

дротехнических сооружений: материалы международной научно-практической конференции. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2011. – Ч. III. – С. 258–265.

Материал поступил в редакцию 10.11.14.
Черных Ольга Николаевна, кандидат технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»
 E-mail: gtsmgup@mail.ru

Сабитов Михаил Александрович, старший преподаватель кафедры «Гидротехнические сооружения»

E-mail: sabitoffms@mail.ru

Алтунин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика»

E-mail: chtara@mail.ru

УДК 502/504:624.042:627/626

В. П. ШАРКОВ, В. М. КАРНАУХОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНОГО УГЛА ТРЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ГРУНТА В ЯЧЕЙСТОЙ КОНСТРУКЦИИ

В работе предлагается для расчета горизонтального давления грунта на стенки после заполнения ячейстых малогабаритных конструкций гидротехнических и других сооружений использовать угол трения, определенный как среднее арифметическое углов внутреннего и контактного трения. В расчетах давления грунта-заполнителя в ячейстых конструкциях (как гидротехнических, так и в хранилищах-силосах, бункерах) при использовании формулы Янсена, регламентированной действующими нормами, угол трения грунта у стен является одним из важнейших параметров. Предложенная методика расчета отличается приемлемой точностью с отличием от опытных данных на 5...11 %. Установлено, что при заполнении цилиндрической ячейки сухим песком через отверстие с диаметром 40 мм, то есть более крупное, чем в опытах с диаметром 30 мм, наблюдается повышение горизонтального давления на стенки с 35 до 40 г/см² (на 14,3 %), что должно приводить к изменению угла контактного трения. Интересно что при этом вертикальное давление на основание уменьшается с 114 до 107,5 г/см² (на 6 %). Отмечается, что это может быть вызвано возникающей вибрацией в ячейке при соударении более мощной падающей струи сухого грунта с заполнителем, что вызывает дополнительные осадки грунта у стен и динамический эффект.

Ячейка, заполнитель, горизонтальное давление заполнителя, угол контактного трения грунта, статика, расчет, опыт.

It is proposed in the work to use a friction angle determined as an arithmetical mean of angles of internal and contact friction for calculation of horizontal soil pressure on the walls after filling cellular small structures of hydraulic and other structures. In calculations of the soil-filler pressure in cellular structures (both for hydro engineering and in storages-silos, bins) when using a Jansen formula regulated by the current norms the friction angle of soil near the walls is one of the most important parameters. The proposed methodology of calculation differs by the admissible accuracy with difference from experimental data by 5...11 %. It is established that when filling a cylindrical cell with dry sand through the hole of 40 mm diameter that is larger than in experiments with 30 mm dia, we can observe a higher horizontal pressure on the walls from 35 to 40 g/sm² (by 14,3 %) which must lead to the angle changing of contact friction. It is interesting that at the same time vertical pressure on the base decreases from 114 to 107,5 g/sm² (by 6 %). It is stated that it may be caused by an arising vibration in the cell under the hit of a more powerful falling jet of dry soil with filler which activates additional soil settling near the walls and dynamic effect.

Cell, filler, horizontal pressure of the filler, angle of soil contact friction, statics, calculation, experiment.

В расчетах давления грунта –заполнителя в ячеистых конструкциях (как гидротехнических, так и в хранилищах – силосах, бункерах) при использовании формулы Ян-сена, регламентированной нормами [1], угол трения грунта у стен δ является одним из важнейших параметров. Так горизонтальное давление здесь вычисляется делением касательного напряжения на тангенс этого угла (коэффициент контактного трения), то есть из известной формулы:

$$p = \tau / \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

Величина p используется и для определения вертикального давления заполнителя в ячейке. То есть угол δ относится к определяющим давление параметрам.

Внутренние стенки ячеистых конструкций в реальных сооружениях или моделях могут иметь различную шероховатость в зависимости от материала и качества выполненных работ, а также конструктивных особенностей. При этом угол трения заполнителя у стен может изменяться, как показывают исследования [2], в пределах $(0,5...1,0) \varphi$ и более (φ – угол внутреннего трения).

В указанном диапазоне углов в соответствии с известной формулой (1) (при постоянных других параметрах) горизонтальное давление на стены может изменяться на 200% (то есть в 2 раза).

Очевидно, для расчета давления с высокой точностью требуется знание фактического угла трения δ . В практике его принимают по лабораторным данным угла $\delta_{\text{лаб}}$, полученного на основе специальных сдвиговых испытаний фрагмента стеновой конструкции (или аналога) по грунту. При этом он должен иметь такую же шероховатость, что и внутренние стены конструкции.

