

К93

Институтъ Инженеровъ путей сообщенія Императора АЛЕКСАНДРА I.

Д. III. 41

О СОПРОТИВЛЕНІИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНІЙ.

ПУБЛИЧНОЕ ЧТЕНІЕ

Инженера В. И. КУРДЮМОВА,

Учебная библіотека института инженеровъ  
путей сообщенія Императора А I.

по инвентарю .....  
№ 3076 .....  
шкафъ .....  
полка .....  
№ 14978 .....

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Министерства путей сообщенія (А. Бенке), Фонтанка 99.  
1889.



1991

K93

Институтъ Инженеровъ путей сообщенія Императора АЛЕКСАНДРА I.

Абонементъ на доступъ-  
технической литературы  
Дата 2004

# О СОПРОТИВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНІЙ.

ПУБЛИЧНОЕ ЧТЕНІЕ

Инженера В. И. КУРДЮМОВА,

состоявшееся 7 Ноября 1888 года въ Конференцъ-залѣ Института.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Министерства путей сообщенія (А. Бенке), Фонтанка 99.  
1889.

1975

42532



## О СОПРОТИВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНІЙ.

(Съ 23 политипажами, помѣщенными въ текстѣ).

Публичное чтеніе инженера В. И. Курдюмова, состоявшееся 7 ноября 1888 г. въ конференцъ-залѣ Института инж. п. с.

---

Милостивые Государи!

Съ небольшимъ 60 лѣтъ тому назадъ, а именно 27 декабря 1825 года, была открыта первая въ мірѣ желѣзная дорога, построенная знаменитымъ Стефенсономъ между Стоктономъ и Дарлингтономъ.

Не смотря на полную удачу перваго опыта, желѣзная дорога съ локомотивомъ, какъ и всякое новшество, не сразу снискала къ себѣ довѣріе публики и техниковъ. При постройкѣ второй желѣзной дороги между Ливерпулемъ и Манчестеромъ, хозяева дороги серьезно задумывались надъ вопросомъ — примѣнить ли къ тягѣ поѣздовъ постоянныя машины, паровозъ или даже лошадей. Только удачное испытаніе новаго паровоза Стефенсона, названнаго имъ „Ракетою“, шедшаго на пробной поѣздкѣ со скоростью 40 верстъ въ часъ, рѣшило вопросъ въ пользу примѣненія паровоза къ движенію по рельсовымъ путямъ.

7 октября 1829 г. — день испытаніе „Ракеты“ Стефенсона — и можно считать днемъ возникновенія желѣзнодорожнаго сообщенія, въ томъ смыслѣ, въ какомъ мы его теперь понимаемъ.

Стефенсонъ возлагалъ большія надежды на желѣзныя дороги, но, сознавая какъ медленно проникаетъ въ жизнь всякое нововведеніе, не думалъ, что ему придется увидать торжество его идеи. Однако на его долю выпало счастье быть свидѣтелемъ того, на сколько широко стала раскидываться желѣзнодорожная сѣть, не только на его родинѣ, въ Англіи, но и далеко за ея предѣлами.



Какъ бы ни были смѣлы предположенія Стефенсона относительно возможности распространенія желѣзной дороги по земному шару, однако едва ли они заходили такъ далеко, какъ зашла дѣйствительность.

Вотъ нѣкоторыя данныя, приводимыя въ *Revue Scientifique*, относительно состоянія желѣзнодорожной сѣти всего земнаго шара въ 1885 году.

Протяженіе всѣхъ дорогъ было равно 487.740 километрамъ, на нихъ обращалось 100.000 паровозовъ, 150.000 пассажирскихъ и 2.500.000 товарныхъ вагоновъ. На желѣзныя дороги израсходовано 130.117.000.000 франковъ. По этой сѣти въ 1885 году перевезено 2.100.000.000 пассажировъ и 78 миллиардовъ пудовъ товаровъ.

Но какъ ни велики эти циффы, онѣ все таки не могутъ выразить того значенія, какое пріобрѣли въ теченіи 60 лѣтъ желѣзныя дороги въ жизни цивилизованнаго міра.

Да едва ли и возможно выразить цифрами значеніе желѣзныхъ дорогъ въ современной жизни и въ исторіи культуры. Оцѣнить это значеніе можно только путемъ сравненія того, что было въ 30-хъ годахъ нашего столѣтія, съ тѣмъ, что мы имѣемъ въ настоящее время.

Едва ли можно ошибаться, утверждая, что почти нѣтъ такого рода дѣятельности отдѣльныхъ лицъ и цѣлыхъ государствъ, на который желѣзныя дороги не оказали бы въ большей или меньшей степени своего вліянія. Если же взглянуть на нѣкоторые роды промышленности, то окажется, что ихъ современными успѣхами они почти всецѣло обязаны желѣзнымъ дорогамъ. Напримѣръ, желѣзодѣлательная промышленность могла дойти до настоящаго ея состоянія, благодаря только тому огромному спросу, какой предъявили желѣзныя дороги на матеріалы для рельсовъ, скрѣпленій, мостовъ, подвижнаго состава. Въмѣсто дорогихъ чугунныхъ рельсовъ 30-хъ годовъ, мы имѣемъ теперь дешевыя стальные, и недалеко уже то время, когда прежняя „чугунка“ станетъ называться „стальною дорогою“, когда названіе дорогъ желѣзными станетъ анахронизмомъ.

Постройка 100.000 паровозовъ, 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> милліоновъ вагоновъ и безчисленнаго множества машинъ для мастерскихъ и водоснабженія, конечно, имѣла огромное вліяніе на развитіе механическаго производства.

Въ инженерномъ дѣлѣ желѣзныя дороги произвели полный переворотъ: постройка желѣзныхъ дорогъ научила инженеровъ не обходить естественныя преграды, а устранять ихъ съ пути. Только



благодаря желѣзнымъ дорогамъ могли появиться 15-ти верстные тоннели и 7-ми верстные мосты.

Что касается инженерной науки или, лучше сказать, теоріи инженернаго дѣла, то и тутъ нельзя не признать за желѣзными дорогами огромнаго вліянія на ея успѣхи. Желѣзныя дороги выдвинули цѣлый рядъ теоретическихъ вопросовъ, разработка которыхъ породила обширную техническую литературу. Много такихъ вопросовъ въ настоящее время уже разрѣшено, но едва ли не большее ихъ количество еще ждетъ своей разработки, такъ какъ теорія положительно не успѣваетъ слѣдить за быстрыми шагами практики. Особенно рельефно такая отсталость теоріи отъ практики можетъ быть наблюдаема на ученіи объ основаніяхъ и фундаментахъ.

Практика устройства фундаментовъ стоитъ въ настоящее время на довольно высокой степени развитія, что же касается теоріи сопротивленія основаній, то таковая находится еще въ младенческомъ состояніи или, вѣрнѣе сказать, теоріи сопротивленія основаній пока еще нѣтъ. Дѣйствительно, мы умѣемъ, напримѣръ, опускать на значительную глубину колодцы или кессоны внушительныхъ размѣровъ, но не можемъ при этомъ дать себѣ вѣрнаго и яснаго отчета о томъ, на сколько великъ въ каждомъ частномъ случаѣ коэффициентъ прочности или безопасности, не грѣшимъ ли мы въ ту или другую сторону; другими словами — въ вопросѣ опредѣленія глубины заложенія основаній мы дѣйствуемъ еще пока недостаточно сознательно. Болѣе осторожные, вѣроятно, придаютъ своимъ сооруженіямъ излишнюю прочность, а болѣе смѣлые дѣлаютъ, быть можетъ, непоправимыя ошибки. Первыми руководить соображеніе — деньги казенныя, а отвѣтственность моя, — вторые дѣйствуютъ на авось. Если излишняя смѣлость въ постройкахъ, по возможнымъ своимъ послѣдствіямъ, преступна, то излишняя осторожность, влекущая за собою напрасную трату денегъ и труда, низводитъ инженерное дѣло со степеней науки.

О степени отсталости ученія объ основаніяхъ, по сравненію съ другими отдѣлами инженерной науки, можно судить, наприм., по такому сопоставленію.

Мы умѣемъ вычислять съ достаточною для практики степенью точности напряженія въ различныхъ частяхъ болѣе или менѣе сложной мостовой или стропильной фермы и можемъ поэтому вполне сознательно придавать имъ тѣ или другіе размѣры. Если же намъ приходится имѣть дѣло со сваями, то въ нашемъ распоряженіи имѣется до десятка формулъ для расчета допускаемой нагрузки



свай, но всѣ онѣ даютъ различныя указанія, другими словами задачи не рѣшаютъ.

Не говоря уже о теоріи основаній, вообще ученіе объ основаніяхъ и фундаментахъ значительно отстало отъ общаго движенія инженерной науки, о чемъ можно отчасти судить по сравнительной бѣдности литературы этого вопроса.

Первою въ Европѣ книгою, трактующею спеціально вопросъ объ основаніяхъ и фундаментахъ и по размѣрамъ своимъ соотвѣтствующею важности предмета, безспорно слѣдуетъ признать извѣстное сочиненіе инженера В. Карловича, появившееся въ 1869 году, такъ какъ сочиненіе E. Dobson'a: *Rudimentary treatise on foundations and concrete works*, появившееся въ Англіи въ 1850 г., по своимъ размѣрамъ — 126 страницъ въ  $\frac{1}{8}$  — можетъ быть названо только брошюрою. Общеизвѣстное сочиненіе Klasen'a: *Fundierungsmethoden* появилось въ 1879 г. Въ Америкѣ первая книга объ основаніяхъ *Foundations and Foundation Walls*, by G. Powell, издана въ 1884 г. Оба послѣднія сочиненія страдаютъ элементарностью и носятъ узко практическій характеръ. Во французской литературѣ, насколько мнѣ извѣстно, нѣтъ ни одного сочиненія, которое, будучи посвящено спеціально ученію объ основаніяхъ, трактовало бы всесторонне этотъ вопросъ. Единственнымъ сочиненіемъ въ современной европейской литературѣ, которое по полнотѣ изложенія предмета, какъ со стороны практической, такъ и теоретической, соотвѣтствовало бы книгѣ Карловича, является трудъ L. Brennecke: *Der Grundbau*, изданный лишь въ 1887 г. Въ вопросѣ теоріи основаній Brennecke не идетъ дальше эмпирическихъ данныхъ Hagen'a и игнорируетъ работы Rankine'a и Паукера; послѣднее тѣмъ болѣе странно, что онъ, работая при постройкѣ моста Александра II въ С.-Петербургѣ, имѣлъ возможность познакомиться съ русскою наукою. Вообще же въ настоящее время нельзя насчитать и десятка книгъ, которыя бы были посвящены спеціально ученію объ основаніяхъ и фундаментахъ. Я не хочу этимъ сказать, чтобы вопросъ устройства основаній и фундаментовъ вообще игнорировался въ технической литературѣ — нѣтъ, въ большинствѣ сочиненій по строительному искусству ему посвящаются отдѣльныя главы, а иногда и цѣлые отдѣлы, какъ наприм. у Hagen'a, Debaue'a и др., но вотъ что говорится объ этомъ въ одномъ объявленіи о выходѣ сочиненія „*Handbuch der Architectur*“:

„Ученіе объ основаніяхъ въ большинствѣ сочиненій по строитель-



ному искусству было въ положеніи пасынка, благодаря чему въ немъ до сихъ поръ такъ много остается предразсудковъ и рутины“.

Для полной иллюстраціи современнаго состоянія ученія объ основаніяхъ и фундаментахъ остается только ко всему вышесказанному добавить, что мы по настоящее время еще недостаточно освоились съ самыми терминами: „основаніе“ и „фундаментъ“, судя по крайней мѣрѣ потому, что сплошь и рядомъ употребляемъ одинъ терминъ вмѣсто другаго и тѣмъ какъ бы отрицаемъ существованіе различія между ними.

Такое печальное состояніе ученія объ основаніяхъ, а особенно теоріи сопротивленія основаній, находитъ себѣ оправданіе въ томъ обстоятельстве, что тутъ за исключеніемъ случаевъ, когда найденъ слой сплошной скалы, намъ приходится имѣть дѣло съ землею, т. е. съ матеріаломъ крайне неопредѣленнымъ, весьма разнообразнымъ по своимъ качествамъ, недостаточно изученнымъ. Земля, или землистое тѣло, какъ особый типъ тѣла, по совокупности всѣхъ своихъ свойствъ, занимаетъ среднее мѣсто между тѣлами твердыми, сыпучими и жидкими, если подъ именемъ тѣла твердаго понимать такое, частицы котораго находятся во взаимномъ устойчивомъ равновѣсіи, обусловливаемомъ силою сдѣвленія, при чемъ тренія между частицами твердаго тѣла, пока оно остается таковымъ, не обнаруживается; далѣе, понимая подъ тѣломъ сыпучимъ такое, которое, будучи предоставлено самому себѣ, сохраняетъ возможную для него форму только въ силу проявляющагося между частицами тренія, и, наконецъ, понимая подъ тѣломъ жидкимъ такое, между частицами котораго не существуетъ ни сдѣвленія, ни тренія \*); такое тѣло, будучи предоставлено самому себѣ, не можетъ имѣть какой либо опредѣленной формы. Этими свойствами обусловливаются слѣдующія отличительныя черты трехъ рассматриваемыхъ типовъ тѣлъ.

Тѣла твердыя, имѣя возможность держаться въ вертикальномъ откосѣ, не производятъ давленія на вертикальную стѣнку; деформациі твердаго тѣла — его сжатіе и вытягиваніе — въ извѣстныхъ предѣлахъ пропорціональны дѣйствующимъ усиліямъ, при чемъ послѣднія могутъ быть приложены къ тѣлу въ любыхъ направленіяхъ. Жидкое тѣло на стѣнку, его поддерживающую, производитъ давленіе пропорціональное высотѣ столба жидкости надъ рассматриваемою точкою. Жидкія тѣла не представляютъ никакого сопротивленія усиліямъ растягивающимъ, а равно сжимающимъ, прило-

\*) Свойства эти строго говоря, принадлежатъ лишь жидкостямъ идеальнымъ.



