

27.13
K 93
Королеву великому
учителю обрвожа
20 Jul
1891.
В. Курдюмова

КЪ ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНІИ ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНІИ.

Фотографическій способъ изслѣдованія процесса разрушенія песчаного
слоя подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки.

ПУБЛИЧНАЯ ЛЕКЦІЯ

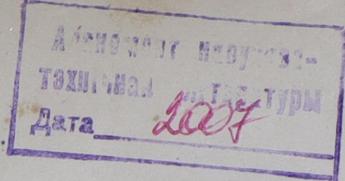
Инж. В. И. Курдюмова.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ

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

1891.

1991



624

К9

КЪ ВОПРОСУ
О
СОПРОТИВЛЕНІИ
ЕСТЕСТВЕННЫХЪ ОСНОВАНИЙ.

Фотографическій способъ изслѣдованія процесса разрушенія песчаного
слоя подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки.

ПУБЛИЧНАЯ ЛЕКЦІЯ

Инж. В. И. Курдюмова.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ

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

1891.

БИБЛИОТЕКА

SUR LA RÉSISTANCE
DES
SOLS NATURELS
À LA PRESSION VERTICALE.

par **V. J. Kourdumoff,**

Professeur à l'Institut des Ingénieurs des Voies de Communication
de St. Pétersbourg.



ST. PÉTERSBOURG.
Imprimerie **J. Ehrlich**, Sadovaïa, N° 9.
1891.

S O M M A I R E.

Objet de la théorie des fondations situées sur le sol naturel.-Différentes conditions du travail des matériaux dans le sol de la fondation et dans les diverses parties du bâtiment. — Expériences de M. Durand-Claye. — Trois espèces principales des terrains: solides, sablonneux et fluides.—L'étude des conditions de l'équilibre des bâtiments construits sur les terrains sablonneux comporte le plus grand intérêt pratique. La réaction entre les prismes de poussée et de butée (fig. 1) et la formule qui en est déduite par M. le professeur Pauker. — Correction introduite par M. Jankowski dans la théorie de M. Pauker et la nouvelle formule qui en résulte. — Expériences de résistance du sol sablonneux aux charges locales (fig. 2 et 3). — Coïncidence des résultats expérimentaux avec les valeurs calculées d'après la formule de M. Jankowski. — Diagramme montrant les résultats des expériences (fig. 5). La théorie des prismes rectilignes de poussée et de butée n'est pas justifiée par l'expérience. — Formule de Rankine, basé sur sa théorie d'équilibre des corps pulvérulents (fig. 11).—Les ellipses des tensions dans l'intérieur du corps pulvérulent fatigué par une charge locale changent en passant d'un point à l'autre leur grandeur et leur inclinaisons progressivement et non pas tout à coup. Les prismes de poussée et de butée doivent être limités par des surfaces courbes. — Profil probable de la surface de glissement des prismes. — Possibilité du refoulement du sable de deux côtés de la charge locale (fig. 13 und 14). La définition du vrai profil de la surface de glissement par un procédé immédiat qui consiste à photographier le mouvement produit pendant la descente de la charge dans la couche sablonneuse, comprise dans une boîte en verre. La coïncidence de la forme théorique probable des courbes de glissement avec la vraie forme de ces courbes, obtenue par le procédé photographique (fig. 14 et phototypie 1 et 2).—Analyse expérimentale des courbes de glissement (phototypies 3—7). — Avantages de l'application de la méthode photographique à cette analyse.

Къ вопросу о сопротивленіи естественныхъ основаній.

(Фотографическій способъ изслѣдованія процесса разрушенія песчаного слоя подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки).

Вторая публичная лекція инж. В. Курдюмова, прочитанная въ залѣ Института Инж. П. С. 11 декабря 1889 года.

Милостивые Государи!

Въ Ноябрѣ 1888 года въ залѣ Института И. П. С. мною было сдѣлано сообщеніе по вопросу о сопротивленіи естественныхъ основаній *).

Въ первой половинѣ моего сообщенія я старался поколебать довѣріе къ схемѣ взаимодействія призмъ обрушенія и сопротивленія съ прямолинейными очертаніями, при посредствѣ которой Паукеромъ была выведена формула для опредѣленія необходимой глубины заложенія основаній.

Во второй же части сообщенія, за неимѣніемъ фактическихъ данныхъ, я принужденъ былъ ограничиться одними лишь теоретическими соображеніями относительно *впроятнаго вида* криволинейной призмы выпиранія, образующейся въ дѣйствительности при разрушенія песчаного слоя, подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки.

Въ настоящее время мною изысканъ способъ опредѣленія *истиннаго вида* призмъ выпиранія, а слѣдовательно имѣется возможность провѣрить правильность высказанныхъ въ прошломъ году теоретическихъ соображеній. Въ виду этого я рѣшился сдѣлать новое сообщеніе какъ относительно способа изслѣдованія вида призмъ выпиранія, такъ и результатовъ сравненія *впроятнаго вида* этихъ призмъ съ *истиннымъ*. Такимъ образомъ настоящее мое сообщеніе находится въ тѣсной связи

*) Напечатано въ Жур. М. П. С. въ № 8, за 1889 г.

съ первымъ и должно служить ему дополненіемъ. При такихъ условіяхъ, желая быть понятымъ всѣми моими сегодняшними слушателями, я принужденъ хотя бы въ короткихъ словахъ передать сущность прошлогдняго моего сообщенія и повторить высказанныя тогда теоретическія соображенія о вѣроятномъ видѣ призмъ выпирания.

На первомъ моемъ сообщеніи о сопротивленіи естественныхъ основаній я затронулъ вопросъ о нарождающейся теоріи основаній, предметомъ которой должно служить изученіе условій равновѣсія между давленіемъ, производимымъ сооруженіемъ, съ одной стороны и сопротивленіемъ матеріала основанія — съ другой. При этомъ я обращалъ особенное вниманіе на то обстоятельство, что матеріаль въ основаніи работаетъ въ совершенно иныхъ условіяхъ, чѣмъ тотъ же матеріаль въ частяхъ сооруженія, а именно: въ основаніяхъ нагрузки подвергается незначительная только часть поверхности неопредѣленно большой массы матеріала, а въ частяхъ сооруженія — отдѣльные его куски. Эта разность въ способѣ нагрузки отражается какъ на величинѣ временнаго сопротивленія, распредѣленіи напряженій внутри матеріала, такъ и на формѣ его разрушенія. Въ этомъ наглядно можно убѣдиться по опытамъ Дюранъ-Кле *) надъ раздавливаніемъ камней подъ вліяніемъ нагрузки, расположенной на небольшой только части ихъ поверхности. Давленію подвергались кубики въ 10 сантиметровъ въ сторонѣ, давленіе передавалось помощью стальныхъ штамповъ размѣрами отъ 1—10 сант. въ сторонѣ. При расположеніи нагрузки по всей поверхности образца, временное сопротивленіе его раздробленію оказывалось равнымъ 84 кил. на кв. сант., причемъ самое разрушеніе имѣло обычную форму; когда же давленіе производилось штампомъ въ 1 кв. сант., то разрушеніе кубика происходило при нагрузкѣ въ 1.200 кил., и выражалось въ раздробленіи и выкалываніи матеріала вокругъ штампа въ видѣ воронки.

Эта особенность условій работы матеріала въ основаніи, которая до послѣдняго времени какъ бы игнорировалась, имѣетъ

*) Annales des ponts et chaussées 1887. Tome XIV.

въ разсматриваемомъ вопросѣ весьма существенное значеніе, а потому вопросъ о сопротивленіи матеріаловъ, могущихъ служить основаніями сооруженій, заслуживаетъ спеціальнаго изученія.

Всѣ матеріалы, могущіе входить въ составъ естественныхъ основаній, я подраздѣлилъ на нѣсколько категорій и изъ нихъ выдѣлилъ три, которыя по совокупности своихъ физическихъ свойствъ могутъ быть разсматриваемы какъ типы. Такими типичными матеріалами основаній я принялъ: 1) разжиженные грунты, которые можно разсматривать какъ тѣла жидкія, 2) скалистые — какъ тѣла твердыя и 3) грунты сыпучіе, каковы чистые сухіе пески. Всѣ остальные матеріалы основаній, названные мною грунтами землистыми, имѣютъ свойства промежуточные между свойствами трехъ типичныхъ и одни изъ нихъ занимаютъ среднее мѣсто между тѣлами жидкими и сыпучими, а другіе — между сыпучими и твердыми.

Условія равновѣсія основаній, очевидно, могутъ быть изучаемы по стольку, по скольку изучены законы внутренняго равновѣсія перечисленныхъ мною видовъ матеріаловъ при тѣхъ условіяхъ, при которыхъ матеріаль работаетъ въ основаніи. Въ наиболѣе благопріятныхъ условіяхъ, въ смыслѣ знакомства съ законами внутренняго равновѣсія матеріала, мы находимся въ томъ случаѣ, когда такой матеріаль можно разсматривать какъ жидкое тѣло. Равновѣсіе сооруженія на такихъ грунтахъ опредѣляется наиболѣе простыми законами равновѣсія тѣлъ плавающихъ. Изслѣдованіе условій равновѣсія сооруженій, основанныхъ на совершенно твердыхъ грунтахъ, каковы скалы, 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 кв. ед. площади основанія, съ другой стороны — условія работы твердаго матеріала въ основаніи въ значительной степени увеличиваютъ и безъ того большое сопротивление ихъ раздробленію.

При такихъ условіяхъ законы равновѣсія сооруженій, основанныхъ на грунтахъ сыпучихъ, пріобрѣтаютъ наибольшій практической интересъ, такъ какъ къ изученію законовъ внутрен-

няго равновѣсія грунтовъ землистыхъ можно будетъ приступить не ранѣе того, какъ теорія тѣлъ сыпучихъ будетъ разработана настолько же полно, насколько разработана въ настоящее время гидростатика.

Обращаясь къ ученію о сыпучихъ тѣлахъ, мы видимъ, что и до сихъ поръ нельзя еще считать окончательно установившимися взгляды на нѣкоторые основные вопросы этой теоріи, какъ напр. на вопросъ о направленіи давленія песка на вертикальную стѣнку.

Всѣ почти ученые, занимавшіеся теоріею сыпучихъ тѣлъ, старались примѣнить ее къ расчету подпорныхъ стѣнокъ, т. е. къ рѣшенію одной изъ простѣйшихъ задачъ этой теоріи.

Что касается вопроса о сопротивленіи сыпучихъ тѣлъ внѣшнему давленію, подъ какую рубрику подходит и вопросъ о сопротивленіи основаній, то къ его разработкѣ, можно сказать, почти что и не приступали.

Дѣйствительно: можно указать только на двѣ элементарныя работы въ этомъ направленіи, а именно: на работы Ренкина и Паукера, появившіяся только въ 50-хъ годахъ нашего столѣтія, тогда какъ теорія подпорныхъ стѣнокъ изучалась уже и въ прошломъ вѣкѣ.

Какъ Ренкинъ, такъ и Паукеръ задались рѣшеніемъ одного и того же вопроса, а именно: о необходимой глубинѣ заложения основаній.

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

Такое совпаденіе окончательныхъ результатовъ, полученныхъ различными способами, могло бы служить нѣкоторымъ указаніемъ на правильность рѣшенія задачи, однако въ данномъ случаѣ это совпаденіе слѣдуетъ приписать простой только случайности. Формула Паукера не представляетъ собою результата чисто научной разработки общаго вопроса о необходимой глу-

бинѣ заложения основаній, а явилась, такъ сказать, побочнымъ продуктомъ производства. Дѣйствительно, когда Паукеръ предложилъ построить Константиновскую батарею на слоѣ насыпнаго песку, то ему пришлось выслушать цѣлый рядъ возраженій со стороны *опытныхъ и свѣдущихъ инженеровъ* того времени. Такъ, было высказано мнѣніе, что „песокъ, сдавленный зданіемъ форта, выдавится изъ подъ него въ сторону, зданіе погрузится въ песокъ и при этомъ можетъ получить значительныя поврежденія. Въ подтвержденіе правильности такого мнѣнія о подвижности песка подъ давленіемъ значительнаго груза, указывали на то, что нога человѣка, выступающаго по песку, значительно въ него углубляется, и что упирая рукою тупой конецъ карандаша въ песокъ, насыпанный въ какомъ нибудь сосудѣ, напр. песочницѣ, легко можно углубить карандашъ до дна сосуда“ *).