Однако, как показывает анализ, использование «лабораторных» углов $\delta_{\text{лаб}}$ в некоторых случаях существенно завышает величины давления грунта на стены. Например, в крупномасштабных опытах Пипера [3] полученные в сдвиговых опытах углы трения у гладких стен составляли около $\delta_{\text{лаб}} = 21...22^\circ$. По оценкам автора настоящей статьи использование $\delta_{\text{лаб}}$ в расчетах приводит к завышению давления в 1,5...1,6 раза по сравнению с зарегистрированными в опытах [3].

Заметим, что в [1] для обеспечения должного запаса рекомендует принимать угол контактного трения равным $(1/2...2/3) \varphi$. Остается без ответа вопрос, какой величины следует принимать расчетный угол трения у стен ячеистых конструкций после заполнения для определения давления с дос-

таточной точностью.

В данной работе сделана попытка ответить на этот вопрос, используя данные, приведенные в работе [3]. Выбор этой работы обусловлен тем, что в ней немецкие ученые провели исследования на крупной модели ячейки высотой 300 см и диаметром 60 см с высокой точностью. Доверие к этим данным вызвано тем, что здесь давление заполнителя на стены цилиндрической ячейки определялось не в отдельных точках, что обычно сопровождается разбросом значений, а по осредненной его величине по всему периметру цилиндра. Методика регистрации давления здесь была основана на измерении приращения периметра металлического кольца ячейки толщиной 1 см при его высоте 28 см, разрезанного вертикально.

В качестве первой гипотезы в данной работе предлагается для определения давления заполнителя на стенки расчетным считать угол $\delta_{\text{р-д}}$, равный среднеарифметическому значению углов лабораторного и угла внутреннего трения, то есть $\delta_{\text{р-д}} = 0,5 (\delta_{\text{лаб}} + \varphi)$.

В качестве второй гипотезы предполагается использовать в качестве расчетной величины среднеарифметическое значение коэффициента внутреннего трения грунта и его коэффициента трения у стен.

В таблице 1 представлены величины углов трения, полученные в настоящей работе (в том числе углов внутреннего трения грунта φ), углов трения грунта у стен, полученных на сдвиговой установке в лаборатории $\delta_{\text{лаб}}$, их осредненные значения $\delta_{\text{ср}}$, а также тангенсы этих углов и их осредненные значения. Также приведены углы трения $\delta_{\text{п}}$, рекомендуемые Пипером для использования. Дело в том, что значения этих углов – результат обобщений автора, однако из текста работы [3] не ясно, какие критерии при этом использованы. Анализ работы [3] показал, что во всех случаях значение рекомендуемого Пипером угла трения грунта находится между углом контактного трения, определенного в сдвиговых опытах, и углом внутреннего трения, то есть $\delta_{\text{лаб}} \leq \delta_{\text{п}} \leq \varphi$. Перечисленные данные приведены для двух серий опытов с гладкими и шероховатыми стенками. В первом случае гладкость внутренних стенок ячейки обеспечивалась металлической поверхностью самой трубы (цилиндра), а во втором случае были наклеены песчинки. Опыты проводились с тремя видами песка: мелкого, среднего и крупного.

Расчетные и рекомендуемые углы трения грунта у стен в опытах Пиппера

№ серии опытов, заполнитель ячеек	$\varphi, ^\circ$	$\delta_{\text{лаб}}, ^\circ$	$\delta_{\text{ср}}, ^\circ$	$\delta_{\text{п}}, ^\circ$	Соотношение $\delta_{\text{ср}}/\delta_{\text{п}}$	$\text{tg } \varphi$	$\text{tg } \delta_{\text{лаб}}$	$(\text{tg } \varphi + \text{tg } \delta_{\text{лаб}})/2$	$\text{tg } \delta_{\text{п}}$	Соотношение $(\text{tg } \varphi + \text{tg } \delta_{\text{лаб}})/2\delta_{\text{п}}$
Опыты с шероховатыми стенками										
1, мелкий $\gamma R = 21,615$	38	32,8	35,4	32,75	1,08	0,78	0,645	0,712	0,643	1,107
2, средний $\gamma R = 22,11$	38,8	31,7	35,25	35,3	1,00	0,804	0,618	0,716	0,71	1,01
3, крупный $\gamma R = 22,11$	39,1	30,5	34,8	34,4	1,01	0,813	0,589	0,701	0,685	1,020
Опыты с гладкими стенками										
4, мелкий, $\gamma R = 21,615$	38	21,8	29,9	26,5	1,13	0,78	0,40	0,59	0,50	1,18
5, средний $\gamma R = 22,11$	38,8	22,3	30,55	28,1	1,087	0,804	0,41	0,607	0,534	1,13
6, крупный $\gamma R = 22,11$	39,1	21,8	30,45	30,45	1,00	0,813	0,40	0,607	0,588	1,03

Примечание: γR – опытное значение предельного касательного напряжения грунта у стен (γ – плотность заполнителя, R – гидравлический радиус поперечного сечения ячейки).