женнымъ къ нѣкоторой лишь части ихъ свободной поверхности. Давленіе въ каждой частицѣ жидкаго тѣла одинаково по всѣмъ направленіямъ. Частицы жидкаго тѣла могутъ свободно перемѣщаться по всевозможнымъ направленіямъ. Сыпучее тѣло производитъ на вертикальную стѣнку давленіе, хотя и пропорціональное вертикальному разстоянію данной точки до свободной поверхности сыпучаго тѣла, но зависящее еще и отъ коэффициента тренія. Растягивающимъ усиліямъ сыпучее тѣло не представляетъ никакого сопротивленія, что же касается сопротивленія сжатію, то сыпучее тѣло, подобно твердому, оказываетъ такое сопротивленіе и въ томъ случаѣ, если нагружена только часть свободной его поверхности.

Земля, какъ продуктъ механическаго и химическаго разрушенія горныхъ породъ, въ большинствѣ случаевъ смоченная водою, имѣетъ свойства среднія между свойствами тѣлъ твердыхъ, сыпучихъ и жидкихъ. Нѣкоторые роды земель или грунтовъ, какъ наприм. сухая глина, приближаются по своимъ свойствамъ къ тѣламъ твердымъ, суглинки и супески — къ тѣламъ сыпучимъ, мокрая глина — къ тѣламъ жидкимъ. Но при этомъ таже мокрая глина обладаетъ нѣкоторымъ сцепленіемъ, отличающимъ тѣла твердыя, почему можетъ на небольшую высоту держаться въ вертикальномъ откосѣ, который затѣмъ переходитъ въ наклонный — естественный откосъ — характеризующій тѣла сыпучія.

Только чистый и сухой песокъ олицетворяетъ собою типъ сыпучаго тѣла.

При всемъ разнообразіи грунтовъ, ихъ можно однако раздѣлить на двѣ категоріи или на два рода: одни грунты занимаютъ по совокупности всѣхъ своихъ свойствъ среднее мѣсто между тѣлами твердыми и сыпучими, другіе между сыпучими и жидкими. Къ первой категоріи относятся тѣ грунты, которые въ строительной практикѣ принято считать хорошими и называть материкомъ, ко второй — относятся грунты слабые. Сжимаемыхъ грунтовъ, каковы торфъ, растительная земля и т. п., я не имѣю въ виду въ своемъ обзорѣ.

Всѣ вопросы, касающіеся внутренняго равновѣсія частицъ жидкаго тѣла, рѣшаются на основаніи законовъ гидростатики. Условія внутренняго равновѣсія частицъ тѣлъ твердыхъ подчинены дѣйствію гораздо болѣе сложныхъ законовъ теоріи упругости, которая, при современномъ ея состояніи, можетъ рѣшать вопросы частичнаго равновѣсія въ тѣлахъ простѣйшей формы и при величинѣ напряженій, непревышающей такъ называемаго предѣла упругости.



Изученію условій внутренняго равновѣсія тѣлъ сыпучихъ положено начало лишь въ послѣднее время, и теорія этого вопроса находится еще въ зародышѣ.

Что касается тѣлъ землистыхъ, то изученіе законовъ внутренняго ихъ равновѣсія можетъ быть начато не ранѣе того, какъ теорія упругости и теорія тѣлъ сыпучихъ будутъ разработаны на столько же полно, на сколько разработаны сравнительно простыя законы гидростатики. Тѣмъ не менѣе и въ настоящее время имѣется уже полная возможность намѣтить нѣкоторые вопросы будущей *теоріи основаній*.

Предметомъ теоріи основаній должно служить изученіе условій равновѣсія между давленіемъ, производимымъ сооруженіемъ — съ одной стороны и сопротивленіемъ основанія — съ другой. Подъ сопротивленіемъ основанія слѣдуетъ понимать *сопротивленіе матеріала основанія* дѣйствію на него внѣшней нагрузки. Такое сопротивленіе должно имѣть нѣкоторый предѣлъ, за которымъ будетъ слѣдовать *разрушеніе основанія*. Предѣльный, разрушающій основаніе грузъ будетъ опредѣлять собою величину *временнаго сопротивленія основанія*. Нѣкоторая часть такой нагрузки, соотвѣтствующая безопасной, опредѣлитъ собою величину *прочнаго сопротивленія основанія*. Отношеніе величины временнаго сопротивленія къ прочному будетъ *коэффициентомъ прочности основанія*.

Такимъ образомъ между теоріей основаній и строительною механикою, другими словами — теорією сопротивленія строительныхъ матеріаловъ, должна быть полная аналогія или, вѣрнѣе сказать, теорія основаній должна входить въ составъ строительной механики на тѣхъ же правахъ, на какихъ въ ней имѣютъ мѣсто теорія устойчивости сводовъ, подпорныхъ стѣнокъ и др. т. п. отдѣлы; но при разработкѣ теоріи основаній необходимо обращать особенное вниманіе на то обстоятельство, что условія, при которыхъ работаетъ матеріалъ въ основаніи, и способъ его разрушенія совершенно иные, чѣмъ въ томъ случаѣ, если тотъ же матеріалъ работаетъ въ какой либо части сооруженія.

Эта разность условій работы матеріала въ основаніи и въ частяхъ сооруженія обыкновенно или игнорируется, или недостаточно ясно понимается; во всякомъ случаѣ фактъ принятія тождества этихъ условій — на лицо: величина допускаемой нагрузки скалистыхъ основаній ничѣмъ не отличается отъ величины допускаемой нагрузки того же камня, при употребленіи его на кладку стѣнъ; доказать это можно хотя бы ссылкой на сборникъ Недзьялковскаго,



въ которомъ говорится: „давленіе на скалистое основаніе не должно быть выше  $\frac{1}{8}$  временнаго сопротивленія раздробленію“!

Указываемая мною разность условій работы матеріала въ основаніи и въ частяхъ сооруженія заключается въ томъ, что въ частяхъ сооруженія мы имѣемъ дѣло съ кусками матеріала ограниченныхъ размѣровъ, въ основаніяхъ же мы встрѣчаемъ тотъ же матеріалъ въ большихъ массахъ и, по сравненіи съ размѣрами сооруженія, можно сказать, въ неограниченныхъ размѣрахъ. Эта разность размѣровъ обуславливаетъ собою различные виды разрушенія матеріала, а вмѣстѣ съ тѣмъ и различныя величины временнаго сопротивленія. Дѣйствительно, обыкновенное разрушеніе матеріала отъ сжатія есть ничто иное, какъ разрушеніе его отъ скалыванія по нѣкоторымъ плоскостямъ, наклоненнымъ къ направленію сжимающаго усилія и представляющимъ такому скалыванію наименьшее сопротивленіе, причемъ скалывающіяся части стремятся перемѣститься въ стороны. Такой способъ разрушенія особенно ясно выражается при раздавливаніи кубиковъ, въ которыхъ уголъ наклоненія плоскости скалыванія къ направленію сжатія колеблется около  $45^\circ$ , что и соотвѣтствуетъ теоретическому положенію плоскости-наименьшаго сопротивленія скалыванію; при этомъ отколовшіяся части, не встрѣчая препятствій со стороны, отпадаютъ. Если подвергать соотвѣтственному давленію нѣкоторую часть свободной поверхности неограниченной массы того же матеріала, напримѣръ: 1 кв. дм., то характеръ разрушенія долженъ быть совершенно иной; дѣйствительно: представимъ себѣ кубикъ, мысленно выдѣленный изъ массы матеріала непосредственно подъ нагруженною площадкою. При той величинѣ давленія, которой было достаточно для разрушенія свободного кубика, нашъ, мысленно выдѣленный кубикъ, не раздробится, такъ какъ необходимому для такого разрушенія скалыванію кубика будутъ противодѣйствовать слѣдующія добавочныя сопротивленія: сопротивленіе скалыванію по вертикальнымъ гранямъ кубика и сопротивленіе боковому перемѣщенію сколовшихся частей со стороны массы матеріала, окружающей мысленно выдѣленный кубикъ. Другими словами, при такихъ условіяхъ разрушеніе матеріала въ основаніи не ограничится однимъ только скалываніемъ по діагональной плоскости мысленно выдѣленнаго кубика, но будетъ сопровождаться выкалываніемъ вверхъ части окружающаго матеріала, а потому для его разрушенія необходимо приложить на кв. единицу его поверхности бѣльшее давленіе, чѣмъ на отдѣльно взятый кубикъ того же размѣра. Это соображеніе,



о теоретическаго характера, находятъ себѣ полное подтвержденіе въ произведенныхъ въ прошломъ году, по инициативѣ инженера Flamant, директоромъ механической лабораторіи Ecole des Ponts et Chaussées, Durand Claye опытахъ надъ раздробленіемъ камней подъ вліяніемъ нагрузки, расположенной на небольшой только части поверхности камня. Давленію подвергался кубикъ въ 10 сант. въ сторонѣ; давленіе производилось помощью стальныхъ штамповъ квадратнаго сѣченія размѣрами отъ 10 до 1 сантим. въ сторонѣ. При расположеніи нагрузки по всей поверхности образца, временное его сопротивленіе раздробленію опредѣлялось въ 84 килограмма на 1 кв. сант., когда же давленіе производилось штампомъ въ 1 кв. сант., разрушеніе кубика происходило лишь при нагрузкѣ въ 1.200 килограммовъ, при этомъ разрушеніе образца начиналось съ раздробленія и выкалыванія матеріала вокругъ штампа, въ видѣ воронки. Наиболѣе убѣдительнымъ доказательствомъ того, что матеріаль въ массѣ оказываетъ гораздо болѣе сопротивление, можетъ служить принятіе безопасной нагрузки въ 1 пуд. на 1 кв. д. для песчанаго слоя, тогда какъ извѣстно, что песокъ не можетъ оказывать никакого сопротивленія разрушенію въ томъ смыслѣ, въ какомъ мы привыкли понимать вообще сопротивленіе строительныхъ матеріаловъ.

Предметомъ теоріи основаній, какъ я имѣлъ уже честь докладывать, должно служить изученіе условій равновѣсія между давленіемъ, производимымъ сооруженіемъ, и сопротивленіемъ основанія. Очевидно, условія такого равновѣсія могутъ быть изучаемы по столько, по сколько изучены законы внутренняго равновѣсія матеріаловъ основанія, и условія, при которыхъ эти матеріалы работаютъ въ основаніи.

Въ наиболѣе благопріятныхъ условіяхъ, въ смыслѣ знакомства съ законами внутренняго равновѣсія матеріала основанія, мы находимся въ томъ случаѣ, когда матеріаль основанія можетъ быть разсматриваемъ, какъ жидкое тѣло. Равновѣсіе сооруженій на такихъ основаніяхъ обуславливается наиболѣе простыми законами, а именно законами равновѣсія тѣлъ плавающихъ, т. е. требованіемъ для каждой точки основанія равенства давленій—производимого сооруженіемъ, и давленія гидростатическаго. Вслѣдствіе легкоподвижности частицъ жидкаго тѣла, гидростатическій законъ обуславливаетъ собою строго опредѣленное положеніе тѣла, въ нашемъ случаѣ — сооруженія, во время его равновѣсія; всякое измѣненіе въ величинѣ давленія должно вызывать измѣненіе этого



положенія, другими словами, сооруженія на основаніяхъ изъ грунтовъ жидкихъ не могутъ обладать запасомъ устойчивости. При такихъ условіяхъ, казалось бы, принципъ плавающего тѣла не можетъ имѣть мѣста въ строительной практикѣ, однако Хагенъ указываетъ на одну постройку въ Лондонѣ, гдѣ этотъ принципъ былъ примѣненъ къ расчету сооруженія. Во всякомъ случаѣ, принципъ плавающего тѣла даетъ наименьшую величину сопротивленія основанія на самомъ слабomъ грунтѣ.

Изслѣдованіе условій равновѣсія сооруженій, основанныхъ на совершенно твердыхъ грунтахъ, какова наприм. сплошная скала, не представляетъ собою вопроса большой практической важности, потому что, съ одной стороны, въ очень только рѣдкихъ случаяхъ можетъ встрѣтиться надобность пользоваться огромными нагрузками на 1 квадр. единицу основаній, съ другой стороны — условія работы твердаго матеріала въ основаніи въ значительной степени увеличиваютъ и безъ того большое сопротивленіе ихъ раздробленію. Однимъ словомъ, теорія основаній на совершенно твердыхъ грунтахъ, т. е. матеріалахъ съ большимъ временнымъ сопротивленіемъ раздробленію, не можетъ имѣть практическаго значенія.

Такимъ образомъ, условія равновѣсія сооруженій, основанныхъ на грунтахъ сыпучихъ, въ виду сдѣланной мною характеристики землистыхъ тѣлъ, приобрѣтаютъ наибольшій практическій интересъ.

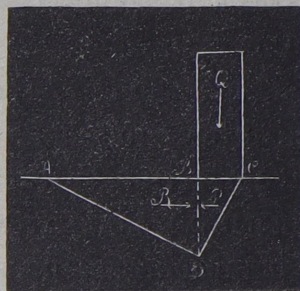
Обращаясь къ обзору существующихъ теорій равновѣсія сыпучихъ тѣлъ, мы видимъ, что до сихъ поръ еще нельзя считать окончательно установившимися взгляды на основные вопросы равновѣсія этихъ тѣлъ. Къ числу такихъ основныхъ вопросовъ безспорно слѣдуетъ отнести, между прочимъ, вопросъ о величинѣ и направленіи давленія, производимаго массою сыпучаго тѣла на поддерживающую его стѣнку; нормально ли это давленіе или наклонно къ поверхности стѣнки, каковъ профіль призмы давленія, по какой поверхности — прямолинейной или криволинейной — происходитъ сползаніе обрушающейся части — все это вопросы, въ отвѣтахъ на которые совершенно расходятся даже выдающіеся ученые.