Паукеру ничего не оставалось, какъ только съ цифрами въ рукахъ доказать, что для данной нагрузки имѣется предѣлъ глубины, за которымъ выдавливаніе песка становится невозможнымъ. Для этого онъ построилъ весьма остроумную схему (чер. 1) взаимодействія двухъ призмъ: призмы обрушенія ABC и призмы сопротивленія $BDEF$ и вывелъ условія ихъ равновѣсія. Эти условія равновѣсія и выражаются формулою $h \geq Htg^4 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right)$, извѣстною теперь подъ названіемъ формулы Паукера.

При рѣшеніи своей задачи, преслѣдовавшей чисто практическую цѣль, Паукеръ пользовался обычнымъ и нынѣ приемомъ, при которомъ дѣлается рядъ пренебреженій, разъ только извѣстно, что онѣ идутъ въ пользу разсчета.

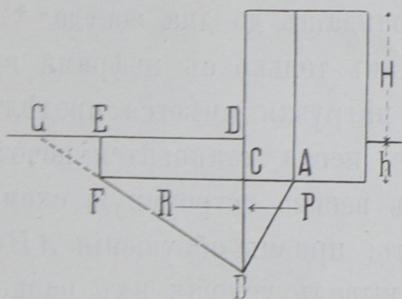
Вычисливъ по своей формулѣ приличную глубину заложения основанія Константиновской батареи, Паукеръ не былъ заинтересованъ въ изслѣдованіи вліянія сдѣланныхъ имъ пренебреженій на окончательный результатъ разсчета глубины. Дѣйствительно, если бы при болѣе точномъ разчетѣ необходимая глубина заложения вышла бы слишкомъ малою — его разсчетомъ

*) Ж. М. П. С. 1889 г. № 40, стр. 220.

могли бы не повѣрить и отказаться отъ осуществленія его идеи—построить батарею на насыпномъ пескѣ.

При такихъ условіяхъ формула Паукера не можетъ претендовать на строго научное значеніе—вѣроятно такъ на нее смотрѣлъ и Паукеръ, не пожелавшій тогда же опубликовать своей работы. Однако, формула эта попала въ учебники, приобрѣла право гражданства, стала примѣняться къ расчету глубины заложенія основаній при различныхъ грунтахъ, не смотря на то, что она была выведена только для сыпучаго песка. Объяснить такое значеніе формулы Паукера можно кажется только тѣмъ обстоятельствомъ, что до послѣдняго времени въ русской наукѣ не имѣлось ничего лучшаго, а спросъ на такую формулу былъ.

Однако, я далекъ отъ мысли отрицать всякое значеніе Паукера въ разработкѣ теоріи основаній. За нимъ остается великая заслуга въ созданіи весьма остроумной, изящной по своей простотѣ схемы взаимодѣйствія двухъ призмъ. Эта схема, съ небольшою поправкою, весьма просто объясняетъ процессъ разру-



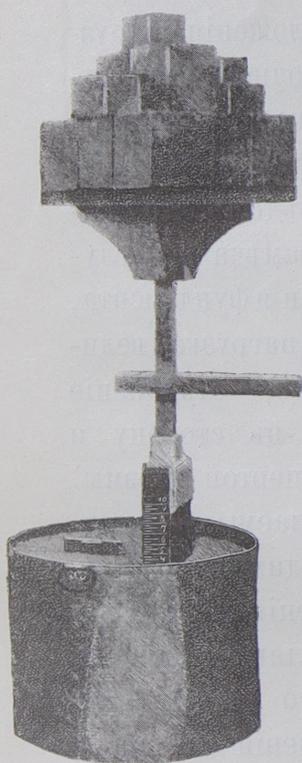
Черт. 1.

шенія песчанаго слоя подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки и даетъ возможность получать цифры временнаго сопротивленія песка выпиранію, довольно близкія къ наблюдаемымъ въ дѣйствительности. Эта схема въ теоріи основаній играетъ ту же роль, какую еще недавно въ теоріи теплоты играла невѣсомая жидкость.

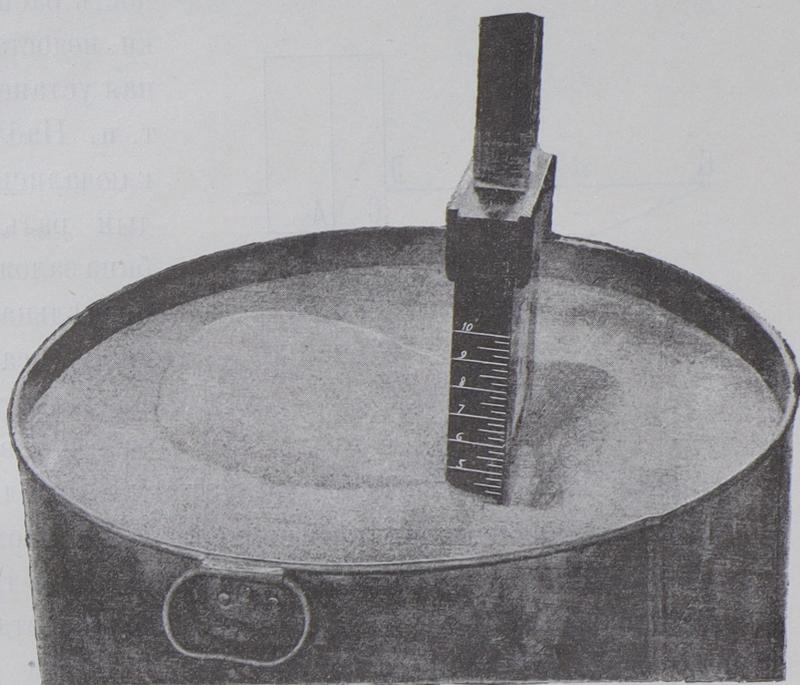
Первая поправка въ схему Паукера была введена инженеромъ П. Янковскимъ и заключалась въ томъ, что онъ трапециoidalную призму сопротивленія $BDEF$ (чер. 1) или, что все равно, треугольную призму BCF , нагруженную слоемъ песка $CDEF$, замѣнилъ одною треугольною призмою BDC . Эта поправка вполне логически вытекаетъ изъ представленія взаимодѣйствія прямолинейныхъ призмъ: призма сопротивленія, очевидно, можетъ скользить только по непрерывному прямолинейному от-

косу BG , а не по ломанной линіи BFE . Введеніе этой поправки, въ связи съ измѣненіемъ нѣкоторыхъ аналитическихъ приѣмовъ изслѣдованія, привели инж. Янковскаго къ формулѣ $h \geq \frac{H}{2} \operatorname{tg}^4 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right)$, по которой необходимая глубина заложения фундаментовъ оказывается вдвое меньшею, чѣмъ по Паукеру.

Съ цѣлью провѣрки этой формулы мною были произведены совместно съ инж. Янковскимъ лабораторные опыты надъ раз-



Черт. 2.

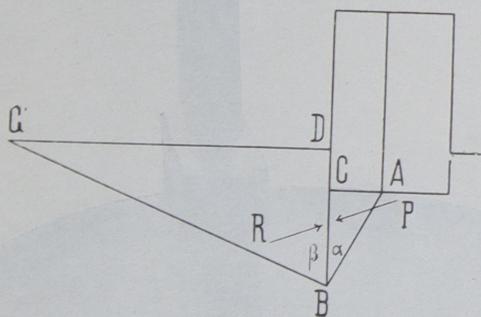


Черт. 3.

рушеніемъ песчаного слоя мѣстною нагрузкою. Приспособленія для опытовъ заключались въ слѣдующемъ (чер. 2): къ имѣющемуся въ механической лабораторіи Института чугунаго столу была привинчена доска, на выступавшемъ концѣ которой было сдѣлано квадратное отверстие; черезъ это отверстие проходилъ вертикальный стержень, къ верхнему концу котораго прикрѣплялся поддонъ для гирь, а къ нижнему — деревянные параллелепипеды, игравшіе роль фундаментовъ. Для помѣщенія песка былъ сдѣланъ желѣзный резервуаръ. Опыты заключались въ томъ, что фундаментъ погружался на нѣкоторую опредѣлен-

ную глубину въ песокъ, а затѣмъ на поддонъ постепенно клались гири до тѣхъ поръ пока фундаментъ не разрупаль песка, т. е. пока онъ не садился въ песокъ и не выпираль призмы сопротивленія (фиг. 3). При выпираниі песка всегда замѣчалось сползаніе фундамента въ сторону, при чемъ, со стороны противоположной выпиранию, образовывалось углубленіе. Отклоненіе фундамента то въ ту, то въ другую сторону обуславливалось совершенно случайными причинами, каковы несимметрич-

ность расположенія нагрузки, недостаточно вертикальная установка фундамента и т. п. Наблюденія наши заключались въ томъ, что каждый разъ замѣчалась глубина заложенія фундамента, предѣльная нагрузка, величина осадки, отклоненіе фундамента въ сторону и размѣры выпертой призмы.



Черт. 4.

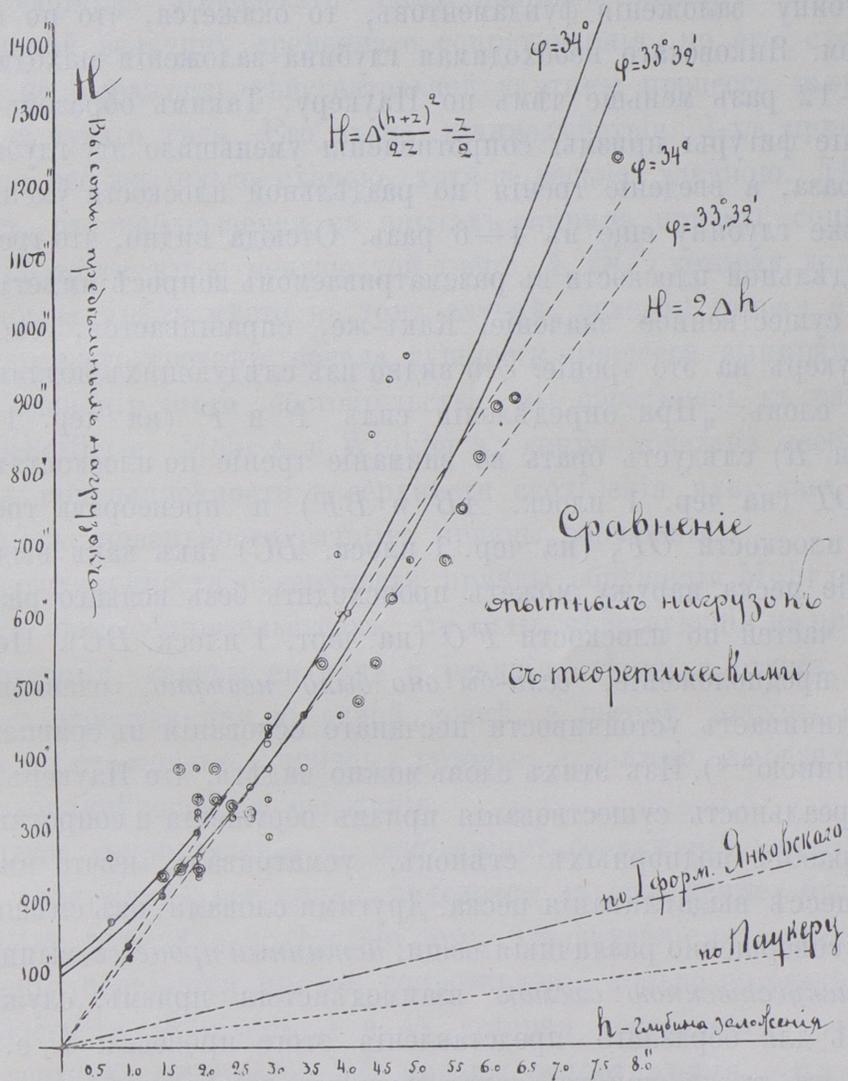
Первые же опыты показали несоотвѣтствіе наблюдаемыхъ нагрузокъ съ исчисленными по формуламъ. Эта несходимость результатовъ побудила изслѣдовать вопросъ о вліяніи тренія по раздѣльной плоскости BC (чер. 1) т. е. по плоскости отдѣляющей призму обрушенія отъ призмы сопротивленія. Когда это треніе было введено въ расчетъ, что отразилось на направленіи давленія и на размѣрахъ призмы сопротивленія (чер. 4), инж. Янковскій получилъ вторую формулу

$$H = 2 \left(\frac{tg \frac{45 + \varphi}{2}}{tg \frac{45 - \varphi}{2}} \right)^2 h \text{ или } H = 2\Delta h^*)$$

*) Въ этой формулѣ H выражаетъ собою предѣльную нагрузку на глубинѣ h отъ поверхности, выраженную въ высотѣ столба песка. Если фундаментъ представляетъ собою сплошной нераздѣльный массивъ, то формула принимаетъ видъ: $H = \Delta \frac{(h+z)^2}{2z} - \frac{z}{2}$. См. П. Янковскій «Врем. сопротивл. естеств. основаній». Ж. М. П. С. 1889. № 8 и 51.

