

Н.Н. Давиденков

О давлении земли на подпорные стенки

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 66.0
ББК 35
Н11

Н11 **Н.Н. Давиденков**
О давлении земли на подпорные стенки / Н.Н. Давиденков – М.: Книга по Требованию, 2024. – 46 с.

ISBN 978-5-458-60495-6

ISBN 978-5-458-60495-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Второй особенностью опытов Фельда, которая должна была их отличать от прежних, явилась новая интерпретация угла трения φ , входящего в формулы всех теорий. По предложению Вольтмана (1799) вместо φ всегда подставляли величину естественного откоса грунта, идентифицируя его с углом внутреннего трения. Еще Буссинеск указал, что такое отождествление неправильно; тем не менее его справедливое замечание было забыто. Кроствет (Crostwaith) в 1916—1920 гг.¹⁾, повидимому, впервые занялся специальным определением угла внутреннего трения, причем вычислял его тремя разными способами: 1) по способу погружения штампа, пользуясь формулой Ренкина для глубины проникания; для рыхлого песка получилось $\varphi = 51\frac{1}{2}^\circ$, 2) по измеренному давлению на вертикальную стенку и формулам Кулона и Ренкина; получилось $\varphi = 42^\circ 20'$; 3) по опытам на перерезывание; получилось $\varphi = 23^\circ$. Расходимость этих трех величин привела автора к убеждению, что он имеет здесь дело с тремя разными видами трения.

Считая, что нельзя проверять применимость формул, если из тех же формул определяются входящие в них постоянные, Фельд применил для определения коэффициентов трения независимый способ. Введя понятие внутреннего сопротивления (трение в покое = трение + сцепление) в отличие от внутреннего трения (трение в движении), он ставил на выравненную поверхность исследуемого грунта бездонный ящик, наполненный тем же грунтом, и измерял силу, потребную для а) сдвижения ящика с места и б) равномерного дальнейшего его передвижения. Коэффициент трения во втором случае должен быть меньше первого на величину сил сцепления. Для своего песка автор получал следующие числа: угол внутреннего трения — 34° , угол внутреннего сопротивления — 37° . При этом угол естественного откоса был $= 40^\circ$.

Для производства своих опытов Фельд повторил в тройном масштабе (с некоторыми изменениями) установку Мюллер-Бреслау, как наиболее совершенную из всего, примененного до сих пор.

Был построен железобетонный ящик в $5\frac{1}{2}$ фут. шириною, 9' длиною и 6' высотой (передней стенки; задняя имела высоту 12'). Толщина стенок — 6". Верх ящика имел уклон к стенке в 34° (угол $<$ естественного откоса грунта); все устройство было расположено на солидном фундаменте с обеспечением надлежащего дренажа. Ящик облицован деревом. Испытываемая подпорная стенка являлась свободно стоящей передней стенкой ящика, сделанной из дерева; давление на нее измерялось посредством десятичных весов (вместо измерения деформации передаточных стержней, как у Мюллер-Бреслау). Двое весов мощностью по одной тонне принимали на себя вертикальную составляющую давления на стенку и трое — горизонтальную. Перемещение плат-

¹⁾ Min. Proc. Inst. Civ. Engin. 1916 и 1920.

формы по вертикали, благодаря специально установленным упорам для коромысла, не могло превосходить $1/2000''$ (0,012 мм.).

Вертикальная составляющая передавалась на весы посредством двух 1" стержней, поддерживающих нижнее ребро стенки в двух точках в расстоянии около $1/4$ ширины ее от краев. Три горизонтальных стержня было расположено в вершинах треугольника: один в середине верхнего ребра и два по нижним углам; горизонтальное давление посредством коленчатых рычагов с неподвижной осью вращения передавалось на платформы десятичных весов. Все передающие части были сделаны настолько жесткими, что исключена была всякая возможность их деформации.

Чтобы исключить всякое трение о боковые стенки, последние в части, соприкасающейся с призмой обрушения, были одеты железными листами в форме треугольников, которые опирались на стенки ящика посредством трех роликов и могли скользить вместе с призмой обрушения (такую систему нельзя признать удачной, так как она базируется на идее призмы обрушения, положение которой заранее неизвестно, да и самый факт существования не доказан). Впрочем, поверочные опыты с неподвижными стенками показали, что влияние бокового трения ничтожно. Все щели были закрыты полосами промасленной бумаги, чтобы предупредить высыпание песка.

