по которому идетъ взадъ и улетаетъ въ дымовую трубу.

При устройствѣ дымовыхъ ходовъ  $NN'$  пламя и горячій воздухъ съ рѣшетки  $a'$  идутъ также взадъ, проходятъ потомъ подъ котломъ по каналу  $b'$  и въ передней части раздѣляются на два параллельные боковые хода  $c$  и  $c'$  (изъ ко-

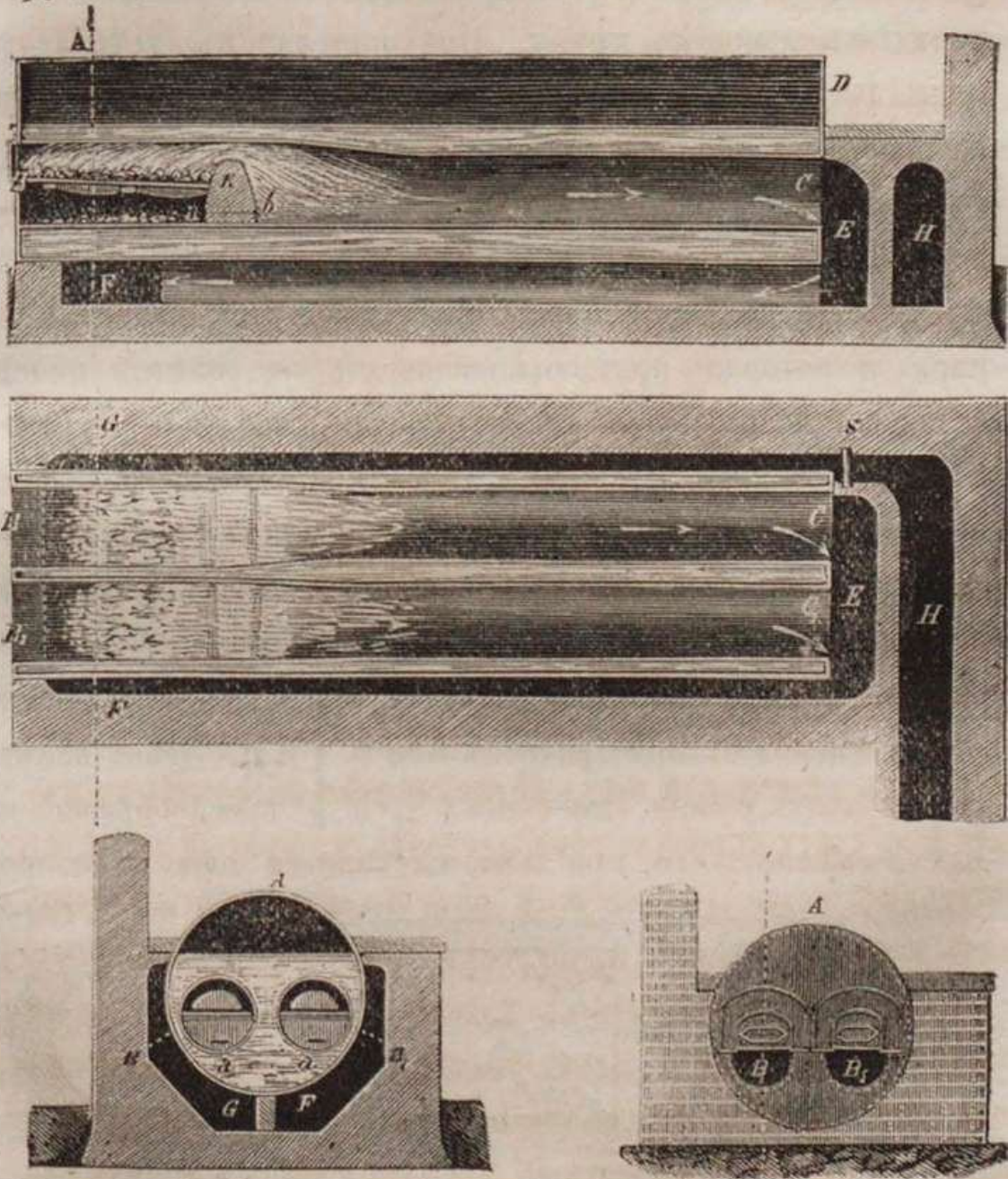


ихъ лѣваго на рисункѣ нѣтъ), пройдя по нимъ спереди назадъ, входятъ въ дымовую трубу.

Первому изъ этихъ расположеній дымовыхъ ходовъ даютъ преимущество, потому что оно быстрѣе производитъ парь.

На фигурахъ 55 (а, в, с и d) представлено въ вертикальномъ и горизонтальномъ разрѣзахъ расположеніе дымогарной печи Ферберна, для котла высокаго давленія.

Котель устроенъ съ двумя внутренними пламенными трубами, въ конхъ помѣщаются отдѣльныя точки.

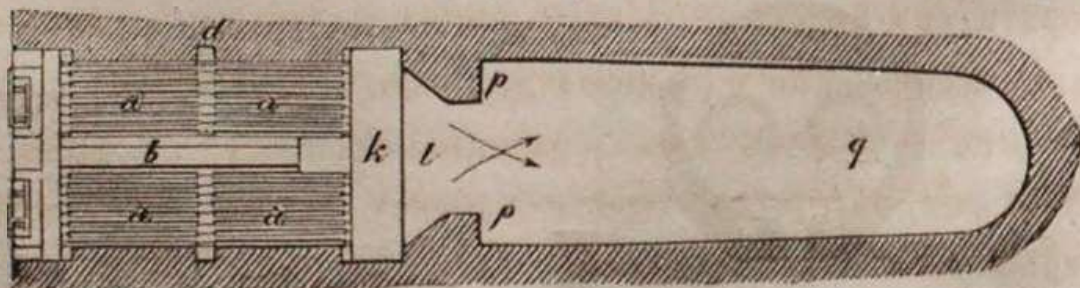


Фигура 55.



Когда печь и котель въ ходу, пламя и горючіе газы, проходя съ рѣшетокъ *D* и *D'*, идутъ по трубамъ *B* и *B'*, соединяются въ *C* и потомъ идутъ по боковому ходу *G*, при чемъ происходитъ горѣніе газовъ и дыма. Отсюда продукты горѣнія, болѣе или менѣе совершеннаго, проходятъ подъ котломъ по каналу *H*, далѣе по другому боковому ходу *F* и наконецъ черезъ *K* въ дымовую трубу. Известно, что во время прибавленія въ печь свѣжаго горючаго матеріала отдѣляется много дыма, который не сгорѣвшимъ улетаетъ въ дымовую трубу. При описанномъ устройствѣ печи, дымъ, выдѣляющійся съ одной рѣшетки вълѣдствіе нагруженія ея топливомъ, сожигается пламенемъ, идущимъ съ другой рѣшетки, на которой въ это время топливо совершенно разгорѣлось. Вълѣдствіе сгорания дыма отдѣляется теплота, которая обращается здѣсь на произведеніе пара и которая при обыкновенномъ устройствѣ печей, оставаясь не развитою, улетаетъ бесполезно въ трубу.

Съ цѣлю воспользоваться этою теплотою на большемъ протяженіи поверхности котла, обогрѣваемой горячими газами, Фербернъ сдѣлалъ въ описанномъ сейчасъ устройствѣ печи нѣкоторое измѣненіе, состоящее въ томъ, что встрѣча пламени и дыма происходятъ ранѣе, какъ видно на фигурѣ 56, и именно въ пространствѣ между *l* и *q*. Здѣсь пламя, дѣйствуя отъ вліянія выступовъ *p* и *p'* крестообразно на дымъ, сжигаетъ его, при чемъ выдѣляется еще нѣкоторое



фигура 56.



количество теплоты. Въ изображенномъ устройствѣ печи, пламя, пройдя подъ котломъ, входитъ въ пламенную трубу и, дойдя до передней ея части, раздѣляется на два тока по обѣимъ сторонамъ котла и потомъ уже вылетаетъ въ дымовую трубу.

Очевидно, что при порядочномъ надзорѣ за топками, которыя попеременно слѣдовали бы одна за другой, печь подобнаго рода можетъ дать весьма выгодные результаты. Мы не имѣемъ точныхъ свѣдѣній относительно полезнаго дѣйствія этихъ дымогарныхъ топокъ Ферберна; но можно сказать, что въ этомъ отношеніи, т. е. въ отношеніи болѣе совершеннаго выдѣленія теплоты, доставляемой горѣніемъ, котлы дымогарные Ферберна должны по всей вѣроятности дать выгоднѣйшіе результаты.

§ 71. Изъ этого перечня котловъ высокаго давленія слѣдуетъ, что всѣ они раздѣляются на двѣ существенно различующія между собою группы: *котлы съ кипятилниками* и *котлы безъ кипятилниковъ*.

Не смотря на то, что первые, при ихъ появленіи въ свѣтъ, были всеми приняты за наилучшіе и, вслѣдствіе заранѣе составленной репутаціи о нихъ, вошли почти во всеобщее употребленіе, особенно во Франціи, эти котлы однакожь далеко не представляютъ тѣхъ выгодъ, какія отъ нихъ ожидали. Правда, что самый котель можетъ служить гораздо дольше, потому что дѣйствію высокой температуры подвергаются только одни кипятилники и, если сіи послѣднія перегорятъ, они могутъ быть легко замѣнены другими, съ меньшими издержками и съ незначительною передѣлкою въ печи. Но при большемъ ихъ, сравнительно говоря, объемѣ и всеѣ они обходятся дороже противу котловъ безъ кипятилниковъ; парообразование въ нихъ идетъ медленно и вслѣдствіе неравномѣрнаго расширенія различныхъ частей



котла крѣпость печи страдаетъ отъ появленія трещинъ, требующихъ частыхъ починокъ. Рѣшительное преимущество котловъ Ферберна предъ этими котлами состоитъ въ томъ, что печная кладка сохраняется гораздо дольше, при всѣхъ обстоятельствахъ дѣйствія тонки; котель скорѣе и больше производитъ пара. Одинъ недостатокъ, по которому иногда обѣгаютъ котлы Ферберна, есть тотъ, что они при одинаковыхъ прочихъ обстоятельствахъ требуютъ большую толщину стѣнокъ и поэтому обходятся дороже. Можетъ быть также не безъ основанія и то замѣчаніе, что по трудности построения котловъ Ферберна многіе котельные фабриканты неохотно берутся за постройку ихъ и часто отговѣтываютъ ихъ употребленіе.

Съ цѣлю опредѣлить сравнительное достоинство котловъ съ кипятилниками и безъ кипятилниковъ въ отношеніи расходовъ топлива для одинаковаго полезнаго дѣйствія, строитель машинъ въ Парижѣ Каве (Cavé) произвелъ цѣлый рядъ опытовъ, при различныхъ обстоятельствахъ и при употребленіи разныхъ сортовъ топлива для каждаго случая (\*).

---

(\*) По опытамъ Каве, котлы съ кипятилниками производятъ на 1 квадр. футѣ площади нагрѣва только 4,5 и 3,6 фунтовъ пара, тогда какъ котлы безъ кипятилниковъ могутъ доставлять 8 и даже 9 фунтовъ. Слѣдствіемъ этого есть то, что для полученія такого же количества пара котлы съ кипятилниками должны имѣть почти вдвое большую поверхность нагрѣва противу котловъ безъ кипятилниковъ, и слѣдовательно имѣть почти вдвое больше объема и вѣса. Вотъ въ этомъ-то главное недостоинство котловъ Вульфа и состоитъ, что они всегда обходятся дороже противу котловъ безъ кипятилниковъ при томъ же ихъ полезномъ дѣйствіи.



Результаты опытовъ Каве приводятъ къ тому заключенію, что котлы съ кипяtilьниками вовсе не такъ выгодны, какъ полагали, и что кипяtilьники, которые должны бы составлять самую дѣятельную часть котла, производятъ дѣйствіе ни больше, ни меньше, какъ дѣйствіе *нагрѣвательныхъ трубъ*, въ которыхъ вода, идущая въ котель, предварительно нагрѣвается. Оттого съ нѣкотораго времени многіе строители избѣгаютъ кипяtilьники и вмѣсто ихъ употребляютъ нагрѣвательные трубы. Слабое дѣйствіе разсматриваемыхъ котловъ можно приписать тому, что пары, образующіеся въ кипяtilьникахъ, не успѣваютъ попадать въ паровое пространство котла по малымъ и узкимъ сообщеніямъ ихъ съ котломъ и долгое время остаются въ самыхъ кипяtilьникахъ.

Въ котлахъ съ кипяtilьниками нагрѣвательную поверхность составляютъ нижняя половина котловаго корпуса и поверхность кипяtilьниковъ. Въ котлахъ безъ кипяtilьниковъ, устраиваемыхъ почти всегда съ внутренними дымовыми ходами, поверхность нагрѣва двоякая: одна внѣшняя— часть котловаго корпуса, подверженная дѣйствію пламени, другая внутренняя — поверхность пламенныхъ ходовъ, устроенныхъ внутри котла.

Котламъ высокаго давленія придаютъ всегда форму *наибольшаго сопротивленія*, т. е. фѳрму цилиндрическую, съ полушаровыми концами. Такъ устроиваются всегда котлы съ кипяtilьниками; но въ котлахъ съ внутренними дымовыми ходами концы рѣдко бываютъ шаровые, потому что внутреннія цилиндрическія трубы (пламенные ходы), будучи склепаны съ плоскими концами котла, доставляютъ имъ значительную крѣпость для сопротивленія давленію на нихъ пара.



Обыкновенно число пламенныхъ ходовъ внутри котла бываетъ одинъ или два, рѣдко три. Два пламенныхъ хода устраиваются тогда, если одинъ ходъ представляетъ недостаточную поверхность нагрѣва для данной испаряемости котла, требуемой силою машины. Употребленіе двухъ пламенныхъ ходовъ представляетъ ту выгоду, что при нихъ разстояніе между нормальною высотой уровня воды въ котлѣ и дымовыми ходами больше, нежели при одномъ ходѣ, и поэтому менѣе опасности при пониженіи горизонта воды въ котлѣ.

Вообще котлы съ двумя внутренними ходами предпочитаются котламъ съ однимъ ходомъ потому, что ихъ поверхность нагрѣва больше и устройство прочнѣе; также уровень воды подъ поверхностію ходовъ выше и точка можетъ въ нихъ попеременно смѣняться.

Употребленіе внутреннихъ топокъ въ котлахъ сопряжено всегда съ тѣмъ обстоятельствомъ, что по малой тонкѣ держать въ горнѣ сильный жаръ, который болѣе сосредоточивается въ одномъ мѣстѣ и сильно дѣйствуетъ на верхнюю стѣнку дымоваго хода, отчего эта часть котла скоро прогораетъ.

Въ устройствѣ котловъ высокаго давленія для сильныхъ машинъ стараются всегда при возможно меньшемъ діаметрѣ котла соединить всѣ выгоды, представляемыя разными системами котловъ высокаго давленія.

Хорошій котель долженъ быть такъ построенъ, чтобъ онъ не только доставлялъ бы требуемое количество паровъ въ данное время, но чтобы это условіе было выполняемо при возможно наименьшемъ его объемѣ и меньшей стоимости его построения. Отъ устройства котла и выбора его системы зависитъ *испарительная способность* котла,



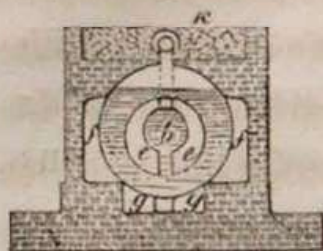
т. е. количество пара, испаряемое на единицу площади нагрѣва, въ единицу времени; чѣмъ совершеннѣе котель, тѣмъ болѣе онъ долженъ образовать паровъ на меньшей площади нагрѣва, и тѣмъ сильнѣе и скорѣе должно быть производство *парообразованія*. Слѣдовательно все стремленіе строителей въ улучшеніи устройства котловъ должно быть основано на этой темѣ, и инженеры, понимающіе существенное достоинство паровыхъ котловъ, заботятся соединить въ ихъ улучшеніи все дознанныя опытомъ благоприятныя явленія.

§ 72. Понимая, въ какомъ отношеніи важно устройство котловъ съ внутренними пламенными ходами, и исправляя существенные недостатки кипяtilьниковъ, нѣкоторые техники напали наконецъ на мысль — проектировать лучшую систему котловъ чрезъ соединенія выгодныхъ сторонъ обѣихъ означенныхъ системъ въ одно цѣлое. Такимъ образомъ въ новѣйшее время мы видимъ котлы высокаго давленія въ одно и то же время и съ кипяtilьниками и съ внутренними ходами, и опытъ убѣждаетъ совершенно, въ какой степени сильно работаютъ подобные паровики. Мы здѣсь представляемъ для примѣра чертежи двухъ паровиковъ, какъ наилучшихъ, одного съ внутреннею топкою, другаго съ внѣшною или обыкновенною.

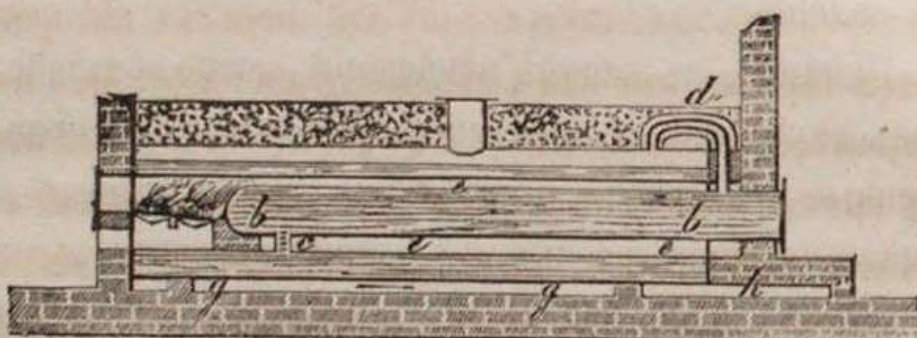
Чертежи 57 и 57 bis представляютъ разрѣзы котла, устроеннаго инженерами Vest и Petterick въ рудникахъ Fowey Console графства Корнваллійскаго. Въ котлѣ устроенъ дымовой ходъ ee, и въ немъ помѣщенъ кипяtilьникъ b. Кипяtilьникъ сообщенъ съ нижнею частію котла трубкою c, а съ верхнею — посредствомъ трубки d. Топка и зольникъ расположены въ пламенномъ ходѣ ee такъ же, какъ и въ предъидущихъ Корнваллійскихъ котлахъ. Пламя



и горячіе газы идутъ сперва по трубѣ ее, окружая кипя-  
 тильникъ в со всѣхъ сторонъ; дошедши до конца трубы,

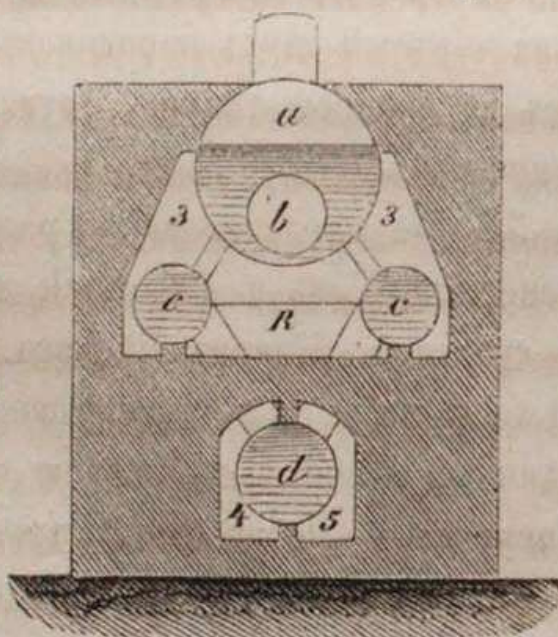


они вступаютъ послѣдовательно въ бо-  
 ковые ходы ff, въ послѣдній дымовой  
 ходъ gg, устроенный подъ котломъ, въ  
 камеру h и дымовую трубу. Въ камерѣ  
 h помещена широкая труба, содержа-  
 щая воду; нагрѣваемая тамъ вода слу-  
 житъ для питанія котла.



Фигура 37.

На чертежѣ 38 представленъ поперечный вертикальный  
 разрѣзъ пароваго котла высокаго давленія, построеннаго не-  
 давно однимъ извѣстнымъ строителемъ машинъ въ Берлинѣ (\*).  
 Этотъ котелъ замѣчателенъ малымъ потребленіемъ топлива и



Фигура 38.

(\*) Wöhlert.



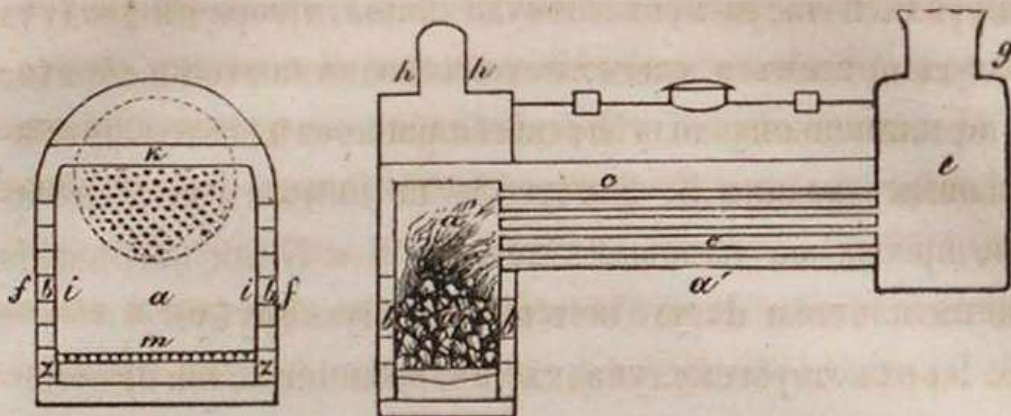
превосходить всѣ прочія системы парообразовательною способностію. Рѣшетка лежитъ въ горизонтальной плоскости при *R* въ передней части печи, откуда пламя и горячій воздухъ идутъ подъ котломъ а взадъ; потомъ поднимаются и обратно идутъ по пламенному ходу *b*; далѣе распредѣляются по обѣимъ боковымъ ходамъ *3*, *3* и текутъ по нимъ въ задъ, и наконецъ, пройдя по дымовымъ ходамъ *4* и *5* для нагрѣванія тамъ кипятивильника *d*, уходятъ въ дымовую трубу.

§ 73. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ употребленіе котла не позволяетъ устраивать каменную кладку для печи, въ которой совершается горѣніе топлива и производится нагрѣваніе котла. Такіе примѣры — паровозы и пароходы. Въмѣстѣ съ отсутствіемъ каменной печной кладки теряется возможность нагрѣвать котель снаружи, т. е. уничтожается внѣшняя нагрѣвательная поверхность котла, и поэтому для достиженія требуемой испаряемости остается увеличивать внутреннюю нагрѣваемую поверхность, т. е. поверхность внутреннихъ пламенныхъ ходовъ, устраиваемыхъ почти всегда въ котлахъ высокаго давленія. При употребленіи одного или двухъ пламенныхъ ходовъ, одна внутренняя поверхность нагрѣва недостаточна, если не увеличивать размѣровъ самаго котла. Но какъ діаметръ котловъ высокаго давленія можетъ быть увеличенъ только до извѣстныхъ предѣловъ, поэтому исключительнымъ средствомъ увеличить поверхность нагрѣва такихъ котловъ остается только одно — увеличить число пламенныхъ ходовъ. Мысль эта, развитая обстоятельствами и временемъ, была основаніемъ къ произведенію *трубчатой системы паровыхъ котловъ*.

Топка въ нихъ помѣщается всегда въ особой коробкѣ, которая для избѣжанія потери теплорода наружу, окружена со всѣхъ сторонъ водою.



На чертежѣ 59 представленъ паровозный котель въ про-  
дольномъ и поперечномъ разрѣзахъ.



фигура 59.

Паровозные котлы состоятъ изъ трехъ частей: цилиндрической части и двухъ коробокъ: топочной *a* и дымовой *e*. въ задней коробкѣ помѣщается горнъ, совершенно погруженный въ воду. Пламя и горячіе газы идутъ съ рѣшетки *m* въ трубки *c, c'*, протянутыя во всю длину котла и занимающія всю его нижнюю полуцилиндрическую половину. Въ дымовой камерѣ *e* устроена искусственная тяга. Пары, кончившіе свое дѣйствіе, выходя изъ паровыхъ цилиндровъ, вылетаютъ въ дымовую трубу *g*, чрезъ узкую трубочку (отъ 2 — 2½ дюймовъ въ діаметрѣ) съ чрезвычайною быстротою и увлекаютъ за собою дымъ, находящійся въ дымовой камерѣ. Отъ этого уменьшается давленіе газовъ въ дымовой камерѣ и свѣжій воздухъ стремится туда чрезъ топочное пространство, такъ какъ постоянное движеніе паровъ и дыма вверхъ по трубѣ лишаетъ всякаго доступа наружнаго воздуха въ дымовую камеру.