которая даетъ результаты довольно близко подходящїе къ наблюдаемымъ на опытѣ. О степени сходимости 2-ой формулы Янковскаго съ результатами опытовъ можно судить по слѣдующему графику (чер. 5).

По оси абсциссъ отложены въ дюймахъ глубины заложения



Черт. 5.

фундаментовъ, по оси ординатъ— предѣльные нагрузки на 1 кв. дм., выраженные въ соответственныхъ высотахъ столба песку, дающаго ту же нагрузку. Нижняя наклонная пунктирная линия опредѣляетъ предѣльные нагрузки по Паукеру, вторая— такія же нагрузки по 1 форм. Янковскаго, остальные линїи соответ-

ствують двумь видамь второй формулы Янковскаго для двухъ значеній φ — угла тренія песка. Точки соотвѣтствуютъ опытнымъ даннымъ.

Если за единицу для сравненія формулы Паукера и 2-ой формулы Янковскаго принять исчисляемую по нимъ необходимую глубину заложенія фундаментовъ, то окажется, что по второй форм. Янковскаго необходимая глубина заложенія выходитъ отъ 8—12 разъ меньше чѣмъ по Паукеру. Такимъ образомъ измѣненіе фигуры призмы сопротивленія уменьшило эту глубину въ 2 раза, а введеніе тренія по раздѣльной плоскости уменьшило ту-же глубину еще въ 4—6 разъ. Отсюда видно, что треніе по раздѣльной плоскости въ разсматриваемомъ вопросѣ имѣетъ весьма существенное значеніе. Какъ-же, спрашивается, смотрѣлъ Паукеръ на это треніе? Это видно изъ слѣдующихъ подлинныхъ его словъ: „При опредѣленіи силъ P и P' (на чер. 1 силы P и R) слѣдуетъ брать во вниманіе треніе по плоскостямъ OB и OT (на чер. 1 плоск. AB и BF) и пренебречь треніемъ по плоскости OF , (на чер. 1 плоск. BC) такъ какъ выдавливаніе песка наружу можетъ происходить безъ всякаго раздѣленія частей по плоскости FO (на черт. 1 плоск. BC). Последнее предположеніе, *если-бы оно было невѣрно*, очевидно не увеличиваетъ устойчивости песчанаго основанія въ сравненіи съ истинною“ *). Изъ этихъ словъ можно видѣть, что Паукеръ, вѣря въ реальность существованія призмъ обрушенія и сопротивленія въ работѣ подпорныхъ стѣнокъ, усматривалъ нѣчто иное въ процессѣ выдавливанія песка. Другими словами, онъ смѣшивалъ двѣ совершенно различныя вещи: *истинный процессъ* выпиранія съ *искусственною схемою* взаимодействія призмъ, служащею лишь для образнаго представленія этого процесса; т. е. впадалъ въ ту же ошибку, какая не чужда и нѣкоторымъ изъ современныхъ изслѣдователей того-же вопроса.

Послѣ показаннаго на графикѣ совпаденія результатовъ опытовъ съ теоретическими выводами можно-бы, казалось, допус-

*) Жур. М. П. С. 1889 № 40 (Сентябрь—Октябрь) стр. 227.

тять, что сущность процесса выпирания песка изъ подъ фундаментовъ выражена во второй схемѣ Янковскаго вполне вѣрно, а вмѣстѣ съ тѣмъ вопросъ о величинѣ временнаго сопротивленія песка разрушенію путемъ выдавливанія рѣшенъ окончательно. Однако, тѣ же опыты доказывали противное. Дѣйствительно: вторая формула Янковскаго даетъ довольно близкую къ дѣйствительной величину временнаго сопротивленія, но его схема далеко не выражаетъ дѣйствительной картины процесса разрушенія сыпучаго тѣла. Его схема взаимодѣйствія 2-хъ призмъ остается все же только схемою, хотя и весьма удачною. Дѣло въ томъ, что наблюдаемая на опытахъ ширина призмы сопротивленія почти вдвое меньше той (черт. 4 DG') которая должна-бы была имѣть мѣсто въ томъ случаѣ, если-бы вторая схема Янковскаго соотвѣтствовала сущности процесса выпирания. Для объясненія этого обстоятельства мы обратились къ работамъ Scheffler'a, Mohr'a и Winkler'a, коими доказана необходимость криволинейности поверхности скользенія или, какъ ее называютъ, поверхности разрыва призмы обрушенія.

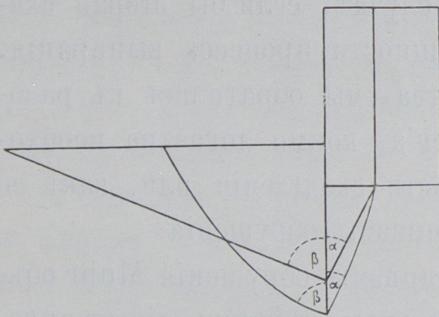
Криволинейность поверхности призмы обрушенія Mohr объясняетъ тѣмъ обстоятельствомъ, что силы, дѣйствующія на призму обрушенія, каковы ея вѣсъ и реакція стѣнки и откоса, вообще не пересѣкаются въ одной точкѣ, а потому должны вызывать *перекашивание* призмы, которое и должно выразиться въ криволинейности ея очертанія.

Призма сопротивленія въ основаніяхъ сооруженій, въ отношеніи дѣйствія на нее силъ, находится въ еще менѣе благоприятныхъ условіяхъ вслѣдствіе того, что давленіе отъ призмы обрушенія передается призмѣ сопротивленія только по раздѣльной плоскости BC (черт. 1 и 4), которая составляетъ только часть вертикальной грани BD призмы сопротивленія. Эти соображенія побудили насъ допустить, что и поверхность скользенія призмы сопротивленія также должна быть криволинейна. Такое допущеніе дало намъ возможность объяснить несходимость исчисленныхъ по формулѣ ширинъ призмъ сопротивленія съ дѣйствительными. Представленная на черт. 6 схема, въ которой углы α и β тѣ же, что и въ схемѣ съ прямолинейными приз-

мами (черт. 4), показываетъ, что при криволинейныхъ очертаніяхъ призмъ ширина призмы сопротивленія дѣйствительно должна быть меньше, чѣмъ при призмахъ прямолинейныхъ.

Сопоставляя съ одной стороны меньшую ширину призмъ сопротивленія, которая находитъ себѣ объясненіе въ допущеніи криволинейности ихъ очертанія, а съ другой стороны констатированную уже сходимость опытныхъ нагрузокъ съ исчисленными по форм. Янковскаго, выведенной въ предположеніи прямолинейности очертанія тѣхъ-же призмъ, мы должны были придти къ заключенію, что *въ дѣйствительности* призмы обрушенія и сопротивленія *криволинейны*, но сопротивленіе ихъ выпиранію

должно быть одинаково съ такимъ-же сопротивленіемъ призмъ съ прямолинейными очертаніями, принятыми въ схемѣ Янковскаго. Другими словами: прямолинейныя призмы пнж. Янковскаго, въ смыслѣ сопротивленія ихъ выпиранію, *эквивалентны* дѣйствительнымъ, криволинейнымъ. Возможность



Черт. 6.

такой эквивалентности прямолинейныхъ и криволинейныхъ призмъ 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, чѣмъ по откосу прямому; вполне-же естественно допустить, что обстоятельства эти, вліяя на величину сопротивленія выпиранію въ противоположныхъ направленіяхъ, могутъ уравновѣшиваться. 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.

Остановившись на предположеніи о криволинейности очертанія призм обрушенія и сопротивленія, мы стали пытаться опредѣлить истинный видъ кривыхъ, по которымъ происходитъ вышпраніе песка.

Однако, отъ этого пришлось скоро отказаться, такъ какъ даже сравнительно болѣе простую кривую разрыва призмы обрушенія и по настоящее время никому не удалось выразить уравненіемъ, а проф. Bussinesq высказываетъ мнѣніе, что интегрированіе дифференціальныхъ уравненій равновѣсія сыпучихъ тѣлъ едва-ли и возможно. При такомъ состояніи ученія о равновѣсіи сыпучихъ тѣлъ, намъ оставалось только выяснитъ *вѣроятный* видъ кривыхъ скользенія и давленій, руководствуясь основными положеніями новѣйшей теоріи сыпучихъ тѣлъ.

Въ общихъ чертахъ выводы новой теоріи сыпучихъ тѣлъ заключаются въ слѣдующемъ: каждый элементъ, находящагося въ покоѣ, сыпучаго тѣла, подобно элементамъ тѣлъ жидкихъ, испытываетъ со всѣхъ сторонъ нѣкоторыя давленія, причемъ величины этихъ давленій, въ противоположность давленіямъ въ жидкостяхъ, неодинаковы по разнымъ направленіямъ и при томъ составляютъ разные углы съ нормальми къ поверхности элемента. Законъ измѣненія величины давленій, въ зависимости отъ разсматриваемыхъ направленій ихъ, можетъ быть выраженъ такъ: если изъ центра даннаго элемента провести всевозможныя направленія давленій и на нихъ отложить величины этихъ давленій, то геометрическимъ мѣстомъ концовъ отрѣзковъ, изображающихъ эти давленія, будетъ эллипсоидъ съ тремя, 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 между полуосями b и a или наименьшимъ и наибольшимъ давленіями существуетъ *постоянное отношеніе*, равное

$$\frac{b}{a} = \frac{1 - \text{Sin } \varphi}{1 + \text{Sin } \varphi} = \text{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2},$$

гдѣ φ уголъ тренія или уголъ естественнаго откоса песка. Такъ

напримѣръ, при $\varphi = 33^{\circ}22'$, $\frac{b}{a} = 0,288$. Что касается направленія осей эллипса напряженій (или давленій) относительно вертикали, то оно можетъ быть различно въ зависимости отъ профиля верхней поверхности песчаного слоя, мѣстной его погрузки и т. п. Если поверхность слоя горизонтальна и не имѣетъ никакой дополнительной погрузки, то большая ось эллипса напряженій вертикальна, а малая, слѣдовательно, — горизонтальна. Большая ось эллипса въ этомъ случаѣ опредѣляетъ собою величину вертикальнаго давленія, испытываемаго элементомъ и равна δh , гдѣ h — разстоянiе разсматриваемаго элемента отъ поверхности слоя, а δ — плотность песку. Малая ось эллипса опредѣляетъ собою величину давленія испытываемаго элементомъ по горизонтальному направленію и равняется $\delta h \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \delta h \tan^2 \frac{90 - \varphi}{2}$. Это горизонтальное давленіе носить названіе *активнаго* (activer Druck).

Если какимъ либо способомъ начать искусственно увеличивать горизонтальное давленіе на элементъ сыпучаго тѣла, напр. при помощи надавливанія слоя какою либо вертикальною стѣнкою, то положеніе эллипса и величины его осей стануть измѣняться. Предѣломъ такого измѣненія будетъ поворотъ большой оси эллипса на 90° , т. е. переходъ ея въ горизонтальное положеніе. Въ этомъ случаѣ малая ось представитъ собою величину вертикальнаго давленія и будетъ равняться δh , т. е. величинѣ большой оси эллипса до его поворота, а горизонтальная, въ силу постоянства соотношенія величинъ полуосей, увеличится и будетъ равна

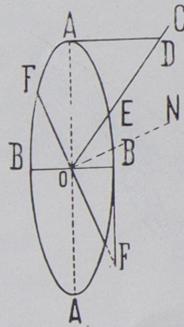
$$\delta h \cdot \frac{1}{\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}\right)} = \delta h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \delta h \cot^2 \left(\frac{90 - \varphi}{2}\right)$$

Это горизонтальное давленіе называется *пассивнымъ* (passiver Druck) или *сопротивленіемъ*. При дальнѣйшемъ горизонтальномъ надавливаніи происходитъ разрушеніе слоя, выражающееся въ сдвиженіи кверху нѣкоторой призмы (призмы сопротивленія). Для нахождения направленій тѣхъ элементарныхъ пло-

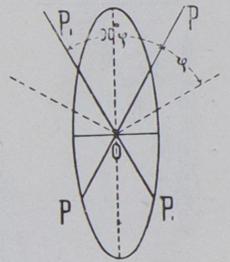
площадокъ, на которыя дѣйствуютъ давленія данныхъ направленій, служить слѣдующее построение. Пусть CO (чер. 7) будетъ направленіе давленія, по величинѣ равнаго OE и требуется опредѣлить направленіе площадки (касательной къ элементу) на которую оно дѣйствуетъ. Проводимъ изъ A линію $AD \parallel OB$ до пересѣченія съ OC ; изъ B проводимъ $BF \parallel OA_1$ и откладываемъ отъ B отрѣзокъ $BF = AD$; FF будетъ искомымъ направленіемъ. Изъ этого способа построения направленій элементарныхъ площадокъ, испытывающихъ данныя давленія, не трудно заключить, что имѣется всего два направленія площадокъ, на которыя давленія дѣйствуютъ нормально. Направленія этихъ площадокъ совпадаютъ съ осями эллипса.

