

К93

Институтъ Инженеровъ путей сообщенія Императора АЛЕКСАНДРА I.

Q, VI, 41.

о сопротивлении

естественныхъ оснований.

ПУБЛИЧНОЕ ЧТЕНИЕ

Инженера В. И. КУРДЮМОВА,

Учебная библиотека института инженеровъ
путей сообщенія Императора А I.

по инвентарю

№

3076

шкафъ

полка

№

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

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

1889.

1991

К93

Институтъ Инженеровъ путей сообщенія Императора АЛЕКСАНДРА I.

Абонементъ
технической
литературы
Дата 2007

о сопротивлении естественныхъ оснований.

ПУБЛИЧНОЕ ЧТЕНИЕ

Инженера В. И. КУРДЮМОВА,

состоявшееся 7 Ноября 1888 года въ Конференц-залѣ Института.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

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

1975

О СОПРОТИВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНІЙ.

(Съ 23 политипажами, помѣщеными въ текстѣ).

Публичное чтеніе инженера В. И. Курдюмова, состоявшееся 7 ноября 1888 г. въ конференц-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 первого 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, названаго 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, по, 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 запла дѣятельность.

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 цифры, 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 отдельныхъ 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. Вмѣсто дорогихъ чугунныхъ рельсовъ 30-хъ годовъ, мы имѣемъ теперь дешевые стальные, и недалеко уже то время, когда прежняя „чугунка“ станетъ называться „стальною дорогою“, когда название дорогъ желѣзными станетъ анахронизмомъ.

Постройка 100.000 паровозовъ, $2\frac{1}{2}$ миллионовъ 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 естественные преграды, а устраниять 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 инженерного 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 наблюдала на ученіи обѣ 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 коэффиціентъ 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 казенные, а ответственность 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 степенія науки.

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

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

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

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

Первою въ Европѣ книгою, трактующею специально 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 $1/8$ — можетъ быть названо только брошюрою. Общеизвѣстное сочиненіе Klasen'a: *Fundirungsmethoden* появилось въ 1879 г. Въ Америкѣ первая книга объ основаніяхъ Foundations and Foudation 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 специально 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 специально 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 отдельныя главы, а иногда и цѣлые отдѣлы, какъ наприм. у Hagen'a, Debauve'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 современаго 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 обстоятельствѣ, что тутъ за исключеніемъ случаевъ, когда найденъ слой сплошной скалы, намъ приходится имѣть дѣло съ землею, т. е. съ материаломъ крайне неопределеннымъ, 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 равновѣсии, обусловливаемомъ силою сцепленія, 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 сцепленія, ни тренія *); такое тѣло, будучи предоставлено самому себѣ, не можетъ имѣть какой либо определенной формы. Этими свойствами обусловливаются слѣдующія отличительныя черты трехъ рассматриваемыхъ типовъ тѣлъ.

Тѣла твердые, имѣя возможность держаться въ вертикальномъ откосѣ, не производятъ давленія на вертикальную стѣнку; деформаціи 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 пѣкоторой 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 производить на вертикальную стѣнку давленіе, хотя и пропорціональное вертикальному разстоянію данной точки до свободной поверхности сыпучаго тѣла, но зависящее еще и отъ коефиціента тренія. Растигивающимъ усиліемъ 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 разрушения горныхъ породъ, въ большинствѣ случаевъ смоченная водою, имѣть свойства среднія между свойствами тѣлъ твердыхъ, сыпучихъ и жидкіхъ. 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 также мокрая глина обладаетъ нѣкоторымъ сцепленіемъ, отличающимъ тѣла твердые, 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 обозрѣніи.

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

Изученію условій внутренняго равновѣсія тѣлъ сыпучихъ по-
ложено начало лишь въ послѣднее время, и теорія этого вопроса
находится еще въ зародыши.

Что касается тѣлъ землистыхъ, то изученіе законовъ внутрен-
няго 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 простые за-
коны 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 од-
ной стороны и сопротивленіемъ основанія — съ другой. Подъ сопро-
тивленіемъ основанія слѣдуетъ понимать *сопротивленіе матеріала
основанія* дѣйствію на него внѣшней нагрузки. Такое сопротив-
леніе должно имѣть нѣкоторый предѣлъ, за которымъ будетъ слѣ-
дователь *разрушеніе основанія*. Предѣльный, разрушающій основаніе
грузъ будетъ опредѣлять собою величину *временного сопротивленія
основанія*. Нѣкоторая часть такой нагрузки, соотвѣтствующая бе-
зопасной, опредѣлить собою величину *прочнаго сопротивленія осно-
ванія*. Отношеніе величины временнаго сопротивленія къ прочному
будетъ *коefficientомъ прочности основанія*.

Такимъ образомъ между теоріей основаній и строительною ме-
ханикою, другими словами — теоріею сопротивленія строительныхъ
матеріаловъ, должна быть полная аналогія или, вѣрнѣе сказать,
теорія основаній должна входить въ составъ строительной меха-
ники на тѣхъ же правахъ, на какихъ въ ней имѣютъ мѣсто теорія
устойчивости сводовъ, подпорныхъ стѣнокъ и др. т. п. отде-
ли; но при разработкѣ теоріи основаній необходимо обращать особен-
ное вниманіе на то обстоятельство, что условія, при которыхъ
работаетъ матеріалъ въ основаніи, и способъ его разрушенія со-
вершенно иные, чѣмъ въ томъ случаѣ, если тотъ же матеріалъ
работаетъ въ какой либо части сооруженія.

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

въ которомъ говорится: „давленіе на скалистое основаніе не должно быть свыше $1/8$ временнаго сопротивленія раздробленію“!