Очевидно, что степень разряженія воздуха или уменьшенія плотности газовъ въ дымовой камерѣ зависитъ отъ скорости движенія паровъ изъ трубочки, а эта послѣдняя въ свою очередь измѣняется въ обратномъ отношеніи къ пло-

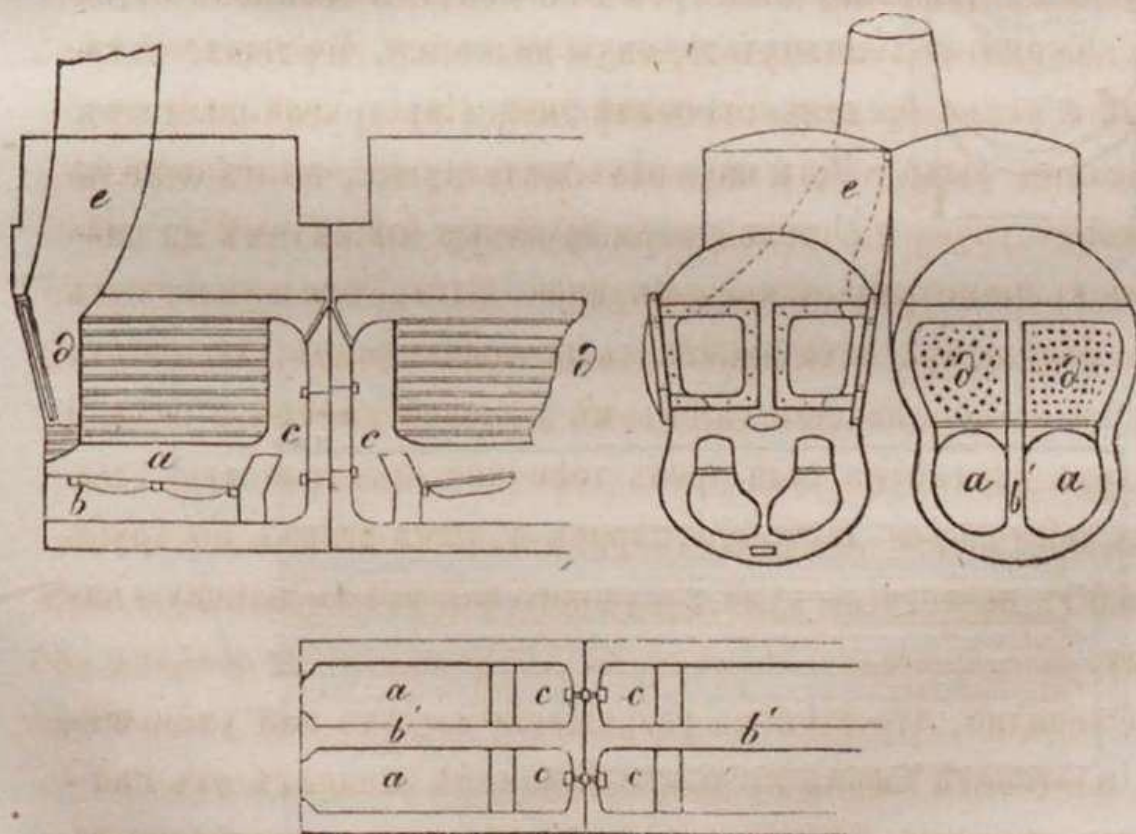


щади ея отверстія, поэтому выходитъ, что тяга въ паровозныхъ трубахъ зависитъ отъ размѣровъ трубочки.

Замѣтимъ, что, выпуская мятые пары, чрезъ узкую трубочку, увеличиваютъ давленіе на паровой поршень со стороны, противоположной дѣйствию пара; на побѣжденіе этого давленія движитель употребляетъ часть работы бесполезно.

Для того, чтобы пары, кончившіе свое дѣйствіе и вылетающіе чрезъ трубочку изъ одного цилиндра, не производили бы вреднаго давленія на поршень другаго, въ нѣкоторыхъ паровозахъ коническую трубочку раздѣляютъ вдоль ея оси перегородкою на двѣ части. Въ другихъ паровозахъ каждая труба, ведущая мятые пары, оканчивается особою коническою трубочкою.

На чертежахъ 60, 60' 60'' представленъ трубчатый ко-

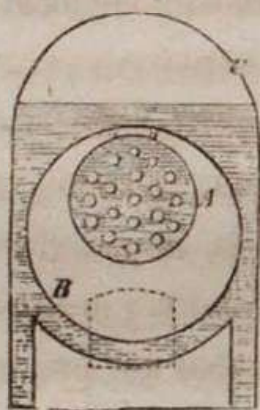


фигура 60.

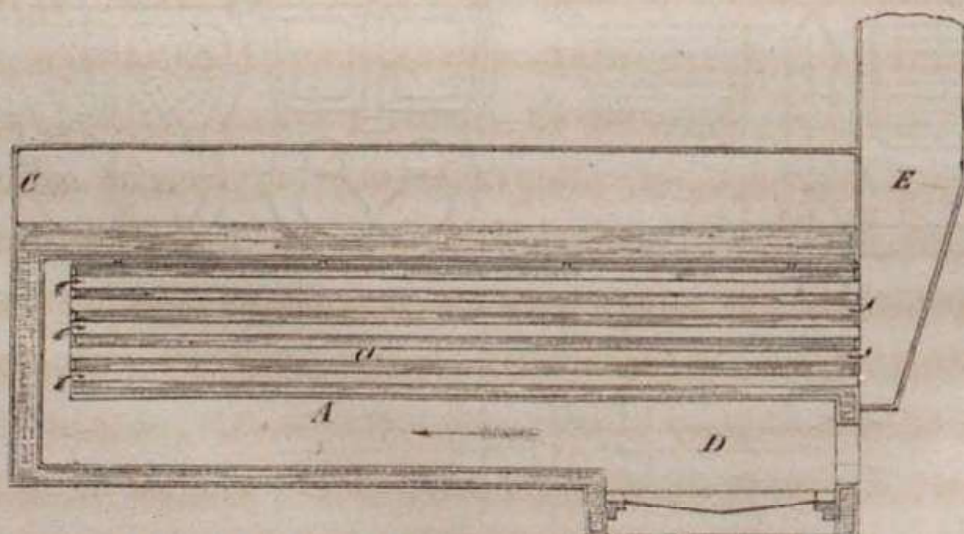


тель, употребляемый на пароходахъ. Обыкновенно на большихъ судахъ, напр. фрегатахъ, устраиваютъ по четыре котла, совершенно одинаковаго устройства, приставленные одинъ къ другому стѣнками такъ, что точка въ нихъ производится съ двухъ противоположныхъ сторонъ. Горнъ а cadaго котла раздѣленъ стѣнкою *b'*, содержащею воду на двѣ части; *b*— зольникъ, *c* — дымовые ходы, *d* — пламенные трубки, *e* — дымовой ходъ, идущій въ общую для четырехъ котловъ дымовую трубу.

Превосходнымъ дѣйствіемъ отличаются такъ называемые *американскіе котлы*, коихъ устройство представлено на фигурѣ 61 въ продольномъ и на фигурѣ 61 bis въ поперечномъ разрѣзѣ. Главную часть такого котла составляетъ цилиндръ *A*, сквозь которій идетъ множество пламенныхъ трубъ *a*, діаметромъ не менѣе 3 дюймовъ. Цилиндръ *A*, какъ видно изъ чертежа, вдѣланъ эксцентрически въ другой цилиндръ *B*, и все это опять вставлено въ котель *C* такой формы, какую мы видимъ на па-



номъ разрѣзѣ. Главную часть такого котла составляетъ цилиндръ *A*, сквозь которій идетъ множество пламенныхъ трубъ *a*, діаметромъ не менѣе 3 дюймовъ. Цилиндръ *A*, какъ видно изъ чертежа, вдѣланъ эксцентрически въ другой цилиндръ *B*, и все это опять вставлено въ котель *C* такой формы, какую мы видимъ на па-

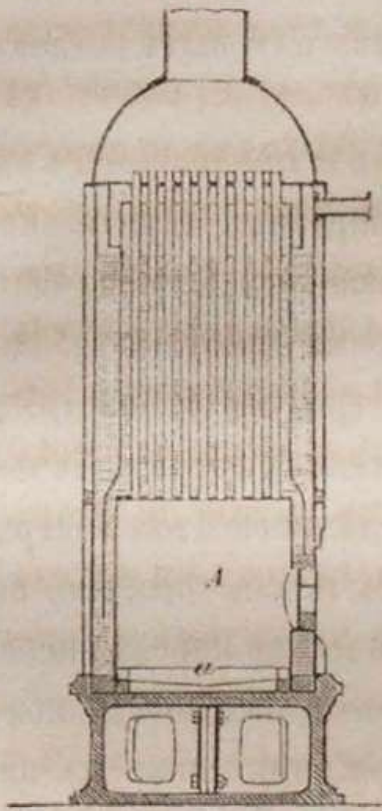


фигура 61.



ровозахъ. Пламя и горячіе газы дѣйствуютъ сперва на внѣшнюю поверхность цилиндра *A* и внутреннюю цилиндра *B*, обращаются потомъ вверхъ, идутъ по пламеннымъ трубамъ *a* и потомъ въ трубу *E*.

Хорошо работаютъ также вертикальные трубчатые котлы, употребляемые на небольшихъ пароходахъ. Въ нихъ горнъ *A* помѣщается въ нижней части котла и оканчивается вверху множествомъ пламенныхъ трубъ, выходящихъ въ дымовую трубу (чертежъ 62) (\*).



фигура 62.

Топливо, горящее на рѣшеткѣ *a*, дѣйствуетъ сперва непосредственно на его стѣны, окруженные водою; горячіе газы проходятъ потомъ черезъ вертикальныя трубки и выходятъ въ дымовую трубу.

Трубки на протяженіи около  $\frac{2}{3}$  ихъ высоты, окружены водою, а выше онѣ погружены въ пары. Такое расположеніе трубокъ способствуетъ *осушенію* паровъ: капли воды, увлекаемая паромъ, прикасаясь къ сильно нагрѣтымъ трубкамъ, немедленно обращаются въ парь.

Вертикальные трубчатые котлы употребляютъ также и для заводовъ; тогда ихъ одѣваютъ кирпичемъ и между кирпичною одеждою и металлическою поверхностію котла дѣлаютъ дымовые ходы.

(\*) Чертежъ этотъ представляетъ устройство котла Замбо (Zambeaux).



Нагрѣвательную поверхность трубчатыхъ котловъ составляютъ: стѣны горна и трубокъ; первыя находятся въ соприкосновеніи съ горящимъ топливомъ и пламенемъ; по трубамъ же пламя проходитъ не угасая или по всему ихъ протяженію, или по нѣкоторой части ихъ длины; далѣе же пламя гаснетъ и трубки на остальномъ протяженіи обогрѣваются только горячими газами.

#### IV. ВОПРОСЫ, ПРИНАДЛЕЖАЩІЕ УСТРОЙСТВУ ПАРОВЫХЪ КОТЛОВЪ.

§ 74. *Испарительная способность и поверхность нагрѣва паровыхъ котловъ.* Всякій паровикъ, предназначенный доставлять пары для паровой машины, долженъ быть въ состояніи приготовить въ данное время требуемое количество паровъ, т. е. долженъ имѣть требуемую *испаряемость*. Эта послѣдняя зависитъ отъ степени нагрѣванія поверхности котла и увеличивается съ величиною этой поверхности въ прямомъ содержаніи. Стало бытъ для того, что бы котель могъ доставлять требуемое количество паровъ, необходима достаточная для этого *поверхность нагрѣва*, подверженная наибольшему дѣйствию жара, такъ какъ въ паровыхъ котлахъ нагрѣвательная поверхность не вся испытываетъ одинаковое дѣйствіе жара: одна часть бываетъ подвержена *прямому* дѣйствию пламени, существующему въ печи, другая обогрѣвается уже потухшими горячими газами. Въ первомъ случаѣ часть всей поверхности котла называютъ *прямою поверхностію* нагрѣва котла; во второмъ—не прямою. Прямая поверхность нагрѣва котла получаетъ тепло родъ вслѣдствіе отраженія, не прямая—черезъ теплопроводность. Эта неодинаковость въ степени нагрѣванія произво-



дить неодинаковость и въ паропроизводительности. Вообще полагають, впрочемъ не безъ основаній, что, при одинаковой поверхности и при одинаковыхъ прочихъ обстоятельствахъ, теплота, воспринимаемая прямою нагрѣваемой поверхностію, въ четыре и даже въ пять разъ болѣе теплоты, передаваемой горячими газами. Поэтому, чтобы испарительная способность котла производила требуемое количество паровъ въ данное время, котель долженъ имѣть достаточную прямую поверхность нагрѣва, потому что только эта поверхность можетъ передать водѣ достаточное количество теплорода для обращенія ея въ паръ; стѣнки же, обогрѣваемые только горячими газами, слабо производятъ испареніе воды и не должны быть принимаемы за поверхность нагрѣва.

Если единица площади поверхности металла известной толщины производитъ известное, определенное опытами, количество  $n$  паровъ, или, правильнѣе, испаряетъ известное количество воды  $n$  (по вѣсу) въ единицу времени, напр. въ 1 часъ, а котель долженъ готовить на примѣръ  $S$  фунтовъ пара въ секунду, то *площадь нагрѣва* его будетъ

$$G = \frac{3600 S}{n} \dots \dots \dots (92)$$

Вслѣдствіе указаній опыта можно съ достовѣрностію принять, что количество воды, испаряемой въ котлѣ въ единицу времени на единицу площади нагрѣваемой поверхности, не зависитъ отъ упругости пара, приготовляемаго въ котлѣ, такъ что одинъ и тотъ же котель, какой бы ни былъ упругости образующійся въ немъ паръ, производитъ одно и то же количество паровъ.

Различныя системы паровыхъ котловъ отличаются между собою между прочимъ тѣмъ, что съ постепеннымъ измѣненіемъ ихъ устройства достигается все большая и большая



поверхность нагрѣва при возможно меньшемъ объемѣ котла. Вслѣдствіе этихъ-то измѣненій разные котлы и производятъ не одинаковое количество пара на единицу нагрѣваемой поверхности. Изъ сравненія между собою котловъ разныхъ системъ можно видѣть, что тѣ изъ нихъ, въ которыхъ соприкасаніе массы воды съ нагрѣваемой поверхностью котла происходитъ въ большей степени, парообразование происходитъ сильнѣе, и поэтому каждая единица поверхности нагрѣва доставляетъ большее количество паровъ противу другихъ случаевъ.

Въ этомъ отношеніи трубчатые котлы превосходятъ всѣ прочіе: въ нихъ масса воды раздѣлена множествомъ пламенныхъ трубъ на самые малые слои, такъ что передача теплоты водѣ совершается во всей массѣ одновременно, и оттого парообразование въ нихъ бываетъ скоро и сильно. Напротивъ того всѣ другіе котлы производятъ пары тѣмъ медленнѣе и тѣмъ въ меньшемъ количествѣ, чѣмъ не такъ одновременно производится нагрѣваніе воды во всей массѣ, хотя и принадлежащей поверхности нагрѣва. Возьмемъ для примѣра сундучные котлы Уатта низкаго давленія. Въ нихъ нагрѣваются непосредственно отъ стѣнокъ котла только тѣ слои воды, которые прилегаютъ къ нагрѣвательнымъ поверхностямъ котла; масса же нагрѣвается или чрезъ теплопроводность или чрезъ движеніе, происходящее отъ того, что нагрѣтые слои, находящіеся внизу котла, поднимаются по сравнительной своей легкости вверхъ, въ то время, какъ холодные и слѣдовательно болѣе тяжелые опускаются на дно и въ свою очередь опять нагрѣваются. Очевидно, что такая передача теплоты не можетъ совершаться быстро и вся масса, находящаяся въ котлѣ, не можетъ въ одно время быть въ одинаковомъ состояніи и производить паръ едино-



временно во всѣхъ слояхъ. Отъ того парообразование въ подобныхъ котлахъ бываетъ далеко не такъ быстро и въ такомъ количествѣ, какъ въ трубчатыхъ котлахъ.

Изъ всѣхъ трубчатыхъ котловъ только надъ паровозными сдѣланы были, впрочемъ уже давнія, наблюденія съ цѣлю опредѣлить ихъ *испарительную способность*; для другихъ же котловъ этой системы не опредѣлены съ точностію ни ихъ испарительная способность, ни количество потребляемаго топлива, такъ что эти обстоятельства, составляющія необходимыя данныя при построеніи котловъ, до сихъ еще поръ остаются неопредѣленными. Поэтому, не имѣя никакихъ точныхъ данныхъ для нѣкоторыхъ, даже многихъ системъ паровыхъ котловъ, остается догадываться о степени напр. испарительной способности этихъ котловъ и другихъ условіяхъ, только вслѣдствіе сравненія проектируемаго устройства котла съ тѣми (одной только системы), которые уже изучены отчетливо и изслѣдованы достаточнымъ числомъ наблюденій.

§ 75. Независимо отъ системы котла количество пара, образующагося на единицѣ площади нагрѣваемой поверхности, зависитъ еще *отъ способа сжиганія* топлива. Опыты, произведенные англійскимъ инженеромъ Уикстидомъ (Wicksteed) надъ сожиганіемъ топлива въ печахъ паровыхъ котловъ, дали между прочимъ слѣдующій замѣчательный результатъ:

Способъ сжиганія горючаго материала.	Количество угля, сжигаемаго на 1 квадрат. футъ рѣшетки въ 1 часъ.	Вѣсъ воды, испаряемой 1 фунтомъ каменнаго угля.	Вѣсъ воды, испаряемой на 1 квадрат. футъ площади на грѣва въ 1 часъ.
Скорое горѣніе.	3,15	8,55	10,15
Медленное.	3,00	8,42	5,5



Этотъ фактъ ясно приводитъ къ заключенію, что медлен-  
ное горѣніе топлива не даетъ выгоднѣйшихъ результатовъ,  
и потому именно, что при скоромъ сгораніи топлива, вслѣд-  
ствіе сильной тяги воздуха, пламя пробѣгаетъ по всей по-  
верхности котла, предназначенной для нагрѣванія, не уга-  
сая, и слѣдовательно производитъ испареніе на всей нагрѣ-  
ваемой поверхности котла.

Напротивъ того при медленномъ горѣніи пламя уже само  
по себѣ не можетъ быть сильно; температура горѣнія не  
можетъ быть высока, потому что скорость тяги незначи-  
тельна, и пламя, не будучи сильно раскалено, скоро гас-  
нетъ и не нагрѣваетъ всей поверхности, которая была при-  
нята въ расчетъ вся одинаково дѣятельною въ процессѣ  
парообразованія.

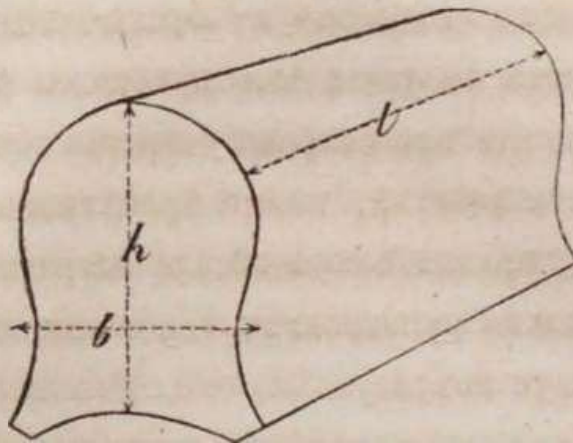
§ 76. Большая часть котловъ, при извѣстныхъ размѣрахъ,  
представляетъ соотвѣтственную ихъ устройству поверх-  
ность нагрѣва, такъ что для каждой системы паровыхъ кот-  
ловъ существуетъ нѣкотораго рода зависимость между по-  
верхностію нагрѣва и размѣрами котла. Руководствуясь  
этимъ, можно для всякаго рода паровыхъ котловъ опредѣ-  
лить постоянныя отношенія между означенными обстоятель-  
ствами для того, чтобы по заданной площади поверхности  
нагрѣва можно было бы найти такіе размѣры котла, при ко-  
торыхъ бы онъ могъ удовлетворять требуемой испаряемости.

Такимъ образомъ Вейсбахъ въ его «*Ingenieur*» представ-  
ляетъ отношеніе между площадью нагрѣваемой поверхности  
сундучнаго котла (Уатта) и его размѣрами слѣдующимъ урав-  
неніемъ:

$$G = bl + 1, 2 (b + l) h. . . . . (93)$$

Принимая, какъ бываетъ въ большей части случаевъ,  
 $b = \frac{3}{4} h$  и  $l = \frac{5}{2} h$  (до 3 h)





Фигура 63.

получимъ:

$$h = 0,416 \sqrt{G}, \quad b = 0,314 \sqrt{G}, \quad l = 1,040 \sqrt{G}.$$

Для цилиндрическаго котла высокаго давленія съ кипя-  
тильниками, поверхность нагрѣва имѣетъ слѣдующую вели-  
чину:

$$G = \frac{1}{2} \pi D L + \frac{3}{4} \pi d l n, \dots \dots \dots (94)$$

называя  $D$  и  $L$  діаметръ и длину котла,  $d$  и  $l$  діаметръ  
и длину кипятильниковъ,  $n$  число ихъ. Обыкновенно  
 $n = 2$ ,  $d = 0,4 D$  и  $l = L = 3 D$ ; поэтому, выражая  
въ радіусахъ,  $G = 26 \pi R^2$ , и слѣдовательно

$$R = \sqrt{\frac{G}{26\pi}} = 0,1106 \sqrt{G}$$

$$r = 0,04424 \sqrt{G}.$$

При отысканіи входящихъ въ уравненіе (94) размѣровъ  
котла и кипятильниковъ, по заданной площади нагрѣваемой  
поверхности, можно руководствоваться слѣдующими данны-  
ми: кипятильники дѣлаются обыкновенно діаметромъ отъ  
1 до  $1\frac{1}{2}$  фута и одинаковой длины съ котломъ; діаметръ  
котла рассчитывается по сопротивленію, которое стѣнки кот-  
ла должны представлять давленію пара. Такимъ образомъ  
для упругости пара въ 6 атмосферъ, какъ наибольшей допу-  
скаемой постановленіями нашего правительства, діаметръ  
котла при толщинѣ стѣнокъ  $\frac{1}{2}$  дюйма не долженъ быть бо-



лѣе  $3\frac{1}{2}$  футъ. Такъ какъ съ увеличеніемъ діаметра котла возрастаетъ давленіе пара на его стѣнки и вмѣстѣ съ тѣмъ сила, разрывающая котель, поэтому по мѣрѣ увеличенія діаметра котла должна увеличиваться толщина стѣнокъ. Но въ практикѣ не употребляютъ при постройкѣ котловъ желѣза, котораго толщина превосходила бы  $\frac{1}{2}$  дюйма, исключая самыхъ рѣдкихъ случаевъ; кромѣ того слишкомъ толстые листы медленно передаютъ теплоту и не могутъ быть дѣйственными частями котла. Число кипяtilьниковъ опредѣляется устройствомъ котла.

Такія же соображенія могутъ руководствовать при опредѣленіи размѣровъ котла высокаго давленія безъ кипяtilьниковъ съ внутренними пламенными ходами.

Называя подобно предыдущему  $R$  и  $L$  радіусъ и длину котла,  $r$  и  $l$  радіусъ пламенныхъ ходовъ,  $n$  число ихъ, будемъ имѣть для выраженія площади нагрѣваемой поверхности цилиндрическаго котла безъ кипяtilьниковъ

$$G = \pi RL + n \pi r l \dots (95)$$

Въ трубчатыхъ котлахъ поверхность нагрѣва можетъ быть выражена слѣдующимъ уравненіемъ:

$$G = A + n \frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{3} \dots (96)$$

въ которомъ  $A$  поверхность горна,  $d$  діаметръ пламенныхъ трубъ,  $l$  длина, и  $n$  число ихъ. Обыкновенно считаютъ, что поверхность пламенныхъ трубъ должна быть въ три раза больше противу поверхности стѣнокъ горна, для того, чтобы произвести такое же количество пара. И это потому, что поверхность горна вся подвержена непосредственному дѣйствію пламени, между тѣмъ, какъ въ пламенныхъ трубахъ пламя пробѣгаетъ иногда не по всей длинѣ ихъ, а только по нѣкоторой части.



Изъ этого разсужденія составляютъ впрочемъ исключеніе вертикальные трубчатые котлы (фигура 62), въ которыхъ, во всякомъ уже случаѣ, часть трубъ, погруженныхъ въ воду, подвержена дѣйствию пламени.

Котлы съ внутренними топками, по величинѣ ихъ діаметра, не могутъ быть употребляемы для приготовленія паровъ высокаго давленія (5 — 6 атмосферовъ), потому что въ нихъ внутренніе пламенные ходы не могутъ быть менѣе 30—24 дюймовъ; а это обстоятельство требуетъ діаметръ котла не менѣе 6 футъ.