Давленія на площадки другихъ направленій составляють съ нормалями къ этимъ площадкамъ нѣкоторые углы, величина которыхъ колеблется въ предѣлахъ $0 - \varphi$. Такъ какъ въ каждомъ эллипсѣ диаметры расположенные симметрично относительно осей попарно равны, то, очевидно, что для каждаго элемента сыпучаго тѣла существуютъ, между прочимъ, и два такихъ направленія площадокъ, давленія на которыя составляють углы φ съ нормалями. Изъ чертежа 8 видно, что направленія такихъ площадокъ *взаимны*, т. е. направленіе давленія PO на площадку P_1P_1 совпадаетъ съ направленіемъ площадки PP , на которую дѣйствуетъ давленіе P_1O . Эти два направленія называются *плоскостями скольженія*, въ нихъ частицы сыпучаго тѣла находятся на границѣ своей устойчивости. Плоскости скольженія составляють съ большою осью углы равные $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$.

Указанная теорія даетъ возможность опредѣлить точную картину распредѣленія напряженій въ разныхъ точкахъ сыпучаго тѣла въ тѣхъ только случаяхъ, когда послѣднее ограничено



Черт. 7.

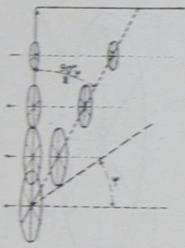


Черт. 8.

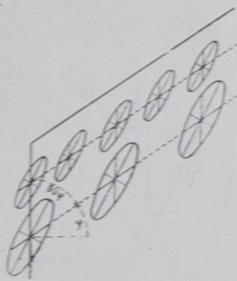
сверху одною плоскостью. Такъ, при ограниченіи слоя горизонтальною плоскостью или естественнымъ откосомъ, напряженія въ различныхъ точкахъ его опредѣляются положеніями эллипсовъ, показанными на черт. 9 и 10.

Въ первомъ случаѣ всѣ эллипсы вертикальны, положеніемъ плоскостей скользенія опредѣляется направленіе *плоскости разрыва* призмы обрушенія; во второмъ случаѣ эллипсы наклонны и плоскости скользенія параллельны естественному откосу. Для тѣхъ случаевъ, когда верхняя поверхность сыпучаго тѣла ограничена не плоскостью, то интегрированіе дифференціаль-
ныхъ уравненій равновѣсія до сихъ поръ не удается, а вмѣстѣ

съ тѣмъ не имѣется возможности дать, для такихъ случаевъ, вѣрной картины положенія эллипсовъ напряженій въ различныхъ точкахъ сыпучаго тѣла. Однако, на основаніи хотя бы только что приведенныхъ примѣровъ, можно заключить, что мѣстное поднятіе профиля верхней поверхности слоя должно вызывать



Черт. 9.



Черт. 10.

измѣненія въ напряженіяхъ, которыя и выразятся наклоненіемъ большихъ осей эллипсовъ въ сторону возрастанія нагрузокъ.

Приведенныя основныя положенія новой теоріи равновѣсія сыпучихъ тѣлъ были прилагаемы по преимуществу къ расчету подпорныхъ стѣнокъ и только Rankine попытался воспользоваться ими для вывода формулы для опредѣленія возможной нагрузки песчаныхъ основаній или, что тоже, необходимой глубины ихъ заложенія.

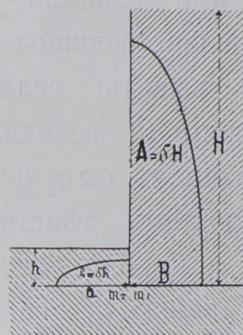
Формула Rankine'а выведена на основаніи слѣдующихъ соображеній.

На нѣкоторой глубинѣ h (черт. 11) отъ горизонтальной поверхности песчанаго слоя заложено основаніе сооруженія, въсь котораго равенъ P . Давленіе сооруженія можетъ быть замѣнено давленіемъ столба песку высотой H , имѣющаго ту-же площадь

подошвы и одинаковъй съ нимъ вѣсъ P . Разсмотримъ два смежные элемента песчанаго слоя m_1 и m_2 , изъ которыхъ первый находится подъ грузомъ сооруженія, а второй подъ нагрузкою свободнаго слоя песку толщиною h . Соответствующій элементу m_1 эллипсъ напряженій долженъ быть вертикаленъ и имѣть большою полуосью величину $A = \delta H$, а потому малая его полуось B должна быть горизонтальна и равна

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

Предѣльное равновѣсіе будетъ въ томъ случаѣ, когда эллипсъ напряженій элемента m_2 подъ вліяніемъ давленія B повернется такимъ образомъ, что его большая полуось a станетъ горизонтальною, а по величинѣ равною B . При вертикальномъ разстояніи h элемента m_2 отъ поверхности слоя, вертикальное на него давленіе равно δh . Въ нашемъ случаѣ оно должно равняться малой полуоси эллипса напряженій элемента m_2 , а потому большая полуось того же эллипса должна быть равна



Черт. 11.

$$a = \delta h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \delta h \operatorname{cotg}^2 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right).$$

И такъ предѣльное равновѣсіе можетъ быть въ случаѣ равенства

$$B = a$$

или

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

или

$$\delta H \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right) = \delta h \operatorname{cotg}^2 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right)$$

откуда
$$h = H \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^2$$
 по Ренкину или

$$h = H \operatorname{tg}^4 \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right) \text{ по Паукеру.}$$

Этот выводъ, какъ показали наши опыты надъ сопротивленіемъ песчанаго слоя дѣйствию мѣстъ нагрузки, невѣренъ, а потому въ основѣ его должно лежать какое либо ошибочное допущеніе. Подобнымъ допущеніемъ слѣдуетъ признать такое расположеніе эллипсовъ напряженій двухъ смежныхъ элементовъ, при которомъ большія оси ихъ взаимно перпендикулярны, или, другими словами, допущеніе въ двухъ смежныхъ элементахъ конечной разницы въ напряженіяхъ. Отсюда мы дѣлаемъ слѣдующій выводъ: если допущеніе конечныхъ измѣненій въ положеніи и величинѣ эллипсовъ напряженій двухъ смежныхъ элементовъ сыпучаго тѣла приводитъ къ выводамъ несоотвѣствующимъ дѣйствительности, то слѣдуетъ допустить противное, а именно *постепенность* вращенія эллипсовъ напряженій при переходѣ отъ одного элемента къ смежному, бесконечно къ нему близкому.

Схема Ренкина и сдѣланный нами выводъ о необходимости допущенія постепенности вращенія эллипсовъ напряженій въ бесконечно близкихъ элементахъ сыпучаго тѣла и послужили намъ исходною точкою для опредѣленія вѣроятнаго вида кривой разрыва или кривой скользенія призмы, выпираемой изъ песчанаго слоя дѣйствіемъ мѣстной нагрузки.

Наши соображенія о вѣроятномъ видѣ кривой скользенія заключаются въ слѣдующемъ:

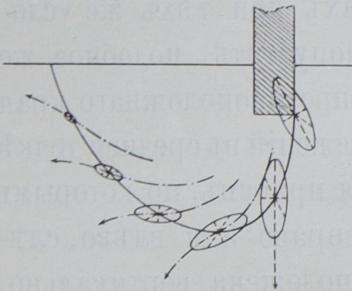
1) Линія скользенія должна быть рассматриваема какъ геометрическое мѣсто плоскостей скользенія эллипсовъ напряженій въ различныхъ точкахъ сыпучаго тѣла, причемъ отклоненіе этихъ эллипсовъ отъ ихъ естественнаго положенія во время покоя вызвано мѣстною нагрузкою.

2) Въ виду необходимости допустить постепенное вращеніе эллипсовъ напряженій, линія скользенія должна быть кривою плавною, безъ точекъ перелома.

3) Разсматривая тонкій слой песку, лежащій непосредственно подъ фундаментомъ, слѣдуетъ допустить, что, при вертикальной осадкѣ фундамента, онъ опускается вмѣстѣ съ нимъ, а потому боковыя плоскости разрыва этого слоя должны быть вертикальны. Эти плоскости разрыва и будутъ *первыми элементами кривой скользенія*, а потому мы вправѣ заключить, что въ крайнихъ элементахъ тонкаго слоя песка, лежащаго непосредственно подъ фундаментомъ, эллипсы напряженій расположены такимъ образомъ, что одна изъ ихъ плоскостей скользенія вертикальна, а слѣдовательно большая ихъ ось, показывающая направленіе наибольшаго давленія, наклонена къ вертикали на уголъ $45 - \frac{\varphi}{2}$, что совершенно аналогично распространенію давленія въ твердыхъ тѣлахъ при тѣхъ же условіяхъ. По закону симметріи слѣдуетъ допустить подобное же расположеніе эллипса напряженій и съ противоположнаго края фундамента. Что же касается эллипса напряженій въ средней точкѣ подошвы фундамента, то, въ виду отсутствія причинъ, по которымъ бы эллипсъ этотъ могъ быть наклоненъ вправо или влево, слѣдуетъ допустить, что большая его ось расположена вертикально. Подобное же вертикальное положеніе большихъ осей эллипсовъ напряженій должно сохраниться во всѣхъ элементахъ сыпучаго тѣла, расположенныхъ по оси фундамента, т. е. по вертикали, идущей чрезъ средину его. Одинъ изъ такихъ эллипсовъ долженъ лежать и на кривой скользенія. Плоскости скользенія эллипса напряженій составляютъ съ большою осью углы равные $45 - \frac{\varphi}{2}$ а потому мы вправѣ сказать, что кривыя скользенія должны пересѣкать вертикальную ось фундамента подъ угломъ $45 - \frac{\varphi}{2}$. Въ низшей точкѣ кривой скользенія плоскость скользенія эллипса напряженій должна быть горизонтальна, а большая ось, показывающая направленіе наибольшаго давленія, должна быть наклонена къ горизонту подъ угломъ $45 - \frac{\varphi^0}{2}$. Остальные эллипсы, лежащіе по кривой скользенія, по мѣрѣ уменьшенія абсолютной ихъ величины (т. е. по мѣрѣ прибли-

женія къ поверхности слоя), должны все болѣе и болѣе отклоняться отъ своего естественнаго положенія. Въ виду вышесказаннаго, вѣроятный видъ кривой скользенія долженъ быть приблизительно такой, какой показанъ на черт. 12. Такъ какъ положеніемъ большихъ осей эллипсовъ напряженій опредѣляется направление наибольшихъ давленій, то по виду кривой скользенія можно составить себѣ представленіе о *направленіяхъ* наибольшихъ давленій въ разныхъ точкахъ этой кривой.

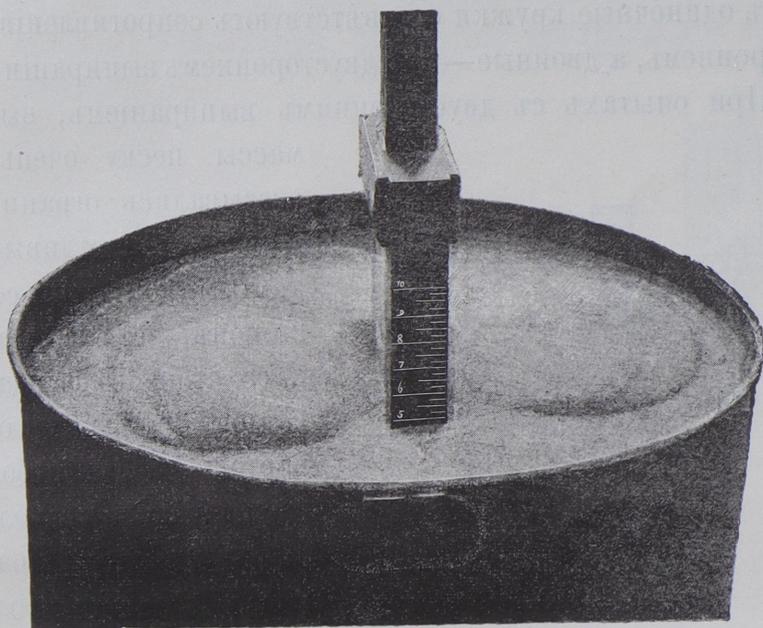
4) При вертикальномъ направленіи давленія фундамента слѣдуетъ допустить симметричное расположеніе эллипсовъ напряженій въ точкахъ сыпучаго тѣла, лежащихъ симметрично по обѣимъ сторонамъ вертикальной оси фундамента. Такъ какъ одна система эллипсовъ совокупностью своихъ плоскостей скользенія образуетъ кривую скользенія призмы выпирания, лежащей, положимъ, налѣво отъ фундамента, то, въ силу симметричности расположенія эллипсовъ напряженій по обѣимъ сторонамъ отъ оси фундамента, слѣдуетъ допустить возможность суще-



Черт. 12.