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

о теоретического характера, находитъ себѣ полное подтверждение 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 помошью стальныхъ штамповъ квадратнаго сѣченія размѣрами отъ 10 до 1 сантим. въ сторонѣ. При расположениіи нагрузки по всей поверхности образца, времененное 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 большее сопротивленіе, можетъ служить приватіе бозопасной нагрузки въ 1 пуд. на 1 кв. д. для песчанаго слоя, тогда какъ известно, 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 разновѣсія 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 обусловливается наиболѣе простыми законами, а именно законами равновѣсія тѣлъ плавающихъ, т. е. требованіемъ для каждой точки основанія равенства давленій—производимаго сооруженіемъ, и давленія гидростатического. Вследствіе легкоподвижности частицъ жидкаго тѣла, гидростатической законъ обусловливаетъ собою строго опредѣленное положеніе тѣла, въ нашемъ случаѣ — сооруженія, во время его равновѣсія; всякое измененіе въ величинѣ давленія должно вызывать измененіе этого

положенія, другими словами, сооруженія на основаніяхъ изъ грунтовъ жидкихъ не могутъ обладать запасомъ устойчивости. При такихъ условіяхъ, казалось бы, принципъ плавающаго тѣла не можетъ имѣть мѣста въ строительной практикѣ, однако Hagen указываетъ на одну постройку въ Лондонѣ, гдѣ этотъ принципъ былъ примѣненъ къ разсчету сооруженія. Во всякомъ случаѣ, принципъ плавающаго тѣла даетъ наименьшую величину сопротивленія основанія на самомъ слабомъ 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 материала въ основаніи въ значительной степени увеличиваются и безъ того большое сопротивленіе ихъ раздробленію. Однимъ словомъ, теорія основаній на совершенно твердыхъ грунтахъ, т. е. материалахъ съ большимъ временнымъ сопротивленіемъ раздробленію, не можетъ имѣть практическаго значенія.

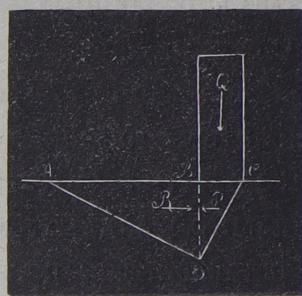
Такимъ образомъ, условія равновѣсія сооруженій, основанныхъ на грунтахъ сыпучихъ, въ виду сдѣланной мною характеристики землистыхъ тѣлъ, пріобрѣтаютъ наибольшій практическій интересъ.

Обращаясь къ обзору существующихъ теорій равновѣсія сыпучихъ тѣлъ, мы видимъ, что до сихъ поръ еще нельзя считать окончательно установленіемъ взгляды на основные вопросы равновѣсія этихъ тѣлъ. Къ числу такихъ основныхъ вопросовъ безспорно слѣдуетъ отнести, между прочимъ, вопросъ о величинѣ и направлении давленія, производимаго массою сыпучаго тѣла на поддерживающую его стѣнку; нормально ли это давленіе или наклонно къ поверхности стѣнки, каковъ профиль 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 представление о той формѣ, въ которой можетъ выражаться разрушение 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 определенія условій равновѣсія песку подъ 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 наибольшею призмою обрушенія BCD , подъ 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 подъ сооруженія является процессомъ болѣе сложнымъ, чѣмъ сползаніе земли въ сторону подающейся подпорной стѣнки. Поэтому, задаваясь цѣлью выяснить вопросъ о временномъ сопротивленіи основаній на сыпучемъ грунте 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 современныя теоріи подпорныхъ стѣнокъ можно подраздѣлить на двѣ категоріи.

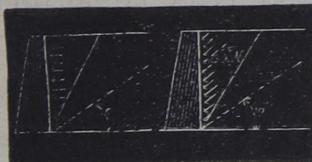
Къ первой категоріи относятся теоріи, основанныя на принципѣ призмъ наибольшаго давленія, указанномъ еще въ 1773 г. Coulomb'омъ, и разработанныя въ трудахъ Prony, Francais, Poncelet, Moseley, а въ послѣднее время Scheffler'a, Culmann'a, Rebhann'a и др. Согласно этимъ теоріямъ, дѣйствіе сыпучаго тѣла на подпорную стѣнку выражается въ сползаніи нѣкоторой треугольной призмы, производящей при этомъ известное давленіе. Величина сползающей призмы, называемой призмою обрушенія, опредѣляется изъ условія, что она производить 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), Francais (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 φ , къ нормали N къ задней поверхности подпорной стѣнки (фиг. 3).

Одновременное и, такъ сказать, равноправное существование 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 противорѣчности 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 нормальною 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 возврѣній, раздѣлявшихся 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'y, а особенно въ 1856 г. Rankine'y удалось основать и частью разработать вполнѣ рациональную общую теорію давленія въ сыпучихъ тѣлахъ, которая въ настоящее время, благодаря трудамъ Levy, Saint-Venant'a, Considère'a, Winkler'a, Mohr'a, Weihrauch'a и др. значительно разработана и ими же прилагается къ разсчету 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 давленијамъ въ жидкостяхъ, неодинаковы по разнымъ направленіямъ и при томъ дѣйствуютъ подъ разными углами къ поверхности элемента. Законъ измѣненія давлений, въ зависимости отъ рассматриваемыхъ направленій ихъ, можетъ быть выраженъ слѣдующимъ образомъ: если изъ центра данного элемента провести всевозможныя направленія давлений и на нихъ отложить величины соотвѣтственныхъ давлений, то геометрическимъ мѣстомъ концовъ отрѣзковъ, изображающихъ эти давления, будетъ эллипсоидъ съ 3-мя вообще неравными осями. Если ограничиться разсмотрѣніемъ давлений, дѣйствующихъ въ какой либо плоскости, то законъ измѣненія давлений выразится эллипсомъ.

Если рассматривать давления въ вертикальной плоскости, то отношеніе между полуосами эллипса или наименьшимъ и наибольшимъ давлениемъ будетъ: $\frac{b}{a} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right)$, 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 профилю 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, имѣеть большую ось, направленную отвѣсно и равную вертикальному давлению на этой глубинѣ, т. е. δh ; малая же его ось, горизонтальная и равная $\delta h \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$, выражаетъ величину, такъ называемаго, дѣйствительного или активнаго горизонтальнаго давления (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 давления на вертикальную площадку наступила бы въ тотъ моментъ, когда эллипсъ напряженій повернулся бы на 90° , при чемъ его меньшая ось приняла бы вертикальное направлениe, и сдѣлалась бы равной δh , т. е. прежней большой оси естественнаго эллипса; въ такомъ случаѣ большая ось повернутаго эллипса расположилась бы горизонтально по направлению надавливанія и

получила бы величину $\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, несшую название наибольшего пассивного горизонтального давления или сопротивления (Passiver Druck). При томъ что описанномъ положеніи эллипса на-
прежній, отношение горизонтального сжатія элемента къ уравно-
вѣщающему его вертикальному, т. е. въсю сверху лежащимъ слоевъ
песка, очевидно, есть maximum, тогда какъ при естественномъ по-
ложеніи эллипса это же отношеніе есть minimum *), т. е. элементъ
испытываетъ наибольшее вертикальное сжатіе.