При діаметрѣ пламеннаго хода менѣе 24 дюймовъ, топка выходитъ весьма недостаточною по величинѣ нагрѣваемой поверхности котла, при извѣстныхъ его размѣрахъ. Поэтому можно принять, что для котловъ съ внутренними топками діаметръ котла не можетъ быть менѣе 6 и при двухъ топкахъ менѣе 5 футъ, что соотвѣтствуетъ при толщинѣ стѣнокъ котла въ  $\frac{1}{2}$  дюйма упругости пара только въ 3 —  $3\frac{1}{2}$  атмосферы.

Во всѣхъ паровикахъ, нагрѣваемыхъ только внутри, какъ напр. пароводныхъ, или паровозныхъ, діаметръ котла не имѣетъ никакого соотношенія къ поверхности нагрѣва, и эта послѣдняя можетъ измѣняться въ одномъ и томъ же котлѣ, смотря по обстоятельствамъ, безъ всякаго измѣненія главныхъ размѣровъ.

Въ пароводныхъ котлахъ низкаго давленія (фигура 47) площадь поверхности нагрѣва измѣняется съ длиною всего пламеннаго хода  $b$ ,  $b$  и можетъ быть уменьшена, или увеличена при тѣхъ же размѣрахъ котла уменьшеніемъ или увеличеніемъ длины пламенныхъ оборотовъ. Въ трубчатыхъ котлахъ поверхность нагрѣва можетъ быть измѣнена по произволу увеличеніемъ или убавленіемъ числа пламенныхъ тру-



бокъ. Такимъ образомъ какой нибудь напр. паровозный котель, оставаясь при однихъ и тѣхъ же главныхъ своихъ размѣрахъ, можетъ быть принаровленъ для приготовления разнаго количества паровъ и устроенъ для производства разныхъ работъ. Если по опыту окажется, что онъ производитъ при обыкновенной тягѣ слишкомъ много паровъ, такъ что они не израсходываются въ цилиндрахъ въ данное время, то можно уменьшить его площадь нагрѣва, вынувъ одинъ или два ряда пламенныхъ трубъ и ослабить этимъ испарительную его способность; точно также при недостаточной испаряемости котла стоитъ только вставить нѣсколько трубокъ и этимъ увеличить площадь его нагрѣва; для этого нужно будетъ только повысить уровень воды въ котлѣ на нѣсколько дюймовъ и нѣсколько стѣснить паровое пространство котла. Хотя эти измѣненія испарительной способности трубчатыхъ котловъ могутъ быть сдѣланы не въ большихъ предѣлахъ, все-таки возможность произвести эти измѣненія бываетъ весьма большой важности, особенно для котловъ, назначенныхъ производить неодинаковыя работы. Обыкновенно паровознымъ котламъ не даютъ больше  $4\frac{1}{2}$  футовъ въ диаметрѣ, и поверхность нагрѣва въ разныхъ случаяхъ измѣняется числомъ пламенныхъ трубъ и длиною ихъ, сообразно съ количествомъ полезной работы, которую паровозъ долженъ доставить въ нѣкоторыхъ обстоятельствахъ.

§ 77 *Количество воды, уносимой парами изъ котла въ цилиндръ.* Наблюденія показываютъ, что во время дѣйствія машины вмѣстѣ съ паромъ уносится въ цилиндръ нѣкоторая часть воды въ видѣ капель, не обращенныхъ еще въ парь. Слѣдуя за паромъ во всеѣ средине, вода въ капельномъ видѣ не производитъ никакого полезнаго дѣйствія, какъ движитель, а между тѣмъ уноситъ съ собою теплородъ, кото-



рый теряется безъ всякой пользы. Количество воды, уносимой парами, въ разныхъ котлахъ не одинаково: оно зависитъ главнымъ образомъ отъ величины пространства, оставляемаго въ котлѣ для скопленія паровъ, и отъ способа выхода пара изъ котла въ цилиндръ.

Предположимъ, что упругость пара въ котлѣ поддерживаютъ постоянною во все время дѣйствія машины, а масса паровъ, расходуемыхъ цилиндрами при каждомъ размахѣ поршня, довольно умѣренна въ сравненіи съ полнымъ объемомъ пара въ котлѣ и равна массѣ паровъ, вновь въ немъ образующихся.

Тогда испареніе должно совершаться съ возможно большимъ спокойствіемъ, и пары будутъ поднимать съ собою въ капельномъ видѣ наименьшее количество воды. Напротивъ, если упругость паровъ въ котлѣ подвержена колебаніямъ и свободная поверхность, чрезъ которую пары выходятъ изъ воды, незначительна, то и при умѣренномъ расходѣ паровъ, равномъ ихъ притоку, процессъ испаренія будетъ совершаться неспокойно, и тѣмъ неспокойнѣе, чѣмъ между большими предѣлами будутъ совершаться колебанія въ упругости паровъ и чѣмъ меньше будетъ свободная поверхность воды.

Когда упругость паровъ подвержена колебаніямъ, то при всѣхъ прочихъ одинаковыхъ обстоятельствахъ стремленіе паровъ отдѣлиться отъ воды должно измѣняться. Слѣдовательно количество паровъ, отдѣляющихся отъ воды въ равные элементы времени, будутъ не равны между собою, и отъ этого спокойствіе испаренія будетъ нарушаемо. Выгода, представляемая большою свободною поверхностію воды, состоитъ въ томъ, что парообразование въ этомъ случаѣ будетъ спокойнѣе, пары выдѣляются изъ воды съ меньшею



быстротою и потому менѣе воды будутъ уносить съ собою въ приѣмники.

Если испаряемость въ котлѣ постоянна, что происходитъ отъ одинаковой степени жара, поддерживаемаго въ печи, тогда *паровое пространство* котла вмѣщаетъ постоянно одинаковое количество паровъ и отъ того упругость пара въ котлѣ сохранится постоянною во все время производства работъ.

Въ котлахъ постоянныхъ машинъ количество воды, уносимой парами въ капельномъ состояніи, бываетъ около  $\frac{1}{20}$  всего объема расходуемой воды.

Отъ паровозныхъ котловъ требуется, чтобы они при ихъ небольшомъ объемѣ и всѣхъ доставляли возможно наибольшее количество паровъ; этому же условію подвергаются и котлы, устраиваемые на небольшихъ пароходахъ, въ которыхъ по недостатку мѣста прибѣгаютъ къ выбору машинъ высокаго давленія. Слѣдовательно подобные котлы при маломъ ихъ объемѣ и при малой вмѣстимости паровъ должны имѣть сильную испаряемость и представлять возможно наибольшую поверхность нагрева. Отъ этого эти котлы терпятъ и всѣ недостатки, сопряженные съ ихъ усиленною испаряемостію: парообразование въ нихъ происходитъ сильно; паръ съ быстротою выдѣляется изъ воды, которая поэтому находится постоянно въ сильномъ волненіи и во множествѣ уносится съ паромъ. Въ паровозныхъ котлахъ потеря воды въ капельномъ состояніи составляетъ, по опытамъ Ле-Шателье (*Le Chatelier*), отъ 0,3 до 0,4 всего объема расходуемой воды.

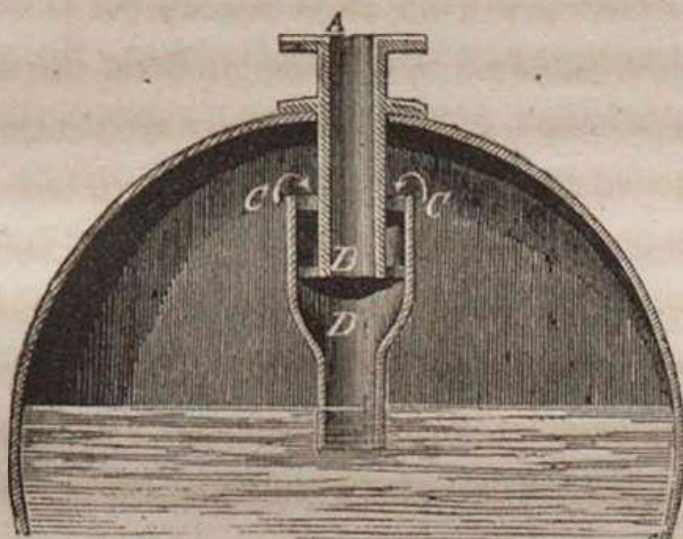
Въ котлахъ, имѣющихъ малую точку, замѣтно такое же явленіе: огонь въ нихъ держится постоянно сильный, и образование пара совершается при сильномъ кипѣніи воды,



которая въ большомъ количествѣ уносится изъ котла вмѣстѣ съ паромъ.

Для того, чтобы увлеченіе воды парами сдѣлать по возможности меньшимъ на всѣхъ котлахъ, особенно высокаго давленія, устраиваютъ особый резервуаръ для паровъ въ видѣ купола. Пары, поднимаясь въ него, оставляютъ въ котлѣ часть капельной воды, которая не успѣваетъ за ними слѣдовать, и, по большей тяжести оседаая внизъ, падаютъ обратно въ котель.

Наилучшее устройство пароприемной трубы, при которомъ паръ могъ бы вступать въ паропроводныя трубы по возможности сухимъ, представлено на фигурѣ 66.



фигура 66.

Къ нижнему концу паропроводной трубы *AB* присоединена широкая труба *CCD*, которая опускается ниже уровня воды въ котлѣ. Такъ какъ при *CC* паръ измѣняетъ свое направленіе во время движенія его въ трубѣ *A*, капельная вода, увлекаемая паромъ, падаетъ, если не вся, то по крайней мѣрѣ большая ея часть, внизъ.

Въ паровозахъ, при ихъ сильномъ и скоромъ парообразованіи даже и при употребленіи купола, количество воды,



уносимой парами, все-таки бываетъ значительно. Опыты Памбура и позднѣйшія наблюденія служатъ тому ясными доказательствами.

Желая уменьшить эту потерю, нѣкоторые извѣстные строители паровозовъ изыскивали другія средства.

Все ихъ улучшенія въ этомъ отношеніи основываются на той мысли, чтобы паръ, при выходѣ его изъ котла, пропускать сквозь множество мелкихъ отверстій, устроенныхъ въ приборѣ, выпускающемъ паръ изъ котла.

Масса пара, раздѣляясь такимъ образомъ на множество отдѣльныхъ струй, не можетъ увлекать съ собою капельной воды, которая неминуемо оседаетъ на края и стѣнки выпускнаго прибора. На этой мысли основано между прочимъ устройство регистра или задвижки Борсига (Borsig) въ паровозахъ. Въ новѣйшее время эта прекрасная мысль такъ развита, что ее нашли единственнымъ средствомъ для уменьшенія потери воды, уносимой парами въ капельномъ состояніи. Извѣстный инженеръ Крамптонъ (Crampton) въ недавно устроенныхъ имъ паровозахъ вовсе не употребляетъ купола, а вмѣсто его выпускаетъ паръ изъ котла въ паропроводную трубу *черезъ узкія щели*, сдѣланныя въ трубѣ на всемъ ея протяженіи.

Въ вертикальныхъ трубчатыхъ котлахъ, какіе устраиваютъ на небольшихъ пароходахъ, *осушеніе паровъ*, т. е. освобожденіе ихъ отъ капельной воды, производится дѣйствіемъ нагрѣтыхъ трубокъ, чрезъ которыя проходятъ пламя и горячіе газы и которые около двухъ третей ихъ высоты окружены водою, а выше погружены въ пары. Водяныя капли, поднятыя парами, проходя между верхними частями трубокъ, обращаются въ пары. Такое превосходное дѣйствіе нагрѣтыхъ трубокъ даетъ возможность получать



пары столь сухіе, какъ это только возможно, и потому котламъ этимъ открылось въ короткое время обширное примѣненіе къ машинамъ высокаго давленія.

Замѣтимъ здѣсь еще, что по причинѣ потери воды въ капельномъ состояніи, при опредѣленіи размѣровъ пароваго котла для данной паровой машины, величину испаряемости паровика, вычисленную помощію формулы (39), надлежитъ увеличивать, такъ что дѣйствительная испаряемость котла  $S'$  должна быть

$$\text{для паровозовъ отъ } \frac{S}{0,8} \text{ до } \frac{S}{0,83} \text{ и}$$

$$\text{для постоянныхъ машинъ } \frac{S}{0,93}.$$

§ 78. *Измѣняющаяся испаряемость паровыхъ котловъ.* Всякій паровикъ, какой бы онъ ни былъ системы, можетъ быть назначенъ или для производства одной и той же работы, или разныхъ работъ, смотря потому, остается ли сопротивленіе, преодолеваемое машиною, одинаковымъ во все время ея дѣйствія, или измѣняется. Мы видѣли уже въ своемъ мѣстѣ, что съ измѣненіемъ полезнаго сопротивленія, преодолеваемого машиною, измѣняется дѣйствіемъ нарочныхъ для этого механизмовъ иногда упругость, а иногда количество паровъ, расходуемое въ паровомъ цилиндрѣ, иногда же то и другое вмѣстѣ. Первое бываетъ въ машинахъ безъ расширенія, второе и третіе въ машинахъ, въ которыхъ паръ дѣйствуетъ и полною упругостію и расширеніемъ. Разсмотримъ теперь, какимъ образомъ измѣняется въ паровыхъ котлахъ величина ихъ испаряемости, т. е. количество пара, приготовляемое котломъ, и упругость его.

Такъ какъ только та часть нагрѣваемой поверхности пароваго котла производитъ надлежащее парообразованіе, которая подвержена непосредственному дѣйствію пламени,



стало быть величина площади нагрѣва зависитъ главнымъ образомъ отъ того, на какое пространство дѣйствуетъ пламя, представляющее наибольшую степень раскаленія газовъ.

Съ другой стороны дѣйствіе пламени въ процессѣ парообразованія тѣмъ сильнѣе, чѣмъ выше его температура, и слѣдовательно чѣмъ больше разность между температурами, дѣйствию которыхъ подвержены обѣ стороны нагрѣваемого котла, такъ что степень парообразованія находится еще въ тѣсной связи съ температурою пламени. А такъ какъ въ свою очередь то и другое, т. е. и пространство, пробѣгаемое пламенемъ, и температура его, зависятъ отъ быстроты втеканія воздуха въ печь, и слѣдовательно отъ количества втягиваемаго къ мѣсту горѣнія свѣжаго воздуха, поэтому окончательно выходитъ, что испаряемость котла находится въ зависимость отъ *тяги*, или скорости движенія газовъ въ дымовой трубѣ. На этомъ основаніи въ печахъ паровыхъ котловъ, которые должны доставлять пары для машины иногда въ большемъ, иногда въ меньшемъ количествѣ, употребляютъ *измѣняющуюся* или правильнѣе *перемѣнную тягу*. Употребленіе измѣняющейся тяги имѣетъ особенную важность въ паровозахъ, въ которыхъ измѣняются сопротивленія въ наибольшихъ, сравнительно съ прочими случаями, предѣлахъ, и самымъ неправильнымъ образомъ.

Изъ предыдущаго разсужденія выходитъ, что тяга газовъ въ трубѣ, или, что все равно, скорость движенія воздуха и пламени въ печи, дѣйствуетъ вдвойнѣ на испаряемость котла: она въ одно и то же время увеличиваетъ или уменьшаетъ площадь нагрѣва паровика и усиливаетъ или понижаетъ температуру пламени въ печи, или, проще сказать, степень жара.



Безспорно, во многихъ случаяхъ употребленія паровыхъ машинъ, употребленіе измѣняющейся тяги неизбѣжно и составляетъ единственный способъ измѣнять испаряемость котла въ соразмѣрности съ потребленіемъ паровъ; но оно невыгодно дѣйствуетъ на горѣніе топлива, потому что для одинаковаго количества горючаго матеріала, находящагося въ топкѣ, приходитъ вслѣдствіе измѣненія тяги не одно и тоже количество свѣжаго воздуха, и слѣдовательно горѣніе не всегда бываетъ въ обстоятельствахъ, соотвѣтствующихъ наибольшему полезному дѣйствію топлива. Обыкновенно во время производства работъ парами нагрузка печи топливомъ производится равными количествами и чрезъ одинаковое пространство времени, и даже независимо отъ того, въ какой степени работа машины по случайнымъ обстоятельствамъ можетъ измѣниться, и слѣдовательно измѣнится и расходъ паровъ. Не всегда предстоящее усиленіе или уменьшеніе работы двигателя можетъ быть заранѣе предусмтрѣно, чтобы потомъ уже распредѣлить потребленіе топлива сообразно съ предстоящимъ расходомъ паровъ.

При наименьшемъ доступѣ воздуха отъ уменьшенія тяги въ трубѣ, часто даже прекращается горѣніе, и если оно еще бываетъ, то почти безъ отдѣленія пламени, и слѣдовательно не доставляя никакого полезнаго дѣйствія. Поэтому чѣмъ парообразование въ котлахъ болѣе неодинаково, тѣмъ употребляемое топливо менѣе доставляетъ полезнаго дѣйствія. Паровозы и въ этомъ отношеніи представляютъ первый примѣръ несовершенства. Переносныя паровыя машины (*locomobiles*) и парходныя представляютъ для этого примѣръ тоже довольно близкій.

Вообще употребленіе двигателя находится въ такой зависимости отъ условій назначенія его, что вслѣдствіе этихъ



условіи всегда одно что нибудь имѣть большее преимущество — или наивыгоднѣйшее употребленіе движителя, какъ виновника потребленія горячаго матеріала, и слѣдовательно имѣющаго вліяніе на цѣнность промышленной работы, или удобство примѣнимости его къ мѣстнымъ условіямъ и выполнение работы, имъ производимой, совершенно сообразное съ назначеніемъ движителя. Въ этомъ-то отношеніи пріемники работы пара, т. е. паровыя машины, могутъ быть раздѣлены на двѣ группы: одну, въ которой употребленіе движителя должно главнымъ образомъ удовлетворять требованію возможной экономіи содержанія, какъ одного изъ элементовъ расходовъ какаго либо производства; другую, въ которой примѣненіе движителя должно быть соединено со всеми удобствами производства специальныхъ работъ. Къ первому разряду принадлежатъ все постоянныя машины, назначаемыя для дѣйствія заводовъ и фабрикъ; ко второму все подвижныя (locomotives) и все переносныя (locomobiles). Нѣтъ ничего совершеннаго въ общемъ смыслѣ этого слова, и въ нашихъ дѣяніяхъ всегда совершенство одного чего либо достигается съ потерей или невыгодностію въ другомъ отношеніи.

§ 79 *Отношеніе площади нагрѣва къ площади рѣшетки.* Такъ какъ на единицу площади рѣшетки сгораетъ болѣе или менѣе опредѣленное количество топлива, которое отдѣляетъ при сгораніи соотвѣтствующее ему количество теплоты, и такъ какъ этотъ теплородъ дѣйствуетъ наивыгоднѣйшимъ образомъ только на извѣстную площадь нагрѣва, поэтому въ паровыхъ котлахъ, при условіи наивыгоднѣйшаго дѣйствія топлива, должно быть для каждаго горячаго матеріала между площадью нагрѣва паровика и площадью рѣшетки *извѣстное отношеніе*. Дѣйствительно для



каждой системы паровиковъ единица площади нагрѣва доставляетъ на примѣръ п фунтовъ пара въ часъ, и каждая единица вѣса топлива производитъ въ свою очередь, при известномъ устройствѣ печи, соответствующее количество  $\omega$  (вѣсомыхъ единицъ) пара, то для паровика известного устройства, при данной его поверхности нагрѣва  $G$  и расходѣ топлива въ часъ  $x$ , существуетъ равенство

$$Gn = \omega x, \text{ откуда} \\ \frac{G}{x} = \frac{\omega}{n} \dots \dots \dots (97)$$

Или, называя чрезъ  $x_0$  количество по вѣсу топлива, сгорающее на единицѣ площади рѣшетки, и чрезъ  $Q$  эту площадь, то написанное отношеніе можетъ быть изображено въ слѣдующемъ видѣ

$$\frac{G}{x_0 Q} = \frac{\omega}{n}, \text{ откуда}$$

*отношеніе площади нагрѣва паровика къ площади рѣшетки*

$$\frac{G}{Q} = \frac{\omega x_0}{n} \dots \dots \dots (98)$$

Изъ этихъ уравненій видно, что для всякаго пароваго котла, при соответствующемъ ему устройствѣ печи, отношеніе площадей нагрѣва и рѣшетки зависитъ только отъ рода употребляемаго горючаго матеріала и системы котла.

Послѣ этого возможно ли, чтобы котель при данной системѣ его устройства могъ доставлять одинаковое полезное дѣйствіе при употребленіи какого угодно горючаго матеріала. Ошибки въ этомъ отношеніи весьма нерѣдки и отъ того случается часто, что котель при лучшемъ его устройствѣ не отличается особенно большою испаряемостію.

Если при употребленіи дровъ, пудъ которыхъ производитъ напр. въ котлахъ Уатта низкаго давленія, 3 пуда пара ( $\omega$ )







конечно малую площадь поверхности котла чрезъ  $ds$ , то давлeнiе пара на эту площадь будетъ  $pds$ .

Полное давлeнiе пара на всю внутреннюю поверхность котла можно разсматривать какъ сумму давлeнiй  $pds$ , дѣйствующихъ *перпендикулярно къ касательной*, проведенной къ поверхности котла въ разсматриваемой точкѣ, т. е. для настоящаго случая перпендикулярно къ линiи  $AB$ , касательной къ поверхности котла въ точкѣ  $B$ .

Равнодѣйствующая всѣхъ частныхъ составляющихъ, такихъ, какъ  $pds$ , выражающая собою полное давлeнiе пара на внутреннюю поверхность котла, дѣйствуетъ, какъ показали многочисленныя примѣры взрывовъ, по направленiю оси  $YY$ , по ту и по другую сторону оси  $XX$ , т. е. вверхъ и внизъ, такъ что при взрывахъ почти всегда одно полушарiе отдѣлялось отъ другаго въ плоскости сѣченiя  $XX$ .

Основываясь на этомъ, можно полагать, что силы, производящiя взрывъ котла, дѣйствуютъ на каждую безконечно малую площадь  $ds$  не перпендикулярно, а по оси  $YY$ , и слѣдовательно все давлeнiе пара на внутреннюю поверхность котла или равнодѣйствующая, разрывающая котель, равна суммѣ составляющихъ давлeнiй пара  $pds$ , по направленiю оси  $YY$ , т. е. равна

$$\int_{-r}^{+r} pds \frac{dX}{ds},$$

взявъ эту сумму для цѣлаго полушарiя отъ  $-r$  до  $+r$ .

Это выраженiе можетъ быть преобразовано слѣдующимъ образомъ:

$$\int_{-r}^{+r} pds \frac{dX}{ds} = p \int_{-r}^{+r} ds = p [r - (-r)] = 2pr = pD. \quad (99)$$



и получимъ выводъ, показывающій, что давленіе пара на всю поверхность котла, или равнодѣйствующая сила, стремящаяся разорвать котель, *возрастаетъ съ діаметромъ котла.*

Если металлъ на единицу толщины и на единицу площади сѣченія представляетъ прочное сопротивленіе  $R$ , то для цѣлаго полушарія все сопротивленіе металла въ двухъ сѣченіяхъ  $x$  и  $x$  и при толщинѣ стѣнокъ котла  $e$  будетъ равно  $2 Re$ .

Чтобы котель могъ сопротивляться давленію пара на его стѣнки, нужно, чтобы существовало слѣдующее равенство:

$$2 Re = 2 pr, \text{ откуда выходитъ}$$

*толщина стѣнокъ*

$$e = p \frac{r}{R}, \dots \dots \dots (100)$$

которая зависитъ отъ діаметра котла и упругости паровъ въ немъ. Поэтому съ увеличиваніемъ размѣровъ паровика должна увеличиваться и толщина его стѣнокъ, чтобы котель могъ выдержать давленіе паровъ. Но какъ металлъ при большей толщинѣ теряетъ способность проводить теплоту надлежащимъ образомъ, то въ практикѣ при построеніи котловъ употребляютъ такой металлъ, котораго толщина не превышаетъ извѣстныхъ предѣловъ.

Для практическаго употребленія существуетъ эмпирическая формула толщины стѣнокъ паровиковъ, узаконенная правительствомъ.

Она имѣетъ слѣдующее выраженіе:

$$e = 0,0092 pr + 0,12, \dots \dots \dots (101)$$

въ которомъ  $e$  означаетъ искомую толщину въ дюймахъ,  $p$  — дѣйствительное давленіе паровъ на квадратный дюймъ въ пудахъ,  $r$  — внутренній радіусъ котла въ дюймахъ.



Согласно съ указаніями этой формулы выходитъ, что для каждой упругости паровъ существуетъ при наибольшей толщинѣ металла *предѣльный* діаметръ котла, при которомъ давленіе паровъ можетъ быть съ безопасностію выдержано прочностію металла.