ствования второй системы эллипсовъ, образующихъ еще одну кривую скользенія призмы, которая можетъ быть выперта вправо. Кривыя эти, будучи симметричны, должны пересѣкаться въ одной изъ точекъ оси фундамента, а именно въ точкѣ пересѣченія сопряженныхъ плоскостей скользенія эллипса, имѣющаго большую ось вертикальною. Такъ какъ при совершенно точномъ направленіи осадки фундамента по вертикали нѣтъ особыхъ причинъ, по которымъ бы призма выпирания должна была образоваться справа, а не слѣва или наоборотъ, то слѣдуетъ допустить возможность одновременнаго образованія двухъ призмъ выпирания или возможность двусторонняго выпирания песку изъ подъ фундамента. Если же въ дѣйствительности, при нашихъ опытахъ надъ сопротивленіемъ песчанаго слоя, выпирание происходило одностороннее, то это могло происходить отъ слу-

чайныхъ причинъ, вродѣ непертикальности установки фундамента и т. п. Допуская возможность двусторонняго выпирания, является вопросъ: не представляется ли двустороннему выпиранию большее сопротивленіе чѣмъ одностороннему, такъ какъ приводимыя въ движеніе массы песку въ томъ и другомъ случаѣ должны быть не одинаковы. Съ теоретической точки зрѣнія двустороннее выпирание можно разсматривать какъ результатъ попеременн-ныхъ одностороннихъ выпираний то въ одну, то въ другую сто-



Черт. 13.

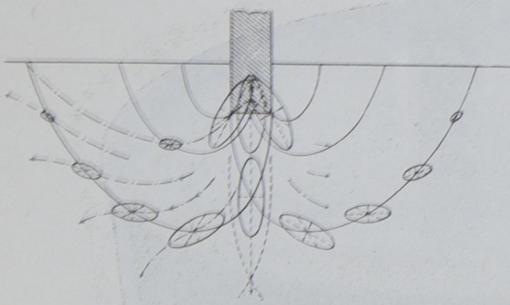
рону, сопротивленіе же движенію призмы по одной кривой должно быть равно сопротивленію по другой, а потому сопротивленіе двустороннему выпиранию не должно бы превышать сопротивленія выпиранию одностороннему. Что же касается разности въ величинѣ приводимыхъ въ движеніе массъ песку при одно- и двустороннемъ выпирании, то она можетъ уравниваться разностью высотъ выпирания въ томъ и другомъ случаѣ, слѣдовательно работа фундамента при обоихъ видахъ выпирания остается одинаковою.

Для проверкы этихъ теоретическихъ соображеній нами былъ произведенъ опытъ при помощи прибора, служившаго для опредѣленія сопротивленія слоя песку дѣйствию мѣстной нагрузки

(фиг. 2), причѣмъ, для достиженія совершенной вертикальности осадки фундамента, была установлена вторая направляющая немного выше первой. Возможность двусторонняго выпирания не замедлила обнаружиться, въ чемъ и можно убѣдиться по слѣдующей фотографіи (фиг. 13).

Сопротивленіе песчанаго слоя разрушенію одностороннимъ или двустороннимъ выпираниемъ оказывается одинаковымъ, въ чемъ не трудно убѣдиться по графику результатовъ опытовъ (черт. 5), на которомъ одиночные кружки соотвѣтствуютъ сопротивленіямъ при одностороннемъ, а двойные—при двустороннемъ выпираниіи песку.

5) При опытахъ съ двустороннимъ выпираниемъ, выпертыя



Черт. 14.

массы песку очень часто оказывались ограниченными вполне отчетливымъ замкнутымъ контуромъ со всѣхъ сторонъ, а слѣдовательно и со стороны фундамента, который отдѣлялся отъ выпертой массы небольшою площадкою и углубленіемъ въ видѣ воронки возлѣ самаго фундамента. Подобную

форму призмы выпирания можно объяснить образованіемъ въ массѣ песка вторыхъ кривыхъ скольженія, ограничивающихъ призмы сверху. Кривыя эти первымъ, своимъ элементомъ должны имѣть плоскости скольженія эллипсовъ напряженій въ крайнихъ точкахъ песчанаго слоя, лежащаго непосредственно подъ фундаментомъ и наклоненныя подъ угломъ $90 - \varphi$ къ вертикали*). Такимъ образомъ каждая изъ призмъ выпирания (правая и лѣвая) должна быть ограничена двумя кривыми, одною нижнею, другою верхнею, какъ это показано на черт. 14.

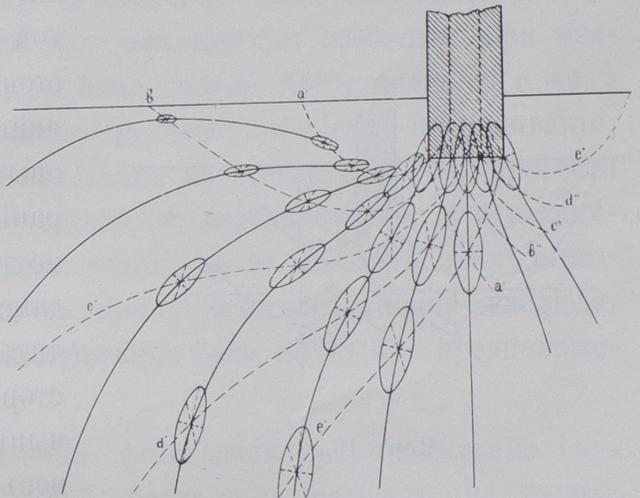
6) Ширина призмы выпирания подъ самую подошвою фундамента, очевидно, равна ширинѣ этой подошвы, ширина же

*) Угль между двумя плоскостями скольженія эллипса напряженій равенъ $90 - \varphi$.

ея по поверхности песчаного слоя, какъ показали опыты, значительно больше. Отсюда мы вправѣ заключить, что во время процесса выпирания призмы въ ней происходитъ относительное перемѣщеніе частицъ или деформация массы песка. Проще всего допустить, что частицы двигаются по нѣкоторымъ кривымъ скольженія, первые элементы которыхъ совпадаютъ съ плоскостями скольженія эллипсовъ напряженій въ различныхъ точкахъ песчаного слоя лежащаго непосредственно подъ фундаментомъ. На черт. 14 показаны такія кривыя скольженія для средней точки подошвы фундамента. Вслѣдствіе центральнаго положенія этой точки, кривыя скольженія исходящія изъ нея оказываются симметричными.

Для всякой другой точки должны существовать двѣ кривыя скольженія не одинаковыя по величинѣ.

7) Направленіе наибольшихъ давленій опредѣляется положеніемъ большихъ осей эллипсовъ напряженій, которыя съ плоскостями скольженія составляютъ углы $45 - \frac{\varphi^0}{2}$. Проводя въ различныхъ точкахъ различныхъ кривыхъ скольженія линіи подѣ угломъ $45 - \frac{\varphi^0}{2}$ къ этимъ кривымъ, получимъ направленія давленій въ массѣ песка (черт. 12 и 14). Такъ какъ въ смежныхъ элементахъ песчаного слоя положеніе эллипсовъ напряженій измѣняется притомъ постепенно (большія оси отклоняются одна отъ другой на безконечно малый уголъ), то мы вправѣ заключить, что и давленія въ массѣ песка распространяются также по нѣкоторымъ кривымъ. На черт. 15 показанъ приблизительный видъ такихъ кривыхъ.

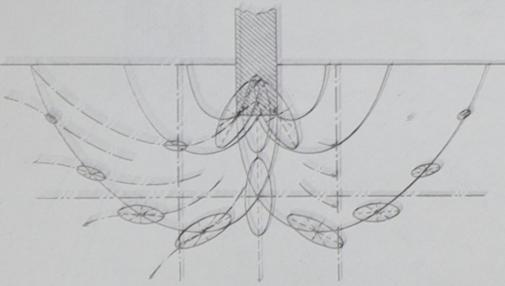


Черт. 15.

7) По мѣрѣ углубленія фундамента въ массу песка, сопротивленіе выпиранію должно возрастать вслѣдствіе того, что для возможности самого выпиранія эллипсы напряженій въ элементахъ сыпучаго тѣла должны все болѣе и болѣе отклоняться отъ своего естественнаго положенія, съ тѣмъ чтобы совокупностью своихъ плоскостей скользя образовать новую кривую скользянія еще болѣеї призмы выпиранія, какъ это показано пунктиромъ на черт. 14.

8) Съ увеличеніемъ ширины фундамента (черт. 15), при условіи одинаковой нагрузки на кв. единицу и при той же глубинѣ, сопротивленіе выпиранію тоже должно возрастать и по

той же причинѣ. Этимъ обстоятельствомъ можно объяснить тотъ обнаруженный опытами фактъ, что выпираніе песку изъ подъ прямоугольныхъ въ планѣ фундаментовъ всегда происходитъ вдоль длинныхъ его сторонъ, такъ какъ такому выпиранію соотвѣтствуетъ меньшая ширина въ профилѣ выпираемой призмы.



Черт. 16.

9) Въ общемъ случаѣ выпираніе представляется возможнымъ при томъ условіи, что слой сыпучаго тѣла имѣетъ неопредѣленные размѣры какъ по вертикальному, такъ и по горизонтальному направленію. Если слой ограниченъ съ боковъ и снизу, какъ показано пунктиромъ на черт. 16 то выпираніе представляется возможнымъ только для глубинъ и ширинъ фундаментовъ не превосходящихъ нѣкотораго предѣла, другими словами: въ тѣхъ только случаяхъ, когда кривыя скользянія цѣликомъ помѣщаются между предѣлами песчанаго слоя.

Этимъ и исчерпывались наши соображенія относительно *вѣроятнаго* вида кривыхъ скользянія призмы выпиранія.

Убѣдившись въ правдоподобности нашихъ теоретическихъ

соображеній относительно *вьроятнаго вида* кривыхъ скользянія путемъ непосредственнаго наблюденія этихъ кривыхъ въ сосудѣ со стеклянною стѣнкою, я задался цѣлью если не аналитически, то хотя-бы какимъ либо инымъ способомъ опредѣлить *истинный видъ* тѣхъ-же кривыхъ.

Наиболѣе цѣлесообразнымъ оказался способъ фотографическій, т. е. *непосредственное фотографированіе призмъ выпиранія*. Примѣненіе фотографіи къ опредѣленію вида призмъ выпиранія должно имѣть то преимущество предъ простымъ наблюденіемъ процесса выпиранія въ стеклянномъ сосудѣ, что фотографія можетъ дать графическое, *безспорное* изображеніе этихъ кривыхъ, тогда какъ простыя наблюденія, особенно при медленномъ выпираніи, даютъ одни только представленія о видѣ кривыхъ, исчезающія вслѣдъ за прекращеніемъ надавливанія, представленія расплывчатыя, такъ какъ весьма трудно провести рѣзкую границу между частицами двигающимися и остающимися въ покоѣ; при такихъ условіяхъ въ созданіи этихъ представленій не малую роль должно играть воображеніе наблюдателя, такъ или иначе настроенное его личными предположеніями.

Возможность примѣненія фотографіи къ опредѣленію вида кривыхъ скользянія въ массѣ песка я основывалъ на такихъ соображеніяхъ: если фотографировать въ теченіи нѣсколькихъ секундъ песокъ, заключенный въ сосудѣ со стеклянною стѣнкою и подвергаемый надавливанію стержнемъ, двигающимся непосредственно возлѣ стѣнки сосуда, то тѣ песчинки, которыя при этомъ остаются въ покоѣ, должны выйти на фотографіи вполне рѣзко, отчетливо, тогда какъ изображенія песчинокъ, двигавшихся при фотографированіи, должны оказаться не рѣзкими, размазанными. Вся совокупность размазанныхъ изображеній должна опредѣлить собою фигуру *призмы выпиранія*, а граница между изображеніями размазанными и рѣзкими—*кривую скользянія* призмы выпиранія.