При производстве опытов был принят следующий порядок, признанный необходимым для того, чтобы вместо активного давления не измерить случайно пассивного (при обратном движении стенки). После каждого взятого отсчета грузы на коромысле весов ставились на нагрузку, заведомо превышавшую следующий ожидавшийся отсчет; для производства же наблюдения эти грузы осторожно передвигались обратно; пока коромысло не приподнималось в горизонтальное положение. В этот момент стенка, очевидно, подавалась в сторону действия давления грунта, хотя и на ничтожную величину, что исключало всякую возможность встретиться с пассивным давлением земли. Поверочные наблюдения показали, что те ничтожные передвижения стенки, которые могли иметь место при переходах коромысла из одного край-

него положения в другое, практически не отражались на величине измеренного давления.

Принятое расположение пяти точек опоры стенки (рис. 1) позволяло определить: 1) величину вертикальной составляющей давления на стенку V , 2) величину горизонтальной со-

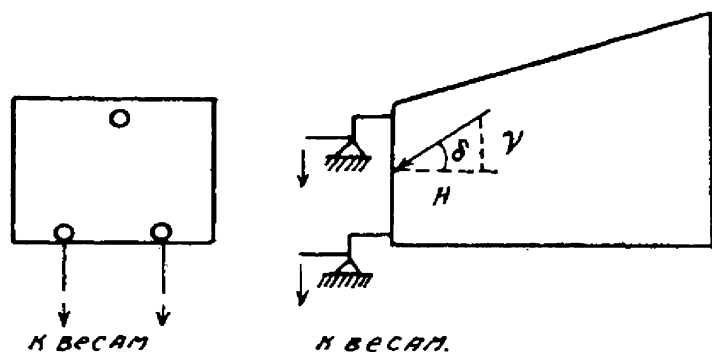


Рис. 1.

ставляющей H , 3) направление полного давления из условия $tg\delta = \frac{V}{H}$ и 4) точку приложения этой равнодействующей (из условия равенства нулю моментов всех сил относительно нижнего ребра стенки).

Для сыпучего материала, наполнявшего ящик, каждый раз определялись: плотность, естественный откос, коэффициент внутреннего трения, коэффициент внутреннего сопротивления и содержание влаги. Материалом этим служил песок уд. веса 2,6, с содержанием влаги от 9 (вначале) до 3 (к концу опытов) %; количество пыли и глины ($< 0,01\%$) не превышало $2\frac{1}{2}\%$.

Задача опытов заключалась в измерении давлений на стенку при различных комбинациях факторов: при вертикальном и наклонном в обе стороны расположении стенки, при горизонтальной и наклонной засыпке, при различной шероховатости стенки (дерево, стекло, металл), при различных физических свойствах песка, при разной степени его уплотненности (усадке) и при статической и динамической нагрузке свободной поверхности засыпки.

Главнейшие результаты опытов оказались следующими:

1. Давление на вертикальную стенку при горизонтальной поверхности засыпки. В этом случае теории Кулона и Ренкина дают одни и те же формулы. Определенный опытом угол внутреннего сопротивления был $= 37^\circ$. Для этого значения φ в формуле распора земли

$$H = \frac{1}{2} \gamma h^2 tg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) = \frac{1}{2} \gamma \zeta h^2$$

коэффициент ζ получается равным 0,248 (при угле $\varphi = 40^\circ$ естественного откоса $\zeta = 0,218$). По теории Понселе для горизонтальной составляющей распора (который в этом случае не нормален к стенке) при определенных из опытов углах трения ζ получается $= 0,193$.

Опыты показали, прежде всего, что давление на стенку не горизонтально, а наклонено к горизонту под углом около 33° (угол трения между деревянной стенкой и грунтом при непосредственном измерении оказался $= 32^\circ 30'$).

Точка приложения равнодействующей находится на высоте от 0,35 до 0,40 h , т. е. несколько выше обычно принимаемого 0,33 h . Для горизонтальной составляющей ζ получилось из опыта $= 0,264$, что заметно больше даваемого формулой Кулона-Ренкина и совпадает с этой формулой лишь при $\psi = 36^\circ$ (на 1° менее определенного из опытов угла внутреннего трения) (рис. 2).

Формула Понселе, как видим, дает худшие результаты, чем самая элементарная формула Кулона.