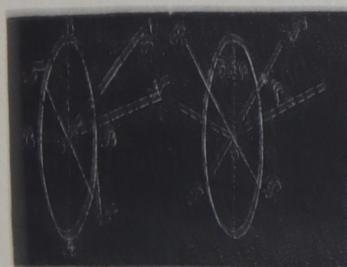
Для нахожденія положенія элементарныхъ площадокъ, на кото-
рыя дѣйствуютъ давленія данныхъ направлений, служить слѣдующее
построеніе (фиг. 4).

Пусть CO буде данное направление давленія, абсолютная
величина которого равна EO , и требуется определить направление
площадки, на которую оно дѣйствуетъ. Для этого изъ A проводимъ
линию 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 направление площадки.

Изъ такого способа построенія направлений элементарныхъ
площадокъ, испытывающихъ данные напряженія, видно, что имѣется
всего два направления площадокъ, на которыхъ давленіе дѣйствуетъ
нормально. Положеніе этихъ площадокъ совпадаетъ съ осями
эллипса.

Давленіе на площадки всѣхъ другихъ направлений составляетъ
съ нормалями иъ пимъ большие или меньшие углы $\beta \angle \varphi$. Наи-
большій уголъ отклоненія направлений давленія отъ нормали равенъ
углу тренія или углу естественного откоса φ .

Фиг. 4. Фиг. 5.



Изъ чертежа видно, что направление такихъ давленій и пло-
щадокъ взаимны, т. е. направление давленія P_0 на площадку P_1P_1
совпадаетъ съ направлениемъ площадки PP , на которую дѣй-
ствуетъ давленіе P_1O . Эти два направления называются *плоско-*

*) Всѣдѣствіе 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 распределенія напряженій въ разныхъ точкахъ сыпучаго тѣла только въ тѣхъ случаяхъ, когда послѣднее ограничено сверху плоскостью. На фиг. 6 и 7 показано распределеніе 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 распределенія напряженій въ разныхъ точкахъ сыпучаго тѣла; тѣмъ не менѣе, на основаніи только что приведенного, можно заключить, что мѣстныя поднятія профиля верхней поверхности сыпучаго тѣла будутъ вызывать измѣненія въ напряженіяхъ, которые и выражаются въ наклоненіи большихъ осей эллипса въ сторону увеличенія нагрузокъ.

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 разсчету подпорныхъ стѣнокъ, и только Rankine и профессоръ Паукертъ пытались изслѣдовывать вопросъ о возможной нагрузкѣ основаній.

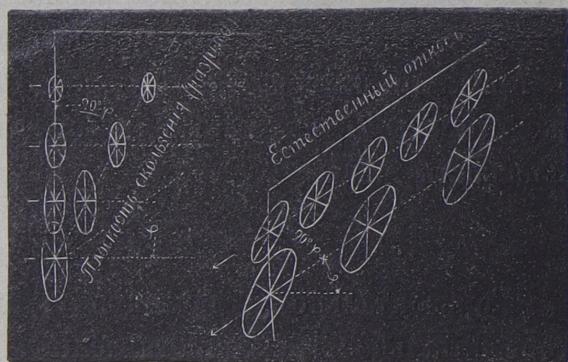
Исходя изъ совершенно различныхъ точекъ зреенія, а именно: Rankine изъ новѣйшей теоріи равновѣсія сыпучихъ тѣлъ, а профессоръ Паукертъ изъ теоріи призмъ обрушенія и сопротивленія, они пришли къ тождественнымъ окончательнымъ выводамъ, выражавшимъ отношеніе между глубиной заложенія основанія и величиною предельной нагрузки на него, выраженною въ высотѣ столба того же грунта.

Формула Rankine'a 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

Фиг. 6.

Фиг. 7.



высотою H , имѣющаго ту же площадь подошвы и одинаковый съ нимъ вѣсъ P . Разсмотримъ два смежные элемента m_1 и m_2 песчанаго 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 δ плотность песка, а потому соотвѣтствующій элементу m_1 эллипсъ напряженій имѣть большую ось вертикальную и равную 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, имѣть своимъ предѣломъ, какъ было указано выше, величину пассивнаго горизонтального 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.

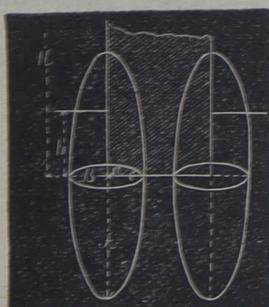
Изъ этого уравненія слѣдуетъ:

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

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

Пусть $CDET$ (фиг. 9) будетъ призма песку высотою 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 давление 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 давление P на нѣкоторую плоскость ac . Это давление P стремится сдвинуть по откосу dc призму сопротивленія acd , нагруженную слоемъ песку $adef$, толщиною равною глубинѣ h заложенія основанія. Въ действительности же усиліе, необходимое для сдвиженія этой призмы acd , есть нѣкоторое R .

Принимая ac за постоянную, проф. Паукеръ опредѣляетъ величину угла α подъ условіемъ, чтобы давление P было наибольшее, совершенно аналогично тому, какъ опредѣляется призма наибольшаго давленія на подпорную стѣнку. Далѣе, проф. Паукеръ опредѣляетъ величину угла β 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 $fc d_1e_1$ —окончательно получаетъ свою формулу:

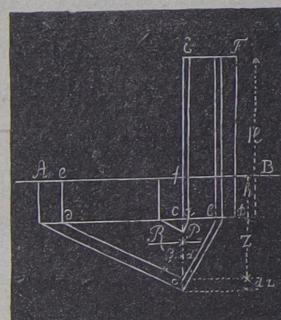
$$h \geq Htg^4 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right),$$

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

Этю формулой обыкновенно и руководствуются при опредѣленіи глубины заложенія основаній, преимущественно мостовыхъ опоръ, при различныхъ грунтахъ, не придавая особенного 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-

Фиг. 9.



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

Далѣе инженеръ Янковскій указываетъ на то, что, принимая треугольную призму сопротивленія cAf , дифференцированіе нера-венства:

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

не даетъ условія равновѣсія безконечно малыхъ полосокъ.

Въ концѣ концовъ инженеръ Янковскій доказываетъ, что въ не- выгоднѣйшемъ случаѣ должно быть сохранено равновѣсіе не между безконечно малыми полосками, а между конечными призмами обру-шенія и сопротивленія, опредѣливъ которыя, инженеръ Янковскій по- лучаетъ свою формулу:

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

отличающуюся отъ формулы Rankine'a и Паукера коэффиціентомъ $1/2$.