Вычисливъ радіусы цилиндрическихъ котловъ помощію формулы (101) для упругостей паровъ, допускаемыхъ здѣшнимъ узаконеніемъ, мы представили въ нижеслѣдующей таблицѣ *наибольшіе діаметры* паровиковъ при толщинѣ ихъ стѣнокъ въ полдюйма:

Упругость пара въ атмо- сферахъ.	2	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	3	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	4	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	5	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	6
Діаметры котловъ въ футахъ.	9	7	6	5 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	4	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	3

V. КОЛИЧЕСТВО ПАРА, ДОСТАВЛЯЕМОЕ ПАРОВЫМИ КОТЛАМИ НА ЕДИНИЦУ ВѢСА ИЗРАСХОДОВАННАГО ТОПЛИВА.

§ 81. По теоріи Клемана и Реньо, количество паровъ, доставляемое единицею вѣса топлива, вовсе не зависитъ отъ упругости приготавлиаемаго пара, а только отъ устройства, при которомъ котель способенъ болѣе или менѣе совершенно воспринимать теплоту, отдѣляющуюся при горѣніи. Простое наблюденіе надъ ходомъ работъ при приготвленіи паровъ въ котлахъ различныхъ системъ могло бы доставить много данныхъ для опредѣленія относительнаго достоинства каждой изъ нихъ. Къ сожалѣнію и на этотъ разъ наука о паровыхъ машинахъ такъ бѣдна изслѣдова-



ніями подобнаго рода, что мы могли собрать ихъ весьма не-  
много, съ цѣлю воспользоваться ими при изложеніи  
теоріи.

Предложенная здѣсь таблица представлять вѣсъ воды,  
обращенной въ паръ единицею вѣса горючаго матеріала.

Система котла.	Вѣсъ воды обра- щенной въ паръ единицею вѣса горючаго мате- ріала.	Горючій матеріалъ.
1. Котель низкаго давле- нія (сундучный).	8,35	Каменный уголь.
	9,1	Каменный уголь.
	7,7	
	6,25	Камен. уголь хорош.
	7,0	Тожь.
	5	Тожь.
	2,7	Еловые дрова.
	3,8	Лигнитъ.
	2,7	Торфъ 1 качества.
4,0	» плотно-спрес.	
2. Сундучный котель Уат- та съ однимъ внутрен- нимъ дымовымъ ходомъ (фигура 45). . . . .	7,8	Каменный уголь.
3. Цилиндрическій котель съ внутреннимъ ходомъ (фигура 50 и 50 bis). . .	9,5	Каменный уголь.
	8,5	
4 Корнваллійскіе котлы.	8—8,5	Каменный уголь.
5. Пароходные котлы. . .	отъ 3 до 4	Каменный уголь.
6. Вертикальные трубча- тые котлы (фиг. 62). . .	отъ 6,5—8	Каменный уголь.
7. Паровозные котлы. . .	5,8	Коксъ.
	6,1	
	6,4	



Относительно сравнительнаго пирометрическаго достоинства разныхъ горючихъ матеріаловъ мы заимствовали изъ сочиненія «*Guide du chauffeur, par M. M. Grouvelle et Jaunez*» слѣдующія данныя: 1 фунтъ каменнаго угля производитъ отъ 5 до 8 фунтовъ пара, смотря по системѣ котла и по устройству печи; коксъ даетъ отъ  $4\frac{2}{3}$  до 5,8; древесный уголь 6 и дрова отъ 2,5 до 2,7 фунтовъ.

Если вѣрить показаніямъ приведенныхъ результатовъ, то, сравнивая эти цифры съ наибольшимъ полезнымъ дѣйствіемъ, какое возможно извлечь изъ топливъ при наивыгоднѣйшихъ условіяхъ развитія и передачи теплоты, увидимъ, что даже наилучшіе котлы не воспринимаютъ всего количества теплорода, доставляемаго горѣніемъ топливъ. Напримѣръ, каменный уголь посредственной доброты даетъ при горѣніи 7500 единицъ теплоты; для обращенія же единицы вѣса воды, взятой при  $0^{\circ}$ , въ паръ потребно 650 единицъ теплоты, слѣдовательно единицею вѣса, напр. 1 пудомъ каменнаго угля, можно испарить 11,54 пудъ воды, между тѣмъ какъ весьма немногія системы котловъ производятъ даже 9 фунтовъ пара и 1 фунтомъ каменнаго угля, т. е. доставляетъ только три четверти всего полезнаго дѣйствія топлива.

Впрочемъ дѣйствительное, получаемое на дѣлѣ, полезное дѣйствіе топливъ въ заводскихъ печахъ никогда не можетъ быть достигнуто въ такой степени, какое получается при опытахъ въ маломъ видѣ и какое показываютъ теоретическія вычисленія. Причинъ этому много. Независимо отъ того, что теплородъ не вполне развивается въ печахъ вслѣдствіе несовершеннаго процесса горѣнія и потому еще, что не весь горючій матеріалъ участвуетъ въ этомъ процессѣ, даже и получаемый теплородъ не весь передается предмету его дѣйствія. При горѣніи топлива на рѣшоткѣ нѣкоторая



часть его просыпается не сгорѣвшею между колосниками, если промежутки между ними сдѣланы несообразно съ природою и составомъ употребляемаго горючаго матеріала. При нѣкоторыхъ угляхъ, имѣющихъ свойство *спекаться*, или образовать шлаковые комья, внутреннія части этихъ комьевъ лишены свободнаго къ нимъ доступа кислорода воздуха, слѣдовательно не горятъ и не производятъ пирометрическаго дѣйствія. Промѣшиваніе въ печи производитъ только слабое устраненіе этого неудобства, расмелъчая въ добавокъ крупный уголь и способствуя ему чрезъ это скорѣе проваливаться сквозь рѣшетку.

Кромѣ того горючій матеріалъ, употребляемый въ практикѣ, содержитъ кромѣ твердыхъ минеральныхъ частицъ, образующихъ по сгорѣніи золу, всегда болѣе или менѣе гигроскопическую воду въ соединеніи. Первыя должны быть доведены до высокой температуры; послѣдняя, напротивъ, обращена въ паръ.

§ 82. Въ печахъ паровыхъ котловъ теплородъ, развивающійся при горѣніи топлива, не весь идетъ на парообразованіе по двумъ главнымъ причинамъ: во первыхъ часть теплоты переходитъ чрезъ каменную кладку въ наружный воздухъ, другими словами теряется чрезъ охлажденіе печи и котла дѣйствіемъ наружнаго воздуха; во вторыхъ теряется значительная часть теплоты чрезъ тягу. Разсѣяніе теплоты въ воздухъ чрезъ охлажденіе составляетъ дѣйствительно значительный ущербъ для экономіи топлива. Каменная кладка въ паровыхъ котлахъ воспринимаетъ частію чрезъ отраженіе, частію чрезъ соприкосновеніе съ газами значительную часть теплоты и передаетъ ее бесполезно въ атмосферный воздухъ.



Кромѣ того часто чрезъ топочную дверцу проходить въ печь излишнее количество атмосфернаго воздуха, который бесполезно долженъ быть нагрѣтъ. Впрочемъ, устраивая въ каменной кладкѣ котла вертикальные каналы, наполненные воздухомъ, можно значительно задержать сообщеніе теплоты наружу.

Съ этою же цѣлю топочныя дверцы дѣлають двойными, въ которыхъ наружная вслѣдствіе худопроводности находящагося за нею воздуха не накаляется докрасна и не препятствуетъ рабочему производить надзоръ за ходомъ топки въ близкомъ отъ нея разстояніи. Менѣе всего теряется жаръ топочнаго пространства въ подвижныхъ машинахъ (паровозахъ и пароходахъ), въ которыхъ горнъ окруженъ со всѣхъ сторонъ водою, находящеюся въ самомъ же котлѣ и долженствующею испариться.

Для предохранія котловъ отъ охлажденія, всѣ наружныя поверхности ихъ, резервуаровъ пара, паропроводныхъ трубъ и цилиндровъ покрываютъ обыкновенно толстымъ слоемъ (дюйма въ 3 или 4) худыхъ проводниковъ теплорода, каковы: древесныя опилки, зола, войлокъ и проч.

Уикетидъ (Wicksteed) произвелъ въ 1840 году опыты надъ паровымъ котломъ системы Уатта какъ не покрытымъ вовсе, такъ и покрытымъ болѣе и болѣе худыми проводниками теплорода и нашель, что испареніе увеличилось почти на 10,8%, когда котель былъ защищенъ отъ вліянія внѣшняго воздуха.

Перемѣнная работа пароваго котла, напр. только днемъ, также уменьшаетъ количество полезной работы, доставляемой топливомъ, потому что по остановкѣ работы каждый разъ теплородъ, приобрѣтенный водою и различными внутренними частями печи, разсѣвается въ наружномъ воздухѣ, вслѣдствіе постепеннаго охлажденія котла и печи.



Уикстидъ производилъ также и съ этою цѣлю наблюде-  
нія надъ тѣмъ же паровымъ котломъ. Сбереженіе горючаго  
матеріала, доставляемое непрерывностію работы, прости-  
рается до 4%. Въ предстоящей таблицѣ представлены ре-  
зультаты опытовъ Уикстида.

С о с т о я н і е к о т л а .		Вѣсъ воды, испаренной 1 пудомъ ка- меннаго угля.
Открытый котель . . . . .		7,37
Котель, закрытый шерстян- ною тканью въ три ряда . . .	работая только днемъ.	7,85
		7,94
» » въ пять рядовъ . . . . .		
Котель, закрытый шерстян- ною тканью въ пять рядовъ . .	работая день и ночь . . . . .	8,09
	Однимъ войлокомъ . . . . .	7,96
	Двумя . . . . .	7,96
Котель работалъ только днемъ и былъ покрытъ:	Тремя . . . . .	8,0
	Тремя войлоками и начало паропроводной трубы однимъ войлокомъ . . . . .	8,37
	Четырмя войлоками и нача- ло паропроводной трубы дву- мя войлоками . . . . .	8,4
		пуды.

Наконецъ самую значительную потерю теплоты въ печахъ  
паровыхъ котловъ причиняетъ *тяга*. Для произведенія ея  
въ дымовой трубѣ постоянно поддерживается возвышенная  
температура теченіемъ горячихъ газовъ, имѣющихъ при вхо-  
дѣ въ дымовой пролетъ часто температуру около 300° Цель-



сія. Потеря теплоты въ этомъ случаѣ можетъ быть выражена уравненіемъ.

$$U = C \frac{\tau_1}{\tau_2} \dots \dots \dots (102)$$

гдѣ  $C$  есть количество единицъ теплоты, доставляемое горѣніемъ топлива,  $\tau_2$  температура газовъ и пламени, отдѣляющихся при горѣніи (въ топкѣ),  $\tau_1$  температура ихъ при выходѣ въ трубу.

Опредѣляя для извѣстнаго горючаго матеріала температуру  $\tau_2$ , по уравненію (81), можно приблизительно узнать количество  $U$  при извѣстныхъ обстоятельствахъ горѣнія. Помощію формуль (102) и (81) составлена слѣдующая таблица, изображающая *потерю теплоты чрезъ тягу*, для разныхъ горючихъ матеріаловъ, при чемъ температура газовъ при входѣ въ дымовую трубу принята равною 300° Цельсія.

Горючій матеріалъ.	Тепло-родъ, отдѣляемый горѣніемъ.	Объемъ газовъ и пара, взятый при 0°.	Температура дыма и газовъ, отдѣляющихся съ очага.	Потеря теплоты $U$ чрезъ тягу.
Дерево совершенно сухое.	3600	259,31	1507°	777
Дерево обыкновенное съ 20% воды . . . . .	2800	215,91	1408°	597
Каменный уголь обыкновенный . . . . .	7500	650,56	1231°	1798
Коксъ съ 15% золы . . . . .	6000	529,20	1231°	1462
Торфъ совершенно сухой.	4800	413,83	1259°	1144
Торфъ обыкновенный съ 20% воды . . . . .	3600	340,43	1148°	941
Древесный уголь . . . . .	7000	578,59	1313°	1599
	един. тепл.	кубичес. фут.	терм. Цельсія.	един. тепл.

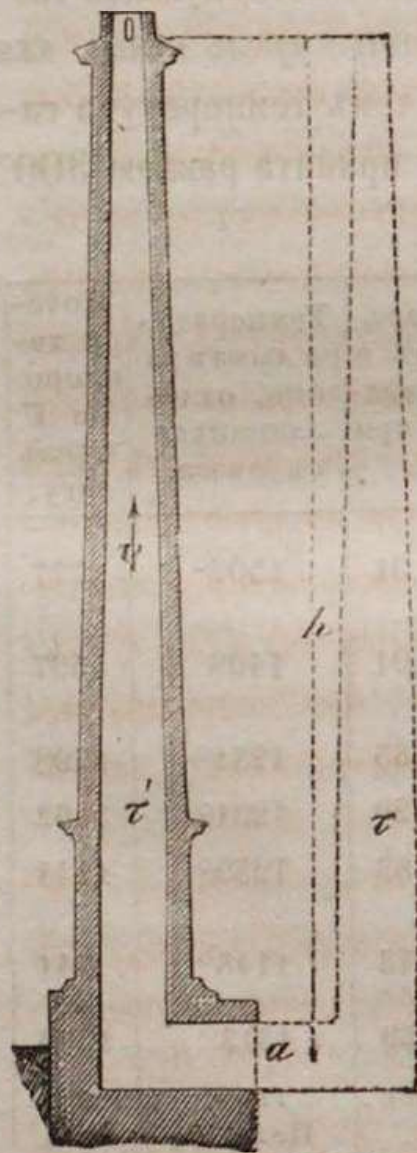


Изъ этой таблицы видно, что теплородъ, уносимый газами въ дымовую трубу, составляетъ около  $\frac{1}{4}$  всей теплоты, развивающейся при горѣніи топлива. Ясно, что такая потеря составляетъ одинъ изъ главныхъ расходовъ на производство парообразованія и есть одна изъ существенныхъ причинъ разности между теоретическимъ полезнымъ дѣйствіемъ топлива и дѣйствительнымъ.

§ 83. Назначеніе дымовой трубы состоитъ въ произведеніи тяги для доставленія свѣжаго воздуха къ мѣсту горѣнія въ такомъ количествѣ, чтобы *все* употребляемое топливо сгорало совершенно и чтобы доставлялось наибольшее количество теплоты для парообразованія.

Скорость воздуха въ трубѣ, или тяга, какъ мы уже говорили выше, не есть величина совершенно произвольная: она зависитъ, при условіяхъ наивыгоднѣйшаго горѣнія топлива, отъ способа сжиганія горючаго материала и отъ величины пространства, которое пламя должно пробѣгать не угасая, чтобы дѣйствовать на нагреваемую поверхность. Поперечное сѣченіе дымовой трубы рассчитывается уже по извѣстной скорости или тягѣ для данного объема воздуха.

Тяга же въ свою очередь зависитъ отъ разности давленій, производимыхъ на одну и ту же площадь соприкасанія *a* (фигура 68) двумя столбами воздуха: одного—холоднаго на-



фигура 68.



ружного, другаго — нагрѣтаго до температуры  $\tau_1$  и движущаго въ трубѣ.

Исслѣдованія теоріи дымовыхъ трубъ приводятъ къ заключенію такого рода, что *скорость  $v$  движенія газовъ въ трубѣ*, а слѣдовательно и объемъ ихъ при извѣстномъ живомъ сѣченіи трубы, *зависитъ* главнымъ образомъ отъ двухъ обстоятельствъ: *температуры  $\tau_1$  газовъ, движущихся въ трубѣ*, и высоты  $h$  этой послѣдней (\*).

Эти два обстоятельства имѣютъ между собою такое отношеніе, что для произведенія одной и той же тяги высота трубы уменьшается съ увеличиваніемъ температуры газовъ, и обратно температура газовъ для произведенія той же тяги въ трубѣ должна быть меньше, при большей высотѣ трубы. И такъ съ цѣлю не допускать газамъ входить въ дымовую трубу при слишкомъ высокой температурѣ ихъ и не терять такимъ образомъ много теплоты бесполезно, слѣдуетъ употреблять возможно наибольшую высоту трубы. А такъ какъ для успешнаго образованія пара газы должны дѣйствовать въ раскаленномъ состояніи, т. е. пробѣгать въ видѣ пламени, не угасая, на возможно наибольшую поверхность нагрѣва котла, поэтому жаръ, содержащійся въ газахъ, при выходѣ ихъ изъ печи, можетъ быть съ успехомъ обращенъ на такое употребленіе, при которомъ онъ способенъ оказать бѣльшее полезное дѣйствіе, напр. нагрѣваніе воды.

(\*) Прибавимъ для ясности что видъ формулы, изображающей зависимость между скоростью тяги въ трубѣ, температурою движущихся въ ней газовъ и высотой ея, есть слѣдующій:

$$v = \sqrt{2gha (\tau_1 - \tau)},$$

въ которой  $g$  есть напряженіе силы тяжести, и  $a$  коэффициентъ расширенія воздуха.



Въ хорошо устроенныхъ паровыхъ котлахъ дѣйстви- тельно и пользуются жаромъ газовъ, выходящихъ изъ пламенныхъ ходовъ печи, и помѣщаютъ между дымо- вою трубою и печью котла аппараты для нагрѣванія во- ды, поступающей для питанія котловъ (\*). Вода, на- качиваемая питательнымъ насосомъ, проходитъ по тру- бамъ подобныхъ аппаратовъ, нагрѣвается почти до кипѣ- нія жаромъ газовъ, идущихъ въ трубу, и горячая уже посылается въ паровикъ. Замѣтимъ опять, основываясь на вышесказанномъ, что наибольшая высота дымовой трубы можетъ принести большую пользу въ экономіи топлива, не-жели меньшая высота ея въ отношеніи одновременныхъ расходовъ на постройку.

Котлы паровозовъ и пароходовъ представляютъ въ этомъ отношеніи неизлечимую крайность. Почти совершенное от- сутствіе естественной тяги въ ихъ короткихъ дымовыхъ трубахъ причиною того, что пламени, выходящему изъ печей ихъ, представляется совершенно свободный вылетъ въ атмосферу, и оттого газы, сильно еще раскаленные, слѣдовательно съ значительнымъ запасомъ теплоты, уxo- дятъ изъ котла, не передавъ водѣ еще много теплоты. Кромѣ того отсутствіе естественной тяги въ дымовыхъ трубахъ паровозовъ и пароходовъ привело къ употребленію *искусственной* тяги, которая также недешево обходится въ отношеніи потери работы двигателя. По этому обстоя- тельству и по причинѣ сильнаго вліянія наружнаго воздуха, охлаждающаго всю поверхность котла и цилиндровъ, котлы

---

(\*) Напримѣръ аппаратъ Грина (Green), описанный въ поли- техническомъ журналѣ Динглера за 1858 годъ.



ихъ дѣйствуютъ въ самыхъ неблагопріятныхъ обстоятельствахъ, доказательствомъ чему служитъ малое полезное дѣйствіе паровозовъ, сравнительно съ котлами постоянныхъ машинъ. Этимъ легко убѣдиться, въ какой степени мѣстные условія и крайности могутъ имѣть вліяніе на выгоду употребленія двигателей.

## VI. СГУЩЕНІЕ ПАРОВЪ.

§ 84. Паръ, притекая въ холодную среду, осаждается. Полученная отъ этаго вода, въ теченіи большаго или меньшаго времени, принимаетъ температуру среды. Но какъ сгущеніе паровъ въ пустомъ сосудѣ, чрезъ одно только соприкосновеніе ихъ съ холодными стѣнками его, которыя постоянно охлаждаются снаружи холодною водою, происходитъ медленно, поэтому въ холодильники паровыхъ машинъ, кромѣ этого вспрыскиваютъ холодную воду посредствомъ сѣтки; вода, разбрызгиваясь въ видѣ мелкихъ струй, или мелкаго дождя, распространяется по всему пространству холодильника, и чрезъ это входитъ въ наибольшее соприкосновеніе съ паромъ. Пары осаждаются мгновенно, и полученная при этомъ вода, смѣшавшись съ холодною, принимаетъ среднюю температуру холодильника. Разсмотримъ теперь, отъ какихъ обстоятельствъ зависитъ количество воды, употребляемое въ паровыхъ машинахъ для сгущенія паровъ въ холодильникѣ.

Если предположить, что теплородъ, приносимый паромъ въ холодильникъ, весь переходитъ въ смѣсь, получаемую вслѣдствіе охлажденія и не теряется чрезъ стѣнки наружу, то количество теплоты, заключающейся до смѣшенія въ охлаж-



даемомъ парѣ и водѣ, назначаемой для охлажденія его, должны быть равны количеству теплоты, содержащейся въ водѣ, полученной послѣ смѣшенія, т. е. послѣ охлажденія пара.

И такъ, если количество  $\omega$  (по вѣсу) пара при какой бы ни было его температурѣ охлаждается количествомъ  $x$  (по вѣсу) воды при температурѣ ея  $t'$  до температуры  $t''$ , то вслѣдствіе высказаннаго сейчасъ же предположенія

$$\omega \cdot 520 + xt' = (\omega + x) t'', \text{ откуда}$$

*количество воды, потребное для охлажденія даннаго вѣса пара*

$$x = \omega \frac{520 - t''}{t'' - t'} \dots \dots \dots (103)$$

Изъ этого уравненія видно, что для даннаго количества пара  $\omega$  количество холодной воды для охлажденія возрастаетъ со степенью сгущенія пара. Чѣмъ больше желаютъ охлаждать паръ, тѣмъ больше нужно воды для охлажденія его, такъ что *для охлажденія пара до той же температуры, какую имѣетъ самая охлаждающая вода, потребно безконечно большое количество ея*, ибо для  $t'' = t'$ , величина  $x$  обратится въ  $\infty$ .

Означенная формула можетъ служить и для рѣшенія обратнаго вопроса, встрѣчающагося въ практикѣ, именно отысканія *количества пара, какое можетъ быть охлаждено извѣстнымъ количествомъ воды*. Для этого случая формулы даютъ такой оборотъ:

$$\omega = x \frac{t'' - t'}{520 - t''} \dots \dots \dots (104)$$

Какъ уравненіе (103) такъ и (104) показываютъ, что, если согласиться съ мнѣніемъ Клемана Дезорма и выводами изъ наблюдений Реньо, *упругость пара не имѣетъ вліянія на количество холодной воды для его сгущенія въ*



*холодильникъ* и что это количество холодной воды зависитъ только отъ степени охлажденія пара.

Такъ какъ со степенью этого охлажденія увеличивается и количество холодной воды, потребной въ этомъ процессѣ, а слѣдовательно и потеря работы движителя для движенія насосовъ, участвующихъ при этомъ какъ исполнительные механизмы, поэтому сгущеніе паровъ производится только *до нѣкотораго предѣла*, и среднею температурою охлажденія паровъ въ холодильникахъ паровыхъ машинъ считаютъ около  $30^{\circ}$  Реомюра. Съ другой стороны сильное охлажденіе пара имѣетъ слѣдствіемъ слишкомъ низкую температуру воды, выкачиваемой воздушнымъ насосомъ и поступающей въ котель — условіе, мало удовлетворяющее экономіи топлива. Поэтому въ практикѣ при глубинѣ колодца отъ 26 до 32 футовъ можно охлаждать паръ до  $35^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  (Цельсія); при колодцахъ болѣе глубокихъ охлаждають до  $44^{\circ}$  и даже до  $50^{\circ}$  того же термометра, и наконецъ вовсе не охлаждають и не слѣдуетъ охлаждать паровъ, если глубина колодца превосходитъ 98 или 130 футовъ.

§ 85. Во всѣхъ же тѣхъ машинахъ, въ которыхъ вода поступаетъ въ холодильникъ непосредственно изъ колодца, вслѣдствіе пустоты, образующейся въ немъ отъ сгущенія паровъ, степень охлажденія ихъ зависитъ еще отъ глубины колодца. Чѣмъ глубже онъ, и слѣдовательно чѣмъ на большую высоту вода должна быть поднята давленіемъ атмосферы, тѣмъ меньшее давленіе должно существовать въ холодильникѣ, т. е. тѣмъ большая должна быть степень охлажденія паровъ: весьма справедливо находятъ, что въ машинахъ постоянныхъ только тогда можно обойтись безъ насоса для холодной воды при охлажденіи паровъ и воспользо-



ваться естественнымъ притокомъ воды въ холодильникъ, если глубина колодца не превышаетъ 20 фут. Въ противномъ случаѣ необходимо прибѣгнуть къ употребленію водянаго насоса, потому что вода даже и при большемъ діаметрѣ трубъ не будетъ приходить въ холодильникъ въ достаточномъ количествѣ.

Пароходныя машины въ этотъ отношеніи пользуются обстоятельствами самыми благопріятными: вода въ ихъ холодильники приходитъ независимо отъ вліянія пустоты, вслѣдствіе еще напора воды внѣ судна, гдѣ уровень всегда выше уровня въ самомъ холодильнике. Оттого охлажденіе паровъ въ машинахъ пароходныхъ можетъ быть доведено до возможно-наименьшей ихъ упругости, а слѣдовательно и расширеніе пара до возможно высшаго предѣла, не допускаемаго въ машинахъ другихъ родовъ. По этимъ доводамъ ясно, почему въ пароходныхъ машинахъ низкаго давленія возможно даже расширять паръ при такой малой его упругости.