Сопоставление приведенных в таблице данных позволяет сделать следующие заключения:

1. Рекомендуемый Пиппером угол трения грунта у стенок, полученный в опытах, практически во всех случаях не превышает среднеарифметическое значение угла внутреннего и контактного трения, то есть $\delta_{\text{п}} \leq \delta_{\text{ср}} = (\varphi + \delta_{\text{лаб}})/2$. При этом угол $\delta_{\text{ср}}$ превышает угол $\delta_{\text{п}}$ в 1,0...1,08 раза для шероховатых стен и в 1,0...1,13 раза – для гладких стен. Сопоставляемые углы совпадают в опытах для среднего песка (при шероховатых стенках) и крупного песка (при гладких стенках).

2. Осредненные величины тангенсов сопоставляемых углов для шероховатых стен дают практически такие же различия, как и сами углы (в 1,01...1,107 раза). Для гладких стен они имеют несколько большую разницу

(в 1,03...1,18 раза), чем соотношения самих углов (в 1,00...1,13 раза). Это свидетельствует о том, что оперирование тангенсами углов при определении расчетного угла трения в ячейке приводит к большим погрешностям, а потому целесообразно использовать в расчетах сами углы.

Анализ результатов работы [3] показывает, что углы трения грунта у стен, полученные расчетом по имеющимся данным горизонтального давления $\delta_{\text{Р-Д}}$, несколько отличаются от рекомендуемых автором рассматриваемой работы $\delta_{\text{п}}$. Для иллюстрации в таблице 2 приведены величины горизонтальных давлений, полученные в опытах, а также определенные по ним расчетные углы, а также углы, рекомендуемые Пиппером $\delta_{\text{п}}$, и углы $\delta_{\text{ср}}$. Для полноты картины здесь добавлены данные опытов с зерном.

Таблица 2

Расчетные углы трения грунта у стен $\delta_{\text{Р-Д}}$, полученные по данным горизонтальных давлений, и рекомендуемые Пиппером $\delta_{\text{п}}$

№	Заполнитель – песок	Угол $\varphi, ^\circ$	Угол $\delta_{\text{лаб}}, ^\circ$	Горизонтальное давление $\sigma_x, \text{г/см}^2$	$\delta_{\text{Р-Д}}, ^\circ$	$\delta_{\text{п}}, ^\circ$	$\delta_{\text{ср}}, ^\circ$	$\delta_{\text{ср}}/\delta_{\text{Р-Д}}$	$\delta_{\text{ср}}/\delta_{\text{п}}$	$\delta_{\text{СТАТ}}, ^\circ$
Опыты с шероховатыми стенками										
1	Мелкий, $\gamma R = 21,615$	38	32,8	32,0	34,0	32,75	35,4	1,04	1,08	35,4
2	Средний $\gamma R = 22,11$	38,8	31,7	31,0	35,5	35,3	35,25	0,99	1,0	35,25
3	Крупный $\gamma R = 22,11$	39,1	30,5	30,0	37,0	34,4	34,8	0,94	1,01	34,8
4	Зерно $\gamma R = 10,545$	32,6	30,9	18,2	30,1	30,2	31,75	1,055	1,051	31,75
Гладкие стенки										
4	Мелкий, $\gamma R = 21,615$	38	21,8	42,0	37,6	26,5	29,9	1,10	1,13	29,9
5	Средний $\gamma R = 22,11$	38,8	22,3	35,0 40,0*	32,3 29,0*	28,1	30,55	0,945	1,087	30,55
6	Крупный $\gamma R = 22,11$	39,1	21,8	37,0	31,0	30,45	30,45	0,98	1,00	30,45
8	Зерно $\gamma R = 10,545$	32,6	25,8	21,4	26,2	24,7	29,2	1,114	1,18	24,7

Примечание: $\delta_{\text{СТАТ}}$ – рекомендуемый угол трения в статических условиях работы; * при наполнении ячейки из емкости с отверстием $\varnothing 40$ мм, в других опытах – $\varnothing 30$ мм.