Къ разработкѣ вопроса о сопротивленіи сыпучихъ тѣлъ внѣшнему давленію до послѣдняго времени, можно сказать, и не приступали. Самый терминъ „временное сопротивленіе“ до сихъ поръ не примѣнялся къ тѣламъ сыпучимъ — до того не ясно было представленіе о той формѣ, въ которой можетъ выражаться разрушеніе сыпучаго тѣла при внѣшнемъ на него давленіи. Первая попытка установить понятіе о способѣ такого разрушенія была сдѣ-



лана въ 50-хъ годахъ профессоромъ Паукеромъ \*), который для опредѣленія условий равновѣсія песку подь сооруженіемъ воспользовался введеннымъ Poncelet въ науку понятіемъ о призмахъ сопротивленія и изобразилъ разрушеніе основанія въ видѣ выпиранія призмы  $ABD$  съ наименьшимъ сопротивленіемъ  $R$ , горизонтальнымъ давленіемъ  $P$ , производимымъ наибольшою призою обрушенія  $BCD$ , подь вліяніемъ нагрузки  $Q$  (фиг. 1). Какъ видно изъ предложенной проф. Паукеромъ схемы разрушенія сыпучаго основанія, теорія этого процесса находится въ тѣсной связи съ теоріею давленія сыпучаго тѣла на подпорныя стѣнки, причемъ выпираніе песка изъ подь сооруженія является процессомъ болѣе сложнымъ, чѣмъ сползаніе земли въ сторону подающей подпорной стѣнки. Поэтому, задаваясь цѣлью выяснитъ вопросъ о временномъ сопротивленіи основаній на сыпучемъ грунтѣ или пескѣ, мы не можемъ обойтись безъ предварительнаго обзора существующихъ теорій подпорныхъ стѣнокъ.

Фиг. 1.



Оставляя въ сторонѣ такія теоріи, какъ Hagen'a, Curie и нѣкоторыя другія, всѣ остальные современные теоріи подпорныхъ стѣнокъ можно подраздѣлить на двѣ категоріи.

Къ первой категоріи относятся теоріи, основанныя на принципѣ призмъ наибольшаго давленія, указанномъ еще въ 1773 г. Coulomb'омъ, и разработанныя въ трудахъ Prony, Français, Poncelet, Moseley, а въ послѣднее время Scheffler'a, Culmann'a, Rebhann'a и др. Согласно этимъ теоріямъ, дѣйствіе сыпучаго тѣла на подпорную стѣнку выражается въ сползаніи нѣкоторой треугольной призмы, производящей при этомъ извѣстное давленіе. Величина сползающей призмы, называемой призою обрушенія, опредѣляется изъ условія, что она производитъ на стѣнку наибольшее давленіе, по сравненію съ другими подобными призмами. Во всѣхъ этихъ теоріяхъ поверхность разрыва сыпучаго тѣла принимается за плоскость. Въ отношеніи вопроса о направленіи давленія сползающей призмы на стѣнку, взгляды разныхъ ученыхъ раздѣляются: одни, какъ: Coulomb (1773), Prony (1802), Français (1820), Navier (1826), а въ настоящее время и Gobin (1883), принимаютъ это давленіе нормальнымъ къ стѣнкѣ (фиг. 2), другіе, къ числу кото-

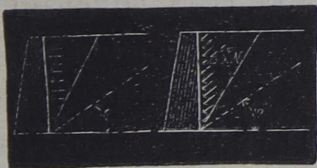
\*) См. „Основанія и фундаменты“ В. Карловича, стр. 76.



рыхъ относятся: Moseley (1833), Poncelet (1840) и большинство современныхъ изслѣдователей этого вопроса, каковы Scheffler (1857),

Фиг. 2.

Фиг. 3.



Culmann (1866), Ott (1868), Rebhann (1871), Winkler (1872) и др., давленіе это принимаютъ направленнымъ подъ угломъ тренія  $\varphi$ , къ нормали  $N$  къ задней поверхности подпорной стѣнки (фиг. 3).

Одновременное и, такъ сказать, равноправное существованіе этихъ различныхъ взглядовъ объясняется тѣмъ обстоятельствомъ, что они, какъ это ни странно, подтверждаются соотвѣтственными и, повидимому, весьма убѣдительными опытами, обобщить и объяснить которые не оказывается возможнымъ ни одною изъ этихъ теорій. Поразительнымъ примѣромъ противорѣчивости экспериментальныхъ данныхъ могутъ служить, съ одной стороны, весьма научно поставленные, произведенные въ 1871 г., опыты Winkler'a, подтверждающіе мнѣніе большинства современныхъ изслѣдователей этого вопроса о томъ, что давленіе сыпучаго тѣла составляетъ съ нормалью къ задней поверхности подпорной стѣнки уголъ тренія испытываемаго грунта о поверхность стѣнки, а съ другой стороны — не менѣе точные опыты Gobin'a, произведенные въ 1883 г. и доказывающіе справедливость воззрѣній, раздѣлявшихъ прежними учеными, на нормальность направленія давленія земли на подпорную стѣнку.

Ко второй категоріи относятся теоріи, въ основу которыхъ положено изученіе условій равновѣсія безконечно малыхъ элементовъ сыпучаго тѣла.

Первая попытка установленія на этихъ началахъ теоріи была сдѣлана въ 1847 г. архитекторомъ Ortmann'омъ, но неудачно, и только въ 1851 г. Scheffler'у, а особенно въ 1856 г. Rankine'у удалось основать и частью разработать вполне раціональную общую теорію давленія въ сыпучихъ тѣлахъ, которая въ настоящее время, благодаря трудамъ Levy, Saint-Venant'a, Considère'a, Winkler'a, Mohr'a, Wehrauch'a и др. значительно разработана и ими же прилагается къ расчету подпорныхъ стѣнокъ, хотя и не всѣми одинаково.

Въ общихъ чертахъ, выводы новѣйшей теоріи сыпучихъ тѣлъ, играющей для нихъ ту же роль, какую теорія упругости для тѣлъ твердыхъ, а гидростатика для жидкихъ, заключается въ слѣдующемъ.

Каждый элементъ находящагося въ покоѣ сыпучаго тѣла, подобно элементамъ тѣлъ жидкихъ, испытываетъ со всѣхъ сторонъ нѣкоторыя давленія, при чемъ величины этихъ давленій, въ противо-



положность давленій въ жидкостяхъ, неодинаковы по разнымъ направленіямъ и при томъ дѣйствуютъ подъ разными углами къ поверхности элемента. Законъ измѣненія давленій, въ зависимости отъ разсматриваемыхъ направленій ихъ, можетъ быть выраженъ слѣдующимъ образомъ: если изъ центра даннаго элемента провести всевозможныя направленія давленій и на нихъ отложить величины соответственныхъ давленій, то геометрическимъ мѣстомъ концовъ отрѣзковъ, изображающихъ эти давленія, будетъ эллипсоидъ съ 3-мя вообще неравными осями. Если ограничиться разсмотрѣніемъ давленій, дѣйствующихъ въ какой либо плоскости, то законъ измѣненія давленій выразится эллипсомъ.

Если разсматривать давленія въ вертикальной плоскости, то отношеніе между полуосями эллипса или наименьшимъ и наибольшимъ давленіемъ будетъ:  $\frac{b}{a} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right)$ , которое, напримѣръ, при величинѣ  $\varphi = 33^\circ 22'$  равно 0,288. Что касается до наклоненія осей этого эллипса относительно вертикали и горизонтали, то оно можетъ быть весьма разнообразно, смотря по профили верхней поверхности земли, мѣстной нагрузкѣ песчанаго грунта и т. п. Ежели верхняя поверхность песчанаго грунта горизонтальна, то эллипсъ напряженій въ нѣкоторой точкѣ грунта, лежащей на глубинѣ  $h$  подъ поверхностью, имѣетъ большую ось, направленную отвѣсно и равную вертикальному давленію на этой глубинѣ, т. е.  $\delta h$ ; малая же его ось, горизонтальная и равная  $\delta h \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ , выражаетъ величину, такъ называемаго, *дѣйствительнаго или активнаго горизонтальнаго давленія* (activer Druck), испытываемаго въ покоѣ частицами песка на глубинѣ  $h$ , подъ вліяніемъ тяжести лежащихъ сверху слоевъ.

Если бы мы искусственно стали увеличивать эту величину естественнаго горизонтальнаго сжатія частицъ, напримѣръ, при помощи надавливанія на нѣкоторую площадку вертикальною стѣнкою, то при этомъ, какъ естественное положеніе эллипса напряженій, такъ и величина его осей немедленно бы измѣнились въ надавливаемой точкѣ; предѣльная величина искусственнаго горизонтальнаго давленія на вертикальную площадку наступила бы въ тотъ моментъ, когда эллипсъ напряженій повернулся бы на  $90^\circ$ , при чемъ его меньшая ось приняла бы вертикальное направленіе, и сдѣлалась бы равной  $\delta h$ , т. е. прежней большой оси естественнаго эллипса; въ такомъ случаѣ большая ось повернутаго эллипса расположилась бы горизонтально по направленію надавливанія и



получила бы величину  $\delta n \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ , дающую значение наибольшего пассивного горизонтального давления или сопротивления (Passiver Druck). При только что описанномъ положеніи эллипса напряженій, отношеніе горизонтальнаго сжатія элемента къ уравновѣшивающему его вертикальному, т. е. вѣсу сверху лежащихъ слоевъ песка, очевидно, есть maximum, тогда какъ при естественномъ положеніи эллипса это же отношеніе есть minimum \*), т. е. элементъ испытываетъ наибольшее вертикальное сжатіе.

Для нахожденія положенія элементарныхъ площадокъ, на которыя дѣйствуютъ давленія данныхъ направленій, служить слѣдующее построеніе (фиг. 4).

Пусть  $CO$  будетъ данное направленіе давленія, абсолютная величина котораго равна  $EO$ , и требуется опредѣлить направленіе площадки, на которую оно дѣйствуетъ. Для этого изъ  $A$  проводимъ линію параллельно  $BB$  до пересѣченія съ  $CO$  въ точкѣ  $D$ . Изъ  $B$  проводимъ  $BG \parallel AA$  и откладываемъ на ней  $BF = AD$ . Линія  $FF$  покажетъ требуемое направленіе площадки.

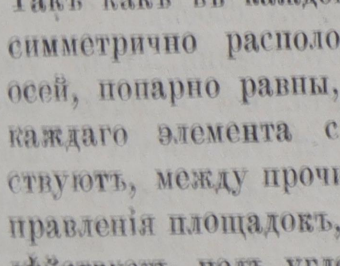
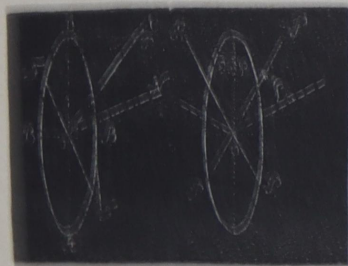
Изъ такого способа построенія направленій элементарныхъ площадокъ, испытывающихъ данныя напряженія, видно, что имѣется всего два направленія площадокъ, на которыя давленіе дѣйствуетъ нормально. Положеніе этихъ площадокъ совпадаетъ съ осями эллипса.

Давленіе на площадки всѣхъ другихъ направленій составляетъ съ нормальми къ нимъ большіе или меньшіе углы  $\beta \leq \varphi$ . Наибольшій уголъ отклоненія направленія давленія отъ нормали равенъ

углу тренія или углу естественнаго откоса  $\varphi$ . Такъ какъ въ каждомъ эллипсѣ діаметры, симметрично расположенные относительно осей, попарно равны, то, очевидно, что для каждаго элемента сыпучаго тѣла существуютъ, между прочимъ, и два такихъ направленія площадокъ, на которыя давленіе дѣйствуетъ подъ угломъ тренія (фиг. 5).

Изъ чертежа видно, что направленіе такихъ давленій и площадокъ взаимны, т. е. направленія давленія  $PO$  на площадку  $P_1P_1$  совпадаетъ съ направленіемъ площадки  $PP$ , на которую дѣйствуетъ давленіе  $P_1O$ . Эти два направленія называются *плоско-*

Фиг. 4. Фиг. 5.



\*) Вслѣдствіе постоянства отношенія между величинами осей эллипсовъ давленій.

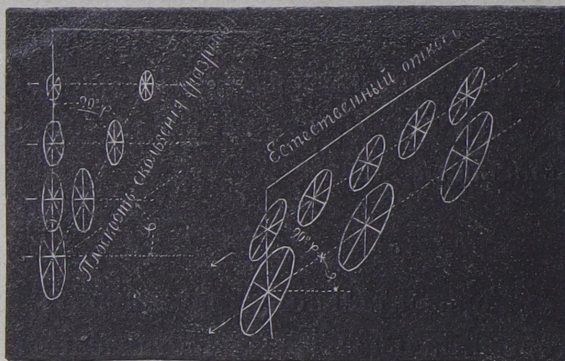


стями скользенія и въ нихъ частицы находятся на границѣ своей устойчивости.

Указанная теорія даетъ возможность опредѣлить точную картину распредѣленія напряженій въ разныхъ точкахъ сыпучаго тѣла только въ тѣхъ случаяхъ, когда послѣднее ограничено сверху плоскостью. На фиг. 6 и 7 показано распредѣленіе давленій въ массѣ песку, ограниченной сверху горизонтальною плоскостью и естественнымъ откосомъ. Для тѣхъ случаевъ, когда верхняя поверхность сыпучаго тѣла не есть плоскость, интегрированіе дифференціальныхъ уравненій равновѣсія до сихъ поръ не удавалось, а потому для такихъ случаевъ и нельзя дать вѣрной картины распредѣленія напряженій въ разныхъ точкахъ сыпучаго тѣла; тѣмъ не менѣе, на основаніи только что приведеннаго, можно заключить, что мѣстныя поднятія профиля верхней поверхности сыпучаго тѣла будутъ вызывать измѣненія въ напряженіяхъ, которыя и выразятся въ наклоненіи большихъ осей эллипса въ сторону увеличенія нагрузокъ.

Фиг. 6.

Фиг. 7.



Всѣ тѣ многочисленные дѣятели на поприщѣ инженерной науки, длинную вереницу именъ которыхъ мнѣ пришлось привести, занимаясь вопросами равновѣсія сыпучихъ тѣлъ, стремились, какъ я уже указывалъ, примѣнить свои выводы къ расчету подпорныхъ стѣнокъ, и только Rankine и профессоръ Паукеръ пытались изслѣдовать вопросъ о возможной нагрузкѣ основаній.

