

порядок ниже натуральных значений) [5]. Кроме того, в опытах на моделях масштабов 1:25; 1:40 и 1:60 (исследования ОАО «НИИЭС», РУДН и МГМИ) отмечено возрастание углов закрутки потока в начальном сечении отводящего туннеля за тангенциальным завихрителем потока при уменьшении сбросных расходов и увеличении содержания воздуха в смеси. Поскольку на натурном объекте воздухосодержание в ключевом сечении тангенциального завихрителя шахтного водосброса всегда незначительно, то и возрастания углов закрутки при уменьшении сбросных расходов ожидать не приходится.

Выводы

В вихревых водосбросных сооружениях при отсутствии воздухозахвата моделирование обеспечивается по всем требуемым критериям подобия.

Для достоверного моделирования закрученного потока при наличии свободно-го уровня (например, в вертикальной или наклонной шахте водосброса до закручивающего устройства и при обильном воздухозахвате потоком) области воздуха в верхнем и нижнем бьефах необходимо изолировать от внешней атмосферы и снижать давление воздуха в этих областях (т. е. создавать вакуум) в соответствии с геометрическим масштабом модели.

1. Животовский Б. А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 190 с.

2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / Д. Д. Лаппо [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

3. Волшанник В. В., Зуйков А. Л., Мордасов А. П. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.

4. Розанова Н. Н. Влияние конструкции тангенциального завихрителя на характеристики закрученного потока и пропускную способность водосброса // Гидротехническое строительство. – 1999. – №2. – С. 24–27.

5. Особенности вихревых туннельных водосбросов и гидравлические условия их работы / М. А. Галант [и др.] // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 9. – С. 16–22.

Материал поступил в редакцию 10.06.13.

Розанова Нина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 976-24-60

E-mail: rozanovann4@mail.ru

УДК 502/504:624.042:627/626

В. П. ШАРКОВ, Б. М. БАХТИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОБ УПРОЩЕННОЙ ФОРМУЛЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЯЧЕЙСТЫХ ГТС

Предлагается упрощенная формула для расчета вертикального давления грунта в ячейстых конструкциях гидротехнических сооружений. Предложенная методика расчета учитывает пространственный характер работы грунта и отличается приемлемой точностью.

Ячейка, заполнитель, осадки, вертикальное давление заполнителя, горизонтальное давление, статика.

The simplified formula for calculation of vertical pressure of soil in cellular constructions of hydraulic structures is proposed. This method of calculation takes into consideration a spatial character of soil work and is notable for its acceptable accuracy.

Cell, filler, precipitation, vertical pressure of filler, horizontal pressure, statics.

В ячейстых гидротехнических сооружениях вертикальное давление грунта-заполнителя на основании используют при

расчете их устойчивости или осадок ячейстого каркаса. В силосах это давление необходимо для расчета прочности днища.

Основа расчета вертикального давления заполнителя в ячеистых конструкциях – формула Янсена, выведенная им для силосов. Ее используют как гидротехники, так и специалисты по силосам.

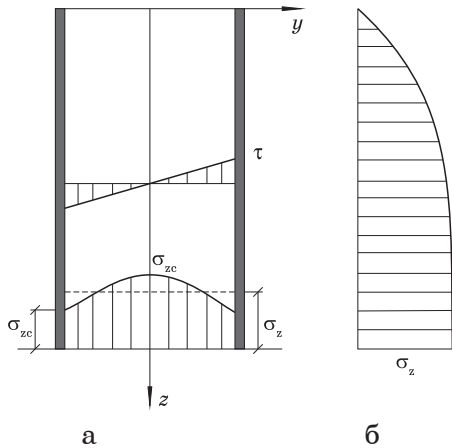
В формуле Янсена [1] вертикальное давление в ячейке

$$\sigma_z = \sigma_0 \times (1 - \exp(-kz/R)), \quad (1)$$

где $\sigma_0 = \gamma R/k$ – предельное значение давления; γ – плотность грунта; R – гидравлический радиус горизонтального сечения ячейки; $R = F/\Pi$; F и Π – площадь и периметр поперечного сечения ячейки; k – коэффициент касательных напряжений, $k = \tau/\sigma_z = \lambda \operatorname{tg} \delta$; (δ – угол трения грунта у стенки; λ – коэффициент горизонтального давления грунта); z – глубина расчетной точки от поверхности засыпки (рисунок 1).

В формуле (1) σ_z – давление, усредненное по площади поперечного сечения ячейки. Для его расчета, кроме плотности и геометрических параметров, как видно из формулы (1), необходимо знать параметр k .

Формула Янсена дает величину для усредненного давления, но не учитывает неравномерности эпюры давления в плане: давление у стен меньше, в центре (у оси) – больше, что связано с возникновением у стен касательных напряжений (рисунок) [2].