Цитированная мною статья инженера Янковскаго вызвала возраженіе со стороны профессора Николаи, который, не входя въ разборъ вопроса о томъ, каковъ долженъ быть видъ призмы сопро- тивленія — трапециoidalный или треугольный, оспариваетъ по пре- имуществу вторую часть статьи Янковскаго, касающуюся непри- мѣнимости 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 осно- ваній уменьшить вдвое нельзѧ считать доказаннымъ“.

Съ своей стороны, позволю себѣ указать на слѣдующіе недо- статки формулы Янковскаго: 1) при предѣльной величинѣ $\varphi = 0$, т. е. при переходѣ къ жидкому тѣлу, она приводить къ абсурду $h = \frac{H}{2}$, тогда какъ законъ плавающаго тѣла выражается равен- ствомъ $h = H$; 2) при $h = 0$, т. е. при возведеніи сооруженія на поверхности песчанаго слоя, $H = 0$, другими словами песокъ на поверхности не можетъ выдерживать никакой нагрузки, что, очевидно, противорѣчить дѣйствительности. Такое противорѣчіе, свойственное, впрочемъ, и формулѣ Rankine'a 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 выпирающейся при этихъ опытахъ массы песка съ исчисленными по формулѣ, Янковскій долженъ былъ прийти къ заключенію, что профиль призмы сопротивленія имѣеть дѣйствительно треугольный видъ, на что онъ и указываетъ въ своемъ отвѣтѣ профессору Николаи, помѣщенному 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 решать многіе вопросы строительной техники, не имѣя для этого достаточныхъ, вполнѣ определенныхъ, научныхъ указаний, а руководствуясь лишь собственнымъ опытомъ, примѣрами другихъ подобныхъ сооруженій или просто ходящею рутиной, и поневолѣ мириться съ такимъ печальнымъ положеніемъ той или другой отрасли инженерной науки, то преподавателю подобного предмета мириться съ нимъ крайне тяжело, такъ какъ молодой, пытливый умъ учащагося требуетъ рационального, логического 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.

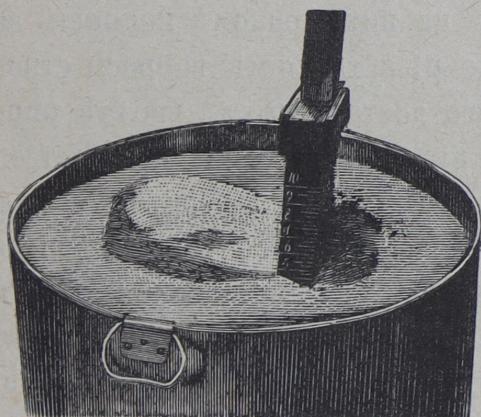
Въ виду сдѣланной мною ранѣе характеристики состоянія науки объ основаніяхъ, вполнѣ понятно, что вопросы теоріи меня интересовали по преимуществу; а потому, слѣдя за литературою, я не могъ не обратить особеннаго вниманія на оригинальныя работы инженера Янковскаго, а именно на его статьи: „О сопротивленіи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

Получивъ разрѣшеніе воспользоваться съ этою цѣлью помѣщениемъ 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 которого прикрѣплялся поддонъ для гирь, а къ нижнему могли прикрѣпляться разной величины параллелопипеды, игравшіе роль фундаментовъ. Для помѣщенія песку 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 свѣженасыпанный песокъ не улегся и не уплотнился до своего естественнаго состоянія. Послѣ нѣсколькихъ дней опытовъ подобныя осадки прекратились, и затѣмъ каждая осадка фундамента сопровождалась одновременнымъ, ясно выражавшимся выпучиваніемъ песку, вдоль одной изъ длинныхъ сторонъ фундамента, какъ показано на рисункѣ

Фиг. 10.



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

При выпучиваніи песку 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 обусловливалось совершенно случайными причинами, каковы: несимметричность расположения нагрузки по поддону, недостаточная точность вертикальной установки фундамента и т. п. Съ цѣллю полученія большей выпирающейся 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,

который не могъ быть превышенъ, и при которомъ выпучиваніе прекращалось. При этомъ грунтъ, находившійся въ фундаментѣ, становился совершенно твердымъ, и фундаментъ, вынутъ изъ грунта, не имѣлъ въ немъ никакихъ следовъ выпучиванія.

при которомъ фундаментъ давалъ осадку, опредѣлялись размѣры призмы выпучиванія, величина осадки и отклоненія фундамента отъ вертикального направленія въ сторону. Песокъ, служившій для опытовъ, былъ предварительно изслѣдованъ въ отношеніи вѣса кубической единицы и коэффиціента тренія по углу естественного 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 выпиравшейся призмы, то она довольно близко подходила къ той, которая получается въ сдѣланномъ Янковскимъ предположеніи треугольного профиля призмы сопротивленія. Подобные результаты сравненія количественныхъ данныхъ опыта съ формулой Rankine'a и Паукера вполнѣ объяснялись, во первыхъ, тѣмъ, что размѣры выпертої призмы въ ширину указывали на ея треугольную, а не трапециoidalную формулу, а во вторыхъ, и главнымъ образомъ, тѣмъ, что формула профессора Паукера выведена для равновѣсія безконечно тонкихъ полосокъ, на опытъ же мы имѣли дѣло съ фундаментами, хотя и небольшихъ, но все же конечныхъ размѣровъ.

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

Такимъ образомъ первые же опыты показали, что обѣ формулы не решаютъ 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 явлений, 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 выпиранія 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:

$$H = 2\Delta h \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

H — высота столба песка, соотвѣтствующая предѣльной нагрузкѣ.

b — ширина фундамента.

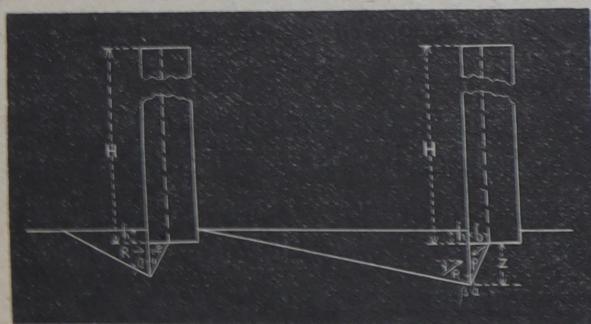
h — глубина заложенія.

φ — 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 выпиранія основанія.

Видъ формулы 2) даетъ величину предѣльной нагрузки при томъ условіи, что сооруженіе раскалывается на вертикальные слои

Фиг. 11.



не можетъ, а потому выдавливаніе должно происходить изъ подъ всего сооруженія.