Остановившись на фотографическомъ способѣ опредѣленія истиннаго вида кривыхъ выпиранія, я устроилъ особый при-

боръ, (фиг. 17) состоящій изъ ящика со стеклянною стѣнкою, въ который насыпается песокъ, и рамы съ гайкою, черезъ которую проходитъ винтъ. Помощью винта можно вдавливать въ песокъ деревянный стержень, зажатый между направляющими и скользящій при своемъ движеніи по зеркальному стеклу. Благодаря такой конструкціи прибора, можно наблюдать и фотографировать

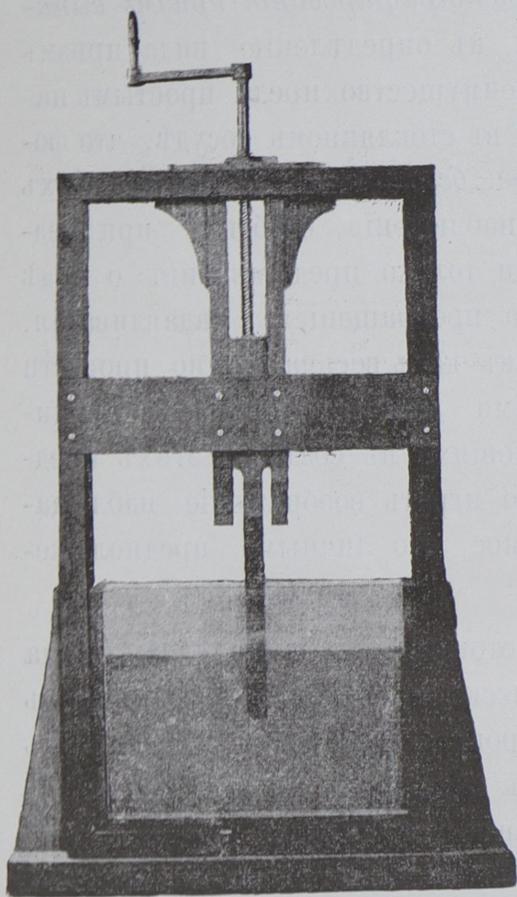
процессъ выпирания въ массѣ песка, такъ сказать, *въ разрывъ*.

Приборъ былъ готовъ въ началѣ февраля 1889 г. Такъ какъ дневной свѣтъ въ то время былъ слабъ, особенно въ институтской фотографической лабораторіи, а нужно было работать объективомъ недостаточно свѣтосильнымъ, то я принужденъ былъ обратиться къ искусственному свѣту. Пользованіе искусственнымъ свѣтомъ представляло еще и то преимущество, что при немъ можно было работать и по вечерамъ.

Пользованіе искусственнымъ свѣтомъ давно уже имѣетъ мѣсто при фотографическихъ работахъ. Источникомъ такого свѣта до послѣдняго сремени служилъ магній исключительно въ видѣ ленты или проволоки. Однако, пламя ленты магнія для меня

оказалось недостаточнымъ и мнѣ пришлось обратиться къ вспышкамъ порошка магнія.

Фотографированіе при вспышкахъ было въ то время одною изъ крупнѣйшихъ новостей въ области фотографіи; съ введеніемъ вспышекъ вопросъ о фотографированіи при искусственномъ свѣтѣ вступилъ въ совершенно новую фазу своего развитія. Дѣйствительно, вспышка порошка магнія, т. е. весьма быстрое

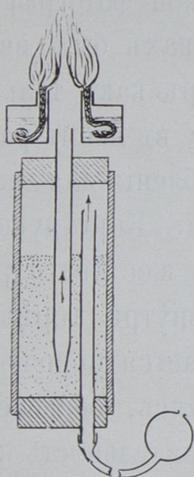


Черт. 17.

сжиганіе сравнительно большаго его количества даетъ чрезвычайно сильное освѣщеніе, на близкихъ разстояніяхъ превосходящее даже солнечное. Эта сила освѣщенія обусловливаетъ возможность фотографировать при искусственномъ свѣтѣ моментально, что до тѣхъ поръ было возможно только при солнцѣ. Если къ этому добавить, что сила освѣщенія, время и мѣсто находятся въ полномъ нашемъ распоряженіи, то станетъ совершенно понятнымъ, почему къ искусственному свѣту вспышекъ стали прибѣгать и въ тѣхъ случаяхъ, когда имѣется возможность работать и при солнечномъ свѣтѣ, т. е. почему иные стали предпочитать магній солнцу. Въ институтской фотографической лабораторіи фотографированіе при вспышкахъ было введено еще съ осени 1887 года, т. е. съ тѣхъ поръ какъ только этотъ способъ сталъ извѣстенъ за границею, а потому въ моемъ распоряженіи находились и необходимыя приспособленія для сжиганія порошка магнія, а именно лампа Ширма. Конструкція этой лампы весьма простая: лампа состоитъ изъ жестянаго резервуара и круглой керосиновой горѣлки. Во внутрь горѣлки вдвигается трубочка, при помощи которой выдувается порошокъ магнія. Магній, пролетая черезъ огонь и загораясь, образуетъ цѣлый снопъ ослѣпительнаго пламени. Продолжительность горѣнія магнія весьма мала, во всякомъ случаѣ меньше продолжительности испытываемаго нами свѣтоваго ощущенія. Вслѣдствіе такой кратковременности освѣщенія, при первыхъ моихъ опытахъ фотографированія я получалъ изображенія, въ которыхъ замѣтна была только нѣкоторая криволинейная струистость въ расположеніи песчинокъ, вытянутость ихъ, но размazанныхъ изображеній не оказывалось вовсе.

Не имѣя возможности увеличить продолжительность горѣнія магнія въ лампѣ Ширма и за отсутствіемъ другихъ приборовъ, которые давали-бы непрерывную струю порошка магнія, я принужденъ былъ заняться конструированіемъ специальной лампы, которая давала-бы, если не непрерывную струю магнія, то хотя-бы рядъ вспышекъ быстро слѣдующихъ одна за другою. Вскорѣ мнѣ удалось сдѣлать такую лампу. Въ первоначальномъ своемъ видѣ лампа эта, названная мною непрерывнодѣйствующею,

состояла изъ стеклянной спиртовой лампы съ кольцевою горѣлкою и трехгорлой банки съ двумя входившими въ нее трубками. Въ банкѣ помѣщался запасъ магнія. Первая трубка оканчивалась на верху банки, а вторая доходила почти до дна. Первая трубка была соединена резиною съ мячикомъ. При надавливаніи мячика, въ банкѣ сжимается воздухъ, который и стремится затѣмъ уйти черезъ вторую трубку, увлекая за собою частицы магнія, которыя, пролетая черезъ пламя спирта, загораются. Повторяя сжиманіе мячика быстро одно за другимъ,



Черт. 17.

оказалось возможнымъ произвести рядъ вспышекъ, сливавшихся въ одну почти непрерывную струю пламени. Хотя устроенная такимъ образомъ лампа имѣла много недостатковъ, благодаря которымъ часто вовсе не давала вспышекъ, однако при ея посредствѣ мнѣ удалось сдѣлать нѣсколько снимковъ призмъ выпирания.

Убѣдившись по первымъ опытамъ въ возможности графическаго рѣшенія задачи объ опредѣленіи истиннаго вида призмъ выпирания, я занялся усовершенствованіемъ лампы съ цѣлью обезпеченія успѣха дальнейшихъ работъ. Усовершенствованія эти заключались въ слѣдующемъ.

Трубка ведущая воздухъ была первоначально направлена сверху внизъ, почему струя воздуха, проходя черезъ магній, оставляла въ немъ вертикальный каналъ, послѣ чего не увлекала за собою магнія и лампа переставала давать вспышки. Этотъ недостатокъ былъ устраненъ измѣненіемъ направленія воздухопроводной трубки: она была направлена снизу вверхъ (черт. 18), благодаря чему струя воздуха стала разбиваться и давить равномерно на всю поверхность магнія. Трубка, черезъ которую выбрасывается магній, сперва имѣла утоненіе въ верхнемъ концѣ. Благодаря этому, магній засорялъ трубку, уплотнялся въ ней и лампа опять не дѣйствовала. Съ уничтоженіемъ такого утоненія, лампа стала дѣйствовать лучше, хотя за-

соренія и случались, но рѣже. Только съ утоненіемъ или заостреніемъ нижняго конца удалось совершенно обезпечить трубку отъ засоренія. Иногда лампа не давала вспышекъ вслѣдствіе того, что магній дѣлался влажнымъ отъ паровъ спирта, попадавшихъ внутрь резервуара съ магниемъ въ то время, когда сжатый первоначально мячикъ снова расправлялся и втягивалъ въ себя воздухъ черезъ пламя спиртовой лампы и сосудъ съ магниемъ. Этотъ недостатокъ лампы устраненъ укороченіемъ трубки выбрасывающей магній настолько, чтобы она была ниже пламени спирта; кромѣ того въ мячикъ сдѣлана дырочка, черезъ которую въ него можетъ входить воздухъ непосредственно. Въ такомъ видѣ лампа оказалась болѣе удобною чѣмъ лампа Ширма и могла найти себѣ болѣе широкое примѣненіе чѣмъ то, ради котораго она была мною устроена. Въ виду этого я рѣшился познакомить съ нею фотографовъ, для чего и воспользовался устроенною въ Техн. Общ. фотографическою выставкою. Мои ожиданія оправдались и въ настоящее время моя лампа вошла въ общее употребленіе.

Преодоливъ такимъ образомъ техническія трудности, заграждавшія въ началѣ путь къ рѣшенію моей задачи опредѣленія истиннаго вида призмъ выпирания, я принялся за отфотографированіе.

Рядъ полученныхъ мною фотографій *истиннаго* вида кривыхъ скользенія призмъ выпирания подтверждаетъ въ общихъ чертахъ правильность высказанныхъ выше теоретическихъ соображеній относительно *впрямнаго* вида тѣхъ-же кривыхъ и въ значительной степени способствуетъ уясненію характера тѣхъ напряженій, которыя проявляются въ песчаномъ слоѣ подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки.

Фотографія доказала слѣдующее:

Въ общемъ случаѣ выпираніе происходитъ двустороннее, а видъ кривыхъ скользенія зависитъ отъ нѣкоторыхъ особыхъ условій.

1) Если слой ограниченъ сверху горизонтальною плоскостью, а давленіе строго вертикально, то кривыя скользенія располагаются симметрично относительно вертикальной оси, какъ это

видно на фототипіяхъ № 1 и 2 (снимокъ въ $\frac{2}{3}$ натуральной величины). На черт. 14 былъ показанъ вѣроятно видъ кривыхъ скользенія при двустороннемъ выпираніи, причемъ послѣднее разсматривалось какъ результатъ попеременныхъ одностороннихъ выпираній то вправо, то влѣво. Кривыя скользенія, начинаясь у краевъ фундамента, пересѣкались на его оси. На томъ-же чертежѣ 14 хотя и были показаны двѣ кривыя скользенія, исходящія изъ середины подошвы фундамента, но какъ-то игнорировалась возможность одновременнаго образованія двухъ отдѣльныхъ призмъ выпиранія, ограниченныхъ этими кривыми. Фотографія показала нашу ошибку: выпираніе происходитъ именно по этимъ двумъ кривымъ, исходящимъ изъ середины подошвы, что особенно наглядно представляетъ фототипія № 2. Этотъ видъ выпиранія я буду называть двустороннимъ равномернымъ.

2) Съ углубленіемъ фундамента въ песчаный слой выпираемая призма увеличивается, но кривыя скользенія видоизмѣняются. Видъ части кривыхъ между точкою исхода и низшею (въ которой касательная къ кривой горизонтальна) почти не зависитъ отъ глубины заложения фундамента (по крайней мѣрѣ въ предѣлахъ глубинъ погруженія 2—9") видъ-же остальныхъ частей, между низшею точкою и поверхностью слоя, измѣняется съ глубиною заложения, а именно: чѣмъ глубина больше, тѣмъ круче кривыя поворачиваются кверху, стремясь приблизиться къ вертикальному направленію. Поэтому ширина выпираемыхъ призмъ далеко непропорціональна глубинѣ заложения, а слѣдовательно и величинѣ сопротивленія выпиранію. Сравнить кривыя наиболѣе удобно при разсматриваніи насквозь ихъ негативовъ, положенныхъ одинъ на другой такимъ образомъ, чтобы изображенія фундаментовъ совпадали.