Исходя изъ совершенно различныхъ точекъ зрѣнія, а именно: Rankine изъ новѣйшей теоріи равновѣсія сыпучихъ тѣлъ, а профессоръ Паукеръ изъ теоріи призмъ обрушенія и сопротивленія, они пришли къ тождественнымъ окончательнымъ выводамъ, выражающимъ отношеніе между глубиною заложения основанія и величиною предѣльной нагрузки на него, выраженной въ высотѣ столба того же грунта.

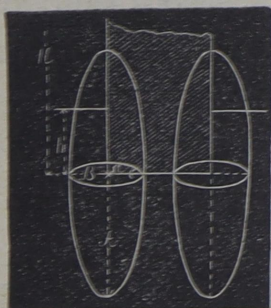
Формула Rankine'а выведена на основаніи слѣдующихъ соображеній:

На нѣкоторой глубинѣ  $h$  (фиг. 8) отъ поверхности песчанаго слоя заложено основаніе сооруженія, вѣсъ котораго равенъ  $P$ . Давленіе сооруженія можетъ быть замѣнено давленіемъ столба песку



высотой  $H$ , имѣющаго ту-же площадь подошвы и одинаковый съ нимъ вѣсъ  $P$ . Разсмотримъ два смежные элемента  $m_1$  и  $m_2$  песча-

Фиг. 8.



наго основанія, соприкасающіеся между собою по раздѣльной плоскости  $ON$ , изъ которыхъ первый находится подъ грузомъ сооруженія, а второй подъ нагрузкою свободнаго слоя песку. Элементъ  $m_1$  испытываетъ наибольшее давленіе въ вертикальномъ направленіи отъ груза сооруженія, по величинѣ равное  $A = \delta H$ , гдѣ  $\delta$  плотность песку, а потому соотвѣтствующій элементу  $m_1$  эллипсъ напряженій имѣетъ большую ось вертикальною и равною  $A$ ; малая же его ось  $B$ , выражающая горизонтальное давленіе на раздѣльную плоскость равна:

$$B = A \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \delta H \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}.$$

Горизонтальному давленію  $B$  элемента  $m_1$ , противодѣйствуетъ горизонтальное же сопротивленіе  $b$  элемента  $m_2$  которое, при его вертикальномъ разстояніи  $h$  отъ поверхности слоя, имѣетъ своимъ предѣломъ, какъ было указано выше, величину пассивнаго горизонтальнаго давленія, т. е.

$$b = \delta h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Предѣльное равновѣсіе сооруженія наступитъ въ томъ случаѣ, когда активное давленіе на раздѣльную плоскость отъ элемента  $m_1$  достигнетъ величины пассивнаго давленіемъ элемента  $m_2$  на ту же плоскость, т. е. когда:

$$\delta H \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \delta h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Это уравненіе представляетъ равенство горизонтальныхъ полуосей эллипсовъ давленій соприкасающихся элементовъ.

Изъ этого уравненія слѣдуетъ:

$$h = H \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^2 = H \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right)^*.$$

Путь, которымъ проф. Паукеръ дошелъ до своей формулы, въ общихъ чертахъ былъ таковъ:

Пусть  $CDET$  (фиг. 9) будетъ призма песку высотой  $H$ , производящая на основаніе, заложенное на глубинѣ  $h$  отъ поверхности

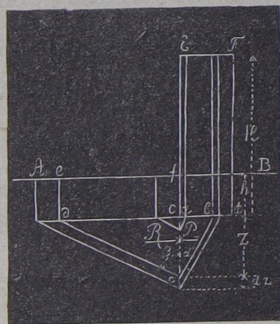
$$*) \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right)}{\operatorname{tg} \left( \frac{90 + \varphi}{2} \right)} = \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right)}{\operatorname{Cotg} \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right)} = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right).$$



песчаного слоя  $AB$ , такое же давленіе  $Q$ , какъ и нѣкоторое сооруженіе, имѣющее одинаковую площадь подошвы  $CD$ .

Подъ вліяніемъ груза  $Q$  подъ подошвою сооруженія образуется въ пескѣ нѣкоторая призма обрушенія  $abc$ , стремящаяся скользить внизъ по откосу  $bc$  и производящая при этомъ горизонтальное давленіе  $P$  на нѣкоторую плоскость  $ac$ . Это давленіе  $P$  стремится сдвинуть по откосу  $dc$  призму сопротивленія  $acd$ , нагруженную слоемъ песку  $adef$ , толщиной равною глубинѣ  $h$  заложенія основанія. Въ дѣйствительности же усиліе, необходимое для сдвиженія этой призмы  $acd$ , есть нѣкоторое  $R$ .

Фиг. 9.



Принимая  $ac$  за постоянную, проф. Паукеръ опредѣляетъ величину угла  $\alpha$  подъ условіемъ, чтобы давленіе  $P$  было наибольшее, совершенно аналогично тому, какъ опредѣляется призма наибольшаго давленія на подпорную стѣнку. Далѣе, проф. Паукеръ опредѣляетъ величину угла  $\beta$  подъ условіемъ, чтобы  $R$  было наименьшее.

Равновѣсіе призмъ обрушенія и сопротивленія опредѣляется изъ условія:

$$\text{Max } P \leq \text{Min } R.$$

Дифференцируя это неравенство по  $ac$ , проф. Паукеръ находитъ условіе равновѣсія безконечно тонкихъ полосокъ и затѣмъ, выбирая пару полосокъ, поставленныхъ въ наиболѣе невыгодныя условія—а такими оказываются полоски  $Eaa_1E_1$  и  $fed_1e$ , —окончательно получаетъ свою формулу:

$$h \geq Htg^4 \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right),$$

которая, какъ оказывается, тождественна съ формулою Rankine'a, въ виду чего эту формулу, по справедливости, слѣдуетъ называть формулою Rankine'a и Паукера.

Этою формулою обыкновенно и руководствуются при опредѣленіи глубины заложенія основаній, преимущественно мостовыхъ опоръ, при различныхъ грунтахъ, не придавая особеннаго значенія тому обстоятельству, что она выведена только для основаній на грунтахъ песчаныхъ.

Въ № 39 журнала Министерства путей сообщенія за 1887 г. появилась статья инженера Янковскаго „о необходимой глубинѣ заложенія основаній“, въ которой онъ оспариваетъ правильность принятія проф. Паукеромъ трапециoidalнаго профиля призмы со-



противленія. Дѣйствительно: въ выводѣ проф. Паукера призма сопротивленія  $adc$  нагружена слоемъ  $cdef$ , и рассматривается сдвигеніе призмы  $adc$  по откосу  $ad$  вмѣстѣ со слоемъ  $cdef$ , т. е., другими словами, рассматривается сдвигеніе трапециoidalной призмы  $cdef$  по откосу  $cd$ . Такому сдвигенію должно сопротивляться не одно только треніе по откосу  $cd$ , но и отпоръ со стороны  $de$ , который и выразится въ сопротивленіи сдвигенію призмы  $deA$  по откосу  $dA$ .

Далѣе инженеръ Янковскій указываетъ на то, что, принимая треугольную призму сопротивленія  $cAf$ , дифференцированіе неравенства:

$$\text{Max } P \leq \text{Min } R$$

не даетъ условія равновѣсія безконечно малыхъ полосокъ.

Въ концѣ концовъ инженеръ Янковскій доказываетъ, что въ невыгоднѣйшемъ случаѣ должно быть сохранено равновѣсіе не между безконечно малыми полосками, а между конечными призмами обрушенія и сопротивленія, опредѣливъ которыя, инженеръ Янковскій получаетъ свою формулу:

$$h \cong \frac{H}{2} \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right),$$

отличающуюся отъ формулы Rankine'а и Паукера коэффициентомъ  $1/2$ .

Цитированная мною статья инженера Янковскаго вызвала возраженіе со стороны профессора Николаи, который, не входя въ разборъ вопроса о томъ, каковъ долженъ быть видъ призмы сопротивленія — трапециoidalный или треугольный, оспариваетъ по преимуществу вторую часть статьи Янковскаго, касающуюся непримѣнимости дифференцированія неравенства  $\text{Max } P \leq \text{Min } R$ , и въ заключеніе приходитъ къ тому выводу, что „положеніе Янковскаго о возможности опредѣляемую по Паукеру глубину заложенія основаній уменьшить вдвое нельзя считать доказаннымъ“.

Съ своей стороны, позволю себѣ указать на слѣдующіе недостатки формулы Янковскаго: 1) при предѣльной величинѣ  $\varphi = 0$ , т. е. при переходѣ къ жидкому тѣлу, она приводитъ къ абсурду  $h = \frac{H}{2}$ , тогда какъ законъ плавающего тѣла выражается равенствомъ  $h = H$ ; 2) при  $h = 0$ , т. е. при возведеніи сооруженія на поверхности песчаного слоя,  $H = 0$ , другими словами песокъ на поверхности не можетъ выдерживать никакой нагрузки, что, очевидно, противорѣчитъ дѣйствительности. Такое противорѣчіе, свойственное, впрочемъ, и формулѣ Rankine'а и Паукера, объясняется тѣмъ, что



формулы выведены для взаимодействія невыгоднѣйшихъ призмъ обрушенія и сопротивленія, размѣры которыхъ, съ приближеніемъ  $h$  къ  $O$ , также стремятся къ  $O$ .

Инженеръ Янковскій, не желая далѣе оставаться въ своихъ изслѣдованіяхъ исключительно на теоретической почвѣ, для подтвержденія правильности своихъ соображеній о треугольномъ профилѣ призмы сопротивленія произвелъ нѣсколько опытовъ, хотя и въ крайне скромныхъ размѣрахъ, но при различныхъ условіяхъ.

Сравнивая размѣры выпиравшей при этихъ опытахъ массы песка съ исчисленными по формулѣ, Янковскій долженъ былъ придти къ заключенію, что профиль призмы сопротивленія имѣетъ дѣйствительно треугольный видъ, на что онъ и указываетъ въ своемъ отвѣтѣ профессору Николаи, помѣщенномъ въ № 38 журнала Министерства путей сообщенія за 1888 г.

Приведенными мною работами исчерпывается вся литература вопросовъ, касающихся теоріи естественныхъ основаній.

Если практическимъ дѣятелямъ на инженерномъ поприщѣ зачастую приходится такъ или иначе рѣшать многіе вопросы строительной техники, не имѣя для этого достаточныхъ, вполне опредѣленныхъ, научныхъ указаній, а руководствуясь лишь собственнымъ опытомъ, примѣрами другихъ подобныхъ сооружений или просто ходячею рутиною, и поневолѣ мириться съ такимъ печальнымъ положеніемъ той или другой отрасли инженерной науки, то преподавателю подобнаго предмета мириться съ нимъ крайне тяжело, такъ какъ молодой, пытливый умъ учащагося требуетъ раціональнаго, логическаго отвѣта на всѣ новые для него вопросы, зачастую еще и невыясненные наукою.

Въ такомъ незавидномъ положеніи пришлось очутиться мнѣ лично, когда, послѣ активной строительной дѣятельности, я имѣлъ честь выступить въ нашемъ институтѣ въ качествѣ преподавателя курса основаній и фундаментовъ.

Въ виду сдѣланной мною ранѣе характеристики состоянія науки объ основаніяхъ, вполне понятно, что вопросы теоріи меня интересовали по преимуществу; а потому, слѣдя за литературою, я не могъ не обратить особеннаго вниманія на оригинальныя работы инженера Янковскаго, а именно на его статьи: „О сопротивленіи свай“ и на цитируемую уже мною статью „О глубинѣ заложенія основаній“. Когда же появилось возраженіе профессора Николаи, я предложилъ инженеру Янковскому совмѣстно заняться повѣркою его теоріи путемъ болѣе научно обставленныхъ опытовъ.

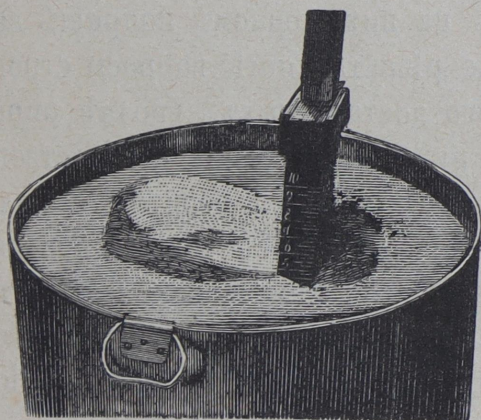


Получивъ разрѣшеніе воспользоваться съ этою цѣлью помѣщеніемъ механической лабораторіи, мы въ іюлѣ настоящаго года сдѣлали необходимыя приспособленія и начали свои опыты.

Приспособленія эти заключались въ слѣдующемъ: къ имѣвшемуся въ лабораторіи чугунному столу была привинчена доска, на выступавшемъ концѣ которой было сдѣлано квадратное отверстіе; чрезъ это отверстіе проходилъ стержень, къ верхнему концу котораго прикрѣплялся поддонъ для гирь, а къ нижнему могли прикрѣпляться разной величины параллелопипеды, игравшіе роль фундаментовъ. Для помѣщенія песка былъ сдѣланъ желѣзный резервуаръ. Наши фундаменты имѣли слѣдующіе размѣры подошвъ:  $1'' \times 8''$ ,  $2'' \times 6''$ ,  $2'' \times 8''$ ,  $3'' \times 9''$  и  $4'' \times 9''$ .

При первыхъ опытахъ фундаменты, болѣе или менѣе нагруженные, давали осадку, не сопровождавшуюся никакимъ выпучиваніемъ поверхности. Это происходило до тѣхъ поръ, пока свѣженаасыпанный песокъ не улегся и не

Фиг. 10.



уплотнился до своего естественнаго состоянія. Послѣ нѣсколькихъ дней опытовъ подобныя осадки прекратились, и затѣмъ каждая осадка фундамента сопровождалась одновременнымъ, ясно выражавшимся выпучиваніемъ песка, вдоль одной изъ длинныхъ сторонъ фундамента, какъ показано на рисункѣ

(фиг. 10). Выпучиванія вдоль короткихъ сторонъ никогда не происходило, равнымъ образомъ не случалось наблюдать одновременнаго выпирания вдоль обѣихъ длинныхъ сторонъ.