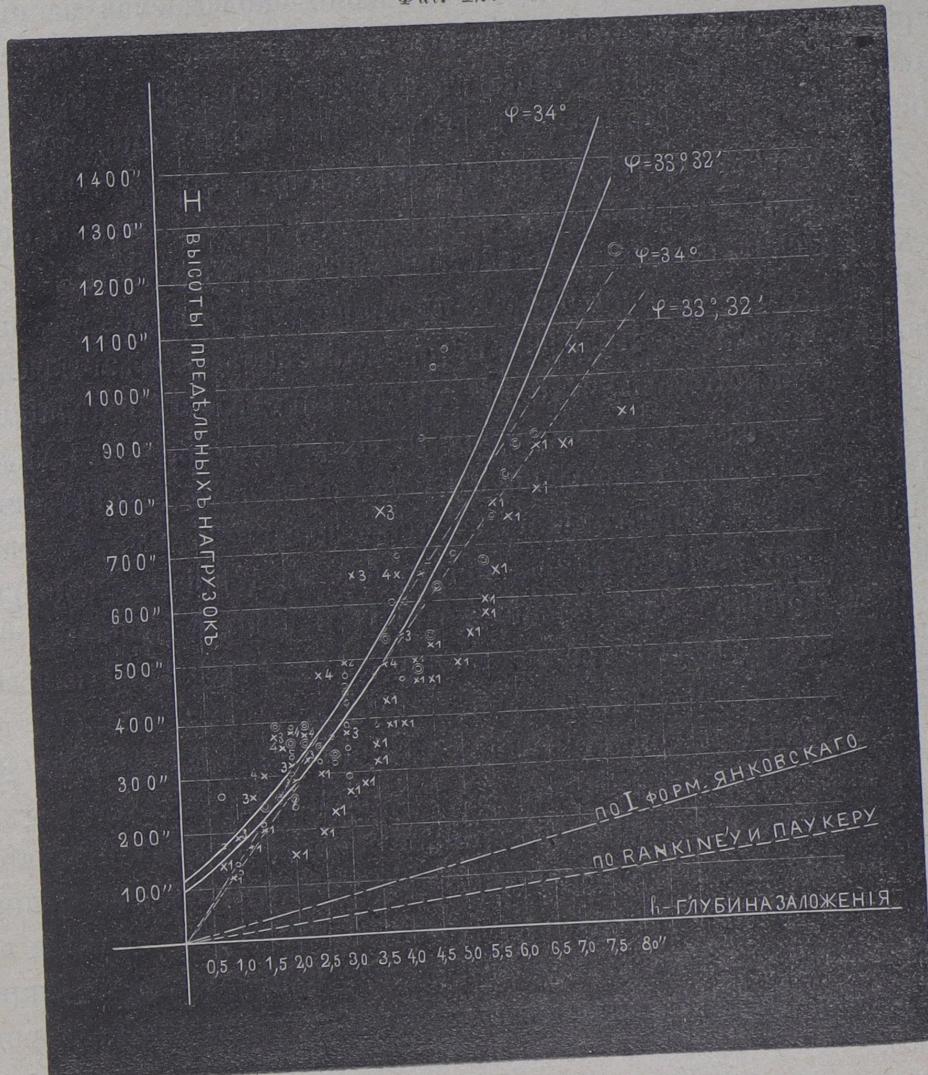
Разница между первоначальною формулой Янковскаго и двумя вышеприведенными видами второй формулы наглядно выясняется изъ фигуры 11.

Результаты наблюденій опытныхъ предѣльныхъ нагрузокъ и

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

величины ихъ, исчисленыя 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, предоставлю 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 вполнѣ 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 вѣсъ кубич. единицы и въ коэффиціентѣ тренія, тогда какъ для тѣль твердыхъ временное сопротивленіе можно опредѣлять только непосредственнымъ испытаниемъ.

Однако сложить орудіе было бы слишкомъ рано: правда, вторая формула Янковского даетъ весьма вѣрную величину временнаго сопротивленія, но она далеко не выражаетъ дѣйствительной картины процесса разрушенія сыпучаго тѣла. Его схема взаимодѣйствія призмъ 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 Янковского соответствовала сущности процесса выпиранія.

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

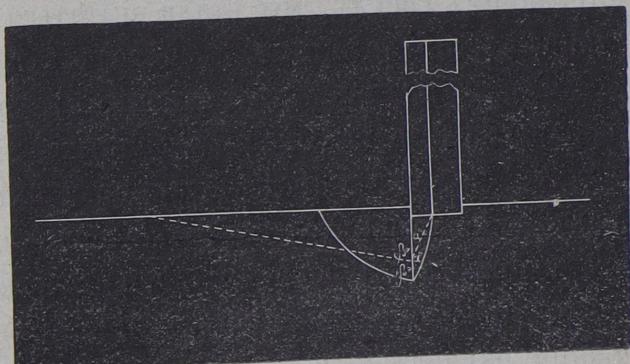
Когда первые наши опыты, имѣвшіе цѣлью провѣрить первоначальную формулу Янковского, привели насъ къ заключенію о полной ея несостоительности въ смыслѣ опредѣленія величины предѣльныхъ нагрузокъ или временнаго сопротивленія песка выдавливанію, не смотря на довольно близкое совпаденіе дѣйствительныхъ ширина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

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

Криволинейность поверхности обрушенія проф. Mohr элемен-тарно 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 силь, 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 ширинъ призмъ 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 α и β какъ въ прямолинейныхъ, такъ и въ криволинейныхъ призмахъ одинаковы, показываетъ, что при криволинейномъ очертаніи призмъ, ширина призмы сопротивленія должна быть меньше. Сопоставляя съ одной стороны меньшую ширину призмы сопротивленія, которая находитъ себѣ объясненіе въ допущеніи криволинейности призмъ, а съ другой стороны, констатированную уже здѣсь, сходимость опытныхъ нагрузокъ съ исчисленными по второй формулѣ Янковскаго, выведенной въ предположеніи прямолинейности очертанія объемъ призмъ, мы должны были прийти къ заключенію, что въ дѣйствительности призмы обрушенія и сопротивленія криволинейны, но сопротивленіе этихъ призмъ выписанію должно быть равно сопротивленію призмъ прямолинейныхъ, принятыхъ въ теоріи Янковскаго. Другими словами, прямолинейны призмы Янковскаго, въ смыслѣ сопротивленія, эквивалентны дѣйствительнымъ призмамъ съ криволинейнымъ очертаніемъ.

Фиг. 13.