§ 86. Полагаютъ, что вода можетъ содержать въ растворѣ при  $12^{\circ}$  около  $\frac{1}{14}$  своего объема воздуха или газовъ, которые, выдѣляясь въ холодильникъ, достигаютъ часто давленія  $\frac{1}{10}$  атмосферы.

Опытомъ дознано, что упругость пара, охлажденнаго до  $32^{\circ}$  Реомюра ( $40^{\circ}$  Цельсія), равна 1,33 фунта на 1 квадратный дюймъ площади поршня, и пара, охлажденнаго до  $28^{\circ}$  Цельсія, 0,86 фунта. А какъ давленіе на противоположную сторону пароваго поршня со стороны холодильника бываетъ всегда 1,68 фунт., значитъ давленіе воздуха въ холодильникъ будетъ:

при  $32^{\circ}$  Реом.  $1,68 - 1,33 = 0,53$  фунта и

при  $28^{\circ}$  Реом.  $1,68 - 0,86 = 0,82$  ф. на квадрат. дюймъ.



Назовемъ это давленіе воздуха чрезъ  $p''$ , то объемъ  $O''$  содержащихся въ водѣ воздуха и газовъ будетъ, по формулѣ Гей-Люссака:

для ключевой воды, содержащей около  $\frac{1}{14}$  объема воздуха и газовъ,

$$O'' = \frac{O'}{14} \cdot \frac{16,28}{p''} \cdot \frac{1 + \alpha t''}{1 + \alpha t'} \dots \dots \dots (105)$$

для рѣчной, въ которой объемъ воздуха и газовъ простирается до  $\frac{1}{20}$

$$O'' = \frac{O'}{20} \cdot \frac{16,28}{p''} \cdot \frac{1 + \alpha t''}{1 + \alpha t'} \dots \dots \dots (105 \text{ bis}).$$

Чтобы этотъ воздухъ и газы, скопляясь въ холодильникѣ, не производили на паровой поршень значительнаго давленія и не препятствовали движенію его, въ машинахъ, работающих съ охлажденіемъ паровъ, употребляютъ такъ называемый *воздушный насосъ*, который вмѣстѣ съ водою долженъ выкачивать изъ холодильника воздухъ, выдѣляющійся изъ нея.

Для этого размѣры воздушнаго насоса должны быть рассчитаны всегда такъ, чтобы онъ могъ вытягивать въ известное время воду, служившую для охлажденія паровъ, воду, образовавшуюся изъ охлажденнаго пара, и воздухъ, содержащійся въ водѣ, охлаждавшей паръ.

По мѣсту прикрѣпленія стержня поршня воздушнаго насоса, движеніе его и движеніе пароваго поршня обыкновенно бываютъ одновременны (машины съ коромысломъ), и поэтому поршень воздушнаго насоса въ одинъ размахъ долженъ выкачивать изъ холодильника такое же количество воды и воздуха, какое соотвѣтствуетъ объему пара, расходуемаго паровымъ цилиндромъ въ каждый двойной ходъ его.



Такъ какъ въ каждый размахъ пароваго поршня расходуется объемъ пара

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{l}{M},$$

или, обращая этотъ объемъ въ объемъ воды,

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{l}{M} \frac{A p_0}{1 + \alpha t} \cdot \frac{1}{1,73} = O,$$

то объемъ воды, потребной для охлажденія этого пара, будетъ по формулѣ (103)

$$O \frac{320 - t''}{t'' - t'} = O' \text{ кубич. фут.}$$

Итакъ воздушный насосъ долженъ въ каждый ходъ своего поршня выкачивать сумму объемовъ воды и воздуха

$$O + O' + O''$$

Обыкновенно эти насосы всегда устраиваются одиночнаго дѣйствія, поэтому размѣры его (діаметръ  $d'$  и ходъ поршня  $l'$ ) должны быть опредѣлены условіями слѣдующаго уравненія:

$$K' \frac{\pi d'^2}{4} \cdot l' = 2 (O + O' + O'') \dots \dots (106)$$

въ которомъ чрезъ  $K'$  названъ коэффициентъ полезнаго дѣйствія насосовъ подобнаго рода.



## ГЛАВА IV.

### **ВЗРЫВЫ ПАРОВЫХЪ КОТЛОВЪ И НАКИПИ ВЪ НИХЪ.**

Самое ужасное, что можетъ случиться съ паровикомъ это взрывъ. Послѣдствія этого явленія такъ извѣстны, что излишне ихъ описывать.

§ 87. Вообще причина взрывовъ состоитъ въ чрезмѣрно большой упругости пара, превосходящей прочное сопротивленіе стѣнокъ котла. Это обстоятельство можетъ имѣть мѣсто при двухъ случаяхъ: или упругость пара въ котлѣ возрастетъ до того, что она преодолеетъ даже нормальное сопротивленіе стѣнокъ котла, или эти стѣнки, оставаясь нѣкоторое время не покрытыми водою, раскаляются и теряютъ часть ихъ крѣпости такъ, что не выдерживаютъ даже и той упругости, которая существуетъ въ котлѣ при нормальномъ ходѣ машины.

Въ первомъ случаѣ постепенное возрастаніе упругости паровъ въ котлѣ не ведетъ за собою гибельныхъ послѣдствій, потому что излишніе пары могутъ тогда выходить чрезъ охранные клапаны, или, если этого недостаточно, будутъ искать себѣ выхода въ слабѣйшихъ частяхъ котла;



да и кромѣ того манометры, указывая постоянно состояніе упругости паровъ въ котлѣ, предупреждаютъ во всякомъ случаѣ взрывъ, если точка производится сообразно съ расходомъ приготовляемаго пара, и слѣдовательно съ состояніемъ пара въ котлѣ. Совѣмъ другое дѣло при быстромъ образованіи большого количества паровъ: дѣйствіе всѣхъ охранныхъ приборовъ становится тогда недостаточнымъ и котель долженъ неминуемо лопнуть. Мгновенное образованіе паровъ можетъ происходить отъ соприкосновенія воды къ раскаленнымъ частямъ котла вслѣдствіе пониженія уровня воды въ котлѣ ниже пламенныхъ ходовъ, или внезапнаго отдѣленія накипи, подъ которою стѣнки котла раскалились.

Для предупрежденія взрывовъ на паровыхъ котлахъ устраиваютъ охранные клапаны, которые даютъ свободный выходъ пару, какъ скоро упругость его перейдетъ извѣстные предѣлы. Устройство такого прибора тѣмъ совершеннѣе, чѣмъ скорѣе клапанъ открываетъ закрываемое имъ отверстіе котла при увеличеніи упругости выше обыкновенной. Выполненію этого условія болѣе всего препятствуетъ прилипаніе соприкасающихся поверхностей клапана и закрываемаго имъ отверстія; поэтому лучшіе строители дѣлаютъ поверхность соприкасания по возможности самою малою.

При всемъ этомъ площадь отверстія, закрываемаго охраннымъ клапаномъ, дѣлается обыкновенно весьма малою. Правительствомъ нашимъ постановлено давать этому отверстію размѣры въ 0,05 квадр. дюйм. на каждый квадрат. футъ площади нагрѣва паровика; но такіе размѣры весьма недостаточны для того, чтобы отверстіе клапана могло дать скопившемуся въ котлѣ пару выходъ *свободный и въ достаточномъ количествѣ*. Поэтому многіе инженеры въ новѣй-



шее время предлагали устраивать охранные клапаны съ отверстіемъ въ котлѣ *несравненно большимъ* противу обыкновенно устраиваемыхъ.

Такъ или иначе, но наблюденія и изслѣдованія нѣкоторыхъ взрывовъ показали, что открытіе охранныго клапана *при образовавшейся уже* большей упругости паровъ не только не избавляютъ отъ опасности, но кажется бывають еще причиною взрыва, всегда его сопровождающаго.

Дѣйствительно многіе взрывы случались при такихъ обстоятельствахъ, которыя повидимому совершенно ручались за безопасность. Въ то время, какъ слишкомъ скопившемуся пару даютъ открытіемъ охранныго клапана свободный выходъ, взрывъ котла едва ли могъ имѣть мѣсто. Иногда взрывамъ предшествовало даже замедленіе хода машины. Какъ же теперь объяснить происхожденіе взрыва при этихъ обстоятельствахъ въ томъ или другомъ изъ упомянутыхъ случаевъ?

Такіе вопросы, какъ кажется съ перваго взгляда, противорѣчатъ законамъ физики, и слѣдовательно здраваго разсудка, но многіе взрывы представляютъ ясное доказательство правдоподобности этихъ вопросовъ.

§ 88. Перкинсъ повидимому объясняетъ ихъ довольно удовлетворительно. По мнѣнію этого американскаго инженера, въ паровомъ котлѣ, въ которомъ воды мало и пламя обхватываетъ стѣнки его слишкомъ высоко, нѣкоторыя части этихъ стѣнокъ могутъ дойти до краснаго каленія, и паръ, прикасающійся къ накаленному докрасна металлу, нагрѣвается чрезвычайно, не приобрѣтая большой упругости (?). Если теперь въ такомъ состояніи котла вдругъ открыли охранный клапанъ тотчасъ паръ и бросится въ него; вода, избавленная отъ давленія, поднимется кверху въ видѣ



пѣны, наполнить всю вмѣстимость котла и, разбрызгавшись по накаленному пару, тотчасъ сама обратится въ чрезвычайно упругій паръ.

Клапанъ, не смотря на то, что открыть совершенно, не можетъ дать выхода пару въ достаточномъ количествѣ, и стѣнки котла должны разорваться.

Это объясненіе допускаетъ три предположенія. Во-первыхъ Перкинсъ предполагаетъ, что при пониженіи воды въ котлѣ стѣнки его, выше уровня воды находящіяся, должны нагрѣваться до весьма высокой температуры и сообщать ее пару, между тѣмъ какъ вода отъ нихъ не нагрѣвается. Во вторыхъ онъ допускаетъ, что вода во время кипѣнія бьетъ снизу вверхъ до известной высоты въ видѣ пѣны, если только уничтожать, или даже значительно уменьшать давленіе, паромъ на нее производимое, и наконецъ онъ принимаетъ, что вода, разсѣянная такимъ образомъ по пару, содержащему большое количество теплорода, вдругъ сама превращается въ паръ.

Первое предположеніе Перкинса совершенно очевидно: если металлическій сосудъ, поставленный на уголья, не накаливается до красна, то это отъ того, что вода постоянно уноситъ теплоту отъ его стѣнокъ и не позволяетъ ей тамъ сгущаться. Паръ, будучи гораздо рѣже воды, не можетъ произвести того же дѣйствія, и когда пламя достигаетъ до части котла, выше поверхности воды находящейся, эта часть можетъ сильно накалиться и сообщить теплоту слою ближайшаго пара, который въ свою очередь передаетъ ее другому и такимъ образомъ разсѣетъ по всей вмѣстимости котла. Это первое свое предположеніе Перкинсъ основываетъ на слѣдующемъ собственномъ его опытѣ.



Цилиндрической котель въ 4 фута длины и 1 футъ діаметромъ вертикально стоялъ надъ печью, основаніе обхватывалось огнемъ и пламя достигало до трети высоты котла, между тѣмъ, какъ вода наполняла только шестую часть его. Слѣдовательно  $\frac{2}{6}$  поверхности котла были подъ непосредственнымъ дѣйствіемъ огня:  $\frac{1}{6}$  была подъ водою, поэтому жаръ ею и поглощался, и  $\frac{1}{6}$  надъ нею, здѣсь металлъ ничѣмъ не былъ охлаждаемъ. Предохранительный клапанъ съ грузомъ, равнымъ одной атмосферѣ, былъ сдѣланъ въ боку котла, на половинѣ высоты его. По мѣрѣ того, какъ паръ, образовавшійся изъ воды или вода въ видѣ пара, выходила изъ отверстія клапана, ее тотчасъ же наполняли.

Термометръ, опущенный до дна котла въ воду, показывалъ  $104^{\circ}$  Цельса. ( $82\frac{1}{5}$  Реомюр.). Такова была температура слоя пара, находящагося надъ поверхностію воды, между тѣмъ какъ на половинѣ высоты котла тотъ же термометръ показывалъ  $260^{\circ}$  ( $208^{\circ}$  Реомюр.) и крышка была накалена докрасна. Этого опыта довольно, чтобъ доказать первое положеніе Перкинса; перейдемъ теперь ко второму.

Нѣкоторыя жидкости во время кипѣнія поднимаются, т. е. бьютъ кверху, какъ на примѣръ: сѣрная кислота, также молоко, хотя въ меньшей степени. Вода, когда она кипитъ сильно, отъ времени до времени разбрызгивается тоже въ маленькія капельки, которыя летаютъ высоко вверхъ. Ясно, что все это происходитъ отъ плотности жидкости и отъ трудности, съ какою шарики паровъ пролагаютъ себѣ дорогу сквозь массу ея.

Если этихъ шариковъ весьма много и если восхожденію ихъ мѣшаетъ одно только сильное давленіе на поверхность жидкости, то понятно уже, что, въ случаѣ внезапнаго унич-



тоженія давленія, отдѣленіе паровъ, вмѣсто того, чтобъ быть постепеннымъ, какъ это случается при обыкновенныхъ обстоятельствахъ, сдѣлается чрезвычайно сильнымъ. При этомъ жидкость пѣнится точно такъ же, какъ воды, соединенныя съ газами, и превращается вся почти въ пѣнистое вещество, составленное изъ воды и паровъ; отъ этого объемъ ея возрастаетъ чрезвычайно, и она наполняетъ весь котель.

Прямой опытъ, сдѣланный въ прозрачномъ сосудѣ, могъ бы показать предѣлы точности такого предположенія: правда, что мы не можемъ сослаться на такого рода опытъ; но разсудокъ говоритъ въ пользу этого предположенія и заставляетъ насъ согласиться съ Перкинсомъ, что, въ случаѣ внезапнаго уменьшенія упругости пара, вода можетъ выйти изъ своихъ предѣловъ и наполнить всю вмѣстимость котла.

Разсмотримъ наконецъ третіе предположеніе американскаго инженера, то есть быстрое превращеніе воды въ упругую жидкость. Здѣсь мы будемъ основывать свои сужденія на прямыхъ опытахъ.

Перкинсъ, наполнивъ водою одинъ изъ тѣхъ цилиндрическихъ сосудовъ, которые онъ называетъ паропроизводителями, довелъ температуру до  $260^{\circ}$  по Цельсіеву термометру (по Реомюрову до  $208^{\circ}$ ). Съ боку этого цилиндра былъ пріемникъ, въ которомъ не было воды, а только одинъ весьма неплотный паръ; температура его простиралась до  $650^{\circ}$  ( $620^{\circ}$  по Реомюру). Оба эти сосуда могли сообщаться промежуточною трубкою, которая обыкновенно была закрыта клапаномъ, обремененнымъ довольно значительнымъ грузомъ.

При такомъ устройствѣ ясно, что если помощію насоса вбрасывали въ одинъ конецъ паропроизводителя известное количество холодной воды, тогда сообщительный клапанъ



долженъ былъ открываться, и при этомъ такое же количество теплой воды тотчасъ проходило въ пріемникъ и превращалось тамъ въ парь. Въ пріемникѣ этомъ былъ сдѣланъ особаго рода клапанъ, посредствомъ котораго можно было узнать, вдругъ ли происходило это превращеніе.

Перкинсъ утверждаетъ, что оно точно было въ то же самое мгновеніе, и что едва только начнутъ дѣйствовать насосомъ, вбрасывающимъ холодную воду, тотчасъ можно узнать по предохранительному клапану пріемника, что упругость паровъ простирается отъ сорока до ста атмосферъ: сорокъ атмосферъ въ случаѣ меньшаго и сто въ случаѣ большаго вбрасыванія воды. Этотъ опытъ совершенно подтверждаетъ предположеніе Перкинса, тѣмъ болѣе, что 260° Цельса. температуры употребленной воды далеко не соответствуютъ упругости ста атмосферъ давленія, слѣдовательно здѣсь часть воды мгновенно превратилась въ парь, что намъ и надобно было доказать.

§ 89. Французскій корабельный инженеръ Марестье далъ свою теорію тѣхъ взрывовъ, которыми занимался Перкинсъ. Хотя вообще теоріи этихъ двухъ инженеровъ имѣютъ большое сходство, но есть обстоятельства, въ которыхъ они совершенно различны. Марестье подобно Перкинсу допускаетъ, что за нѣсколько минутъ до взрыва бываетъ недостатокъ воды въ котлѣ; что часть стѣнокъ котла, находящаяся прямо на огнѣ, не передавая болѣе своей теплоты жидкости, пріобрѣтаетъ высокую температуру и можетъ накалиться докрасна; что въ мгновеніе открытія клапана, или при какомъ либо случайномъ выходѣ пара, поверхность воды повышается, и такимъ образомъ поднявшаяся вода, прикасаясь къ накаленной докрасна части котла, вдругъ



превращается въ парь, въ такомъ количествѣ, что предохранительный клапанъ не можетъ дать довольно мѣста для его выхода. Въ котлахъ пароходовъ есть еще причина того, что вода прикасается къ накаленнымъ докрасна частямъ стѣнокъ: это—морское волненіе.

И такъ вотъ существенная разница: по мнѣнію Перкинса, быстрое образованіе весьма упругаго пара происходитъ отъ разбрызгиванія воды въ видѣ пѣны по весьма рѣдко и сильно нагрѣтому пару; между тѣмъ какъ Марестье полагаетъ, что такое большое количество пара образуется отъ прикосновенія воды къ накаленному докрасна металлу. При первомъ взглядѣ кажется послѣднее мнѣніе самое естественное. На дѣлѣ часто что либо происходитъ такимъ путемъ, который съ перваго взгляда казался почти невозможнымъ.

При этомъ весьма кстати вспомнить опытъ Клапрота, у котораго капля воды, кашнутая на желѣзную ложку, доведенную до бѣлокраснаго каленія, употребила 40 секундъ на испареніе. Когда потомъ на ту же ложку кашнули другой разъ, капля испарилась совершенно въ 20 секундъ. Кашнувши послѣ испаренія этой еще разъ, замѣтили, что капля исчезла въ 6 секундъ, четвертая капля въ 4 секунды, пятая въ 2, наконецъ шестая въ мгновеніе, котораго нельзя было уже и замѣтить.

Впрочемъ, не смотря на все это, одно не подлежитъ сомнѣнію, что главная причина быстрого парообразованія заключается въ разгоряченіи стѣнокъ до краснаго каленія, и, примемъ ли мы объясненіе Перкинса или Марестье, практическій выводъ будетъ одинъ и тотъ же, именно никакъ не допускать котель накалиться докрасна и, если это уже случилось, не открывать вдругъ клапановъ.



§ 90. Многие, пораженные огромностию и быстротою дѣйствія при взрывахъ котловъ, увѣряютъ, что одинъ паръ не можетъ произвести ихъ, но что тутъ участвуютъ газы, способные по своей природѣ къ подобнымъ взрывамъ. По мнѣнію ихъ, водяные пары, прикасаясь иногда къ стѣнкамъ, докрасна накалившимся, разлагаются на составныя части, причемъ кислородъ окисляетъ желѣзо, а водородъ выдѣляется свободнымъ. Но одинъ водородъ, или даже и смѣшанный съ водяными парами, не произведетъ вспышки: для произведенія ея нужно смѣшать въ известной пропорціи водородъ съ кислородомъ; но какъ найти и смѣшать эти два газа въ котлѣ? Такимъ образомъ подобное объясненіе кажется слишкомъ натянутымъ и не можетъ быть ни въ какомъ случаѣ удовлетворительнымъ.

Взрывъ иногда можетъ произойти и при обыкновенной упругости, которой сильно раскаленные отъ какой бы ни было причины стѣнки котла не могутъ выдержать, потерявъ значительную часть своей крѣпости, будучи нагрѣты докрасна. Опыты Тремери доказали, что крѣпость листового желѣза при красномъ каленіи составляетъ только шестую часть крѣпости холодного желѣза. Если по несчастію случится, что часть котла дойдетъ до красного каленія, то уже она будетъ весьма близка къ разрыву, между тѣмъ какъ клапанъ еще не откроется. Судя же по пробѣ, которой подвергаются котлы предъ употребленіемъ ихъ въ дѣло, казалось бы, что нечего и думать о взрывѣ.

§ 91. Нѣкто Галль (Hall), въ Соединенныхъ Штатахъ въ запискѣ, представленной имъ недавно въ Бирмингамскій институтъ гражданскихъ инженеровъ (\*) разбираетъ все

(\*) Статья его помѣщена въ «Civil Engineer and Architect's Journal» April 1856, page 133.



причины взрывовъ паровыхъ котловъ и высказываетъ довольно вѣрное мнѣніе объ этомъ предметѣ. Въ ней между прочимъ онъ говоритъ слѣдующее: «обыкновенно предполагаютъ, что отъ дѣйствія огня обнаженныя части котла раскаляются, водяной паръ приходитъ въ разложеніе, кислородъ его соединяется съ желѣзомъ, водородъ остается и производитъ взрывъ; но это явленіе едва ли можетъ имѣть мѣсто, потому что водородъ не можетъ производить взрыва безъ сильнаго смѣшенія съ атмосфернымъ воздухомъ, между тѣмъ какъ этотъ послѣдній можетъ попадать въ котель только въ маломъ количествѣ, будучи вгоняемъ туда питательнымъ насосомъ вмѣстѣ съ водою. Хотя ржавѣніе внутренней поверхности котла и доказываетъ химическое вліяніе желѣза на воду, все-таки это разложеніе происходитъ въ такомъ маломъ количествѣ, что выдѣлившійся водородъ не можетъ произвести сильнаго дѣйствія. Отъ докрасна-раскаленной поверхности котла вода нескоро обращается въ паръ; сильный жаръ отталкиваетъ частицы воды, и онѣ обращаются въ паръ медленно отъ сообщенія теплоты со стороны скопленнаго пара, слѣдовательно отъ дѣйствія раскаленныхъ стѣнокъ котла не можетъ произойти сильнаго образованія пара.»

Опытами дознано, что сосуды, подверженные сильному давленію, лопались при малѣйшемъ сотрясеніи; между тѣмъ какъ въ спокойномъ состояніи они могли бы выдержать еще сильнѣйшее давленіе. Этотъ фактъ объясняетъ многіе взрывы и именно тѣ, которые случаются по приведеніи машины въ дѣйствіе, или при открываніи клапановъ или крановъ въ паропроводной трубѣ. Вообще всякое сотрясеніе котла и движеніе въ немъ воды въ то время, когда паръ пріобрѣлъ значительную упругость, вредно и опасно; движеніе воды



вверхъ , или поднятіе ея происходитъ всякій разъ при внезапной и скорой потерѣ паровъ и уменьшенія давленія, какъ это бываетъ при внезапномъ открытіи охранныго клапана или крана, дающаго выходъ парамъ въ цилиндрѣ.

Въ паровозахъ и пароходахъ сотрясеніе котла и колебаніе воды происходитъ въ первыхъ отъ толчковъ и тряски, во вторыхъ отъ качанія судна.

Причиною взрывовъ во многихъ случаяхъ были еще ошибочная постройка паровика, его несовершенство и дурное качество металла. Поэтому правительствомъ во всѣхъ странахъ постановлено узаконеніемъ, чтобы каждый котель до употребленія долженъ быть подверженъ испытанію, при которомъ въ дѣйствительности узнается его прочность.

О существующихъ охранныхъ приборахъ Галль въ упомянутой его запискѣ говоритъ слѣдующее: «всѣ до сихъ поръ употребляемыя устройства и изобрѣтенія для предупрежденія взрывовъ служатъ для того, чтобы или усилить питаніе котла, если уровень воды въ немъ низокъ, или открывать охранный клапанъ давленіемъ пара, независимо отъ другихъ обстоятельствъ. Можно основательно принять, что большая часть взрывовъ произошла отъ небрежности машинистовъ , допускаявшихъ водѣ слишкомъ понизиться, чрезъ что нѣкоторая часть желѣзныхъ листовъ обнажалась, такъ что паръ былъ сильно нагрѣваемъ и упругость его переходила за предѣлы. Если тогда при этихъ опасныхъ обстоятельствахъ приходитъ свѣжая вода въ котель, потомъ распространяется на раскаленные листы и разсѣвается по сильно нагрѣтому пару, то эта вода вдругъ обращается въ паръ, котораго упругость становится больше сопротивленія стѣнокъ котла и неминуемо происходитъ взрывъ. Поэтому выходитъ, что охранные приборы, обыкновенно до сихъ упо-



требляемые, могут быть нѣкоторымъ образомъ причиною взрывовъ. Эти разсужденія ведутъ къ заключенію, что безопасность только тогда будетъ достигнута, если устроить клапанъ, который открывался бы тотчасъ, какъ вода въ котлѣ очень низко опустилась, для того, чтобы выпустить *сначала воду*, какъ болѣе опасный элементъ въ этомъ отношеніи, и *потомъ уже паръ*.»