При выпучиваніи песка всегда замѣчалось сползаніе фундамента въ одну или другую сторону, при чемъ со стороны противоположной выпучиванію образовывалось углубленіе. Отклоненіе фундамента то въ одну, то въ другую сторону обуславливалось совершенно случайными причинами, каковы: несимметричность расположенія нагрузки по поддону, недостаточная точность вертикальной установки фундамента и т. п. Съ цѣлію полученія большей выпирающей призмы, въ нѣкоторыхъ опытахъ фундаментъ ставился не по срединѣ резервуара; на величину сопротивленія это не вліяло.

Наблюденія наши заключались въ томъ, что для каждой глубины заложенія фундамента замѣчался тотъ предѣльный грузъ,



при которомъ фундаментъ давалъ осадку, опредѣлялись размѣры призмы выпучиванія, величина осадки и отклоненія фундамента отъ вертикальнаго направленія въ сторону. Песокъ, служившій для опытовъ, былъ предварительно изслѣдованъ въ отношеніи вѣса кубической единицы и коэффиціента тренія по углу естественнаго откоса.

Когда, послѣ нѣсколькихъ опытовъ, наблюденныя предѣльныя нагрузки при различныхъ заложеніяхъ были сравнены съ теоретическими, исчисленными по формуламъ Rankine'a и Паукера съ одной стороны, и Янковскаго — съ другой, то оказалось, что наблюденныя величины въ среднемъ превышаютъ вычисленныя по Rankine'у и Паукеру въ 8, а по Янковскому въ 4 раза. Что же касается ширины выпиравшей призмы, то она довольно близко подходила къ той, которая получается въ сдѣланномъ Янковскимъ предположеніи треугольнаго профиля призмы сопротивленія. Подобные результаты сравненія количественныхъ данныхъ опыта съ формулою Rankine'a и Паукера вполне объяснялись, во первыхъ, тѣмъ, что размѣры выпертой призмы въ ширину указывали на ея треугольную, а не трапецидальную формулу, а во вторыхъ, и главнымъ образомъ, тѣмъ, что формула профессора Паукера выведена для равновѣсія бесконечно тонкихъ полосокъ, на опытѣ же мы имѣли дѣло съ фундаментами, хотя и небольшихъ, но все же конечныхъ размѣровъ.

Что касается несходимости результатовъ опытовъ съ формулою Янковскаго, то она на первый взглядъ представлялась тѣмъ болѣе необъяснимою, что всѣ обстоятельства опытовъ, казалось, вполне соотвѣтствовали основнымъ положеніямъ его теоріи.

Такимъ образомъ первые же опыты показали, что обѣ формулы не рѣшаютъ вопроса о величинѣ разрушающаго груза, т. е. о величинѣ временнаго сопротивленія песка выдавливанію.

Такіе печальные результаты опытовъ, очевидно, указывали на то, что при выводѣ формулы Янковскаго было упущено изъ виду какое нибудь важное обстоятельство.

Дѣйствительно, обращаясь къ болѣе простой и разработанной теоріи подпорныхъ стѣнокъ и сопоставляя два ряда явленій, а именно треніе земли о подпорную стѣнку при минимальномъ перемѣщеніи послѣдней, и относительное перемѣщеніе *внизъ* призмы обрушенія подъ фундаментомъ, при одновременномъ съ нимъ перемѣщеніи призмы сопротивленія *вверхъ*, — совершенно естественно было сдѣлать попытку ввести и въ теорію выпирания песку такое же треніе между призмами обрушенія и сопротивленія. Результатомъ вве-



денія тренія по раздѣльной плоскости явилась вторая формула Янковскаго.

Выводъ второй формулы Янковскаго \*) аналогиченъ съ выводомъ его первой формулы; окончательные же результаты представляются въ двухъ видахъ, а именно:

$$H = 2\Delta h . . . . . (1)$$

$$H = \Delta \frac{(h+z)^2}{2z} - \frac{z}{2} . . . . . (2);$$

гдѣ: 
$$\Delta = \frac{\cos 2\varphi + 8B \sin \varphi}{\cos 2\varphi - 8A \sin \varphi} = \left( \frac{B}{A} \right)^2 = \left( \frac{\operatorname{tg} \frac{45 + \varphi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{45 - \varphi}{2}} \right)^2,$$

$$A = \cos \frac{45 + \varphi}{2} \sin \frac{45 - \varphi}{2},$$

$$B = \sin \frac{45 + \varphi}{2} \cos \frac{45 - \varphi}{2},$$

$$z = \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4A \cos \varphi}{\cos 2\varphi}.$$

$H$  — высота столба песка, соответствующая предѣльной нагрузкѣ.

$b$  — ширина фундамента.

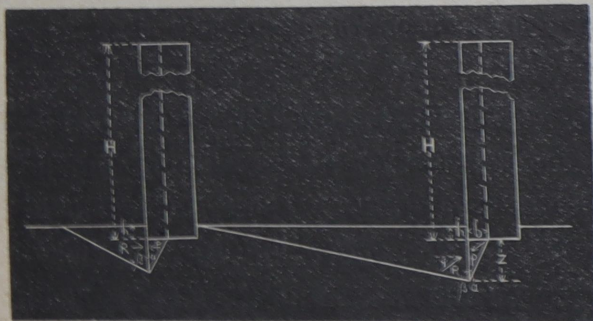
$h$  — глубина заложения.

$\varphi$  — уголъ тренія песка.

Видъ формулы 1) даетъ, выраженную въ высотѣ  $H$ , величину предѣльной нагрузки песчанаго основанія при томъ условіи, что отъ сооруженія можетъ отколоться нѣкоторый вертикальный слой, невыгоднѣйшій въ смыслѣ возможности выпирания основанія.

Видъ формулы 2) даетъ величину предѣльной нагрузки при томъ условіи, что сооруженіе раскалывается на вертикальные слои не можетъ, а потому выдавливаніе должно происходить изъ подъ всего сооруженія.

Фиг. 11.



Разница между первоначальной формулою Янковскаго и двумя вышеприведенными видами второй формулы наглядно выясняется изъ фигуры 11.

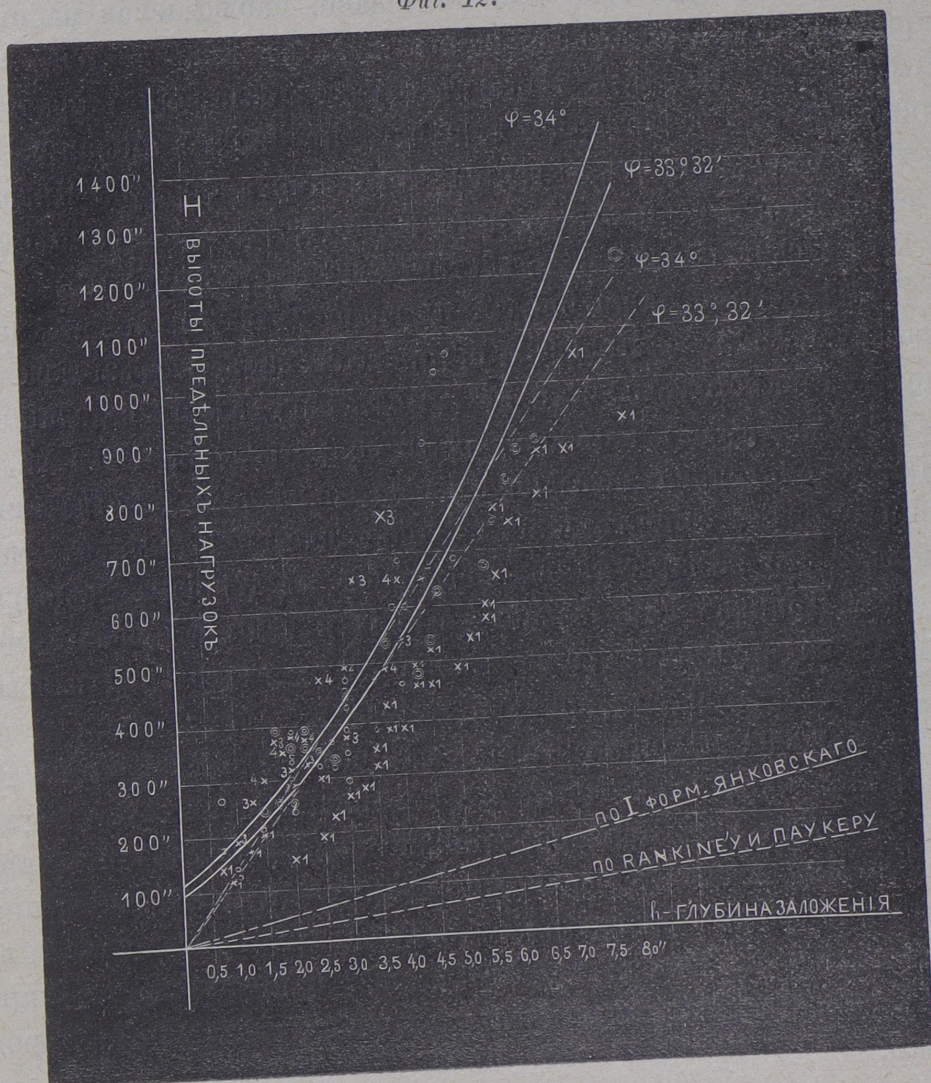
Результаты наблюденій опытныхъ предѣльныхъ нагрузокъ и

\*) Выводъ этой формулы всецѣло принадлежитъ П. К. Янковскому.



величины ихъ, исчисленныя по формуламъ Rankine'a и Паукера, по первой и второй формуламъ Янковскаго, представлены на графикѣ (фиг. 12), а потому о степени приближенія второй формулы Янковскаго къ дѣйствительности, предоставляю Вамъ, Мм. Гг., судить самимъ.

Фиг. 12.



Послѣ такого совпаденія результатовъ опытовъ съ теоретическими выводами, казалось бы, можно было допустить, что природа явленія выпиранія песка изъ подъ фундаментовъ выражена во второй теоріи Янковскаго вполне вѣрно, а вмѣстѣ съ тѣмъ вопросъ о величинѣ временнаго сопротивленія песка разрушенію, путемъ выдавливанія, окончательно разрѣшенъ, можно сказать, блистательно, такъ какъ величина временнаго сопротивленія выражена въ вѣсѣ кубич. единицы и въ коэффициентѣ тренія, тогда какъ для тѣлъ твердыхъ временное сопротивленіе можно опредѣлять только непосредственнымъ испытаніемъ.



Однако сложить орудіе было бы слишкомъ рано: правда, вторая формула Янковскаго даетъ весьма вѣрную величину временнаго сопротивленія, но она далеко не выражаетъ дѣйствительной картины процесса разрушенія сыпучаго тѣла. Его схема взаимодействія призмы обрушенія и сопротивленія остается все же только схемою, хотя и весьма удачною. Дѣйствительно: наблюдаемая на опытахъ ширина призмы сопротивленія почти вдвое меньше той, которая должна была бы имѣть мѣсто въ случаѣ, если бы вторая теорія Янковскаго соотвѣтствовала сущности процесса выпирания.

Такимъ образомъ оказывается, что и вторая формула Янковскаго въ сущности тоже невѣрна, хотя и даетъ, какъ Вы сами изволите видѣть, весьма близкіе къ дѣйствительности результаты.

Когда первые наши опыты, имѣвшіе цѣлью провѣрить первоначальную формулу Янковскаго, привели насъ къ заключенію о полной ея несостоятельности въ смыслѣ опредѣленія величины предѣльныхъ нагрузокъ или временнаго сопротивленія песка выдавливанію, не смотря на довольно близкое совпаденіе дѣйствительныхъ ширинъ призмы сопротивленія съ теоретическими, мы, за разъясненіемъ этого недоразумѣнія, обратились къ теоріямъ подпорныхъ стѣнокъ. Принявъ направленіе давленія призмы обрушенія наклоннымъ подъ угломъ тренія къ нормали раздѣльной плоскости или, другими словами, принявъ въ расчетъ треніе между призмами обрушенія и сопротивленія, слѣдовательно ставши на точку зрѣнія новѣйшихъ изслѣдователей теоріи подпорныхъ стѣнокъ, каковы Scheffler, Ott, Rebhann, Winkler и др., мы пришли ко второй формулѣ Янковскаго, давшей вѣрные результаты въ отношеніи величины предѣльныхъ нагрузокъ. Когда тѣ же опыты показали намъ несостоятельность второй теоріи Янковскаго въ отношеніи ширины призмы сопротивленія, мы снова обратились къ теоріи подпорныхъ стѣнокъ.

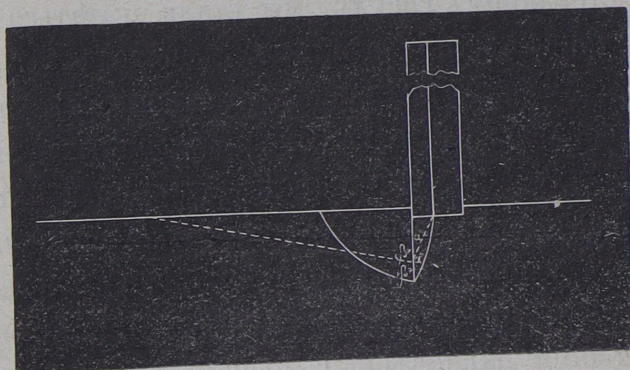
На этотъ разъ мы остановили наше вниманіе на томъ обстоятельстве, что работами Scheffler'a, Mohr'a и Winkler'a доказана необходимость криволинейности поверхности скольженія или, какъ ее называютъ, поверхности разрыва призмы обрушенія.