Возможность такой эквивалентности прямолинейныхъ и криволинейныхъ призмъ можетъ быть объяснена путемъ слѣдующаго соображенія: криволинейная призма имѣеть меньшую площадь съченія, а слѣдовательно и менѣй 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 выиранію въ противоположныхъ смыслахъ, могутъ уравновѣшиваться.

Такимъ образомъ теорія Янковскаго, хотя и основанная на слишкомъ элементарномъ представлениі о процессѣ выиранія, 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, избранныя Янковскимъ призмы представляютъ 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 выиранія, и найдя фактическое подтвержденіе этого предположенія въ наблюденіи процесса выиранія песка въ стекляномъ сосудѣ, мы стали пытаться опредѣлить истинный видъ кривыхъ, по которымъ происходит выираніе 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 настояще 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 выиранія 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 выяснить 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.

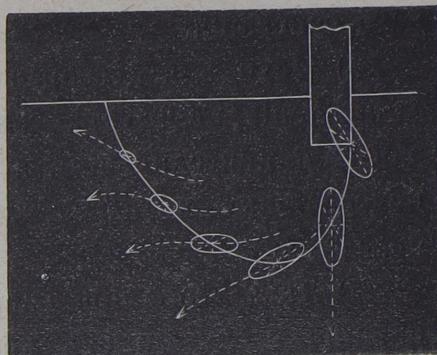
Послѣ цѣлаго ряда гипотезъ мы пришли къ слѣдующимъ выводамъ:

1) Кривая скользенія призмы выиранія должна быть рассматриваема, какъ геометрическое мѣсто плоскостей скользенія эллипсовъ

напряженій въ различныхъ точкахъ сыпучаго тѣла, причемъ отклоненіе этихъ эллисовъ отъ ихъ естественнаго положенія во время покоя вызвано мѣстною нагрузкою сыпучаго тѣла.

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

Фиг. 14.



Рассмотримъ 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 соотвѣтственныхъ элементовъ его будутъ вертикальны. Отсюда слѣдуетъ, что въ эллипсахъ напряженій крайнихъ элементовъ этого слоя одна изъ плоскостей скользенія должна быть вертикальна, а вмѣстѣ съ этимъ большая ось этого эллипса, показывающая направленіе наиболѣшаго 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 напряженій и съ противоположнаго края фундамента. Что касается эллипса напряженій въ центральной точкѣ этого слоя, то, очевидно, большая ось его должна быть вертикальна. Подобное же вертикальное положеніе большихъ осей эллипсовъ напряженій 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 напряженій 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 напряженій было различно: у Gobin'a — нормальное, у Winkler'a — наклонное.

уменьшения абсолютной их величины, все более и более отклоняются от своего естественного положения.

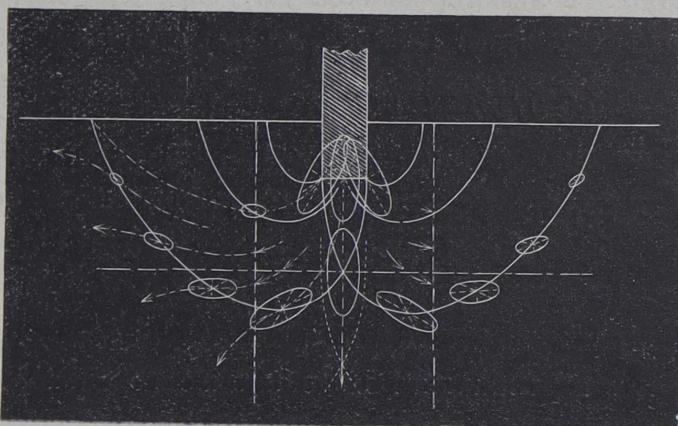
3) По положению больших осей этих эллипсов можно судить о направлениях наибольших давлений в разных точках сыпучего основания.

4) Исходя из соображений о постепенности вращения эллипсов напряжений, следует заключить, что направления наибольших давлений криволинейны, а сфера действия давления вообще неограничена как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

5) Так как при равномерном вертикальном давлении, выпирание песку может происходить безразлично то в ту, то в другую сторону, то описанная система эллипсов, образующих кривую скользения, должна иметь место и по другую сторону фундамента, причем пересечение обеих кривых произойдет, очевидно, по сопряженным плоскостям скользения эллипса, имеющего большую ось вертикально.

На фиг. 15 показаны две системы кривых давлений и скользений.

Фиг. 15.



Очевидно сопротивление скользению по той или другой кривой, при равных прочих условиях, должно быть одинаково; а потому, если песок из под фундамента выпирается то в одну, то в другую сторону, то это следует приписать случайным причинам, в роде невертикальности установки фундамента и т. п.

6) В случае, если бы фундамент был поставлен в условия совершенно одинаковые для возможности скользения как в ту, так и в другую сторону, то вполне естественным является вопрос, — возможно ли одновременное выпирание песка в обе стороны и не представляется ли такому двустороннему выпиранию

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

Разсуждая теоретически, двустороннее выпирание можно рассматривать, какъ результатъ поперемѣнныхъ одностороннихъ выпираний; а потому сопротивление двустороннему выпиранию не должно бы превышать величины каждого въ отдельности.

Что касается разности въ величинѣ приводимыхъ въ движение массъ песка при двустороннемъ и одностороннемъ выпиранияхъ, то она можетъ уравновѣшиваться разностью высотъ выпирания въ томъ и другомъ случаѣ.

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

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

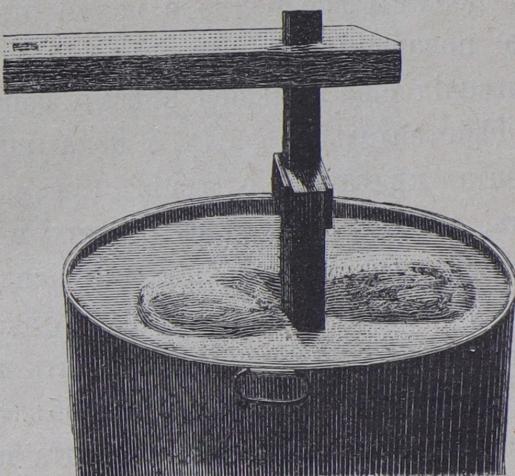
Возможность двусторонняго выпирания не замедлила обнаружиться, въ чѣмъ и можно убѣдиться по этой фигурѣ (фиг. 16).