По этимъ соображеніямъ Галль предлагаетъ устройство придуманнаго имъ охраннаго клапана, изображеніе и описаніе котораго помѣщено въ политехническомъ журналѣ Динглера за 1856 годъ. Устройство его основано на примѣненіи плавящейся вставки на подобіе расплавляющихся пробокъ Гали-Казала, Ивенса и другихъ, иногда употребляемыхъ въ паровикахъ; только эти послѣднія при повышеніи температуры пара или отъ дѣйствія сильнаго накаленія стѣнокъ котла расплавляясь, выпускаютъ паръ, а охранный приборъ Галля сперва выпускаетъ воду изъ котла для того, чтобы она не произвела отъ волненія большаго количества пара, и потомъ уже самый паръ, бывший въ котлѣ.

Положимъ, что подобное устройство избавляетъ въ крайнемъ случаѣ котель отъ взрыва, но не предупреждаетъ опасности при образовавшейся уже большей упругости пара въ котлѣ такъ, чтобы работа машины не останавливалась, и если останавливалась бы, то только на короткое время.

Если и согласиться съ мнѣніемъ Галля, по которому онъ не допускаетъ слишкомъ быстраго образованія пара отъ дѣйствія раскаленныхъ частей котла вслѣдствіе недостатка воды, все-таки раскаленіе металла вредно по крайней мѣрѣ потому, что желѣзо въ раскаленномъ состояніи теряетъ свою крѣпость; котель при этомъ не всегда можетъ выдержать внезапное парообразованіе, значительное увеличеніе



упругости паровъ, или сильный толчекъ воды, и разрывается.

Многіе взрывы паровыхъ котловъ были приписываемы употребленію тонокъ во внутреннихъ ходахъ котла, при чемъ поверхность его часто бываетъ недостаточна, напротивъ тонка скорая и быстрая.

Внутренніе пламенные ходы въ котлѣ высокаго давленія всего слабѣе относительно взрывовъ. Бывали взрывы, въ которыхъ стѣнки внутренняго хода совершенно разрывало и даже выкидывало вонъ, между тѣмъ какъ самый котель оставался цѣль.

Единственный упрекъ, который могутъ сдѣлать противу внутреннихъ тонокъ котловъ, есть опасность отъ образованія накипи чрезъ осяданіе твердыхъ частицъ, находящихся въ водѣ, на дно котла; но чрезъ это обстоятельство происходило мало взрывовъ; единственная порча, могущая отъ этого произойти, есть сгораніе стѣнокъ котла; но и это опять можетъ быть только при большей незначительности. Въ Корнваллисѣ почти исключительно употребляютъ котлы съ внутренней тонкой и, между тѣмъ тамъ взрывы наименѣе обыкновенны, даже рѣдки.

§ 92. Теперь остается упомянуть еще объ одной весьма важной причинѣ взрывовъ, не зависящей ни отъ устройства котла, ни отъ устройства печи.

Рѣдко случается, чтобы вода, наполняющая котель, была чиста, да и при томъ, какъ бы она ни была съ виду чиста, всегда содержитъ въ растворѣ больше или меньше твердыхъ веществъ, смотря по мѣстности. Такъ Невская вода, которая слываетъ въ Петербургѣ самую чистую, содержитъ въ себѣ, кромѣ вытяжныхъ органическихъ веществъ, хлористый кальцій, хлористый глиній, хлористый калий, сѣрно-



кислый натръ, углекислую известь и незначительное количество другихъ веществъ. Въ паровыхъ котлахъ при испареніи воды твердыя вещества осаждаются, пристають къ стѣнкамъ, особенно въ тѣхъ мѣстахъ, которыя подвержены прямому дѣйствию огня. Эти осадки, имѣющіе слоистый видъ, или форму наростовъ, составляютъ такъ называемые накипи. Пока ихъ не было, теплота, поглощаемая металломъ, быстро передавалась водѣ, и стѣнки котла никогда не доходили до весьма высокой температуры; но едва только худо проводящее тепло вещество, каковы всѣ тѣла каменистыя, обложитъ изнутри котель, тепло будетъ передаваться водѣ весьма медленно. При этомъ стѣнки котла, ежеминутно получая теплорода гораздо болѣе, нежели сколько онѣ передаютъ каменистому веществу, будутъ нагреваться болѣе и болѣе до того, что наконецъ дойдутъ до краснаго каленія. Здѣсь не такъ важна потеря горючихъ веществъ, которыя будутъ накаливать стѣнки котла вмѣсто того, чтобы нагревать воду, а важно то, что накалившійся металлъ имѣетъ весьма небольшую крѣпость и слѣдовательно всегда готовъ къ взрыву. Въ самомъ дѣлѣ, всякій легко пойметъ, какъ надобно бояться, чтобы вода, которая сравнительно холоднѣе стѣнокъ котла, не прошла какъ нибудь сквозь щель каменистой коры и не разлилась по внутренней поверхности раскаленнаго металла. Чугунный котель на вѣрное лопнетъ въ ту же минуту; съ желѣзными хотя это и не случится тотчасъ, все-таки попортится и потеряетъ значительную часть сопротивленія, тѣмъ болѣе, что докрасна накаленный металлъ чрезвычайно скоро окисляется, или, какъ мы обыкновенно говоримъ, ржавѣетъ.

Всякій, кто обращался съ паровыми машинами, замѣчалъ, что когда въ котлѣ есть накипи, испареніе воды и слѣдова-



тельно образованіе пара дѣлается затруднительнымъ, машина работаетъ вяло, расходъ топлива увеличивается и наконецъ стѣнки котла скоро прогораютъ. Понятно, отъ чего вниманіе инженеровъ-механиковъ постоянно было обращено на отысканіе средствъ воспрепятствовать образованію накипей и уничтожать ихъ, если онѣ уже образовались въ котлѣ.

Предлагались разные способы; но всѣ они или оказывались не дѣйствительными, или не вполне достигали своей цѣли, такъ что задача до сей поры остается нерѣшенной. Инженеръ Полонсо, съ цѣлію избавиться отъ накипей въ паровозныхъ котлахъ, употреблялъ дубильную кору, древесные отвары, морскую соль и разные химическіе продукты, въ которыхъ главную роль играли соли натра. Полученные имъ результаты были отчасти удовлетворительны, но не вполне: всѣ эти вещества не оказываютъ рѣшительно никакого вліянія на старыя накипи, которыя и можно уничтожить только такими средствами, которыя производятъ уходъ воды съ паромъ и даже разъѣдаютъ металлы. Уходъ воды съ паромъ — важное неудобство, особенно въ паровозахъ. Паръ вмѣстѣ съ водою уноситъ землистыя вещества и самый соляной растворъ; отъ того послѣдній приходится концентрировать, что влечетъ за собой вѣроятно увеличеніе температуры, нужной для образованія пара.

Кромѣ того, землистыя вещества при своемъ проходѣ царапаютъ цилиндры и проникаютъ во всѣ смычки.

Толстыя дубовыя доски, положенныя въ котлы неподвижныхъ паровыхъ машинъ, дали довольно хорошіе результаты. Вытащенные изъ котла по прошествіи нѣкотораго времени, онѣ найдены совершенно обуглившимися, а въ котлѣ



осталась только грязь. Въ паровозахъ опытъ затруднительнѣе: здѣсь всегда есть опасность, что доски могутъ попасть въ пространство между стѣнками и огневыми трубками.

Употребленіе патоки съ сахарныхъ заводовъ найдено также въ нѣкоторыхъ случаяхъ довольно удовлетворительнымъ. Вещество это не разъѣдаетъ котловъ, препятствуетъ образованію накипей, меньше другихъ содѣйствуетъ уходу воды съ паромъ, но не уничтожаетъ старыхъ накипей, а только размягчаетъ ихъ, и то слишкомъ медленно.

Фонтене пришло на мысль испытать—не способны ли накипи къ промерзанію? Тогда можно бы котлы, пока стѣнки ихъ покрыты еще сыростью подвергать дѣйствию мороза и потомъ снова нагрѣвать съ цѣлю заставить накипи отваливаться отъ стѣнокъ. Оказалось, что свѣжія накипи изъ воды нѣкоторыхъ мѣстностей способны къ промерзанію, а старыя вовсе неспособны.

Полонсо полагаетъ, что все попытки избавиться отъ накипей, въ родѣ описанныхъ выше, не пригодны для паровозныхъ котловъ, еслибъ даже онѣ и увѣнчались нѣкоторымъ успѣхомъ. По его мнѣнію гораздо лучше подвергать самую воду, назначенную для котловъ, предварительному очищенію. Большіе аппараты, нужны для этой цѣли, требуютъ значительныхъ расходовъ, неумѣстныхъ, когда дѣло идетъ объ одной неподвижной машинѣ; но на станціяхъ желѣзныхъ дорогъ, гдѣ всякій день наполняется множество котловъ, подобная издержка всегда вознаграждается сбереженіемъ въ прочности паровиковъ. Опираясь на это соображеніе, Полонсо обратилъ свое вниманіе главнымъ образомъ на очищеніе воды отъ углекислыхъ соединеній, состав-



ляющихъ основу всѣхъ накипей. Съ этою цѣлю онъ приливалъ къ очищаемой водѣ известковое молоко въ большей или меньшей пропорціи, смотря по количеству содержащихся въ ней углекислыхъ соединеній. Мало растворимая углекислая известь образовала по истеченіи нѣкотораго времени осадокъ; вода, слитая съ осадка, давала также накипи, но втрое меньше тѣхъ, которыя получались при употребленіи воды, не подвергнутой еще очищенію известковымъ молокомъ. Вода, въ которую вливалось известковое молоко, успѣвала отстояться совершенно никакъ не раньше сутокъ, что составляетъ важное неудобство. До истеченія этого срока, она содержала въ себѣ значительное количество углекислой извести, которая при испареніи воды въ котлѣ осаждалась въ паровыхъ ходахъ и въ отверстіяхъ, назначенныхъ для выхода пара. Для избѣжанія траты времени пробовали процеживать воду чрезъ ткани; но послѣднія скоро засаривались и не пропускали остальной воды. Сливаніе воды съ поверхности также не помогло. По мнѣнію Полонсо на каждой станціи должно устраивать по три резервуара съ тѣмъ, чтобы въ то время, пока вода расходуется изъ перваго резервуара, въ остальныхъ двухъ отстой могъ сдѣлаться совершеннымъ. Сверхъ того, осажденіе должно по его мнѣнію ускориться, если бы съ известковымъ молокомъ прибавлять избытокъ извести.

Желая изгнать изъ воды сѣрнокислыя соединенія, употребляли соли барита, въ которыхъ одинъ недостатокъ—слишкомъ большая цѣнность. Слѣдовало бы разсмотрѣть, стоитъ ли хлопотать много о сѣрнокислыхъ соединеніяхъ, которыхъ содержаніе всегда незначительно, и не лучше ли въ этомъ случаѣ употребить въ небольшомъ количествѣ тѣ же



вещества, которыми пользуются въ неподвижныхъ паровыхъ машинахъ.

Излагая свое мнѣніе, Полонсо указываетъ также на затруднительность чистки паровознаго котла, когда въ немъ есть накипи: приводится разбирать всѣ пламенные трубки, и, не смотря на эту сопряженную съ большими расходами операцію, почти невозможно хорошо очистить котель одной механической работой. Употребивъ кислоты, Полонсо убѣдился, что растительныя кислоты худо дѣйствуютъ, а минеральныя портятъ металлъ. Онъ сильно настаиваетъ на необходимости отыскать дѣйствительное средство для избѣжанія накипей, которыхъ толщина достигаетъ иногда 6 сантиметровъ, особенно въ мѣстахъ надъ топкою. Накипи влекутъ за собой постоянныя опасенія и значительные расходы.

По мнѣнію Бартоломе, хорошее дѣйствіе патоки должно быть кажется приписано значительному содержанію въ ней кали. Но Полонсо кладетъ ее въ котлы такъ мало, что результатъ едва ли можетъ быть объясненъ химическимъ дѣйствіемъ; скорѣе можно принять, что вязкость служитъ главнымъ препятствіемъ образованію накипей. Бартоломе замѣтилъ также, что накипи, отпавшія отъ стѣнокъ котла при дѣйствіи углекислаго натра, надъ топкою составляли куски въ 4 и 5 куб. сантиметровъ.

Полонсо приводитъ наблюденія, что чистая вода, разумѣется лучшее средство для избѣжанія новыхъ накипей, отдѣляетъ иногда отъ стѣнокъ котла и старыя. Такъ на Эльзасской желѣзной дорогѣ одна дистанція имѣетъ воду, дающую накипи, а другая чистую; машины, сдѣлавшіяся совершенно негодными къ работѣ на первой дистанціи, дѣйство-



вали долго еще и хорошо на второй. Накипи уничтожались такъ хорошо, что котлы часто начинали пропускать паръ черезъ расщелины, которыя до тѣхъ поръ оставались залѣпленными накипнымъ веществомъ. Последній фактъ несколько не удивителенъ: известно, что опилки, лошадиные объѣдки, мука часто съ пользою употреблялись для избѣжанія ухода пару черезъ расщелины въ тѣхъ случаяхъ, когда котловъ нельзя было поправить сейчасъ же.

Полонсо замѣчаетъ кромѣ того, что вода можетъ быть со всѣмъ не чиста и не давать накипей, какъ на Парижско-версальской желѣзной дорогѣ. Одному машинисту случилось однажды на желѣзной дорогѣ изъ Монтеро въ Троа взять воду для котловъ изъ торфяныхъ болотъ: накипи, бывшія въ котлахъ, совершенно уничтожились. Кажется этотъ фактъ заслуживаетъ особеннаго вниманія. По мнѣнію Ланге дѣйствіе торфяной воды должно быть приписано содержанию кали. Полонсо полагаетъ, что металлы съ очищенной поверхностію покрываются меньше накипями, чѣмъ металлы, несчищенные на поверхности.

Белье напоминаетъ фактъ, что котлы, изъ которыхъ выпускаютъ воду при давленіи, содержатъ больше накипей, чѣмъ другіе.

Изъ морскихъ котловъ выпускаютъ горячую воду черезъ каждые четыре часа, или выкачиваютъ ее постоянно особыми насосами. Но по наблюденіямъ Кусте этимъ способомъ можно ослаблять образованіе накипей только въ морскихъ котлахъ низкаго давленія. По его же изслѣдованіямъ главную часть отвердѣлыхъ на котлахъ накипей составляютъ сѣрнокислая и углекислая извести. Онѣ осаждаются на дно котла при 120° Реомюра. На этомъ основаніи онъ предло-



жилъ кипятить воду предварительно въ особомъ сосудѣ при 5 и  $5\frac{1}{2}$  атмосферахъ, процѣживаніемъ отдѣлить отъ нея осадки и послѣ того уже употреблять ее на питаніе котловъ высокаго давленія.

Разумѣется, что всѣ взрывы гораздо чаще случаются при машинахъ высокаго давленія, нежели при обыкновенныхъ; но многіе инженеры, между которыми встрѣчаемъ Перкинса, Оливера, Ивенса и другихъ, спорили противъ этого.

---



## ПРИБАВЛЕНІЕ.

### **ВЫЧИСЛЕНІЕ ДИНАМИЧЕСКИХЪ РАЗМѢРОВЪ ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ И КОТЛОВЪ.**

Для проектированія паровой машины необходимы слѣдующія данныя: сила машины, выражаемая обыкновенно числомъ паровыхъ лошадей, и цѣль употребленія, а иногда и устройство самыхъ исполнительныхъ механизмовъ.

§ 93. Съ опредѣленіемъ назначенія машины, дѣлается извѣстенъ и родъ ея движенія, при которомъ исполнительные механизмы могутъ работать наивыгоднѣйшимъ образомъ.

Система машины зависитъ и отъ ея размѣровъ, и отъ рода фабрикацій, для производства которой назначается движитель. Небольшіе паровые пріемники, силъ до 5 или до 6, лучше всего строить высокаго давленія съ расширеніемъ или безъ расширенія, смотря по выбору ея конструкціи. По незначительности своихъ размѣровъ и простотѣ въ построеніи, они сравнительно дешевле, занимаютъ меньше мѣста и не представляютъ большой опасности въ отношеніи высокой упругости употребляемаго въ нихъ пара. Машины силою отъ 10 или 15 до 100 паровыхъ лошадей могутъ быть и



высокаго, низкаго и средняго давленія, съ холодильникомъ и безъ холодильника. Впрочемъ есть случаи, въ которыхъ употребленіе той, или другой системы совершенно обуславливается мѣстными обстоятельствами, наиримѣрь: на паровозахъ возможно употребленіе только машинъ безъ холодильника. Недостатокъ воды тоже бываетъ причиною, почему и для заводовъ прибѣгаютъ къ построенію этихъ же машинъ; на пароходахъ дѣлаютъ часто то же самое для сбереженія мѣста. Разумѣется само собою, что машины высокаго давленія (безъ холодильника) значительныхъ размѣровъ должны быть устраиваемы съ расширеніемъ, какъ наисовершеннѣйшія въ этомъ родѣ; сбереженіе горючаго матеріала можетъ составить въ годовое время значительныя суммы. Говоря вообще, большія постоянныя машины приличнѣе употреблять съ холодильникомъ, если только не препятствуютъ этому мѣстныя условія. Лучшіе и извѣстные строители машинъ почти исключительно употребляютъ систему средняго давленія (съ холодильникомъ и расширеніемъ), которая въ послѣднее время почти уже вытѣснила систему машинъ Уатта, удерживающихъ свое преимущество въ отношеніи малой упругости употребляемаго въ нихъ пара только тамъ, гдѣ потребленіе воды есть вопросъ, нисколько не обуславливающий.

Если машина назначается работать съ переменнымъ расширеніемъ, то степень расширенія, соотвѣтствующая нормальному ходу, должна быть, при проектированіи машины, задана между предѣльными расширеніями, употребляемыми въ практикѣ. При такомъ распредѣленіи наименьшее расширеніе пара будетъ имѣть мѣсто въ томъ случаѣ, когда машина производитъ *наибольшую* работу; наибольшее же, когда преодолеваемое сопротивленіе менѣе нормальнаго. Для



машинъ высокаго давленія (безъ холодильниковъ) расширеніе устраивается отъ  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{1}{5}$  хода поршня; средняго же давленія, т. е. съ холодильникомъ, отъ  $\frac{1}{3}$  до  $\frac{1}{3}$ .

§ 94. Для опредѣленія размѣровъ главныхъ частей паровой машины, напримѣръ пароваго цилиндра, употребляютъ обыкновенно формулу Понселе (22)

$$N = K \frac{2\mu}{60} \cdot \frac{144}{40} \cdot \frac{p_0 W_0}{15} \left( 1 + \log. \text{hyp. } M - \frac{p'}{p_0} M \right)$$

въ которой

$N$  есть число паровыхъ лошадей, изображающее силу проектируемой машины,

$K$  коэффициентъ ея полезнаго дѣйствія,

$\mu$  число одиночныхъ размаховъ пароваго поршня въ минуту,  
 $p_0$  упругость пара въ котлѣ, выраженная давленіемъ въ фунтахъ на квадратный дюймъ,

$W_0$  объемъ пара, расходуемый паровымъ цилиндромъ въ каждый одиночный размахъ поршня,

$M$  степень расширения пара, т. е. отношеніе объема окончательнаго, занимаемаго паромъ по его расширенію, къ объему первоначальному, соотвѣтствующему впусценію паровъ въ цилиндръ.

$p'$  давленіе пара по другую сторону поршня, выраженное также въ фунтахъ на квадратный дюймъ.

По даннымъ всѣмъ обстоятельствамъ, выражаемымъ знаками написанной формулы, опредѣляютъ діаметръ пароваго поршня. Чтобы въ означенную формулу ввести діаметръ  $d$ , изобразимъ расходъ пара  $W_0$  въ размѣрахъ пароваго цилиндра. Такъ какъ этотъ расходъ пара равенъ

$$\frac{\pi d^2 l}{4 M}$$

такъ какъ въ свою очередь



$$1 \frac{2\mu}{60} = v \text{ (скорость поршня);}$$

поэтому для опредѣленія діаметра пароваго поршня получимъ формулу слѣдующаго вида:

$$N = K \frac{144}{15.40} P_0 \frac{\pi d^2}{4} \frac{v}{M} \left( 1 + \log. \text{hyp. } M - \frac{P'}{P_0} M \right) \dots (107)$$

въ которой  $d$  и  $v$  выражены въ футахъ.

Избравъ систему машины сообразно съ мѣстными обстоятельствами и условіями ея примѣненія, получаютъ въ то же время, какъ извѣстныя величины, упругость пара въ котлѣ, степень расширенія его въ цилиндрѣ (если машина съ расширеніемъ) и давленіе на другую сторону поршня такъ что въ употребленной формулѣ только скорость поршня и діаметръ его остаются неизвѣстными. Для опредѣленія сего послѣдняго берутъ скорость поршня съ существующихъ машинъ подобнаго же рода.

Впрочемъ скорость поршня паровыхъ машинъ не можетъ быть разсматриваема какъ величина совершенно произвольная: при построеніи машины она зависитъ отъ рода фабрикаціи, для которой назначается движитель. Приложеніе движителя къ какой либо промышленной работѣ уже заранѣе опредѣляетъ родъ движенія машины и обусловливаетъ нѣкоторымъ образомъ скорость движенія вала, и слѣдовательно пароваго поршня. Лучшими примѣрами этому служатъ машины паровозныя, пароходныя, водокачальныя (въ которыхъ движеніе вала непосредственно передается насосу), паровые молота и проч.: во всѣхъ такихъ машинахъ скорость поршня и скорость исполнительныхъ механизмовъ находятся *въ непосредственной* между собою зависимости, такъ что общая ихъ скорость должна быть средняя и при томъ мало различающаяся отъ наивыгоднѣйшихъ скоростей пароваго поршня и исполнительнаго механизма.



Впрочемъ разсматриваемый случай существуетъ не всегда. Постоянныя машины заводовъ и фабрикъ обыкновенно назначаются для производства нѣсколькихъ работъ, иногда весьма различныхъ по свойству обрабатываемыхъ продуктовъ и роду движенія орудій. Въ такихъ случаяхъ устраиваютъ между машиною—двигителемъ и машинами—орудіями *приводы*, какъ посредствующія части, служащія для измѣненія скорости движенія. Вообще, для избѣжанія излишняго тренія и излишнихъ расходовъ на построеніе приводовъ, надлежитъ изыскивать *возможно-наикратчайшее* сообщеніе движенія между двигителемъ и орудіями. Это достигается тѣмъ, что поршню машины задаютъ скорость, наиблизайшую къ скорости движенія главныхъ машинъ орудій. Если же разность между скоростью этихъ орудій и нормальною скоростью паровой машины довольно значительна, тогда неизбѣжно предстоить устраивать приводы, равно какъ и въ томъ случаѣ, когда движеніе машины—двигителя передается многимъ машинамъ—орудіямъ одновременно и на большомъ протяженіи.

Судя по существующимъ примѣрамъ, *нормальная* скорость поршня во всѣхъ машинахъ, какого бы рода онѣ ни были, одна и та же и хотя увеличивается съ силою машины, но въ предѣлахъ очень не обширныхъ. Такъ напримѣръ въ машинахъ силою въ 5 лошадей поршень проходитъ около 3 футъ въ секунду, въ машинахъ въ 100 силъ около  $4\frac{1}{4}$  фута. Въ болѣе сильныхъ машинахъ, устраиваемыхъ часто для морскихъ пароходовъ, скорость поршня доходитъ до 7 футъ и болѣе въ секунду. Въ паровозахъ поршень движется обыкновенно со скоростью 6 футъ въ секунду. Чтобы дать машинѣ, какъ говорятъ, спокойный ходъ и при томъ уменьшить по возможности всѣ бесполезныя сопротивленія и по-



теру упругости въ паропроводахъ, допускаютъ движеніе поршня только съ умѣренной скоростью. По правилу Уатта, изображенному въ слѣдующей таблицѣ, средняя скорость поршня должна быть въ малыхъ машинахъ около 3 футъ и не болѣе  $3\frac{1}{2}$  и въ большихъ не болѣе 4 футъ.

Сила маши- ны въ паро- выхъ лоша- дяхъ.	отъ 4 до 8	отъ 8 до 13	отъ 13 до 23	отъ 23 до 40	отъ 40 до 60	отъ 60 до 100
Скорость поршня въ дюймахъ.	34	37	40	43	46	50

Соображаясь съ этими данными и родомъ движенія исполнительныхъ механизмовъ всегда можно опредѣлить условія, какимъ скорость движенія поршня должна удовлетворять, и задавая величину ея, получаютъ діаметръ поршня по уравненію

$$d = \sqrt{\frac{N}{K \frac{144}{15.40} p_0 \frac{\pi W_0}{4 M} \left(1 + \log. \text{hur. } M - \frac{P'}{p_0} M\right)}} \dots (108) (*)$$

выведенному изъ формулы (107).