2. Давление на вертикальную стенку при наклонной поверхности засыпки. Засыпка возвышалась над уровнем стенки под разными углами к горизонту (от -34° до $+34^\circ$).

Сопоставляя опытные данные с теоретическими вычислениями по различным гипотезам, можно прийти к следующему заключению.

По величине горизонтальная составляющая дается лучше всего элементарной теорией призмы обрушения, в предположении отсутствия трения между стенкой и грунтом ($\zeta = \left(\frac{\cos \varphi}{n+1}\right)^2$

где $n = \frac{\sqrt{\sin \varphi \cdot \sin (\varphi - \epsilon)}}{\cos \epsilon}$; φ — угол внутреннего сопротивления, ϵ — угол

наклона засыпки). Вертикальная составляющая, как в случае 1, получается из условия, что равнодействующая наклонена к стенке под углом трения φ' , между стенкой и грунтом. Расхождение эксперимента с теорией, в общем небольшое, достигает, однако, местами 12%, и по общему характеру опытная кривая (рис. 3) не напоминает ни одной из теоретических.

Точка приложения равнодействующей находится на высоте от 0,33 до 0,40 h , и притом тем выше, чем выше засыпка.

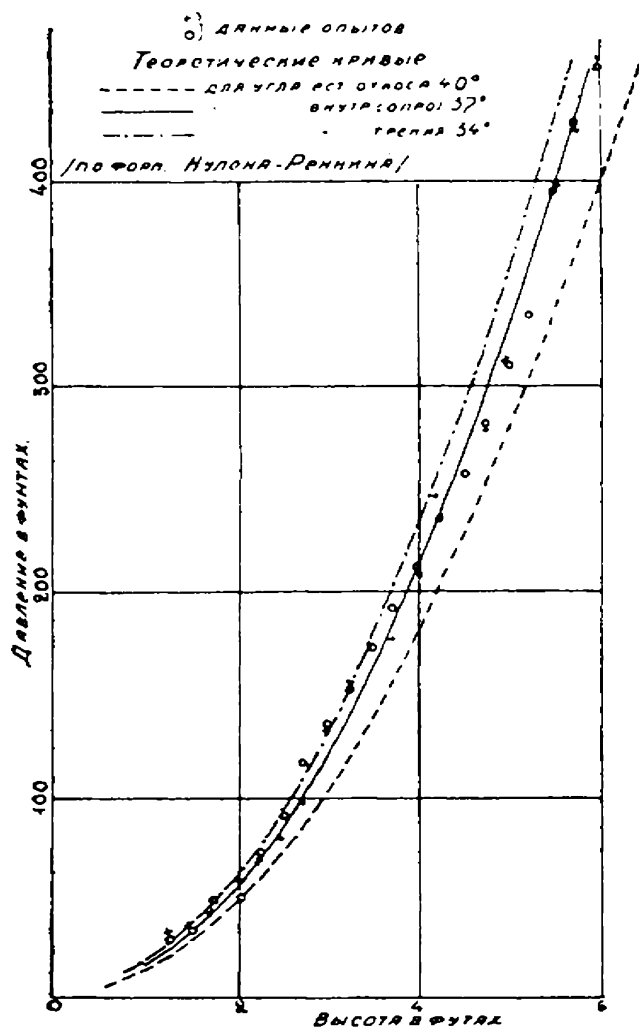


Рис. 2.

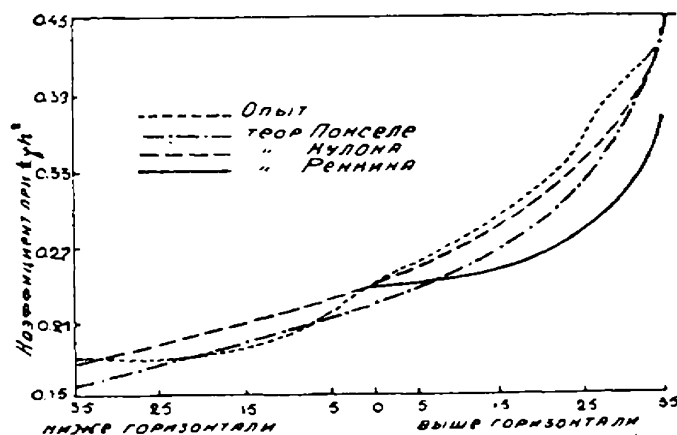


Рис. 3.