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 соотвѣтствуютъ нагрузкамъ при одностороннемъ, а двойные — при двустороннемъ выпирании. Какъ видите, между величинами времененнаго 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 выпертої 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 фигуру 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 решеніе 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 выпиранию должно возрастать вслѣдствіе того, что, для возможности самаго 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.

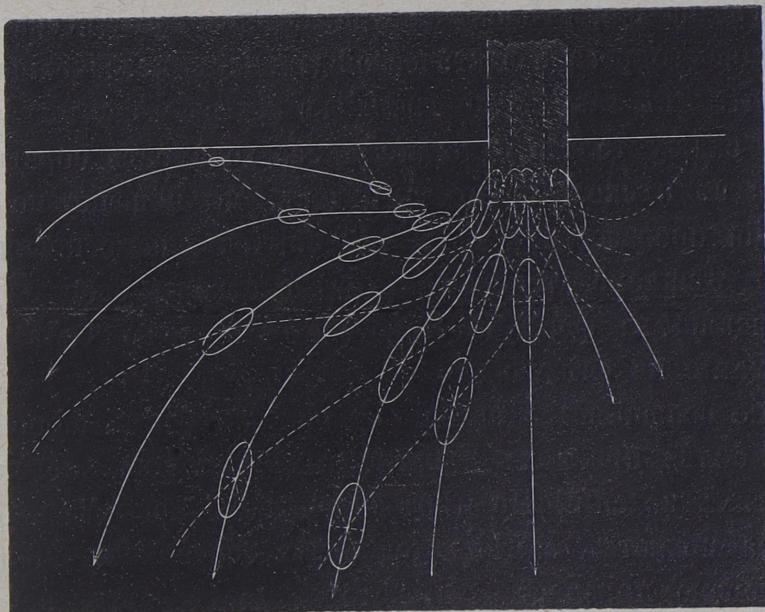
Дѣйствительно, фиг. 15 показываетъ, что съ углубленіемъ фундамента кривая скользенія призмы сопротивленія перемѣщается внизъ, а вмѣстѣ съ тѣмъ ростетъ и самая призма.

8) Съ увеличеніемъ ширины фундамента (при условіи одинаковой нагрузки на одну кв. единицу и при той же глубинѣ) сопротивленіе выпиранию 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 выпиранию соотвѣтствуетъ меньшая ширина въ профиляхъ выпи-
раемой призмы.

9) Въ общемъ случаѣ выпираніе возможно при томъ условіи, что слой сыпучаго тѣла имѣеть неопределенные размѣры какъ по вертикальному, такъ и по горизонтальному направлению. 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

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

Фиг. 17.



10) Понятіе объ углѣ распространенія давленія въ пескѣ какъ о величинѣ постоянной, опредѣляющейся въ 40° — 50° , 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 скользенія.

Мм. Гг. Я приготовился выслушать упреки въ томъ, что решаясь дѣлать такие 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 подобные же опыты съ цѣлью определенія сопротивленія насыпного трамбованного песка дѣйствію вертикальныхъ усилій. Испытываемый песокъ помѣщался въ ящикѣ, 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, выпиранія песка не происходило.

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

Не касаясь вопроса о фактической для настѣ невозможности произвести опыты въ такихъ же грандиозныхъ 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 решаемся 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 чѣмъ господствующею признается та, которая даетъ объясненіе наиболѣшему количеству фактовъ. Гипотезы, дающія возможность не только объяснить, но и предвѣтывать нѣкоторыя явленія, становятся уже въ разрядѣ 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, всѣдѣло господствовавшихъ въ физикѣ до развитія ученія о волнобразномъ 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 безконечно малыхъ элементовъ сыпучаго тѣла.

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

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

Гипотеза Rankine'a при условіи введенія въ нее поправки, а именно допущенія постепенности вращенія эллипса напряженій, на необходимость чего я имѣлъ уже честь указывать, безспорно должна привести къ наиболѣе вѣрному и полному решенію вопроса, но аналитическія трудности такого пути на столько велики, что въ настоящее время, въ аналогическомъ вопросѣ — въ подпорныхъ стѣнкахъ — отъ него принуждены были отказаться такие 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 φ , h и b . Для одного и того же грунта φ 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

$$H = A + B h + C h^2,$$

гдѣ коэффиціенты A , B и C — постоянныя. Кривая, изображаемая

послѣднимъ 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).

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

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

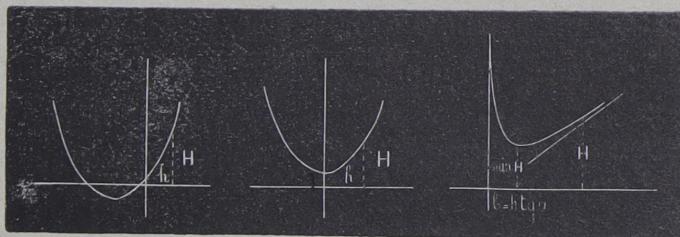
Это тоже парабола, расположенная относительно координатныхъ осей такъ, какъ показано на фигурѣ 19.

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 $\frac{b}{\operatorname{tg} \alpha}$:

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

или

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

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

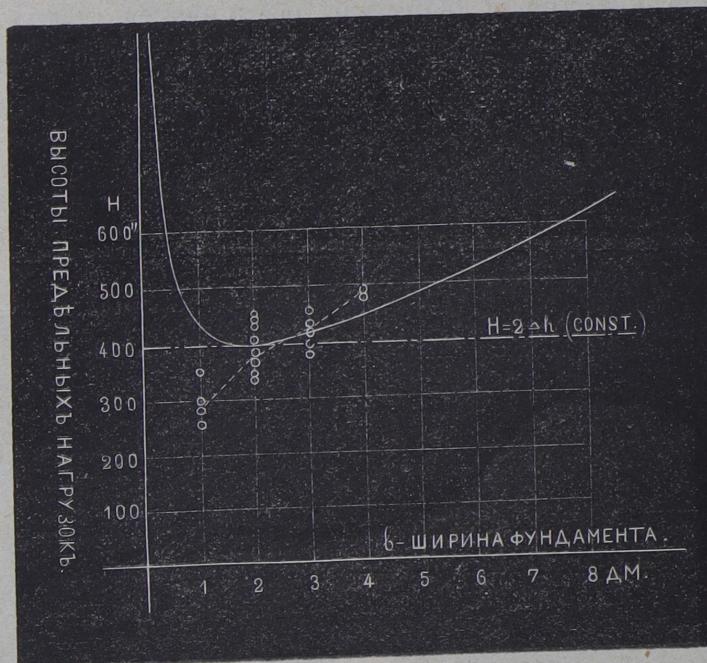
Существование одной изъ вѣтвей этой гиперболы обнаружено нашими опытами надъ фундаментами шириной въ 2, 3 и 4 дюйма, о чмъ можно судить по графику (фиг. 21). Что касается другой вѣтви, дающей возрастаніе предѣльныхъ нагрузокъ съ уменьшениемъ ширины фундамента ниже невыгоднѣйшей ($b = h \operatorname{tg} \alpha$), то обнаружить таковую не удалось, вѣроятно, вслѣдствіе того, что у насъ фундаментъ єже невыгоднѣйшаго — имѣлъ ширину въ 1" и дѣйствовалъ, можетъ быть, какъ клипъ, 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:

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

Фиг. 21.