Криволинейность поверхности обрушенія проф. Mohr элементарно объясняетъ тѣмъ обстоятельствомъ, что силы, дѣйствующія на призму обрушенія, а именно ея вѣсъ и реакціи стѣнки и откоса, вообще не пересѣкаются въ одной точкѣ, а потому должны вызывать перекашиваніе призмы, которое и должно выразиться въ криволинейности ея очертанія. Призма сопротивленія въ основа-



ніяхъ сооруженій, въ отношеніи дѣйствія на нее силъ, находится въ еще менѣе благопріятныхъ условіяхъ вслѣдствіе того, что давленіе отъ призмы обрушенія передается призмѣ сопротивленія по раздѣльной плоскости, которая составляетъ только часть вертикальной грани призмы сопротивленія. Эти соображенія побудили насъ допустить, что и поверхность скольженія призмы сопротивленія также должна быть криволинейна. Такое допущеніе дало намъ возможность объяснить несходимость исчисленныхъ по формулѣ ширины призмы сопротивленія съ дѣйствительными, оставляя при этомъ въ силѣ предположеніе о направленіи давленія отъ призмы обрушенія на призму сопротивленія. Представленная на фигурѣ 13 схема, въ которой углы  $\alpha$  и  $\beta$  какъ въ прямолинейныхъ, такъ и въ криволинейныхъ призмахъ одинаковы, показываетъ, что при криволинейномъ очертаніи призмы,

Фиг. 13.



ширина призмы сопротивленія должна быть меньше. Сопоставляя съ одной стороны меньшую ширину призмы сопротивленія, которая находитъ себѣ объясненіе въ допущеніи криволинейности призмы, а съ другой стороны, констатированную уже здѣсь, сходимость опытныхъ нагрузокъ съ исчисленными по второй формулѣ Янковскаго, выведенной въ предположеніи прямолинейности очертанія обѣихъ призмы, мы должны были придти къ заключенію, что въ дѣйствительности призмы обрушенія и сопротивленія криволинейны, но сопротивленіе этихъ призмы выпиранію должно быть равно сопротивленію призмы прямолинейныхъ, принятыхъ въ теоріи Янковскаго. Другими словами, прямолинейная призма Янковскаго, въ смыслѣ сопротивленія, эквивалентны дѣйствительнымъ призмамъ съ криволинейнымъ очертаніемъ.

Возможность такой эквивалентности прямолинейныхъ и криволинейныхъ призмы можетъ быть объяснена путемъ слѣдующаго соображенія: криволинейная призма имѣетъ меньшую площадь сѣченія, а слѣдовательно и меньшій вѣсъ, чѣмъ призма прямолинейная, но сопротивленіе перемѣщенію по кривому откосу должно быть очевидно, больше такого же сопротивленія по откосу прямолинейному. Вполнѣ же естественно допустить, что обстоятельства эти,



вліяя на величину сопротивленія выпиранію въ противоположныхъ смыслахъ, могутъ уравниваться.

Такимъ образомъ теорія Янковскаго, хотя и основанная на слишкомъ элементарномъ представленіи о процессѣ выпиранія, тѣмъ не менѣе весьма удачно обнимаетъ главнѣйшія обстоятельства взаимодѣйствія двухъ призмъ, благодаря только чему даваемые ею результаты и могутъ быть такъ близки къ наблюдаемымъ на опытѣ. Другими словами, избранная Янковскимъ призма представляетъ весьма удачную схему взаимодѣйствія частицъ сыпучаго тѣла при мѣстной его нагрузкѣ.

Остановившись на предположеніи о криволинейномъ очертаніи призмъ обрушенія и сопротивленія, совокупность которыхъ буду называть призмою выпиранія, и найдя фактическое подтвержденіе этого предположенія въ наблюденіи процесса выпиранія песка въ стеклянномъ сосудѣ, мы стали пытаться опредѣлить истинный видъ кривыхъ, по которымъ происходитъ выпираніе песку.

Теорія подпорныхъ стѣнокъ, къ которымъ мы такъ привыкли обращаться во всѣхъ приведенныхъ мною затруднительныхъ случаяхъ, не могла намъ дать никакихъ полезныхъ указаній, такъ какъ даже сравнительно болѣе простую кривую поверхности разрыва призмъ обрушенія и по настоящее время никому еще не удалось выразить уравненіемъ, а проф. Boussinesq въ своемъ „Опытѣ теоріи равновѣсія сыпучихъ тѣлъ“ высказываетъ мнѣніе, что интегрированіе дифференціальныхъ уравненій равновѣсія сыпучихъ тѣлъ едвали и возможно въ случаѣ конечнаго отклоненія давленій отъ естественныхъ; въ интересующемъ же насъ процессѣ выпиранія песку изъ подъ сооруженій необходимо допустить отклоненіе направленій давленій на 90 и болѣе градусовъ, какъ это слѣдуетъ изъ схемы Rankine'a.

При такомъ состояніи ученія о равновѣсіи сыпучихъ тѣлъ, намъ оставалось только выяснитъ себѣ наиболѣе вѣроятный видъ кривыхъ скользенія и давленій, руководствуясь отчасти вышеизложенными основными законами новѣйшей теоріи сыпучихъ тѣлъ, отчасти непосредственными наблюденіями кривыхъ въ стеклянномъ сосудѣ и, наконецъ, соображеніями, заимствованными изъ теоріи упругости тѣлъ твердыхъ.

Послѣ цѣлаго ряда гипотезъ мы пришли къ слѣдующимъ выводамъ:

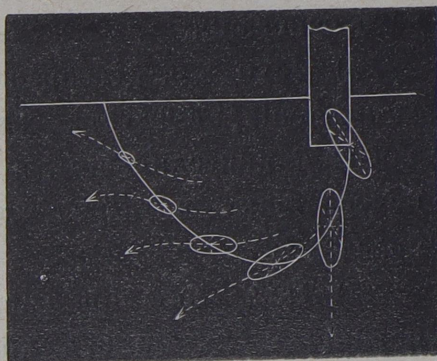
1) Кривая скользенія призмы выпиранія должна быть разсматриваема, какъ геометрическое мѣсто плоскостей скользенія эллипсовъ



напряжений въ различныхъ точкахъ сыпучаго тѣла, причемъ отклоненіе этихъ эллипсовъ отъ ихъ естественнаго положенія во время покоя вызвано мѣстной нагрузкою сыпучаго тѣла.

Фиг. 14.

2) За отсутствіемъ основаній предполагать конечное измѣненіе напряжений между двумя смежными элементами сыпучаго тѣла, мы должны *допустить постепенное вращеніе эллипсовъ напряжений*, откуда само собою вытекаетъ, что кривая скользенія должна быть плавная, безъ точекъ перелома \*). Вѣроятный видъ кривой скользенія, удовлетворяющей этимъ условіямъ, представленъ на фигурѣ 14.



Разсмотримъ тонкій слой песку, лежащій непосредственно подъ фундаментомъ. Очевидно этотъ слой, при вертикальной осадкѣ фундамента опускается вмѣстѣ съ нимъ, а потому боковыя плоскости разрыва этого слоя, другими словами, плоскости скользенія соответственныхъ элементовъ его будутъ вертикальны. Отсюда слѣдуетъ, что въ эллипсахъ напряжений крайнихъ элементовъ этого слоя одна изъ плоскостей скользенія должна быть вертикальна, а вмѣстѣ съ этимъ большая ось этого эллипса, показывающая направленіе наибольшаго давленія, будетъ составлять съ вертикалью уголъ  $45 - \frac{\varphi}{2}$ , что совершенно аналогично распространенію давленій въ твердыхъ тѣлахъ при тѣхъ же условіяхъ. По закону симметріи слѣдуетъ допустить подобное же расположеніе эллипса напряжений и съ противоположнаго края фундамента. Что касается эллипса напряжений въ центральной точкѣ этого слоя, то, очевидно, большая ось его должна быть вертикальна. Подобное же вертикальное положеніе большихъ осей эллипсовъ напряжений должно сохраняться во всѣхъ элементахъ, расположенныхъ по вертикали, идущей отъ центра фундамента. Одинъ изъ такихъ эллипсовъ будетъ находиться и на кривой скользенія.

Остальные эллипсы, лежащіе по кривой скользенія, по мѣрѣ

\*) Постепенность вращенія эллипсовъ напряжений должна имѣть мѣсто, такъ сказать, и въ пространствѣ, и во времени, т. е. по мѣрѣ возрастанія нагрузки. На основаніи такого принципа можно объяснить противорѣчивые, повидимому, результаты опытовъ Gobin'a и Winkler'a: они наблюдали разные моменты отклоненія подпорной стѣнки, въ которые положеніе эллипсовъ напряжений было различно: у Gobin'a — нормальное, у Winkler'a — наклонное.



уменьшенія абсолютной ихъ величины, все болѣе и болѣе отклоняются отъ своего естественнаго положенія.

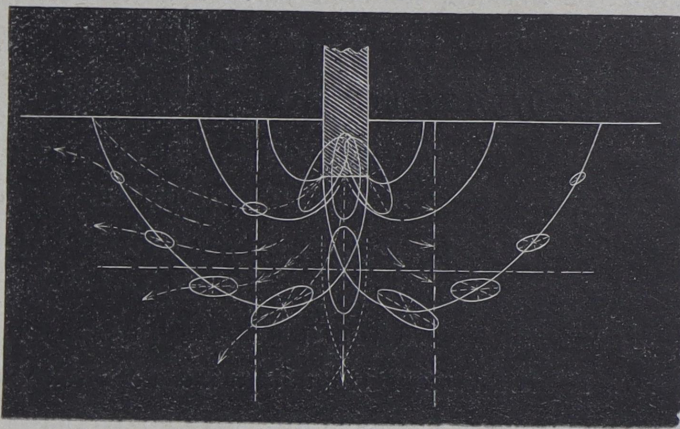
3) По положенію большихъ осей этихъ эллипсовъ можно судить о направленіяхъ наибольшихъ давленій въ разныхъ точкахъ сыпучаго основанія.

4) Исходя изъ соображеній о постепенности вращенія эллипсовъ напряженій, слѣдуетъ заключить, что направленія наибольшихъ давленій криволинейны, а сфера дѣйствія давленія вообще неограничена какъ въ вертикальномъ, такъ и въ горизонтальномъ направленіяхъ.

5) Такъ какъ при равномерномъ вертикальномъ давленіи, выпирание песку можетъ происходить безразлично то въ ту, то въ другую сторону, то описанная система эллипсовъ, образующихъ кривую скользенія, должна имѣть мѣсто и по другую сторону фундамента, причемъ пересѣченіе обѣихъ кривыхъ произойдетъ, очевидно, по сопряженнымъ плоскостямъ скользенія эллипса, имѣющаго большую ось вертикальною.

На фигурѣ 15 показаны двѣ системы кривыхъ давленій и скользеній.

Фиг. 15.



Очевидно сопротивленіе скользенію по той или другой кривой, при равныхъ прочихъ условіяхъ, должно быть одинаково; а потому, если песокъ изъ подъ фундамента выпирается то въ одну, то въ другую сторону, то это слѣдуетъ приписать случайнымъ причинамъ, въ родѣ неперпендикулярности установки фундамента и т. п.

6) Въ случаѣ, если бы фундаментъ былъ поставленъ въ условія совершенно одинаковыя для возможности скользенія какъ въ ту, такъ и въ другую сторону, то вполне естественнымъ является вопросъ,—возможно ли одновременное выпирание песка въ обѣ стороны и не представляется ли такому двустороннему выпиранию



большее сопротивление, чѣмъ одностороннему, такъ какъ приводимыя въ движеніе въ томъ и другомъ случаѣ массы песка должны быть неодинаковы?

Разсуждая теоретически, двустороннее выпирание можно разсматривать, какъ результатъ попеременныхъ одностороннихъ выпираний; а потому сопротивление двустороннему выпиранию не должно бы превышать величины каждаго въ отдѣльности.

Что касается разности въ величинѣ приводимыхъ въ движеніе массъ песка при двустороннемъ и одностороннемъ выпирании, то она можетъ уравниваться разностью высотъ выпирания въ томъ и другомъ случаѣ.

Эти теоретическія соображенія поддаются опытной проверкѣ, а потому мы снова обратились къ нашему прибору.

Для устранения возможности отклоненія фундаментовъ отъ вертикальнаго направленія, мы прибавили вторую направляющую для вертикальнаго стержня, несущаго поддонъ, и, при производствѣ опытовъ, обращали особенное вниманіе на возможно большую симметричность расположенія гирь на поддонѣ.

Возможность двусторонняго выпирания не замедлила обнаружиться, въ чемъ и можно убѣдиться по этой фигурѣ (фиг. 16).

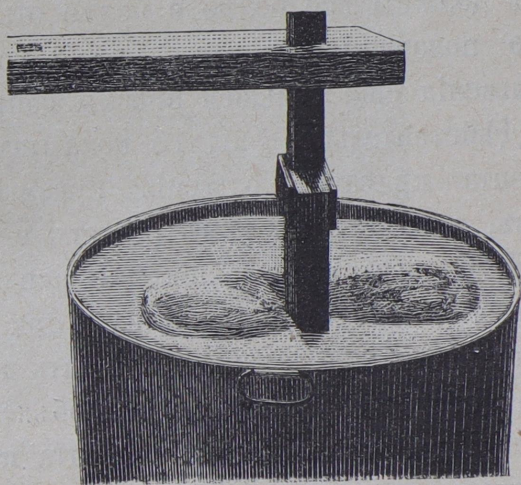
Возвращаясь къ графику результатовъ опытной проверки формулы Янковскаго (фиг. 12), позвольте обратить Ваше вниманіе на то, что здѣсь имѣются кружки двухъ видовъ: одни — одиночные, другіе — двойные.

Одиночные кружки соответствуютъ нагрузкамъ при одностороннемъ, а двойные — при двустороннемъ выпирании. Какъ

видите, между величинами временнаго сопротивленія при обоихъ родахъ выпирания нѣтъ никакой существенной разницы.

При опытахъ съ двустороннимъ выпираниемъ нами было замѣчено слѣдующее обстоятельство: при осадкахъ фундамента, сразу на значительную глубину, выпиравшаяся масса песка была очень часто ограничена отчетливымъ замкнутымъ контуромъ со всѣхъ сторонъ, а слѣдовательно и со стороны фундамента, который отдѣлялся отъ выпертой массы небольшою площадкою и углубленіемъ

Фиг. 16.





въ видѣ воронки. Возможность выпирания массы песка съ замкнутымъ контуромъ, при сравнительно небольшомъ разстояніи его отъ фундамента, можетъ быть объяснена только криволинейностью распространенія давленія, судя по фигурѣ 15.