3. Давление на наклонную стенку при горизонтальной засыпке с положительным наклоном (от вертикали вверх) в сторону стенки. Было испытано 4 разных уклона от $1/12$ до $1/4$. Давление на стенку попрежнему было направлено под углом трения к нормали. Для величины же этого давления опыт дал числа, значительно меньшие теоретических по любым формулам. Меньше других расхождение (порядка 20%) дает метод Понселе, т. е. призма обру-

шения с учетом трения о стенку. Автор отмечает, что при всем несовершенстве постановки опыта в этом трудном случае ошибка не должна была превышать 10%.

При наклоне (от вертикали вверх) в сторону засыпки замечалось отставание грунта от стенки. Тем не менее в этом случае результаты опытов гораздо лучше согласовались с формулами Понселе, и расхождение нигде не достигало 10% (рис. 4).

4. Был произведен также ряд наблюдений для выяснения реальности существования призмы обрушения. С этой целью поверхность песка в ящике загружалась дополнительным слоем песка, толщиной

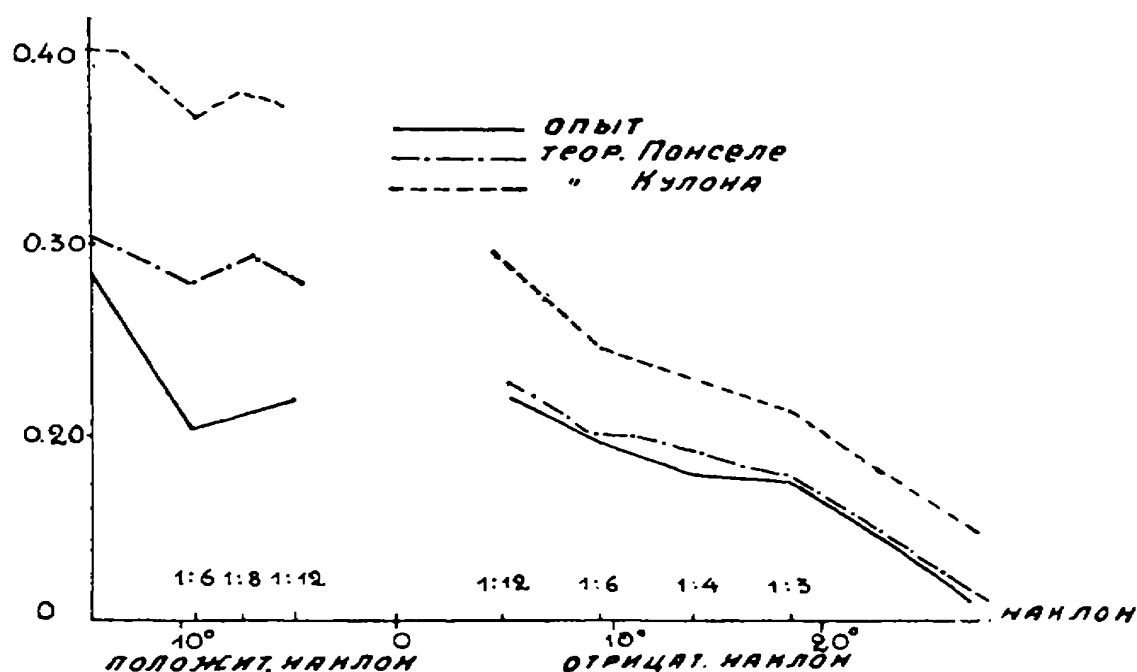


Рис. 4.

в 1 фут, который последовательно передвигался к стенке, начиная с конца ящика. Опыты показали, что давление на стенку оставалось неизменным, пока добавочная нагрузка не приближалась к вычисленной теоретически границе призмы обрушения; начиная же с этого момента наблюдалось увеличение давлений, в особенности вертикального.

Однако, когда опыты стали производиться с более значительной временной нагрузкой (100 фун. на кв. фут), в виде ящиков с гвоздями, картина переменилась, и заметное увеличение давления стало наблюдаться при нагрузке, даже выходящей за пределы призмы; и только степень этого увеличения была гораздо больше, когда груз располагался на призме. Таким образом реальность призмы, как явления, обуславливающего распор, не подтвердилась.

Обнаружено было также типичное явление гистерезиса: по удалении груза давление не сразу возвращалось к первоначальной величине и требовало некоторого времени (нескольких дней).