На чер. 14 верхняя малая кривая скользенія отдѣляетъ отъ фундамента небольшую массу песку, такъ сказать, не входящую въ сферу выпиранія. Но фототипія № 2 у боковой стѣнки фундамента дѣйствительно видны рѣзко очерченныя песчинки, не принимавшія участія въ движеніи. Подобное явленіе можно было прослѣдить на цѣломъ рядѣ снимковъ; на нѣкоторыхъ-же,

сверхъ того, замѣтно движеніе частиць опускавшихся вдоль фундамента — это движеніе вызывается треніемъ фундамента о песокъ.

3) При нѣкоторомъ отклоненіи направленія давленія отъ вертикальнаго, выпирание можетъ происходить одностороннее (фототипія № 3). Говорю „можетъ“ такъ какъ и при подобныхъ условіяхъ зачастую выпирание происходило двустороннее, но не равномерное, о чемъ будетъ сказано ниже.

Вѣроятная кривая скользенія при одностороннемъ выпираниі, показанная на черт. 12, была начерчена въ предположеніи строго вертикальнаго направленія давленія, а потому первый элементъ этой кривой былъ тоже вертикаленъ. На истинной же кривой односторонняго выпирания первый-же ея элементъ имѣетъ наклонное направленіе, не совпадающее съ боковыми стѣнками фундамента (перпендикулярными къ подошвѣ). Это несоотвѣтствіе истинной кривой съ вѣроятною теоретическою слѣдуетъ приписать неvertикальности направленія давленія. Какъ увидимъ ниже, одностороннее выпирание можетъ происходить и при вертикальномъ давленіи фундамента, и въ этомъ случаѣ первый элементъ кривой скользенія оказывается тоже вертикальнымъ, а слѣдовательно правильность соображеній приведшихъ къ опредѣленію вѣроятнаго вида кривыхъ подтверждается вполне. На черт. 15 показаны пунктиромъ возможные направленія кривыхъ скользенія, исходящихъ изъ разныхъ точекъ подошвы фундамента, между прочимъ тамъ показаны кривыя a и a_1 исходящія изъ крайней точки подошвы, причемъ первый элементъ одной кривой вертикаленъ, а у другой наклоненъ подъ угломъ $90 - \varphi$ къ вертикали ($90 - \varphi$ есть величина угла между плоскостями скользенія эллипсовъ напряженій). При одностороннемъ выпираниі и неvertикальномъ направленіи давленія кривая скользенія повидимому и соотвѣтствуетъ кривой a_1 черт. 15.

4) Положеніе, которое принимаютъ эллипсы напряженій подъ вліяніемъ давленія фундамента, а съ ними и видъ кривыхъ скользенія должны, очевидно, зависѣть отъ первоначальнаго положенія эллипсовъ. Послѣднее-же зависитъ отъ вида верхней

поверхности слоя. Это весьма наглядно доказывается фототипією № 4, снятой со слоя песка, ограниченного естественнымъ откосомъ. Изъ ряда снимковъ при иныхъ пологостяхъ верхней поверхности слоя видно, что кривизна кривыхъ скользянія строго соотвѣтствуетъ этой пологости. Въ одномъ изъ опытовъ слой былъ ограниченъ двумя обратными откосами, поднимающимися отъ фундамента въ стороны. Кривыя приняли форму приближающуюся къ дугѣ круга, начинавшейся у середины подошвы и упиравшейся другимъ концомъ въ боковыя стѣнки фундамента.

5) Если слой песку расположенъ уступомъ или, другими словами, ограниченъ двумя горизонтальными плоскостями, расположенными на разныхъ высотахъ по обѣимъ сторонамъ фундамента, то и въ этомъ случаѣ положеніе эллипсовъ напряженій должно отличаться отъ положенія ихъ при ограниченіи слоя одною горизонтальною плоскостью, а вмѣстѣ съ этимъ долженъ измѣниться и видъ кривыхъ скользянія. Дѣйствительно, фотографія показываетъ (фототипія № 5) что въ этомъ случаѣ выпирание происходитъ двустороннее, но не равномерное. Неравномерность выпирания заключается въ томъ, что со стороны меньшей толщины слоя песку (надъ подошвою фундамента) выпирается большая призма, а со стороны большей толщины слоя—меньшая. При этомъ исходная точка кривыхъ скользянія отходить отъ середины подошвы фундамента въ сторону большей толщины слоя.

При данной разницѣ въ относительной высотѣ слоевъ, но при большемъ погруженіи фундамента, вліяніе этой разницы, разсуждая теоретически, должно имѣть меньшее значеніе, и наоборотъ: при данномъ погруженіи фундамента (считая относительно поверхности болѣе тонкаго слоя), съ увеличеніемъ разности толщины слоевъ, вліяніе этой разности должно увеличиваться. Рядъ снимковъ, произведенныхъ при различныхъ комбинаціяхъ глубины заложенія и разности толщинъ слоевъ, вполне оправдываютъ это соображеніе. Изъ того-же ряда снимковъ можно сдѣлать слѣдующій выводъ: стороны выпираемыхъ призмъ, измѣряемая по подошвѣ фундамента, обратно пропорціональны высотамъ слоевъ песку надъ плоскостью подошвы, т. е. обрат-

но пропорціональны сопротивленіямъ выпиранію, такъ какъ послѣднія пропорціональны высотамъ слоевъ или глубинамъ погруженія фундамента. Тоже самое, между прочимъ, слѣдуетъ и изъ формулы П. Янковскаго. При болѣе или менѣе значительной разности высотъ слоевъ надъ плоскостью подошвы фундамента, точка исхода кривыхъ скольженія выпираемыхъ призмъ можетъ подойти къ самому краю фундамента и тогда выпираніе изъ двусторонняго должно перейти въ одностороннее. Въ нѣкоторыхъ опытахъ это дѣйствительно и получалось, чаще-же, со стороны болѣе толстаго слоя двигалась тоненькая струйка песку.

6) Въ случаѣ ограниченія слоя песку какою либо вертикальною стѣнкою, выпираніе представлялось возможнымъ въ томъ лишь случаѣ, если выпираемая призма можетъ *помѣститься* между этою стѣною и фундаментомъ, какъ это показано на черт. 16. Изъ вышеизложеннаго мы уже знаемъ, что ширины выпираемыхъ призмъ могутъ измѣняться (напр. при уступчатомъ ограниченіи слоя) въ зависимости отъ разности сопротивленій выпиранію по обѣимъ сторонамъ фундамента, а потому слѣдуетъ допустить, что и при ограниченіи слоя вертикальною стѣнкою (въ извѣстныхъ предѣлахъ разстоянія ея отъ фундамента) со стороны послѣдней почти во всякомъ случаѣ можетъ выпираться нѣкоторая призма песку, такъ какъ среди всевозможныхъ кривыхъ скольженія, исходящихъ изъ различныхъ точекъ подошвы фундамента, должна найтись и такая, которая можетъ помѣститься между фундаментомъ и этою стѣнкою. Дѣйствительно, фототипія № 6 показываетъ, что и въ случаѣ расположенія вертикальной стѣнки, на разстояніи меньшемъ ширины (по поверхности слоя) призмы при равномерномъ двустороннемъ выпираніи, выпираніе происходитъ, но неравномерное, причѣмъ ширина призмы со стороны стѣнки (измѣряемая по поверхности слоя) опредѣляется разстояніемъ стѣнки отъ фундамента.

7) Сопоставляя вліяніе стѣнки съ вліяніемъ разности въ толщинѣ слоевъ песку (фототип. 5 и 6), можно придти къ заключенію, что всякая стѣнка, въ извѣстныхъ предѣлахъ разстоянія ея отъ фундамента, оказываетъ сопротивленіе выпиранію и ве-

личина этого вліянія можетъ быть оцѣниваема величиною разности высотъ слоевъ песку, вызывающей одинаковое со стѣнкою распредѣленіе выпираемыхъ призмъ. Наиболѣе наглядно выразилась одинаковость вліяній стѣнки и разности высотъ слоевъ песку при слѣдующихъ опытахъ: со стороны стѣнки слой песку (считая отъ плоскости подошвы) постепенно уменьшался, а вмѣстѣ съ этимъ уменьшалась и разница въ величинѣ выпираемыхъ призмъ; наконецъ, при нѣкоторой разности высотъ слоевъ, было достигнуто совершенно равномѣрное двустороннее выпирание, которое указывало на равенство сопротивленій по обѣимъ сторонамъ фундамента.

8) Вліяніе вида нижней поверхности слоя на размѣры выпираемыхъ призмъ показываетъ фототипія № 7.

Приведенными результатами фотографическаго изслѣдованія истиннаго вида кривыхъ скользянія призмъ выпирания хотя и далеко не исчерпывается вопросъ о работѣ песка въ основаніяхъ сооружений, но я позволяю себѣ ими ограничиться въ виду того, что поставленная мною ближайшая задача — выясненіе сущности процесса выпирания — разрѣшается ими достаточно опредѣленно и наглядно.

На этомъ можно было бы и закончить мое сообщеніе, но мнѣ хочется сказать еще нѣсколько словъ въ защиту избраннаго мною фотографическаго способа изслѣдованія вида кривыхъ и тѣхъ преимуществъ, которые онъ имѣетъ предъ способомъ Форхеймера, рекомендованномъ мнѣ однимъ изъ критиковъ моихъ опытовъ *).

Способъ Форхеймера заключается въ слѣдующемъ: масса сыпучаго тѣла составляетъ изъ чередующихся слоевъ песку разной окраски, послѣ производства той или иной деформациі этого тѣла, въ него наливается расплавленный парафинъ, который, застывая, связываетъ отдѣльныя песчинки и обращаетъ такимъ образомъ сыпучее тѣло въ твердое, которое можно разрѣзать на тонкія плитки. По виду расположенія въ этихъ плиткахъ разноцвѣтныхъ слоевъ и можно судить о томъ, какія произошли перемѣщенія частицъ при деформациі.

*) Журн. М. П. С. 1889 г. № 13 „Техническая корреспонденція“ стр. 13.

По отношенію къ вопросу изслѣдованія процесса разрушенія песчаного слоя дѣйствіемъ мѣстной нагрузки, способъ Форхеймера имѣетъ слѣдующій недостатокъ: онъ даетъ только окончательное положеніе частицъ сыпучаго тѣла при сравнительно большихъ абсолютахъ ихъ перемѣщеніяхъ, что-же касается начального положенія тѣхъ-же частицъ и траекторіи ихъ движенія, то они остаются неизвѣстными. Фотографическій-же способъ даетъ возможность не только видѣть, но даже измѣрять траекторіи движенія любой точки и судить объ относительныхъ скоростяхъ движенія въ различныхъ частяхъ сыпучаго тѣла. Однимъ словомъ способъ Форхеймера даетъ конечный результатъ деформации, а фотографическій — показываетъ весь процессъ деформации, слѣдовательно рѣшаетъ задачу болѣе полно.

Способъ Форхеймера болѣе сложенъ, требуетъ больше времени: для каждаго новаго опыта надо составлять сыпучее тѣло изъ разноцвѣтныхъ слоевъ, выжидать пока парафинъ не остынетъ настолько, что его можно будетъ рѣзать, не опасаясь вызвать новое перемѣщеніе частицъ въ массѣ.

Закрѣпленіе слоевъ парафиномъ можно замѣнить фотографированіемъ ихъ послѣ производства деформации, если опыты ведутся въ стеклянномъ сосудѣ, но результаты получатся тѣ-же: мы будемъ имѣть только окончательную картину деформации. Если-же снимать песокъ во время движенія, то для выясненія процесса выпирания нѣтъ надобности въ разноцвѣтныхъ слояхъ. Отнимая-же отъ способа Форхеймера парафинъ и разноцвѣтные слои, отъ него ничего не останется, фотографированіе-же песчинокъ во время ихъ движенія—составляютъ сущность избраннаго мною способа изслѣдованія.

Если задаться цѣлью изслѣдовать относительныя скорости движенія въ различныхъ частяхъ выпираемой призмы, то, для большей наглядности картины движенія, стоитъ только въ массу желтаго песку прибавить горсть бѣлаго, какъ это и было мною сдѣлано при нѣкоторыхъ опытахъ (фототипіи 4—7).

Возможность измѣренія относительныхъ скоростей и траекторій движенія частицъ, при фотографированіи движущагося песка, основывается на слѣдующемъ:

1) Въ предположеніи непрерывнаго освѣщенія.