(\*) Обыкновенно при вычисленіи діаметра поршня  $d$  слѣдуетъ брать условія дѣйствія паровой машины, т. е. силу ея  $N$ , упругость пара въ котлѣ  $p_0$ , скорость поршня  $v$  и степень расширенія  $M$  такія, которыя соотвѣтствуютъ нормальному ходу машины. Тогда для побѣжденія случайныхъ сопротивленій, для которыхъ будетъ потребна сила  $N'$  большая  $N$ , останется возможнымъ увеличивать упругость пара въ котлѣ, или измѣнить расширеніе пара, смотря по системѣ машины.



По заданной же скорости поршня можно помощью уравнения

$$v = l \frac{2\mu}{60} \dots \dots \dots (109)$$

опредѣлить, смотря по обстоятельствамъ, или длину размаха поршня  $l$ , по числу оборотовъ, совершаемыхъ существующими паровыми машинами подобнаго рода, или число оборотовъ вала въ минуту, задавъ длину хода поршня.

Такъ какъ нормальная скорость поршня для разныхъ размѣровъ и системъ паровыхъ машинъ измѣняется весьма мало, а длина хода поршня зависитъ отъ размѣровъ машины, и слѣдовательно измѣняется вмѣстѣ съ нею, поэтому для малыхъ машинъ при ихъ небольшомъ ходѣ поршня число оборотовъ всегда бываетъ больше, нежели въ сильныхъ машинахъ.

Мѣстныя условія всегда яснѣе покажутъ, которая изъ двухъ искомыхъ величинъ уравненія (109) должна быть *задана* какъ данность, и которая слѣдовательно опредѣляется уже въ зависимости отъ заданной.

При отысканіи длины хода поршня не худо руководствоваться примѣрами машинъ существующихъ, и на этотъ конецъ въ нижеслѣдующей таблицѣ представлены числа оборотовъ вала маховаго колеса постоянныхъ паровыхъ машинъ разныхъ системъ и разныхъ силъ.







Въ практикѣ дѣлають длину хода поршня отъ  $1\frac{1}{2}$  до 3 разъ болѣе діаметра; такъ какъ боковая поверхность цилиндра есть поверхность охлаждающая, поэтому строители машинъ избѣгаютъ слишкомъ большаго отношенія хода поршня къ его діаметру; наиболѣе употребляемое ими отношеніе есть 2.

§ 95. Расходъ пара, потребляемый цилиндромъ при извѣстныхъ его размѣрахъ въ секунду есть

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{M} \frac{2\mu}{60} = I \text{ куб. фут.}$$

Котель же долженъ готовить пара отъ 1,1 до 1,2 I, потому что часть паровъ теряется чрезъ охранные клапаны, въ распредѣлительномъ приборѣ, въ мѣстахъ соединенія отдѣльныхъ частей машины ведущихъ паръ, а главное потому, что значительная часть воды уносится изъ котла паромъ въ видѣ капель. По этому испаряемость котла должна быть въ секунду

$$1,12 \frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{M} \frac{2\mu}{60} = S \text{ куб. фут. . . . (110)}$$

Зная теперь испаряемость котла или количество пара (въ куб. фут.) долженствующее образоваться въ котлѣ въ единицу времени, можно рассчитать *площадь нагрѣва* паровика, употребивъ формулу (92)

$$G = \frac{3600 S}{n},$$

въ которой  $G$  и  $S$  выражены въ футахъ: первая квадратныхъ и вторая кубическихъ. Примѣры существующихъ котловъ доставляютъ нѣсколько данныхъ для того, чтобы можно было судить, сколько тѣ или другія системы паровыхъ котловъ производятъ паровъ на единицѣ площади ихъ нагрѣва. Напримѣръ опытами дознано, что котлы Уатта испа-



ряютъ на 1 квадрат. футъ нагрѣваемой поверхности 5 и 6 фунтовъ воды въ 1 часъ; пароводные котлы низкаго давленія даютъ около  $7\frac{1}{2}$  до 8 фунтовъ пара; котлы высокаго давленія безъ кипятильниковъ производятъ по опытамъ Каве 8 и 9 фунтовъ пара въ 1 часъ и на 1 квадрат. футъ съ кипятильниками даютъ только  $4\frac{1}{2}$  и  $5\frac{1}{2}$  фунт. пара на такую же площадь нагрѣва. Мѣдный котель (толщиною листа въ 1,4 линіи) по опытамъ Клемана производилъ 22 фунта пара въ часъ на квадрат. футъ площади нагрѣва. Паровозные котлы Манчестерско-Ливерпульской желѣзной дороги по опытамъ Памбура, при скорости поѣзда, равной 30 верстамъ въ часъ и при отверстіи выдувной трубочки отъ 2 до  $2\frac{1}{2}$  дюймовъ производили 13,7 фунт. пара въ часъ.

По извѣстной площади нагрѣва опредѣляется помощью формулъ (93), (94), (95) и (96) размѣры паровика извѣстной системы, выбранной въ сообразности съ системою машины. При этомъ не слѣдуетъ упускать изъ виду того, чтобы котель предоставлялъ скопленію паровъ достаточную вмѣстимость, при которой упругость ихъ въ котлѣ не могла бы измѣняться во все время дѣйствія машины. Если паровое пространство въ котлѣ мало въ сравненіи съ объемомъ расходуемаго пара въ цилиндрѣ, тогда паръ не можетъ оставаться долгое время при надлежащей упругости и ходъ машины неизбѣжно будетъ замедляться, а иногда даже во все останавливаться, до тѣхъ поръ, пока паръ *скопится*, т. е. пока приобрѣтетъ опять надлежащую упругость. Кромѣ этого малая вмѣстимость паровъ въ котлѣ приводитъ всегда къ вынужденію держать въ печи сильный огонь, для того, чтобы большимъ раскаленіемъ пламени увеличить испарительную способность паровика. Очевидно, что въ та-



кихъ обстоятельствахъ котель не можетъ служить долгое время, и части его, подверженныя сильному пламени скоро прогараютъ.

Чтобы расходъ пара въ машинѣ былъ не чувствителенъ для упругости его въ котлѣ, строители дѣлаютъ объемъ пароваго пространства паровика въ 12 и даже въ 15 разъ болѣе объема пара, расходуемаго цилиндромъ въ каждый размахъ поршня для машинъ низкаго давленія, и въ 17 разъ въ котлахъ высокаго давленія. Другіе строители имѣютъ правиломъ дѣлать объемъ котловъ отъ 15 до 20 разъ болѣе противу объема воды, испаряемой котломъ въ часъ.

Что касается до опредѣленія длины цилиндрическаго котла относительно его діаметра, то для этого нѣтъ опредѣленныхъ правилъ. Тутъ руководствуются обыкновенно собственнымъ усмотрѣніемъ и сообразованіемъ съ мѣстными обстоятельствами. Впрочемъ для извѣстной упругости паровъ существуютъ крайніе предѣлы діаметровъ паровыхъ котловъ, которые не слѣдуетъ переступать при данной толщинѣ металла (таблица § 80). Это обстоятельство можетъ лучше всего руководить при вычисленіи длины котла, когда величина діаметра его болѣе или менѣе уже обусловлена.

Во всякомъ случаѣ лучше дѣлать котлы длиннѣе, нежели короче: чрезъ это, кромѣ того, что при меньшемъ діаметрѣ котель представляетъ меньшую способность къ разрыву, въ котлахъ съ внутренними пламенными ходами увеличивается длина этихъ ходовъ, иногда въ такой степени, что площадь нагрѣва, представляемая ими, бываетъ одна уже достаточна для произведенія требуемаго количества пара, и тогда наружные дымовые ходы, устраиваемые въ самой печи, могутъ быть избѣгнуты. Если же по вычисленію длина котла



для данного его объема выходить очень длиною, тогда слѣдуетъ употребить два, три или болѣе котловъ вмѣсто одного, смотря по требуемой величинѣ ихъ.

§ 96. Формула (89) послужитъ къ опредѣленію расхода топлива, потребнаго для произведенія количества пара, расходуемаго паровымъ цилиндромъ извѣстныхъ уже размѣровъ. Объемъ пара, расходуемый при каждомъ одиночномъ размахѣ поршня, равенъ

$$\frac{\pi d^2 l}{4 M}$$

и въ единицу времени, напр. въ часъ, равенъ

$$\frac{\pi d^2 l}{4 M} 2_{\mu} 60.$$

Тогда по формулѣ (89) количество топлива выразится слѣдующимъ образомъ:

$$x = \frac{\pi d^2 l}{4 M} 2_{\mu} 60 \frac{A p_0}{1 + \alpha t} \cdot \frac{(520 - t')}{b C} \text{ (въ вѣсов. един.) } (111).$$

Въ этомъ уравненіи сверхъ прежнихъ величинъ

$A$  есть отвлеченное число и равно 0,003528.

$t$  — температура пара по стоградусному термометру.

$\alpha$  — коэффициентъ расширенія пара = 0,00368.

$t'$  — температура воды, поступающей въ котель.

$C$  — число единицъ теплоты, доставляемое какимъ нибудь топливомъ при его сгораніи.

$b$  — коэффициентъ полезнаго дѣйствія топлива.

Нужныя при вычисленіи расхода топлива помощію уравненія (111) величины  $C$  для разныхъ горючихъ матеріаловъ представлены въ слѣдующей таблицѣ.



Горючіе матеріалы.	Число единицъ теплоты, доставляемое въвою единицею горючаго матеріала.
Древесный уголь. . . . .	6000 до 7000
Коксъ. . . . .	6000
Обыкновенный каменный уголь. .	7500
Сухой торфъ. . . . .	4800
Обыкновенный торфъ съ 20% воды.	3000
Торфъ втораго качества. . . . .	1500
Сухое дерево всѣхъ сортовъ. . . .	3600
Обыкновенное дерево съ 20% воды	2800
Торфяной уголь. . . . .	5800

§ 97. Зная изъ ежедневныхъ наблюденій надъ ходомъ работъ, сколько извѣстнаго топлива сгораетъ на единицу площади рѣшетки, можно опредѣлить всю площадь этой послѣдней. Среднимъ числомъ на квадратный футъ этой площади сгораетъ въ 1 часъ каменнаго угля около 10—12 фунт., дровъ около полукуда. Впрочемъ независимо отъ этихъ данныхъ размѣры рѣшетки должны удовлетворять еще другому условію. Мы уже говорили (§ 79), что для наилучшаго дѣйствія горѣнія въ процессѣ парообразованія между площадями нагрѣва и рѣшетки пароваго котла должно быть извѣстное отношеніе. Строители машинъ дѣлаютъ это отношеніе, сколько можно судить по существующимъ устройствамъ, для разныхъ котловъ слѣдующимъ образомъ: въ пароводныхъ котлахъ 20, въ Корнваллійскихъ 18, въ па-



ровозныхъ 32 и 48, даже 50 и 60, въ котлахъ съ кипя- тильниками 44, въ котлахъ Уатта между 12 и 17, въ котлахъ цилиндрическихъ съ однимъ внутреннимъ пламен- нымъ ходомъ между 40 и 56; въ котлахъ Уатта съ однимъ внутреннимъ пламеннымъ ходомъ 16; въ вертикальныхъ трубчатыхъ котлахъ 20. Исключительно только отъ выбора горючаго матеріала зависитъ то обстоятельство, что въ котлахъ одной и той же системы, слѣдовательно при одномъ и томъ же устройствѣ, дѣлаютъ отношеніе площадей нагрѣва котла и рѣшетки въ одномъ случаѣ болѣе, въ другомъ менѣе. Практики совѣтуютъ вообще дѣлать рѣшетку лучше больше, чѣмъ меньше противу размѣровъ, получаемыхъ по вычисле- ніямъ, основаннымъ на означенныхъ данныхъ.

Промежутки между колосниками дѣлаются также смотря по горючему матеріалу. Главныя условія при этомъ со- стоятъ во первыхъ въ томъ, чтобы пустоты между колосни- ками доставляли достаточный проходъ воздуху, и во вто- рыхъ, чтобы эти пустоты не допускали проваливаться между колосниками мелкимъ кускамъ горючаго матеріала, еще не сгорѣвшаго. Въ практикѣ дѣлаютъ отношеніе всей площади рѣшетки къ площади пустоты для дровъ  $\frac{1}{4}$ , для каменнаго угля отъ  $\frac{1}{7}$  до  $\frac{1}{15}$  смотря по качеству угля.

§ 98. Вообще во всѣхъ сочиненіяхъ паровыхъ машинъ мало говорится о размѣрахъ топки и если есть нѣкоторыя данныя, полученные частію изъ практики, частію изъ вы- водовъ по аналогіи, но они весьма разногласны; такимъ образомъ положительныхъ руководствъ для построенія отдѣльныхъ частей топки почти нѣтъ. Весьма недавно впро- чемъ профессоръ Вибе (Wiebe) представилъ въ одной изъ своихъ записокъ слѣдующее мнѣніе по этому предмету, которое по видимому довольно вѣрно. Вибе говоритъ, что



1) вмѣстимость пламеннаго пространства (вмѣстимость топки) должна быть, чтобы сжигать въ часъ

100 фунтовъ каменнаго угля	отъ 7 до 8 куб. футъ (*)
100 — твердаго дерева и бурога угля .	— 14 — 16 —
100 — мягкаго дерева и торфа . . . . .	— 21 — 24 —
100 — древеснаго угля и кокса . . . . .	— 17 — 22 —

2) высота пламеннаго пространства, т. е. разстояние рѣшетки отъ нижней части котла:

для каменнаго угля . . . . .	отъ 13 до 15 дюймовъ
для твердаго дерева и бурога угля .	— 15 — 18 —
для мягкаго дерева и торфа . . . . .	— 18 — 24 —
для древеснаго угля и кокса . . . . .	— 16 — 18 —

с) величина всей поверхности рѣшетки для сожиганія въ часъ:

100 фунт. камен. угля	должна быть отъ 7 до 8 квадр. футъ
100 — твердаго дерева и бурога угля	6 — 7 —
100 — мягкаго дерева и торфа . . .	$5\frac{1}{2}$ — $6\frac{1}{2}$ —
100 — древеснаго угля и кокса . . .	8 — 9 —

d) площадь промежутковъ между колосниками для сожиганія въ часъ:

---

(\*) Представленные числовыя величины выражены въ прусскихъ мѣрахъ.



100 фунт. кам. угля.	$2\frac{1}{2}$ кв. ф.	или отъ $\frac{3}{10}$ до $\frac{1}{3}$	всей площ.
100 — тверд. дер.	1	— $\frac{1}{7}$ — $\frac{1}{6}$	—
100 — торфа.	. . . 1,3	— $\frac{1}{5}$ — $\frac{1}{4}$	—
100 — кокса.	. . . 2,3	— $\frac{3}{10}$ — $\frac{1}{4}$	—

е) площадь пролета надъ пламеннымъ порогомъ должна быть взята отъ  $\frac{3}{5}$  до  $\frac{4}{5}$  величины отверстіи между колосниками,

ф) площадь пламенныхъ ходовъ должна быть по крайней мѣрѣ равна площади пустотъ между колосниками,

г) площадь устья дымовой трубы должна быть равна площади пролета надъ пламеннымъ порогомъ, т. е. отъ  $\frac{3}{5}$  до  $\frac{4}{5}$  величины площади пустотъ между колосниками.

h) опредѣлять высоту дымовой трубы по слѣдующей формулѣ:

$$H = 52 + \frac{52 + L}{5d - 1} \text{ (прусск. футъ)}$$

въ которой  $H$  высота дымовой трубы, считая отъ высшей точки пламеннаго хода,  $L$  (въ футахъ) длина всѣхъ пламенныхъ ходовъ, считая отъ топочнаго отверстія до начала дымовой трубы,  $d$  (въ футахъ) внутренній діаметръ круглой или сторона квадратной трубы на верхнемъ концѣ ея.

Инженеръ Армстронгъ (R. Armstrong) (\*), основываясь на собственныхъ опытахъ, не совѣтуетъ дѣлать площадь сѣченія дымовой трубы слишкомъ большою; какъ наилучшіе онъ предлагаетъ слѣдующіе размѣры:

---

(\*) Статья его помѣщена въ «Civil Engineer and Architect's Journal» 1855.



Номинальная сила котла въ паровыхъ лошадяхъ.	Высота дымовой трубы въ русскихъ футахъ.	Внутренній діаметръ трубы	
		футы.	дюймы.
10	60	1	6
12	75	1	8
16	90	1	10
20	99	2	—
30	105	2	6
50	120	3	0
70	120	3	6
90	120	4	0
120	135	4	6
160	150	5	0
200	165	5	6
250	180	6	0

§ 99. Объемъ холодильника составляетъ въ большей части построенныхъ машинъ  $\frac{1}{8}$  объема, описываемаго паровымъ поршнемъ въ одинъ размахъ.

Объемъ же, описываемый поршнемъ воздушнаго насоса въ одинъ размахъ, дѣлается всегда равнымъ объему холодильника.

По правилу Уатта въ машинахъ низкаго давленія діаметръ воздушнаго насоса долженъ быть  $\frac{2}{3}$  діаметра пароваго цилиндра, или ихъ площади въ отношеніи 4 къ 9.

Такъ какъ по мѣсту прикрѣпленія стержня воздушнаго насоса въ боромыслу ходъ его поршня составляетъ обыкновенно половину хода пароваго поршня, то объемъ воздушнаго насоса по правилу Уатта выходитъ  $\frac{4}{18} = \frac{1}{4,5}$  объема описываемаго паровымъ поршнемъ — вдвое большій того, какой придаютъ строители машинъ большею частію. Впро-



чемъ въ парходныхъ машинахъ низкаго давленія въ этомъ случаѣ слѣдуютъ чаще правилу Уатта.

Въ машинахъ, устроенныхъ по системѣ Уатта, объемъ холодильника составляетъ обыкновенно  $\frac{1}{3}$  объема, описываемаго паровымъ поршнемъ въ одинъ размахъ его.

Въ машинахъ Вульфа отношенія объемовъ, описываемыхъ поршнемъ воздушнаго насоса и поршнемъ пароваго цилиндра, слѣдующія:

для упругости пара

4,5 атмосфер. 4,0 атмосфер. и 3,5 атмосфер.

$$\frac{1}{1,45} \quad \frac{1}{1,62} \quad \frac{1}{1,85}$$

Въ машинахъ съ холодильникомъ и расширеніемъ съ однимъ цилиндромъ слѣдующее отношеніе объема, описываемаго поршнемъ воздушнаго насоса къ объему, описываемому паровымъ поршнемъ до расширенія:

упругость паровъ  $p_0 = 5,00$  атмосфер. 4,50 атм. 4,00 атм.

$$\text{отношеніе} \quad \frac{1}{2,61} \quad \frac{1}{2,38} \quad \frac{1}{3,13}$$

§ 100. Насосъ холодной воды долженъ доставить въ каждый размахъ его поршня количество воды

$$O' = O \frac{320 - t''}{t'' - t'} \text{ куб. фут.}$$

потребное для охлажденія объема пара  $O$ , расходуемаго въ каждый ходъ пароваго поршня и равнаго поэтому

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{M} \frac{A p_0}{(1 + \alpha t)} \cdot \frac{1}{1,73} \quad (*)$$

(\*) Здѣсь 1,73 есть плотность воды, или вѣсъ кубическаго фута ея въ пудахъ.



Эти насосы устраиваются въ паровыхъ машинахъ всегда одиночнаго дѣйствія, поэтому въ каждый размахъ ихъ поршня должно быть доставляемо двойное количество холодной воды, соотвѣтствующее объему паровъ, расходуемому двумя одиночными размахами пароваго поршня, и слѣдовательно размѣры насоса опредѣляются уравненіемъ

$$\frac{K_{II} \pi D_{II}^2}{4} l_{II} = 2O' \dots \dots (112)$$

въ которомъ коэффициентъ дѣйствія насоса зависитъ отъ его устройства и равенъ для большей части случаевъ 0,8 или 0,9. Строители придаютъ насосамъ холодной воды такіе размѣры, что объемъ, описываемый ихъ поршнемъ, составляетъ  $\frac{1}{25,33}$  объема, описываемаго паровымъ поршнемъ. Уаттъ въ своихъ машинахъ этотъ объемъ, для вознагражденія потери отъ просачиванія, увеличиваетъ еще на  $\frac{1}{10}$ -ю, такъ что, по его, означенное отношеніе объемовъ должно быть  $\frac{1}{24}$ .

Въ машинахъ системы Вульфа съ двумя цилиндрами отношеніе это, смотря по существующимъ примѣрамъ, можетъ быть выражено въ зависимости отъ упругости работающаго пара слѣдующимъ образомъ:

для давленій пара

$$p_0 = 4,5 \text{ атмосфер. } 4,0 \text{ атмосфер. } 3,5 \text{ атмосфер.}$$

$$\text{отношеніе} = \frac{1}{11,36} \quad \frac{1}{11,53} \quad \frac{1}{13,83}$$

Въ машинахъ съ расширеніемъ и холодильникомъ объ одномъ цилиндрѣ

для упругости паровъ

$$p_0 = 5 \text{ атмосфер. } 4,5 \text{ атмосфер. } 4,0 \text{ атмосфер.}$$

$$\text{отношеніе} = \frac{1}{13,3} \quad \frac{1}{14,7} \quad \frac{1}{16,7}$$



§ 101. Питательный насос назначается для добавленія въ котлѣ того количества воды, которое расходуется машиною въ видѣ пара. Такъ какъ въ цилиндрѣ расходуется въ каждый размахъ поршня объемъ пара

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{M},$$

поэтому питательный насосъ долженъ доставлять въ это самое время объемъ воды

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{l}{M} \cdot \frac{A p_0}{1 + \alpha t} \cdot \frac{1}{1,73} = O'' \text{ въ кубич. футахъ.}$$

Питательные насосы паровыхъ машинъ устриваются исключительно одиночнаго дѣйствія, и слѣдовательно объемъ воды, доставляемый ими въ каждый размахъ, долженъ вознаграждать расходъ пара въ цилиндрѣ, соответствующій двумъ размахамъ (одиночнымъ) пароваго поршня.

Строители паровыхъ машинъ придаютъ питательнымъ насосамъ такіе размѣры, что объемъ воды, доставляемый ими, втрое болѣе противу того объема, который по вычисленію долженъ быть доставленъ насосомъ въ одинъ размахъ его поршня.

Такой запасъ въ размѣрахъ питательнаго насоса дѣлается для того, чтобы всегда была возможность поддерживать уровень воды въ котлѣ на надлежащей высотѣ.

Такимъ образомъ размѣры питательнаго насоса опредѣляются условіемъ слѣдующаго уравненія:

$$\frac{\pi d''^2}{4} l'' = 3.2 O'' \dots \dots \dots (113)$$

Обыкновенно дѣлаютъ объемъ, описываемый поршнемъ питательнаго насоса, равнымъ  $\frac{1}{230}$  объема пара, расходуемаго цилиндромъ въ одиночный размахъ пароваго поршня; въ машинахъ Вульфа  $\frac{1}{40}$  до  $\frac{1}{50}$ . Въ машинахъ высокаго давленія (безъ холодильника) слѣдующія отношенія:



при упругости $p_0 = 6,00$ атмосфер.	5,50 атмосфер.	5,00
отношеніе $= \frac{1}{163,8}$	$\frac{1}{177,3}$	$\frac{1}{193}$

въ машинахъ съ расширеніемъ и холодильникомъ

$p_0 = 5$ атмосфер.	4,5 атмосфер.	4,0
отношеніе $= \frac{1}{60}$	$\frac{1}{70}$	$\frac{1}{80}$

Въ практикѣ встрѣчаемъ часто, что это отношеніе бываетъ увеличено до  $\frac{1}{60}$ , даже до  $\frac{1}{50}$  объема, описываемаго паровымъ поршнемъ.

§ 102. Вѣсъ маховаго колеса опредѣляется формулою (71), въ которой вѣсъ  $P$  выраженъ въ пудахъ, скорость  $V$  въ футахъ и коэффициенты  $K$  для различныхъ системъ паровыхъ машинъ представлены въ таблицѣ § 47. Хотя  $P$  выражаетъ вѣсъ всего маховика, но какъ инерція, представляемая ступицею колеса, весьма незначительна, а моментъ инерціи снѣцъ *уравновѣшивается съ сопротивленіемъ воздуха*, которое не было принято въ соображеніе, поэтому при вычисленіи помощію формулы (71) полученную величину для  $P$  можно принять только за вѣсъ обода маховика.

Діаметръ маховыхъ колесъ дѣлается въ слѣдующихъ размѣрахъ: въ машинахъ низкаго давленія съ коромысломъ въ 3 и  $3\frac{1}{2}$  болѣе хода поршня; въ машинахъ съ двумя цилиндрами, съ расширеніемъ, охлажденіемъ и коромысломъ отъ  $3\frac{1}{2}$  до 4 разъ, и въ машинахъ съ однимъ цилиндромъ высокаго давленія съ расширеніемъ, или безъ расширенія, безъ коромысла отъ 4 до 4,5 разъ болѣе хода пароваго поршня. При этомъ однакожъ руководствуются еще расчетами относительно прочнаго сопротивленія обода, которое бы въ состояніи было выдержать дѣйствіе центробѣжной силы, стремящейся разорвать ободъ при большей скорости.



Въ практикѣ кромѣ этого часто самое помѣщеніе обусловливаетъ величину діаметра маховаго колеса.