5. С целью выяснения постоянства во времени величины распора (относительно которой и у некоторых прежних экспериментаторов возникали сомнения), были произведены повторные наблюдения в течение нескольких часов и дней. При этом обнаружилось, как и следовало ожидать, что распор заметно изменяется в зависимости от температуры, влажности и просто времени. Наибольшее давление обычно наблюдалось вскоре (через 1—2 часа) после засыпки; затем начинаются колебания, амплитуда которых имеет порядок 6—12%. Повышение температуры влечет за собою небольшое увеличение давления с повышением точки его приложения, но с сохранением направления; понижение вызывает обратное явление.

Резюмируя выводы из всех своих многочисленных опытов, которые мы здесь описали только в главнейших чертах, автор приходит к следующим заключениям.

1. Распределение давления внутри засыпки не подчиняется ни гидростатическому закону, ни законам теории упругости.

2. Не существует резко очерченной ни призмы обрушения, ни границы ее на поверхности засыпки.

3. Боковой распор земли во всех случаях направлен под углом к нормали, равным углу трения (φ') между стенкой и грунтом.

4. Точка приложения распора находится выше $1/3$ и ниже 0,4 высоты стенки.

5. Для вертикальной стенки с горизонтальной засыпкой величина горизонтальной составляющей распора лучше всего получается по формуле (общей для теории Ренкина и Кулона):

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 t g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

если вместо φ подставить угловой коэффициент внутреннего сопротивления грунта (статического трения).

Вертикальная составляющая определится из условия 3.

6. Для вертикальной стенки с наклонной засыпкой (под углом ϵ к горизонту) наилучшие результаты дает теория Кулона (не учитывающая трения о стенку):

$$H = \frac{1}{2} \gamma h^2 \left(\frac{\cos \varphi}{n+1} \right)^2, \text{ где } n = \sqrt{\frac{\sin \varphi \cdot \sin(\varphi - \epsilon)}{\cos \epsilon}}.$$

7. Для наклонной стенки (под углом α к вертикали) с любой засыпкой (под углом ϵ) следует пользоваться формулами теории Понселе (т. е. теории Кулона с поправкой на трение о стенку):

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \left[\frac{\cos(\varphi - \alpha)}{(n+1) \cos \alpha} \right]^2 \cdot \frac{1}{\cos(\varphi' + \alpha)},$$

где

$$n = \sqrt{\frac{\sin (\varphi + \varphi') \sin (\varphi - \varepsilon)}{\cos (\varphi' + \alpha) \cos (\alpha - \varepsilon)}} \\ H = E \cos (\varphi' + \alpha).$$

Теория Кулона без поправки на трение дает в этом случае слишком большие значения распора.

8. Теория Ренкина дает результаты, не согласующиеся с опытом (кроме частного случая 5) ¹⁾.

В этих выводах нас не может не поразить та безнадежность, с которой автор относится к теории. Ведь с теоретической точки зрения представляется явным абсурдом предложение вычислять горизонтальную составляющую для вертикальных стенок по формулам, предполагающим давление горизонтальным (Кулон), а вертикальную получать из нее путем введения угла трения. Ясно, что мы имеем дело здесь с чистым эмпиризмом, который довольствуется подбором математических формул, удовлетворительно изображающих реальное явление, не интересуясь их логическим происхождением и связанностью с какой либо теорией. Такой подход, действительно, характеризует современную американскую школу; но едва ли можно ожидать от него большой продуктивности для техники.

2. Опыты других исследователей 1916—1923 гг.

Рядом с тщательными и разносторонними опытами Фельда остальные работы последних лет представляются гораздо менее интересными, а потому мы ограничимся здесь их самым кратким описанием.

Фультон ²⁾ произвел в 1920 г. опыты со стенкой, имевшей, правда, большую высоту в 7 фут., но построенной по методу вращения вокруг нижнего ребра. Величина опрокидывающего момента определялась посредством измерения при помощи экстенсометра Юинга удлинения в стальном стержне, удерживавшем стенку. Таким образом опыты исходили также из идеи масштаба, но были гораздо менее совершенны. Полученные результаты сравнивались с данными различных теорий, причем автор пришел к следующим выводам:

1. Экспериментальные данные приблизительно согласуются с теоретическими формулами, вытекающими из теории Понселе. При вычислении теоретических величин принималось, что равнодействующая приложена в расстоянии $1/3$ от нижнего ребра стенки

¹⁾ Здесь уместно будет отметить, что опыты Мюллер-Бреслау, по способу которого была исполнена установка Фельда, дали несколько иные результаты, именно, из формул были признаны наиболее оправдывающимися формулы Понселе; равнодействующая давления оказалась образующей с нормалью угол в $19-22\frac{1}{2}^\circ$.