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

Такимъ образомъ, имѣются нѣкоторыя 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 песчанаго слоя. Существованіе такого сопротивленія есть фактъ общеизвѣстный.

Къ слабымъ сторонамъ формулы Янковскаго слѣдуетъ отнести:

1) Наблюдаемая ширина призмы выпиранія не совпадаетъ съ теоретическою; впрочемъ, обстоятельство это не имѣеть 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 плавающаго тѣла ($H = h$); дѣйствительно, при $\Delta = 1$, первая формула обращается въ

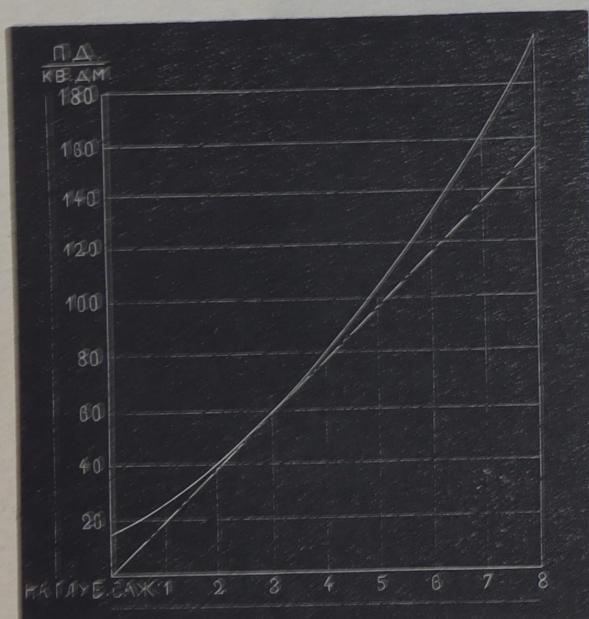
$$H = h + \frac{h^2}{2z},$$

а вторая въ

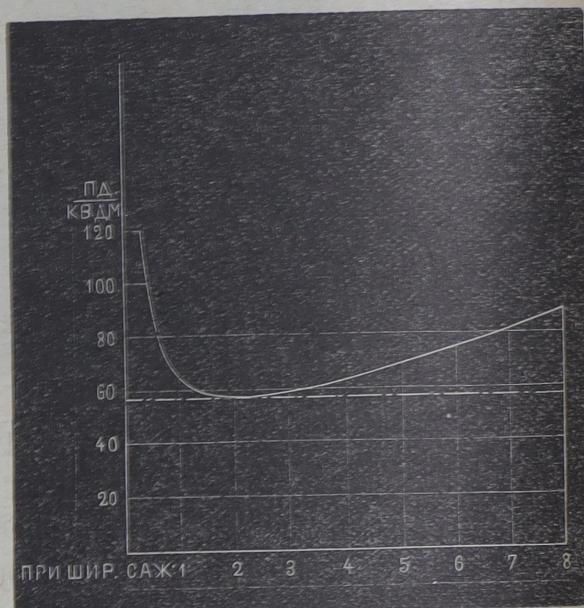
$$H = 2h.$$

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

Фиг. 22.



Фиг. 23



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

Для нагляднаго представлѣнія 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 вражденіе на статью Янковскаго: „положеніе автора, о возможности

опредѣляемую по Паукеру глубину заложенія основаній уменьшать вдвое, нельзя считать доказаннымъ".

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

Въ настоящее время имѣется вторая формула Янковскаго, по которой предѣльныя нагрузки оказываются приблизительно въ 4 раза большими исчислявшихся по первой формулѣ. Непосредственныя опыты подтверждаютъ правильность новой формулы, о чѣмъ 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 заложенія фундаментовъ уменьшить въ восемь разъ?

Мнѣ кажется, что лучшій 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 зренія 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 сооруженій. 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 разматриваемомъ вопросѣ наибольшее практическое значеніе, занимаютъ среднее мѣсто между этими тремя типами.

Далѣе я старался выяснить, 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 тѣль жидкихъ, твердыхъ и сыпучихъ.

Законы равновѣсія жидкостей изучены давно.

Изученіе законовъ внутренняго равновѣсія тѣль 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 заложенія основаній не можетъ опредѣляться изъ одного только условія равенства между давленіемъ сооруженія и прочнымъ сопротивленіемъ основанія; на правильное решеніе 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 решеніе вопроса о глубинѣ заложенія основаній. Очевидно, отсюда далеко еще до установленія строгой пропорціональности между величинами временнаго сопротивленія основаній и необходимою, въ каждомъ частномъ случаѣ, глубиною заложенія фундаментовъ.

При всемъ этомъ не слѣдуетъ упускать изъ виду того обстоятельства, что формула Янковскаго выведена только для сухаго песка, а потому примѣнить ее при разсчетѣ глубины заложенія основаній на обыкновенныхъ землистыхъ грунтахъ, подобно тому какъ это дѣлаютъ теперь, пользуясь формулой 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 некоторой степени приближаются къ свойствамъ тѣлъ сыпучихъ, формула Янковскаго и теперь уже можетъ быть полезна своими указаніями на то вліяніе, какое имѣеть глубина заложенія 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 заложенія, 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 обеспечить 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 техникѣ основаній, позволю себѣ сослаться на статью строителя элеваторовъ въ Чикаго, архитектора Baumana, которая вошла въ составъ упомянутаго уже мною сочиненія Powell'a объ основаніяхъ и фундаментахъ.

Оканчивая на этомъ мое сообщеніе, позволю себѣ, Мм. Гг., высказать пожеланіе, чтобы теорія основаній, возникающая на изящной по своей простотѣ гипотезѣ о взаимодѣйствіи призмъ обрушенія и сопротивленія, при дальнѣйшемъ своемъ развитіи на началахъ новѣйшихъ воззрѣній о равновѣсіи безконечно 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.