§ 103. Діаметръ паропроводныхъ трубъ дѣлается въ машинахъ высокаго давленія обыкновенно отъ  $\frac{1}{5}$  до  $\frac{1}{6}$  діаметра пароваго поршня, такъ что отношеніе площадей ихъ есть отъ  $\frac{1}{30}$  до  $\frac{1}{36}$ . Впрочемъ эти размѣры недостаточны и производятъ даже ощутительное уменьшеніе упругости пара при проводѣ его изъ котла въ цилиндръ; поэтому площадь сѣченія паропроводныхъ трубъ лучше увеличивать противу означенныхъ и дѣлать ее въ  $\frac{1}{20}$  и еще лучше  $\frac{1}{16}$  или  $\frac{1}{15}$  площади нагрѣва поршня.

Діаметръ паропроводныхъ трубъ, проводящихъ мятые пары изъ цилиндра въ холодильникъ или атмосферу, смотря по системѣ, дѣлается всегда болѣе, нежели въ паропроводныхъ для того, чтобы не стѣснять свободный выходъ пара, кончившаго уже свое дѣйствіе.

По закону непрерывнаго теченія жидкостей сообразно размѣрамъ паровыхъ трубъ (паропроводныхъ и паропроводныхъ) площади отверстія паровыхъ пролетовъ и оконъ въ цилиндрѣ должны быть равны площади сѣченія трубъ на всемъ ихъ протяженіи. Но строители придаютъ вообще весьма малые размѣры паровымъ пролетамъ, часто даже далеко меньше размѣровъ трубъ; такъ напр. въ машинахъ высокаго давленія площадь пролетовъ бываетъ  $\frac{1}{60}$  площади поршня. Отъ этого-то и происходитъ, что упругость пара, выходящаго изъ цилиндра наружу, бываетъ въ такихъ машинахъ всегда больше атмосфернаго давленія.

Судя по нѣкоторымъ существующимъ машинамъ, это давленіе мятыхъ паровъ бываетъ очень часто отъ 1,1 до 1,25 атмосферы.



§ 104. По известнымъ диаметру поршня и его ходу определяются уже, смотря по системѣ машины, и размѣры всѣхъ *передаточныхъ частей*: коромысла, шатуна, мотыля, вала. Толщина этихъ частей зависитъ совершенно отъ передаваемого ими давленія и опредѣляется на основаніи прочности строительныхъ матеріаловъ. Отъ размѣровъ, которые придаетъ строитель различнымъ частямъ машины, зависитъ между прочимъ еще то, что машина-двигатель потребляетъ болѣе или менѣе работы на треніе этихъ частей, возрастающее вмѣстѣ съ ихъ вѣсомъ. Вообще слѣдовало бы всѣмъ движущимся частямъ машины придавать по возможности наименьшіе размѣры и даже до такой степени, чтобы они только въ состояніи были оказывать сопротивленіе долговременному и постоянному дѣйствію силъ. Но съ другой стороны опытъ указываетъ, что недостаточные размѣры всѣхъ частей машины скорѣе могутъ увеличить треніе, нежели уменьшить его избѣжаніемъ излишняго вѣса частей машины. При недостаточной толщинѣ ихъ часто бываетъ замѣтно во время движенія машины сгибаніе, производящее дрожаніе или вибрацію (*vibration*).

При такихъ обстоятельствахъ весь составъ машины лишень *спокойнаго движенія*, подверженъ постояннымъ сотрясеніямъ и производитъ чрезмѣрное треніе. Въ этомъ отношеніи при построеніи машинъ кромѣ вычисленій, основанныхъ на теоріи прочнаго сопротивленія строительныхъ матеріаловъ, не худо руководствоваться нѣкоторыми правилами, которыя приобрѣтены долговременною практикою строителей машинъ, и которыя могутъ, какъ самыя положительныя данныя, наиболѣе ручаться за удачность построенія.



Въ заключеніе представляемъ нѣкоторыя данныя, составляющія главные вопросы при проектированіи машинъ и котловъ. Результаты эти, взятые съ существующихъ уже примѣровъ, показываютъ въ то же время, въ какой степени устройство этихъ приемниковъ работы пара соотвѣтствуетъ совершенному употребленію двигателя, если мы сравнимъ ихъ съ выводами изъ теоретическихъ умозрѣній, которыя, если ведены основательно, даютъ всегда заключенія, удачно примѣнимыя и въ самомъ устройствѣ. Здѣсь представлены главные элементы дѣйствія и содержанія паровыхъ машинъ, какъ-то: величина нагрѣва котла и величина рѣшетки, обуславливающія количество потребленія топлива, расходъ воды для испаренія въ котлѣ и для охлажденія паровъ въ машинахъ съ холодильникомъ, и наконецъ потребленіе горючаго матеріала на единицу силы машины. Впрочемъ эти данныя, столь необходимыя для составленія проектовъ двигателей, изслѣдованы весьма мало и еще менѣе для каждаго особеннаго устройства машины или котла, которое измѣняется съ каждымъ днемъ въ большей или меньшей степени, и которое во всякомъ случаѣ болѣе или менѣе имѣетъ вліяніе на условія дѣйствія машины или котла. Таблица содержитъ въ себѣ только общія численныя указанія для главныхъ четырехъ системъ машинъ, да и тѣ приведены нами только для приблизительнаго понятія объ условіяхъ содержанія этого рода двигателей.

Въ описаніяхъ разныхъ машинъ и котловъ, публикуемыхъ техническими журналами, часто и почти всегда обозначаются эти данныя; но они къ силѣ машинъ, которая въ практикѣ обыкновенно опредѣляется *около*, не имѣютъ никакого опредѣленнаго или точнаго отношенія, и отъ того ихъ описанія котла или машины въ отношеніи ихъ динамическаго достоинства мало помогаютъ.



На каждую паровую лошадь потребно.					
Система машины.	Площадь на- грѣва котла.	Площадь рѣ- шетки.	Количество холодо- ной воды для охлаж- денія паровъ.	Количество водо- ды, испаряемой въ паровикѣ.	Количество топлива.
Машины безъ рас- ширенія и безъ хо- лодильника.	Квадр. футы 20	Квадр. футы отъ 0,8 до 1,1	—	фунтовъ. отъ 95 до 90.	Отъ 14 до 17 фунт. камен- наго угля; $\frac{1}{70}$ саж. дровъ сосновыхъ и еловыхъ пяти четвертныхъ.
Машины безъ рас- ширенія съ холо- дильникомъ.	отъ 12 до 18; 10 (въ паро- холодныхъ.)	отъ $\frac{3}{4}$ до 1.	20 кубич. футовъ.	отъ 70 до 74. въ нѣкоторыхъ 80.	Отъ 12 до 14 фунт. въ ма- лыхъ машин., и отъ 11 до 12 фунт. каменнаго угля въ большихъ; $\frac{1}{123}$ саж. дровъ соснов. и елов. 5 четверт.
Машины съ расши- реніемъ безъ холо- дильника.	отъ 9,5 до 10,75	0,7.	—	отъ 38 до 40.	Отъ 7,25 до 8,5 въ больш. машин. и 10 фун. въ машин. менѣе 20 силъ камен. угля, и $\frac{1}{136}$ сажени дровъ соснов. и еловыхъ 5 четвертныхъ.
Машины съ расши- реніемъ и холодиль- никомъ.	отъ 6 до 8,6	0,66.	30 кубич. футовъ.	отъ 35 до 37.	Отъ 6 до 7,3 въ маш. съ од- нимъ цилиндр. и отъ 7 до 8,5 фун. въ маш. съ двумя цилин. камен. угля (*) и $\frac{1}{156}$ дровъ сосн. и елов. 5 четв.

(\*) Корвалійскія машины съ расширеніемъ и холодильникомъ, но съ попереѣмнымъ движеніемъ потребляютъ только  $2\frac{1}{2}$  фунта каменнаго угля въ часъ и на каждую паровую лошадь.



Показанія этой таблицы слишкомъ общи, такъ, что они нисколько не оттъняютъ разныхъ видоизмѣненія устройствъ той или другой системы. Для точнаго рѣшенія вопросовъ при построеніи машинъ и котловъ необходимы данныя для каждаго особеннаго устройства или видоизмѣненія, показывающія въ то же время какую пользу приносятъ то или другое изъ этихъ видоизмѣненій относительно содержанія двигателя. Иначе всѣ постепенныя улучшения, производимыя практикою, будутъ для науки безъ всякаго почти значенія. Послѣ этого нельзя не согласиться съ мыслию, что наука о паровыхъ машинахъ сильно нуждается въ разнообразности или *спеціальности* положительныхъ данныхъ и нельзя не требовать, чтобы изученію этого предмета способствовало также участіе опытныхъ изслѣдованій, производимыхъ съ полнымъ знаніемъ дѣла и съ данною цѣлію.



## ПРОГРАММА.

	Страницы.
Предисловіе. . . . .	отъ III до XIV
Вступленіе . . . . .	1 — 6
§ 1. Нѣкоторыя понятія о употребленіи пара и дѣйствии его въ паровыхъ машинахъ. § 2. Сущность изложенія предлагаемаго сочиненія.	

### ГЛАВА ПЕРВАЯ.

Теорія дѣйствія пара въ паровыхъ машинахъ.

*I. Главныя свойства пара, какъ двигателя.* 7 — 19

§ 3. Свойство паровъ насыщать наполняемое ими пространство. § 4. Зависимость между упруностію пара и его температурою; формулы, выражающія эту зависимость. § 5. Зависимость между объемами, упругостями и температурами паровъ. § 6. Плотность паровъ. § 7. Относительный объемъ паровъ; законъ, открытый Навье. § 8. Таблица, представляющая



температуры, объемы, плотности, давленія на единицу площади и относительные объемы паровъ, соотвѣтствующіе упругостямъ ихъ, выраженнымъ въ атмосферахъ. § 9. Формулы Реньо.

*II. Теоретическая работа пара.* . . . . . 20 — 33

§ 10. Работа пара, дѣйствующаго безъ расширения. § 11. Расширеніе пара; объясненіе этого выраженія въ техническомъ смыслѣ; два предположенія относительно расширения пара; вычисленіе работы, доставляемой расширеніемъ паровъ. § 12. Расширеніе паровъ по закону Навье; выгода отъ расширения паровъ при дѣйствіи ихъ на поршень. § 13. Предѣлы, до которыхъ расширеніе паровъ должно быть допущено для извлеченія изъ движителя наибольшаго полезнаго дѣйствія.

*III. Различныя системы и устройство паровыхъ машинъ.* . . . . . 33 — 60

§ 14. Существенныя части паровыхъ машинъ; невозможность достиженія непосредственно круговращательнаго движенія паровыхъ машинъ, раздѣленіе машинъ на группы въ разныхъ отношеніяхъ; процессъ охлажденія паровъ въ машинахъ съ холодильникомъ. § 15. Расположеніе различныхъ частей паровыхъ машинъ; машины низкаго и высокаго давленія. § 16. Историческій взглядъ на постепенное появленіе разныхъ системъ паровыхъ машинъ; примѣры устройствъ наиболѣе обыкновенныхъ паровыхъ машинъ; употреблявшіяся прежде машины одиночнаго дѣйствія (атмо-



сферическія). § 17. Употребленіе паровъ другихъ жидкостей для производства промышленныхъ работъ. Труды Дютрамблея. § 18. Способы распредѣленія пара въ цилиндрѣ. § 19. Устройства для расширенія паровъ. § 20. Передача работы машины исполнительнымъ орудіямъ. § 21. Употребленіе перегрѣтыхъ паровъ; парокалители. Невыгоды употребленія перегрѣтыхъ паровъ. § 21 bis. Паровыя машины, работающія смѣшанными и возобновленными парами.

*IV. Вычисленіе работы, доставляемой паромъ въ паровыхъ машинахъ . . . . . 60 — 67*

§ 22. Способъ вычисленія работы пара до Памбура: формула Тредгольда, и друг. § 23. Такъ называемая «Теорія коэффициентовъ». Разность между теоретическою работою пара и дѣйствительною. § 24. Сущность формулы Понсле и доказательство ложности понятія о ней, составленнаго нѣкоторыми.

*V. Сравненіе главныхъ четырехъ системъ паровыхъ машинъ . . . . . 67 — 78*

§ 25. Употребленіе формулы Понсле для сравненія системъ паровыхъ машинъ между собою. Единица мѣры для этого сравненія. Выводы о недостаткахъ и преимуществахъ однихъ системъ предъ другими. § 26. Разборъ системы машинъ Вульфа; мнимое преимущество ихъ предъ другими системами.



*VI. Движеніе пара отъ котла къ цилиндру.* 78 — 80

§ 27. Потери или ущербы, претерпѣваемые паромъ при этомъ движеніи; причины ихъ.

*VII. Теорія Памбура . . . . .* 80 — 108

§ 28. Неудовлетворительность формулы Понсле для рѣшенія всѣхъ вопросовъ о паровыхъ машинахъ. Опыты Генвуда и Памбура и слѣдствія ихъ. § 29. Начала, на которыхъ основана теорія Памбура: условія нормальнаго движенія паровыхъ машинъ. Уравненія, выражающія это условіе. § 31. Выраженіе скорости поршня при данныхъ прочихъ обстоятельствахъ движенія машины. § 32. Сопротивленія, преодолеваемые поршнемъ при движеніи машины. § 33. Зависимость скорости поршня отъ прочихъ обстоятельствъ движенія. § 34. Полезное дѣйствіе машины при данныхъ ея размѣрахъ и скорости поршня. § 35. Испаряемость пароваго котла. § 36. Необходимость въ запасъ силы машины; условія возможно-наибольшаго полезнаго дѣйствія данной машины: наивыгоднѣйшая скорость поршня, наибольшее полезное сопротивленіе, наибольшая полезная работа машины, наивыгоднѣйшая испаряемость котла. § 37. Наивыгоднѣйшая степень расширенія пара. § 38. Треніе паровыхъ машинъ; способы къ опытному опредѣленію этого тренія.



## ГЛАВА ВТОРАЯ.

### ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ПАРОВЫХЪ МАШИНЪ.

*I. Различные роды движеній машинъ вообще; необходимость и выгоды равномернаго движенія. . . . . 109 — 115*

§ 39. Разборъ обстоятельствъ, при которыхъ можетъ быть тотъ или другой родъ движенія; невозможность равномернаго движенія въ промышленныхъ машинахъ; послѣдствія, производимыя переменнымъ движеніемъ.

*II. Родъ движенія паровыхъ машинъ; теорія мотылей. . . . . 115 — 126*

§ 40. Разборъ паровыхъ машинъ въ отношеніи рода ихъ движенія; правильность движенія машинъ съ попеременнымъ возвратнымъ движеніемъ. § 41. Теорія мотылей двойнаго дѣйствія; періодическое движеніе ихъ.

*III. Способы къ достиженію равномернаго движенія въ паровыхъ машинахъ, преодолюющихъ всегда одинаковое сопротивленіе. . . . . 126 — 136*

§ 42. Предѣлъ равномерности хода, употребляемый въ паровыхъ машинахъ. § 43. Двойные и тройные мотыли; необходимость машинъ съ двойными мотылями въ нѣкоторыхъ случаяхъ. § 44. Необходимость въ употребленіи маховаго колеса въ паровыхъ машинахъ.



<i>IV. Опредѣленіе вѣса маховаго колеса для паровыхъ машинъ. . . . .</i>	136 — 150
--	-----------

§ 45. Вычисленіе этого вѣса; формула, выражающая зависимость этой величины отъ прочихъ обстоятельствъ движенія машины.

§ 46. Опредѣленіе вѣса маховаго колеса для мотыля двойнаго дѣйствія; формула, выражающая теоретическій вѣсъ маховаго колеса для машинъ съ мотылями двойнаго дѣйствія. § 47.

Неудовлетворительность этой формулы для всѣхъ случаевъ практики; причины уклоненія выводовъ ея отъ дѣйствительности; графическій способъ Морена; таблица коэффициентовъ формулы для рззныхъ системъ паровыхъ машинъ.

<i>V. Возстановленіе равномернаго движенія машины при измѣняющемся сопротивленіи. . . . .</i>	151 — 173
---	-----------

§ 48. Причины непостояннаго напряженія сопротивленій, преодолѣваемыхъ двигателемъ; необходимость присутствія въ устройствѣ паровыхъ машинъ такого механизма, который бы распредѣлялъ работу двигателя съ работою сопротивленій; исполненіе этого въ разныхъ паровыхъ машинахъ. § 49. Коническій маятникъ Уатта. § 50. Рѣшеніе главныхъ вопросовъ при построеніи коническаго маятника.

§ 51. Чувствительность регулятора. § 52. Недостаточная точность въ дѣйствіи коническаго маятника Уатта. § 23. Регуляторъ Франке (параболическій регуляторъ). Общее замѣчаніе о другихъ регуляторахъ.



## ГЛАВА ТРЕТІЯ.

### ПРИГОТОВЛЕНІЕ И СГУЩЕНІЕ ПАРОВЪ.

#### *I. Теорія наивыгоднѣйшаго употребленія топлива въ печахъ паровыхъ котловъ . . . 174 — 212*

§ 54. Условія, при которыхъ топливо можетъ доставить наибольшее полезное дѣйствіе; относительное достоинство разныхъ котловъ. § 55. Условія совершеннаго сгорания топлива въ печахъ; обстоятельства, препятствующія развитію возвышенной температуры въ топкѣ; польза пропусканія пара въ пламень топки. Условія наибольшей температуры горѣнія топлива; трудность выполненія этихъ условій въ практикѣ. § 56. Устройство печей паровыхъ котловъ; процессъ горѣнія топлива въ этихъ печахъ; условія, при которыхъ обыкновенное устройство печей паровыхъ котловъ могло бы дать лучшіе результаты. § 57. Дымъ, какъ слѣдствіе несовершеннаго процесса горѣнія топлива въ печахъ; мѣры для устраненія этого явленія въ печахъ паровыхъ котловъ. Обзоръ привилегій, взятыхъ въ разное время на устройство дымогарныхъ печей. § 58. Группированіе разныхъ системъ дымогарныхъ печей по принципамъ, на которыхъ основано ихъ устройство и дѣйствіе. Примѣры, представляющіе собою характеристическіе элементы каждой изъ означенныхъ группъ дымогарныхъ



печей. Печь Галля; газовыя печи. § 59. Равно-  
мѣрность питанія топки горючимъ матеріа-  
ломъ; топка Етъ; круглыя вращающіяся рѣ-  
шетки и безконечныя. Ступенчатыя рѣшетки;  
опыты де Марсилли надъ этими послѣдними.  
§ 60. Печи съ обратнымъ движеніемъ воздуха  
въ топкѣ (*съ обращенною тягою*). § 61. Пред-  
варительное сожиганіе дыма; печь Зильберма-  
на; своды Шварца; печь Ванделера. § 62. Ана-  
лизъ дымогарныхъ печей съ двумя топками или  
съ двумя огнями. § 63. Мнѣніе Дюмери о воз-  
можности сжигать дымъ. Еще одно замѣчаніе о  
печахъ съ обращенною тягою; улучшенія, сдѣ-  
ланныя, въ разное время, въ дѣйствиіи печей этого  
рода. § 64. Передача теплоты, доетаваемой го-  
рѣніемъ, испаряемой водѣ въ паровыхъ котлахъ;  
условія, при которыхъ эта передача можетъ  
быть достигнута въ наибольшей степени. § 65.  
Вліаніе обстоятельствъ, зависящихъ отъ уст-  
ройства котла и печи, на парообразование.  
§ 66. Степень дѣйствія паровыхъ котловъ, т. е.  
величина полезнаго дѣйствія, доставляемаго го-  
рѣніемъ топлива въ печахъ паровыхъ котловъ.

*II. Теорія парообразованія.* . . . . . 212—217

§ 67. Количество теплорода, потребное для  
образованія единицы вѣса пара; законы Уатта  
и Соутерна. § 68. Количество топлива, потреб-  
ляемое въ печахъ паровыхъ котловъ.

*III. Различныя системы употребляемыхъ  
паровыхъ котловъ.* . . . . . 217—240

§ 69. Примѣры котловъ низкаго давленія.  
§ 70. Примѣры котловъ высокаго давленія.



§ 71. Раздѣленіе этихъ послѣднихъ на группы, сличеніе котловъ съ кипяtilьниками съ котлами безъ кипяtilьниковъ; замѣчанія объ устройствѣ котловъ высокаго давленія; достоинство хорошаго паровика. § 72. Котлы, устроенные въ одно и то же время и съ кипяtilьниками и съ нагрѣвательными трубами. § 73. Котлы съ одною только внутреннею нагрѣвательною поверхностью.

*IV. Вопросы, относящіеся до устройства паровыхъ котловъ. . . . . 240 — 261*

§ 74. Испарительная способность и поверхность нагрѣва паровыхъ котловъ. § 75. Опыты Уикстида. § 76. Соотношеніе между величиною котла и площадью нагрѣва его. § 77. Количество воды, уносимой парами изъ котла въ цилиндръ; обстоятельства, имѣющія вліяніе на это явленіе; средства къ избѣжанію его. § 78. Измѣняющаяся испаряемость паровыхъ котловъ. § 79. Отношеніе площади нагрѣва къ площади рѣшетки. § 80. Сопротивленіе котла разрыву; опредѣленіе толщины стѣнокъ котла по данной упругости пара.

*V. Количество пара, доставляемое паровыми котлами на единицу вѣса израсходованнаго топлива . . . . . 261 — 271*

§ 81. Данныя, по которымъ можно было бы судить объ относительномъ достоинствѣ разныхъ системъ паровыхъ котловъ. Причины, по которымъ въ печахъ паровыхъ котловъ не достигается все теоретическое количество теплоро-



да топливъ. § 82. Причины, по которымъ образующійся уже въ печи теппородъ не весь идетъ на парообразованіе. § 83. Тяга въ печахъ паровыхъ котловъ; тяга естественная и искусственная.

*VI. Сгущеніе паровъ . . . . . 271 — 276*

§ 84. Процессъ охлажденія паровъ въ холодильникахъ паровыхъ машинъ. Формулы, служащія для рѣшенія вопросовъ относительно этого процесса. Степень сгущенія паровъ, возможная въ практикѣ. § 85. Охлажденіе паровъ естественнымъ притокомъ холодной воды въ холодильникъ. § 86. Назначеніе воздушнаго насоса; размѣры его.

**ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.**

**Взрывы паровыхъ котловъ и накипи въ нихъ. 277 — 296**

§ 87. Причина взрывовъ въ паровыхъ котлахъ. Охранные клапаны. § 88. Теорія Перкинса. § 89. Мнѣніе Марестье. § 90. Дѣйствіе газовъ при взрывахъ. § 91. Мнѣніе Галя о взрывахъ и о средствахъ къ отвращенію ихъ. § 92. Накипи въ котлахъ.



## ПРИБАВЛЕНІЕ.

*Вычисленіе динамическихъ размѣровъ паровыхъ машинъ и котловъ. . . . .* 297 — 322\*

§ 93. Выборъ системы машины при проектированіи. § 94. Вычисленіе размѣровъ пароваго цилиндра по заданной силѣ машины. § 95. Опредѣленіе расхода пара, потребляемаго цилиндромъ извѣстныхъ уже размѣровъ. Вычисленіе площади нагрѣва паровика и размѣровъ его. § 96. Опредѣленіе расхода топлива для произведенія даннаго количества паровъ. § 97. Вычисленіе величины рѣшетки, и замѣчанія касательно колосниковъ. § 98. Размѣры топокъ и дымовыхъ трубъ печей паровыхъ котловъ. § 99. Объемъ холодильника и воздушнаго насоса. § 100. Размѣры насоса холодной воды. § 101. Размѣры питательнаго насоса. § 102. Опредѣленіе вѣса и размѣровъ маховаго колеса для машины данной силы и данной системы. § 103. Замѣчаніе о размѣрахъ паропроводныхъ и пароотводныхъ трубъ. § 104. Замѣчаніе о устройствѣ общаго состава машины въ отношеніи прочности и сбереженіи силы двигателя.

Необходимыя данныя, могущія служить руководствомъ или основаніемъ при проектированіи пароваго двигателя.

---



### НЕОБХОДИМЫЯ ЗАМѢТКИ.

---

Въ § 25 на страницѣ 68 строка 14 вмѣсто (17) слѣдуетъ читать (22).

Въ томъ же параграфѣ и на той же страницѣ строка 19 вмѣсто (§ 69) должно быть (§ 68).

На фигурѣ 25 въ центрѣ большаго круга пропущена буква А.

---





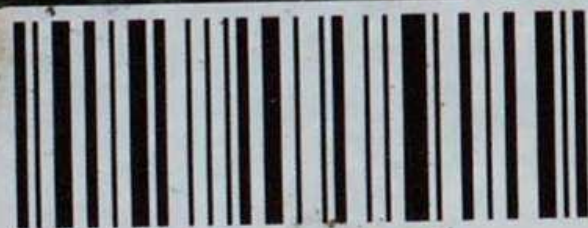






☆ 28 ИЮЛ. 344





2011123482