²⁾ Min. Proc. Inst. Civ. Eng. 1920.

и образует угол с нормалью, равный углу естественного откоса грунта.

2. Для стен, несущих временную нагрузку на части засыпки, формулы эти требуют видоизменения, которое может состоять в замене многоугольной призмы обрушения равновеликой треугольной. При этом точка приложения равнодействующей может подняться на высоту от 0,33 до 0,364 h .

Теория Ренкина давала преувеличенные значения, причем отклонение было особенно значительно для наклонных стенок и достигало 40—50%.

Как видно, опыты эти должны были отличаться крупным масштабом, но не были обставлены достаточно тонко.

Кроствет (Crostwaith) ¹⁾ наряду с определением коэффициента внутреннего трения, о котором упоминалось выше, производил также опыты с определением давления земли на стенки. Он работал с небольшой вертикальной стенкой, опертой нижним ребром, и определял опрокидывающий момент по натяжению струны, привязанной к верхнему ребру. Эти опыты привели его к убеждению, что распор, определенный по формулам Кулона и Ренкина, получается преувеличенным, в особенности при временных нагрузках. Стенки, рассчитанные по Ренкину с углом естественного откоса φ , имели запас устойчивости в $2\frac{1}{2}$ —4 раза.

Чтобы проверить теорию призмы обрушения, он устраивал второе дно, покрытое слоем приклеенного к нему песка, которое можно было располагать под различными углами к стенке и наблюдать момент, начиная с которого давление на стенку падает; отвечающее этому моменту положение дна и должно представить из себя положение плоскости обрушения (очевидно, слой неподвижного песка, приклеенного к доске, ни в какой степени не может заменить свободных зерен, многократно переворачивающихся во время скольжения). Эти опыты показали, что при отсутствии временной нагрузки теория Понселе дает хорошие результаты, при наличии же нагрузки дает значения, преувеличенные на 30%. Такое наблюдение привело автора к убеждению, что лучше не вводить в расчет трения грунта о стенку и что угол φ в действительности — угол внутреннего трения, а не естественного откоса. Вычисляя его на основании опытных значений распора, он получал $\varphi = 42^{\circ}20'$, при угле естественного откоса в 35° (отметим, что у Фельда соотношение между этими обоими углами получалось обратное).

Следующие опыты были поставлены Кростветом для ответа на вопрос, оказывает ли трение о стенку влияние на горизонтальную составляющую распора. Длинный ящик был распилен по середине

¹⁾ Min. Proc. Inst. Civ. Eng. 1920.

на две половины, из которых одна была укреплена неподвижно, а другая поставлена на ролики. Когда ящик был наполнен песком, давление, передававшееся на плоскость разреза от одной половины на другую, могло быть измерено посредством измерения натяжения соединяющих обе половины струн. Затем поставленная на ролики половина ящика была повернута на 180° вокруг вертикали так, что теперь к песку прилегала наружная стенка ящика, покрытая приклеенным песком. По мысли автора эта операция была равнозначна замене песка шероховатой стенкой, и если трение между стенкой и песком оказывает влияние на величину горизонтальной составляющей распора, то во втором случае напряжение в соединительной струне должно было получиться другим. Большое число опытов показало, что в действительности этого изменения не наблюдается.

Отсюда был сделан вывод, что трение между стенкой и грунтом не следует вводить в расчеты.

Выводы, к которым пришел Кроствет на основании своих работ, следующие:

1. Плоскость обрушения может служить удобной математической концепцией, но на самом деле не существует.

2. Угол естественного откоса есть физическая постоянная, относящаяся лишь к поверхности грунта, внутри же массы грунта он должен быть заменен углом внутреннего трения.

3. Последний угол есть величина переменная, изменяющаяся в зависимости от состояния сыпучего тела: рыхлого, уплотненного различными способами и т. п.

4. Трение между стенкой и засыпкой не влияет на величину распора (точнее, горизонтальной составляющей его — ибо вертикальная не измерялась).