Всѣ частицы фотографируются одинаковое время; вслѣдствіе того, что частица двигается при фотографированіи, ея изображеніе получается вытянутымъ; величина вытянутаго изображенія пропорціональна пройденному частицею пути; пройденные же различными частицами въ одинаковый промежутокъ времени пути пропорціональны скоростямъ.

2) При прерывистомъ освѣщеніи рядомъ вспышекъ, быстро слѣдующихъ одна за другою.

Одна и таже частица бываетъ снята въ различныхъ точкахъ ея пути, такъ что получается столько изображеній одной и той же частицы, сколько было вспышекъ; чѣмъ быстрѣе двигалась частица, тѣмъ ближе одно къ другому всѣ ея изображенія, тѣмъ короче рядъ этихъ изображеній; число изображеній различныхъ частиць одинаковое, а потому по длинѣ рядовъ этихъ изображеній и можно судить объ относительныхъ скоростяхъ. Особенно отчетливо выходятъ изображенія бѣлыхъ частиць.

Фотографическій способъ изслѣдованія процесса выпирания имѣетъ и свой недостатокъ. Дѣйствительно: онъ даетъ возможность видѣть кривыя скользенія, расположенныя въ одной только плоскости или, лучше сказать, расположенныя по одному только направленію, тогда какъ можно думать, что выпирание происходитъ во всѣ четыре стороны, если фундаментъ погружается въ слой песка, неограниченный со всѣхъ сторонъ. Способъ же Форхеймера даетъ возможность получать плитки по всевозможнымъ направленіямъ, а потому совершеннѣе способа фотографическаго. Положимъ, что это и такъ, но спрашивается—всегда ли выпирание будетъ происходить во всѣ четыре стороны? Я позволяю себѣ утверждать, что такое выпирание если и будетъ, то только для фундаментовъ круглыхъ, квадратныхъ и имѣющихъ форму правильнаго многоугольника, въ тѣхъ же случаяхъ, когда фундаментъ въ планѣ имѣетъ форму прямоугольника, то выпирание происходитъ только въ двѣ стороны, параллельно меньшему измѣренію подошвы фундамента. Это доказали первые наши опыты.

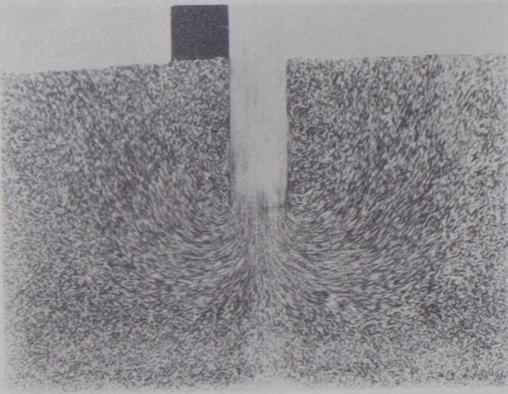
Такимъ образомъ, если стержень прибора, въ которомъ про-

изводится выпирание песка, сдѣланъ не квадратный, а прямоугольный и расположенъ такимъ образомъ, что къ стеклу примыкаетъ узкая его сторона, то выпирание въ слоѣ песка, ограниченномъ стеклянною стѣнкою, имѣетъ тотъ же самый видъ, какъ и въ слоѣ неограниченномъ со всѣхъ сторонъ. Это обстоятельство было принято во вниманіе при устройствѣ моего прибора, а потому я смѣю утверждать, что на полученныхъ фотографіяхъ изображены *истинныя* кривыя скользенія призмъ выпирания.

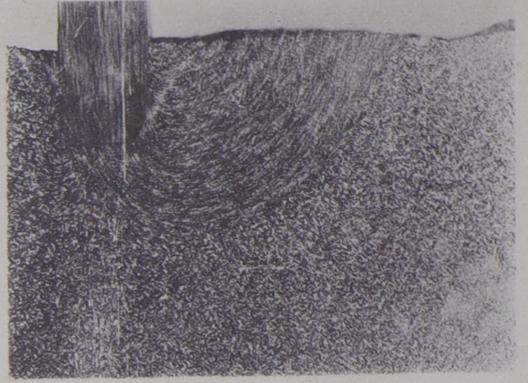
Сопоставляя *истинный* видъ призмъ выпирания съ тѣмъ *вѣроятнымъ* ихъ видомъ, который былъ установленъ путемъ теоретическихъ соображеній, мнѣ кажется можно утверждать, что соображенія эти въ настоящее время оправдались вполне, т. е. другими словами, что сущность процесса разрушенія песчаного слоя подъ вліяніемъ мѣстной погрузки можетъ считаться теперь вполне разъясненною.

Для рѣшенія вопроса о временномъ сопротивленіи песка разрушенію путемъ выпирания остается только высказанныя выше теоретическія соображенія облечь въ математическую форму. Однако, задача эта весьма трудная и рѣшится вѣроятно еще не скоро. Поэтому въ настоящее время намъ поневолѣ приходится довольствоваться рѣшеніями приблизительными, какія и могутъ дать современные искусственныя схемы взаимодѣйствія призмъ съ прямолинейными очертаніями. Изъ всѣхъ такихъ схемъ наиболее цѣлесообразною, очевидно, должно быть та, которая приводитъ къ результатамъ наиболее близко подходящимъ къ наблюдаемымъ на опытѣ. Поэтому остается только пожелать, чтобы такіе опыты были произведены, и притомъ при обстановкѣ болѣе убѣдительною, и тѣмъ былъ положенъ конецъ нѣсколько бесплодному теоретическому спору о сравнительныхъ достоинствахъ той или иной изъ имѣющихся въ настоящее время схемъ взаимодѣйствія прямолинейныхъ призмъ, какъ не имѣющихъ ничего общаго съ истиннымъ процессомъ разрушенія песчаного слоя подъ вліяніемъ мѣстной нагрузки.

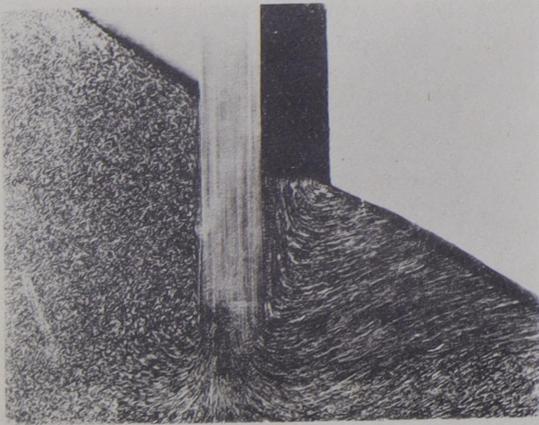
1.



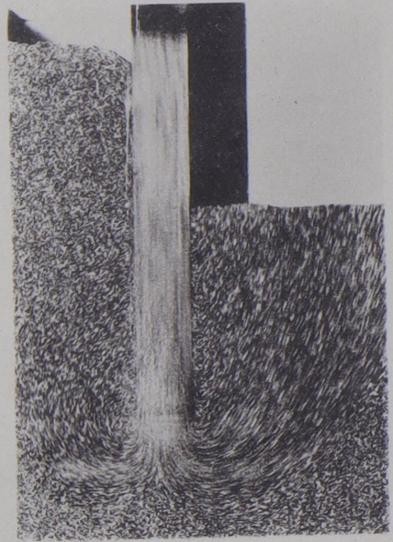
3.



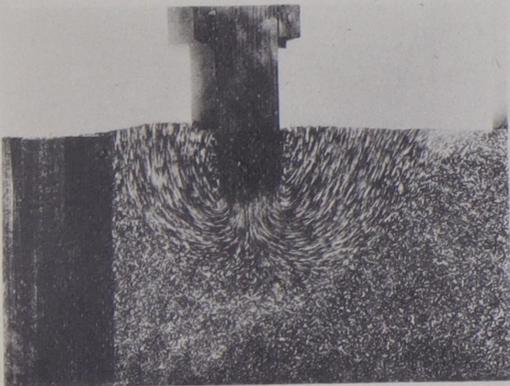
4.



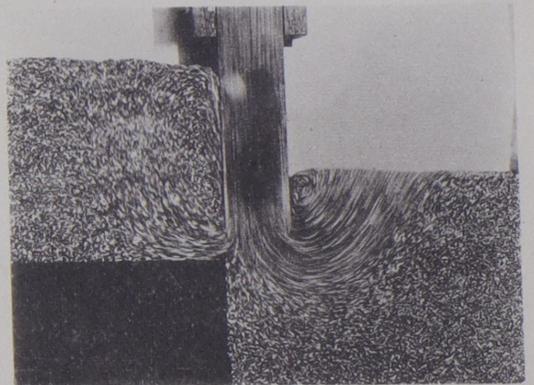
5.

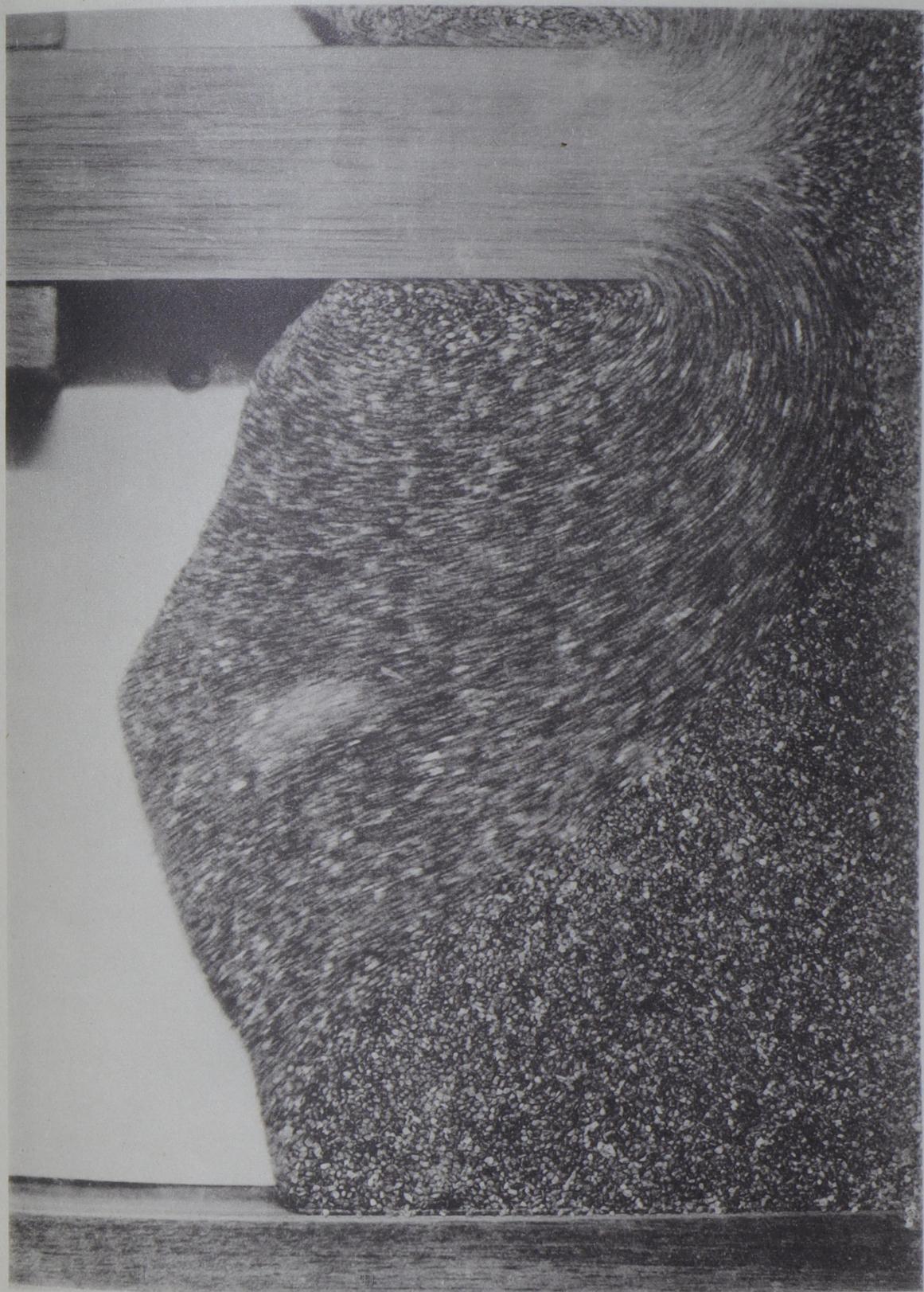


6.



7.





Художеств. Фотогипс А. И. Вильборга

О.-Петербург. Машинский, 19.