Сравнение данных таблицы 2 показало, что углы δ_{Π} , рекомендуемые Пипером, во всех случаях равны или меньше $\delta_{P-д}$, полученных расчетом из горизонтальных давлений. Это может свидетельствовать о выделении автором работы [3] минимальных значений углов, зафиксированных в опытах, что необходимо для обеспечения запаса в расчетах прочности стен. Необходимо отметить, что в [3] не удалось найти обоснования для принятия значений углов δ_{Π} .

Как видно из таблицы 2, при шероховатых стенках соотношение среднеарифметического и расчетного углов по давлению $\delta_{Cp}/\delta_{P-д}$ составляет 0,94...1,05, что несколько меньше соотношений δ_{Cp}/δ_{Π} (при их различии в 1,00...1,08 раза). При гладких стенках первое соотношение составляет 0,945...1,11, что также меньше, чем второе с разницей 1,00...1,18. В соотношении $\delta_{Cp}/\delta_{P-д}$ отличия имеют разные знаки \pm (6...11) %, а соотношение δ_{Cp}/δ_{Π} имеет один знак с отклонением на 0,0... 18,0 %.

Из проведенного выше анализа можно заключить следующее:

1. Углы $\delta_{P-д}$, полученные расчетом по опытными данным горизонтального давления ближе к углам δ_{Cp} , равным половине суммы углов внутреннего и контактного трения, чем углы δ_{Π} , рекомендованные Пипером для использования.

2. При отсутствии точных данных об углах трения у стен для расчетов допускается принимать значение расчетного δ_{Cp} , равного полусумме углов внутреннего и контактного трения у стен, полученных в сдвиговых испытаниях. При этом максимальное отклонение составляет 11 %, а среднее – 2,1 % из 8 опытов. Например, при шероховатых стенках расчетная величина горизонтального давления для мелкого песка равна 30,4 г/см², а в опытах – 32 г/см² (разница 5 %); в крупном песке – 32,6 г/см², в опытах – 30,0 г/см² (8 %); в среднем песке – 31,3 г/см², в опытах – 31,7 г/см² (1 %). При гладких стенках расчетные давления равны для мелкого песка 37,6 г/см², в опытах – 42,0 г/см² (разница 11 %); для среднего песка – 37,5 г/см², в опытах – 35,0 г/см² (7 %); для крупного – 38,5 г/см², в опытах – 37,0 г/см² (4 %).

Заключение

В работе [3] получен интересный результат. Он выражается в том, что при заполнении цилиндрической ячейки сухим песком через отверстие с \varnothing 40 мм, то есть более крупное, чем в основных опытах с \varnothing 30 мм, наблюдается повышение горизонтального давления на стенки с 35 до 40 г/см²

(на 14,3 %), что должно приводить к изменению угла контактного трения. Но при этом вертикальное давление на основание уменьшается с 114 до 107,5 г/см² (на 6 %). По мнению автора настоящей статьи это может быть вызвано возникающей вибрацией в ячейке при соударении более мощной падающей струи сухого грунта с заполнителем, что вызывает дополнительные осадки грунта у стен и динамический эффект, описанный в работах [4, 5]. Влияние динамических воздействий на угол контактного трения представляет интерес и может быть рассмотрен специально.

1. Подпорные стены, судоходные шлюзы рыбозащитные и рыбопропускные сооружения: СНиП 2.06.07.87. – М.: ЦИТП Госстроя, 1989. – 40 с.

2. Рубаник М. Н., Карлин С. М., Шульга В. А. Натурные наблюдения за статической работой секции сопрягающего устоя ячеистой конструкции Каневской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1988. – № 6. – С. 40–46.

3. Пипер К. Исследование силосных нагрузок на моделях // Конструирование и технология машиностроения: Труды Американского общества инженеров. – механиков, 1969. – № 2. – С. 80–86.

4. Шарков В. П. О максимальных и минимальных величинах вертикального давления заполнителя в ячейке в статических и динамических условиях // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК: материалы международной научно-практической конференции. – Ч. 2. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2007. – С. 160–164.

5. Шарков В. П. О максимальном давлении грунтового заполнителя на стенки ячеистой конструкции в процессе его осадок при глубинном виброуплотнении // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: международной научно-практической конференции. – Ч. 2. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2009. – С. 135–141.

Материал поступил в редакцию 16.05.15.

Шарков Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнических сооружений»

Тел. 8 (499) 976-24-60

Карнаухов Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук

Тел. 8 (499) 976-16-50