5. Теория призм обрушения, принимающая во внимание трение о стенку (Понселе) и пользующаяся углом естественного откоса, дает приемлемые результаты для стенок без нагрузки, но совершенно непригодна для случая временной нагрузки.

Выводы эти, за исключением 5, не противоречат выводам Фельда; замечательно, что, как и у последнего, теория призм обрушения оказалась ближе к действительности, чем Ренкина.

Опыты E. Goodrich и J. Meem (1921) ¹⁾, к сожалению, не могли быть здесь описаны, так как автору не удалось достать соответствующей книжки журнала в Ленинграде.

Все опыты, которые производились до сего времени, имели дело исключительно с песком, и притом сухим и крупным, так как ясно было, что говорить о проверке теории можно было только в случае этого наименее сложного, лишенного сцепления грунта. Однако,

¹⁾ Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 1921.

практикам приходится иметь дело с тем грунтом, который имеется под руками; и, не гоняясь за тонкостями теории, они желают знать, хотя приблизительно, насколько формулы, выведенные для лишнего сцепления песка, уместны в других случаях.

Г. Гольдмарк (H. Goldmark)¹⁾ при постройке гавани в Новом Орлеане произвел подобный опыт, хотя и очень грубо обставленный, но интересный по результатам. Подпорная стенка высотой до 55 фут. предназначалась под засыпку глинистым насыщенным водою грунтом посредством землесоса. Для суждения об ожидаемой величине распора строитель изготовил деревянный просмоленный ящик, сечением $1' \times 2'$ в плане и 6' высотой. В одну из боковых стенок была вставлена вертикальная стальная доска, сечением $8" \times \frac{1}{2}"$, предварительно прокалиброванная на изгиб сосредоточенным грузом по середине (для определения жесткости EI). Затем ящик был наполнен водою, и был измерен прогиб стальной доски, который оказался равным 1,83" и послужил поверкой вышеупомянутого калибрования.

Далее в ящик вместо воды был помещен разжиженный грунт, доставленный землесосом. После этого прогиб доски оказался равным 2,1". Измерения прогиба продолжались и далее, и обнаружено было непрерывное уменьшение давления по мере высыхания грунта. В то время как при первых измерениях это давление превышало гидростатическое в 1,14 раз, через 4 месяца оно упало до 45%. Из опыта был сделан практический вывод, что в интересах безопасности

необходимо рассчитать данную стенку на давление, в 1,14 раз большее гидростатического.

Измерение действительного давления напитанного водою грунта на стенку в натуре, а не на модели, произвел Шик (H. Schick) при сооружении плотины № 23 на р. Огайо²⁾. Хотя способы, примененные им, были очень грубыми, однако ре-

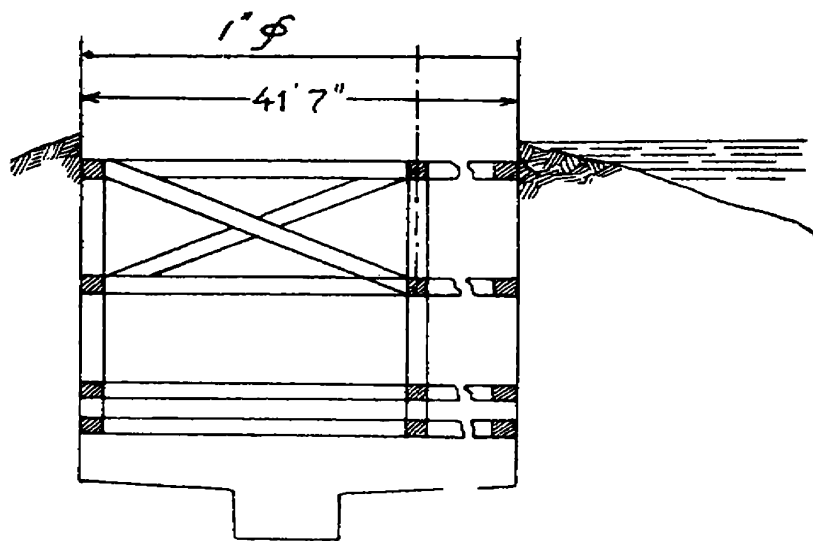


Рис. 5.

зультаты представляют интерес ввиду малочисленности подобных наблюдений.

¹⁾ Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1923, стр. 1553.

²⁾ Eng. News Rec. 1922. July 15.