Констатировавъ, такимъ образомъ, опытами съ двустороннимъ выпираниемъ криволинейность поверхности скользенія призмы выпирания и криволинейность распространенія давленій въ массѣ сыпучаго тѣла, мы тѣмъ самымъ установили нѣкоторую аналогію между явленіями, наблюдаемыми въ тѣлахъ сыпучихъ и—извѣстными изъ теоріи упругости. Теоретическое изслѣдованіе этихъ вопросовъ представляетъ значительныя трудности даже и въ послѣдней теоріи, несравненно болѣе разработанной, а потому мы и принуждены были отказаться отъ мысли найти аналитическое рѣшеніе вопроса о кривыхъ давленія и скользенія.

Однако, продолжая идти далѣе избраннымъ нами путемъ изслѣдованія вѣроятныхъ кривыхъ давленія, мы пришли еще къ слѣдующимъ выводамъ:

7) По мѣрѣ углубленія въ массу сыпучаго тѣла, сопротивленіе выпиранью должно возрастать вслѣдствіе того, что, для возможности самага выпирания, эллипсы напряженій въ элементахъ сыпучаго тѣла должны все болѣе и болѣе отклоняться отъ своего естественнаго положенія съ тѣмъ, чтобы образовать новую поверхность скользенія еще большей призмы сопротивленія.

Дѣйствительно, фиг. 15 показываетъ, что съ углубленіемъ фундамента кривая скользенія призмы сопротивленія перемѣщается внизъ, а вмѣстѣ съ тѣмъ растетъ и самая призма.

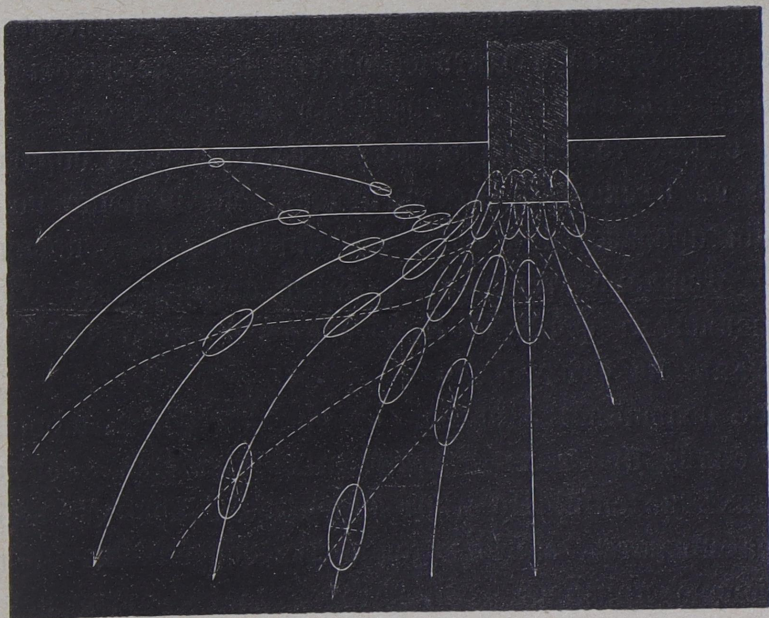
8) Съ увеличеніемъ ширины фундамента (при условіи одинаковой нагрузки на одну кв. единицу и при той же глубинѣ) сопротивленіе выпиранію также должно возрастать и по той же причинѣ. (Фиг. 17). Этимъ обстоятельствомъ можно объяснить тотъ обнаруженный опытами фактъ, что выпираніе грунта изъ подъ прямоугольныхъ фундаментовъ происходитъ вдоль длинныхъ сторонъ, такъ какъ такому выпиранію соотвѣтствуетъ меньшая ширина въ профили выпираемой призмы.

9) Въ общемъ случаѣ выпираніе возможно при томъ условіи, что слой сыпучаго тѣла имѣетъ неопредѣленные размѣры какъ по вертикальному, такъ и по горизонтальному направленію. Если слой ограниченъ снизу или съ боковъ, какъ показано пунктиромъ на фиг. 15-ой, то выпираніе возможно только для глубинъ и ширинъ фундаментовъ, не превосходящихъ извѣстнаго предѣла. Если при



извѣстныхъ глубинахъ заложенія и ширинахъ фундаментовъ и не происходитъ выпирающаго, то поверхности, ограждающія слой сыпучаго тѣла, должны во всякомъ случаѣ испытывать давленіе, которое въ нѣкоторыхъ случаяхъ можетъ быть горизонтальнымъ. Это послѣднее свойство песка—производитъ горизонтальный распоръ на стѣнки сосуда—было замѣчено уже давно, но объяснялось способностью песка образовывать выпуклые къверху своды, опирающіеся своими пятнами на стѣнки сосуда. Производившіеся въ 1857 г. французскимъ капитаномъ Моро опыты, имѣвшіе цѣлью провѣрить правильность такихъ взглядовъ, не дали однако возможности констатировать существованіе подобныхъ сводовъ. Въ настоящее время мы имѣемъ, кажется, данныя утверждать, что въ песокъ, въ силу криволинейности распространенія давленія, дѣйствительно могутъ, подъ вліяніемъ соотвѣтственной нагрузки, образовываться своды или арки, но не прямые, а обратные.

Фиг. 17.



10) Понятіе объ углѣ распространенія давленія въ песокъ какъ о величинѣ постоянной, опредѣлявшейся въ  $40^{\circ}$ — $50^{\circ}$ , оказывается не выдерживающимъ критики. Изъ фигуръ 15—17 мы видимъ, что кривыя, по которымъ распространяется давленіе, измѣняютъ свою кривизну не только съ измѣненіемъ нагрузки, но и съ измѣненіемъ глубины заложенія и ширины фундамента.

Этимъ и исчерпываются наши изслѣдованія вѣроятныхъ кривыхъ давленія и скользянія.

Мм. Гг. Я приготовился выслушать упреки въ томъ, что рѣшаюсь дѣлать такіе смѣлые выводы на основаніи какой нибудь



сотни опытовъ надъ осадкою фундаментовъ ничтожныхъ размѣровъ — въ 1, 2, 3, 4 дюйма ширины и 6, 8, 9 дюймовъ длины, а потому считаю долгомъ оправдаться.

Въ 57—58 годахъ въ Петербургской крѣпости производились подобныя же опыты съ цѣлью опредѣленія сопротивленія насыпнаго трамбованнаго песка дѣйствию вертикальныхъ усилій. Испытываемый песокъ помѣщался въ ящикъ, имѣвшемъ въ длину 31, въ ширину  $9\frac{1}{2}$  и въ высоту  $6\frac{1}{2}$  футовъ. Роль фундамента исполнялъ другой ящикъ въ  $12\frac{1}{2}$  квадр. футовъ площади въ планѣ, погруженный въ песокъ на глубину 2 футъ.

При абсолютной величинѣ нагрузки въ 1.940 пуд. штыковой мѣди, что соотвѣтствуетъ 1,07 пуда на 1 кв. дюймъ, выпирания песка не происходило.

Теперь это обстоятельство легко объяснить: нагрузку ящика нужно было довести до 14.500 пуд. для того, чтобы выпирание стало возможнымъ, и то при томъ условіи, что кривая скользенія не пересѣкаетъ дна или стѣнокъ сосуда, содержащаго песокъ.

Не касаясь вопроса о фактической для насъ невозможности произвести опыты въ такихъ же грандіозныхъ размѣрахъ, какъ Кронштадтскіе, скажу только одно: имѣя необходимость обращаться съ нагрузками въ нѣсколько тысячъ пудовъ, мы конечно не были бы въ состояніи произвести и тѣхъ 120 опытовъ, на основаніи которыхъ мы и рѣшаемся теперь такъ смѣло строить свои теоріи.

Возвращаясь къ формулѣ Янковскаго, позволю себѣ обратить Ваше вниманіе на слѣдующее.

Изученіе большинства явленій физическаго міра начинается съ допущенія болѣе простыхъ и наглядныхъ гипотезъ, объясняющихъ природу этихъ явленій. По мѣрѣ накопленія новыхъ наблюденій, гипотезы развиваются, замѣняются болѣе современными, при чемъ господствующею признается та, которая даетъ объясненіе наибольшему количеству фактовъ. Гипотезы, дающія возможность не только объяснять, но и предъугадывать нѣкоторыя явленія, становятся уже въ разрядъ теорій и, хотя имѣютъ зачастую свои слабыя стороны, но продолжаютъ пользоваться правами гражданства и съ успѣхомъ служатъ наукѣ даже въ то время, когда новѣйшіе факты указываютъ на необходимость принятія новыхъ, болѣе совершенныхъ гипотезъ. Примѣромъ такого хода изученія явленій природы можетъ служить исторія гипотезъ о невѣсовыхъ жидкостяхъ, всецѣло господствовавшихъ въ физикѣ до развитія ученія о волнообразномъ движеніи. Въ явленіяхъ теплоты гипотеза невѣсомой



жидкости теперь совершенно оставлена, въ явленіяхъ же электричества теорія колебаній и до сихъ поръ не вполнѣ еще замѣнила старую гипотезу двухъ жидкостей.

Въ ученіи о подпорныхъ стѣнкахъ господствуетъ въ настоящее время теорія призмъ обрушенія, не смотря на то, что уже положено начало болѣе совершенной теоріи равновѣсія бесконечно малыхъ элементовъ сыпучаго тѣла.

Въ молодомъ еще ученіи о равновѣсіи естественныхъ основаній мы въ настоящее время имѣемъ двѣ гипотезы, а именно — гипотезу Rankine'а — равновѣсія двухъ смежныхъ бесконечно малыхъ элементовъ, и гипотезу проф. Паукера — взаимодействія двухъ призмъ.

Посмотримъ, какая же изъ этихъ гипотезъ представляется наиболѣе удобною для возможности построенія на ней удовлетворительной теоріи сопротивленія естественныхъ основаній на сыпучихъ тѣлахъ.

Гипотеза Rankine'а при условіи введенія въ нее поправки, а именно допущенія постепенности вращенія эллипса напряженій, на необходимость чего я имѣлъ уже честь указывать, бесспорно должна привести къ наиболѣе вѣрному и полному рѣшенію вопроса, но аналитическія трудности такого пути на столько велики, что въ настоящее время, въ аналогическомъ вопросѣ — въ подпорныхъ стѣнкахъ — отъ него принуждены были отказаться такіе ученые, какъ Winkler и Boussinesq.

Остается гипотеза проф. Паукера. Посмотримъ же, на сколько она удовлетворительно разработана Янковскимъ. Я разумѣю, конечно, его вторую формулу, такъ какъ первая, сослужившая свою службу, уже можетъ быть сдана въ архивъ.

Разсмотримъ его общую формулу:

$$H = \Delta \frac{(h + z)^2}{2z} - \frac{z}{2}.$$

Въ этой формулѣ  $H$  есть функція  $\varphi$ ,  $h$  и  $b$ . Для одного и того же грунта  $\varphi$  остается постояннымъ, а потому попробуемъ изслѣдовать зависимость  $H$  только отъ  $h$  и  $b$  или, что тоже, отъ  $z$ .

1) Принимая  $b$  постояннымъ, формулу можно написать въ слѣдующемъ видѣ:

$$H = (\Delta - 1) \frac{z}{2} + \Delta h + \frac{\Delta}{2z} h^2,$$

или

$$H = A + Bh + Ch^2,$$

гдѣ коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  — постоянныя. Кривая, изображаемая



последнимъ уравненіемъ, есть парабола, расположенная относительно координатныхъ осей такъ, какъ показано на фиг. 18.

Параболическое возрастаніе величины  $H$  въ зависимости отъ  $h$  подтверждается опытами, какъ видно изъ графика (фиг. 12).

Наген, на основаніи своихъ опытовъ надъ осадками моделей фундаментовъ на пескѣ, даетъ эмпирическую формулу для опредѣленія зависимости между  $H$  и  $h$ , слѣдующаго вида:

$$H = A_1 + C_1 h^2.$$

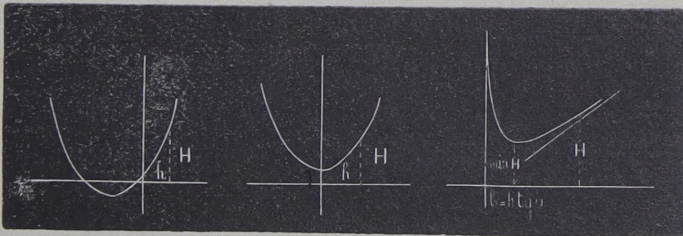
Это тоже парабола, расположенная относительно координатныхъ осей такъ, какъ показано на фигурѣ 19.

Такимъ образомъ, выводы изъ формулы Янковскаго въ отношеніи вліянія глубины заложенія на величину предѣльной нагрузки соотвѣтствуютъ наблюдаемымъ явленіямъ.

Фиг. 18.

Фиг. 19.

Фиг. 20.



2) Принимая  $h$  постояннымъ, ту же формулу можно представить въ слѣдующемъ видѣ, замѣнивъ въ ней  $z$  равнымъ ему  $\frac{b}{tg\alpha}$ :

$$H = \Delta h + \frac{\Delta - 1}{2tg\alpha} b + \frac{\Delta tg\alpha}{2} h^2 b^{-1},$$

или

$$H = M + Nb + Pb^{-1},$$

гдѣ  $M$ ,  $N$  и  $P$  постоянныя. Кривая, изображаемая последнимъ уравненіемъ, есть гипербола, расположенная относительно координатныхъ осей такъ, какъ показано на фиг. 20.

Существованіе одной изъ вѣтвей этой гиперболы обнаружено нашими опытами надъ фундаментами шириною въ 2, 3 и 4 дюйма, о чемъ можно судить по графику (фиг. 21). Что касается другой вѣтви, дающей возрастаніе предѣльныхъ нагрузокъ съ уменьшеніемъ ширины фундамента ниже невыгоднѣйшей ( $b = h tg\alpha$ ), то обнаружить таковую не удалось, вѣроятно, вслѣдствіе того, что у насъ фундаментъ уже невыгоднѣйшаго — имѣлъ ширину въ 1" и дѣйствовалъ, можетъ быть, какъ клинъ, на сосудъ съ пескомъ.

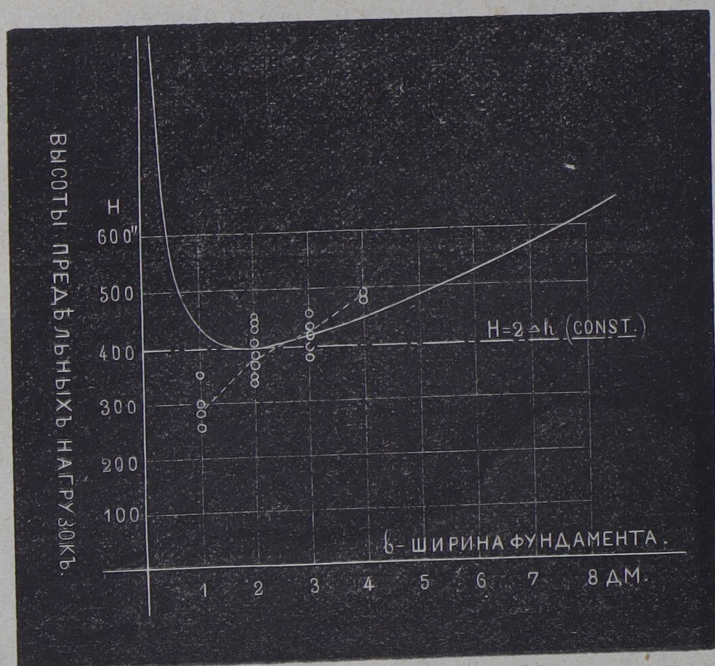
Инженеръ Зброжекъ, на основаніи произведенныхъ имъ въ 1876 г., въ камерѣ кессона толстаго быка Литейнаго моста, опытовъ надъ вдавливаніемъ металлическихъ досокъ въ глинистый



грунтъ, даетъ слѣдующаго вида эмпирическую формулу, выражающую зависимость предѣльной нагрузки отъ абсолютной величины подошвы фундамента:

$H = M_1 + N_1 \omega$ , гдѣ  $\omega$  величина площади подошвы,  $M_1$  и  $N_1$  — постоянныя.

Фиг. 21.



Уравненіе это выражаетъ прямую, соответствующую наблюденной нами вѣтви гиперболы (фиг. 20), такъ какъ  $\omega$  пропорціональна  $b$  при длинѣ фундамента равной единицѣ.

Такимъ образомъ, имѣются нѣкоторые данныя, подтверждающія справедливость вывода изъ формулы Янковскаго и въ отношеніи вліянія ширины фундамента на величину предѣльной нагрузки.

3) При  $h = 0$  формула даетъ

$$H = (\Delta - 1) \frac{z}{2} = (\Delta - 1) \frac{b}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

т. е. конечную величину сопротивленія поверхности песчаного слоя. Существованіе такого сопротивленія есть фактъ общеизвѣстный.

Къ слабымъ сторонамъ формулы Янковскаго слѣдуетъ отнести:

1) Наблюдаемая ширина призмы выпирания не совпадаетъ съ теоретическою; впрочемъ, обстоятельство это не имѣетъ серьезнаго практическаго значенія.

2) При  $\varphi = 0$ ,  $\Delta = 1$ ; при этомъ оба вида формулы Янковскаго:

$$H = \Delta \left( \frac{h+z}{2z} \right)^2 - \frac{z}{2} \text{ и } H = 2\Delta h$$



не приводятъ къ условію равновѣсія плавающего тѣла ( $H = h$ ); дѣйствительно, при  $\Delta = 1$ , первая формула обращается въ

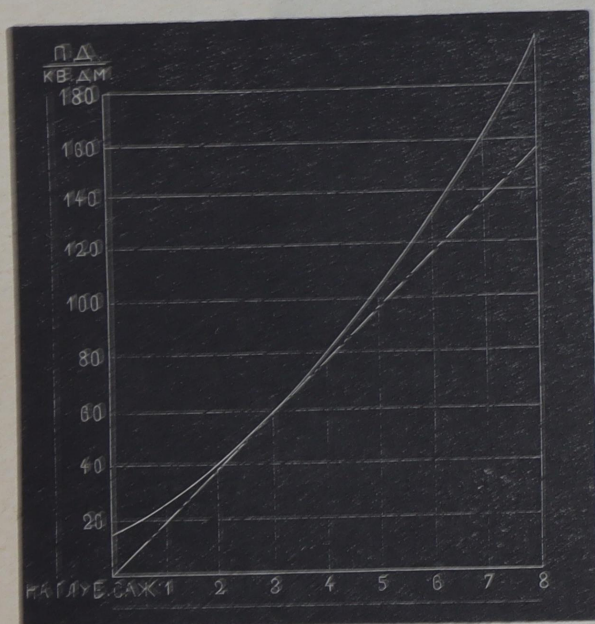
$$H = h + \frac{h^2}{2z},$$

а вторая въ

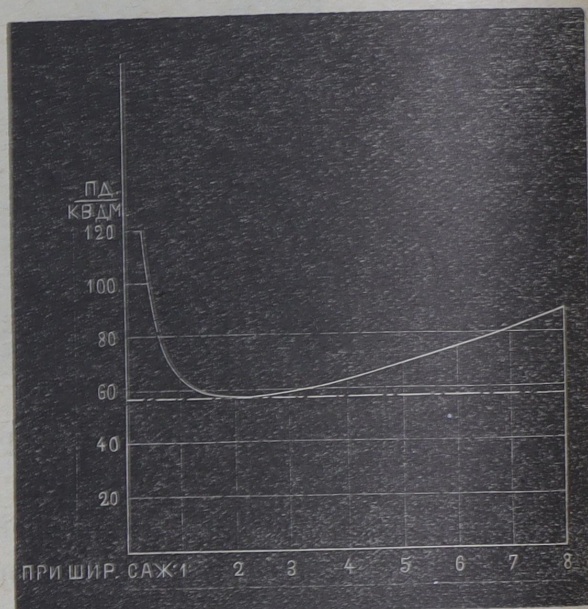
$$H = 2h.$$

Послѣдняя неточность формулы объясняется тѣмъ обстоятельствомъ, что при самомъ ея выводѣ были отброшены такіе члены, абсолютная величина которыхъ очень мала при значеніяхъ  $\varphi$  большихъ  $10^\circ$ , но которые при  $\varphi = 0$  приводили формулу къ условію гидростатическаго равновѣсія.

Фиг. 22.



Фиг. 23.



Такимъ образомъ оказывается, что выведенная на основаніи гипотезы проф. Паукера, формула Янковскаго вполне удовлетворительно опредѣляетъ величину временнаго сопротивленія песчаныхъ основаній и зависимость ея отъ глубины заложения и размѣровъ фундаментовъ, а потому, мнѣ кажется, она вправѣ занять видное мѣсто въ нарождающейся теоріи естественныхъ основаній.

Для нагляднаго представленія цифровыхъ величинъ временнаго сопротивленія песка, получаемыхъ по этой формулѣ, служатъ два графика (фиг. 22 и 23).

Мм. Гг. Въ первой половинѣ моего сообщенія я привелъ слѣдующія слова проф. Николаи, которыми онъ заканчиваетъ свое возраженіе на статью Янковскаго: „положеніе автора, о возможности



опредѣляемую по Паукеру глубину заложения основаній уменьшать вдвое, нельзя считать доказаннымъ“.

Къ этому можно только добавить, что вообще рѣшеніе такого серьезнаго вопроса, какъ глубина заложения, на основаніи однихъ только теоретическихъ соображеній, безъ всякой ихъ провѣрки опытнымъ путемъ, было бы крайне неосторожнымъ.

Въ настоящее время имѣется вторая формула Янковскаго, по которой предѣльныя нагрузки оказываются приблизительно въ 4 раза большими исчислившихся по первой формулѣ. Непосредственные опыты подтверждаютъ правильность новой формулы, о чемъ можно судить по графику опытовъ (фиг. 12). Поэтому совершенно естественно задаться вопросомъ: возможно ли на основаніи этихъ данныхъ, опредѣляемую по формулѣ Rankine'a и Паукера глубину заложения фундаментовъ уменьшить въ восемь разъ?

Мнѣ кажется, что лучший отвѣтъ на такой вопросъ можно найти въ прекрасныхъ словахъ Dupuit: „Les formules ne sont que des outils, qui doivent diriger l'intelligence et qui ne peuvent jamais la remplacer“.

Постараемся же съ этой точки зрѣнія опредѣлить значеніе формулы Янковскаго.

Въ началѣ сообщенія я указывалъ на то, что теорія основаній сводится къ изученію вопроса о величинѣ временнаго сопротивленія матеріала при тѣхъ особыхъ условіяхъ, въ какія онъ бываетъ поставленъ, когда служить основаніемъ сооружений. Изъ всевозможныхъ видовъ матеріаловъ основаній или грунтовъ я выдѣлилъ три характерныхъ типа—грунтовъ жидкихъ, твердыхъ и сыпучихъ, и обратилъ Ваше вниманіе на то, что обыкновенные землистые грунты, имѣющіе въ разсматриваемомъ вопросѣ наибольшее практическое значеніе, занимаютъ среднее мѣсто между этими тремя типами.

Далѣе я старался выяснитъ, что къ изученію условій внутренняго равновѣсія, а слѣдовательно и къ опредѣленію величины временнаго сопротивленія грунтовъ землистыхъ можно будетъ приступить только послѣ всесторонняго изученія законовъ равновѣсія тѣлъ жидкихъ, твердыхъ и сыпучихъ.

Законы равновѣсія жидкостей изучены давно.

Изученіе законовъ внутренняго равновѣсія тѣлъ твердыхъ въ послѣднее время приближается уже къ возможности рѣшенія занимающихъ насъ вопросовъ.



Оставались тѣла сыпучія, законы внутренняго равновѣсія которыхъ не были разъяснены въ соотвѣтственной мѣрѣ.

Формула Янковскаго, какъ построенная на удачной схемѣ, отчасти заполняетъ пробѣлъ въ ученіи о сыпучихъ тѣлахъ, благодаря чему въ настоящее время, повидимому, является уже возможность приступить къ изученію законовъ равновѣсія грунтовъ землистыхъ.

Въ этомъ заключается *научное* значеніе формулы Янковскаго.

Глубина заложения основаній не можетъ опредѣляться изъ одного только условія равенства между давленіемъ сооруженія и прочнымъ сопротивленіемъ основанія; на правильное рѣшеніе этого вопроса вліяетъ порядокъ и характеръ залеганія слоевъ грунта и многія другія тому подобныя мѣстныя условія, а потому формула Янковскаго можетъ служить для опредѣленія одного только фактора, вліяющаго на то или иное рѣшеніе вопроса о глубинѣ заложения основаній. Очевидно, отсюда далеко еще до установленія строгой пропорціональности между величинами временнаго сопротивленія основаній и необходимою, въ каждомъ частномъ случаѣ, глубиною заложения фундаментовъ.

При всемъ этомъ не слѣдуетъ упускать изъ виду того обстоятельства, что формула Янковскаго выведена только для сухаго песка, а потому примѣнять ее при расчетѣ глубины заложения основаній на обыкновенныхъ землистыхъ грунтахъ, подобно тому какъ это дѣлаютъ теперь, пользуясь формулою Rankine'a и Паукера, по меньшей мѣрѣ преждевременно, такъ какъ въ нашемъ распоряженіи имѣется слишкомъ мало данныхъ для того, чтобы судить на сколько законы внутренняго равновѣсія тѣлъ землистыхъ, занимающихъ среднее мѣсто между тѣлами сыпучими, твердыми и жидкими, подходятъ къ законамъ внутренняго равновѣсія тѣлъ сыпучихъ.

Тѣмъ не менѣе въ виду того, что свойства тѣлъ землистыхъ все же до нѣкоторой степени приближаются къ свойствамъ тѣлъ сыпучихъ, формула Янковскаго и теперь уже можетъ быть полезна своими указаніями на то вліяніе, какое имѣетъ глубина заложения и ширина фундаментовъ на величину временнаго сопротивленія грунта. Первымъ такимъ полезнымъ указаніемъ, мнѣ кажется, могло бы быть такое: отказавшись отъ фундаментовъ съ большою площадью подошвы при малой глубинѣ заложения, слѣдуетъ перейти къ фундаментамъ съ меньшей площадью подошвы, но за то опущеннымъ на большую глубину; иными словами, перейти отъ сплош-



ныхъ фундаментовъ къ отдѣльнымъ опорамъ, которыя должны удешевить наши сооруженія и обезпечить имъ несравненно большую устойчивость и прочность. Въ этомъ, по моему мнѣнію, и можетъ заключаться главное *практическое* значеніе формулы Янковскаго.

Чтобы не быть голословнымъ, высказывая такое смѣлое мнѣніе о роли отдѣльныхъ опоръ въ teknikѣ основаній, позволю себѣ сослаться на статью строителя элеваторовъ въ Чикаго, архитектора Баупа'а, которая вошла въ составъ упомянутаго уже мною сочиненія Powell'а объ основаніяхъ и фундаментахъ.

Оканчивая на этомъ мое сообщеніе, позволю себѣ, Мм. Гг., высказать пожеланіе, чтобы теорія основаній, возникающая на изыщной по своей простотѣ гипотезѣ о взаимодѣйствіи призмъ обрушенія и сопротивленія, при дальнѣйшемъ своемъ развитіи на началахъ новѣйшихъ воззрѣній о равновѣсіи бесконечно малыхъ, идя рука объ руку съ указаніями опыта, достигла бы такой же степени совершенства, какъ и многіе другіе отдѣлы Строительной механики, гдѣ точной теоріи принадлежитъ по праву руководящая роль.

**В. Курдюмовъ.**

(Извлечено изъ журнала „Министерства путей сообщенія“ № 8 за 1889 г.).

Печатано съ разрѣшенія Завѣдывающаго изданіемъ и редактора журнала  
Министерства путей сообщенія.

Типографія Министерства путей сообщенія (А. Бенке), Фонтанка 99.