Эпюры распределения вертикального давления заполнителя и касательного напряжения: а – по ширине ячейки; б – по высоте

Цель проведенных исследований – изучение возможности использования в расчетах усредненного давления заполнителя формулы со значениями давления у стен и в центре.

Ограничимся случаем абсолютно шероховатых стен ячеек (когда $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \varphi$, где φ – угол внутреннего трения) и укладки в ячейку неуплотненного грунта. Давление грунта у стен определим по формуле (1) при подстановке в нее коэффициента трения у стен ($\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \varphi$) и коэффициента горизонтального давления у стен для этих условий, а также глубины z расчетной точки.

При большой глубине, когда второй сомножитель в формуле (1) равен 1, вертикальное давление у стен можно определить на диаграмме Мора по известному горизонтальному давлению σ_y из выражения [3]:

$$\sigma_{zc} = \sigma_y (1 + 2\operatorname{tg}^2 \varphi). \quad (2)$$

У оси ячейки (в центре), где касательное напряжение $\tau = 0$, вертикальное давление $\sigma_{zc} = \sigma_y \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)$, где $\lambda_{ц} = \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)$ – коэффициент горизонтального давления грунта в центре ячейки, имеющий место при $\tau = 0$ (выражение (3) имеет силу в том случае, если в рассматриваемом поперечном сечении ячейки $\sigma_y = \operatorname{const}$).

Эпюра вертикального давления по ширине должна иметь параболическую форму. Причина этого в том, что касательные напряжения τ (от центра к стенкам) возрастают по линейному закону (см. рисунок) [2].

Тогда усредненное давление в эпюре с криволинейной формой можно получить, используя формулу для площади параболы (см. рисунок):

$$\sigma_{zo} = \sigma_{zc} + 2/3 (\sigma_{zc} - \sigma_{zc}). \quad (4)$$

Проверим точность приведенных выше формул с использованием опытных данных. Для удобства расчетные и опытные данные представим в табличной форме.

Вертикальное давление по формулам (2)...(4) в статических условиях

Автор, объемная плотность грунта, г/см³	Грунт, угол φ°	Расчет					Опыт σz, г/см²	Отличие Δ =(7:8)
		Давление у стен σzc, по (2)	Давление в центре σzc, по (3)	Давление (среднее) σz, по (4)	σzo, г/см², по (4)	σz, г/см², по (1)		
Шарков γ = 1,38	Песок φ = 36°	2,05σy	3,85σy	3,25σy	38,66	36,3	34,5	1,057
Пипер γ = 1,474	Песок φ = 38,8°	2,29σy	4,356σy	3,67σy	100,9	99,4	94,0	1,057
Пипер γ = 1,441	Песок φ = 38°	2,22σy	4,20σy	3,54σy	97,96	96,9	94,0	1,031
Пипер γ = 0,697	Зерно φ = 32,6°	1,82σy	3,34σy	2,83σy	46,3	45,8	45,0	1,018

Опыт 1 (Шарков) проведен в ячеистой коробке размером 25х25х80 см с шероховатыми стенками (оклеенными наждачной бумагой) при заполнении ее сухим неуплотненным грунтом [4]. В этих опытах получена степень зависания песка $m = 0,687$, при которой вертикальное давление на основание $\sigma_z = (1 - m) \gamma H = (1 - 0,687) 1,38 \times 80 = 34,54$ (г/см²) (здесь m , γ , H – соответственно степень зависания, плотность и высота заполнителя).

По формуле (4), с учетом влияния высоты, расчет по формуле (1) дает давление 36,5 г/см². Как видим, точность формулы (4) приемлема, поскольку отклонение расчетных данных от опытных составляет 5,7 %. В этих опытах коэффициент касательных напряжений $k = \gamma R / \sigma_z = 1,38 \times 6,25 / 34,5 = 0,25$, что в среднем на 22,2 % выше, чем у Латышенкова (0,192...0,217) [5].

Коэффициент k может являться удобным критерием точности опытов, поскольку представляет собой отношение предельного касательного напряжения у стен к величине среднего вертикального давления. Коэффициент k , подсчитанный при вертикальном давлении σ_z (для этих опытов), определенном по формуле (4) без учета высоты заполнителя, равен $k = \gamma R / \sigma_z = 1,38 \times 6,25 / 38,66 = 0,223$. Значение этого коэффициента совпадает с величиной, определенной по формуле Г. А. Гениева для аналогичных условий (при $\delta = \varphi = 36^\circ$), учитывающей пространственный характер распределения давления в ячейке [2]:

$$k = \operatorname{tg} \varphi / \{1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi + 4 \operatorname{tg} \varphi / 3 \cos \varphi\}. \quad (5)$$

Это свидетельствует о том, что сложную формулу Гениева для рассматриваемых условий можно упростить, используя более простую формулу (4).

В *опыте 2 (Пипер)* использовали ячейку диаметром 0,6 м при высоте 3,08 м, засыпанную среднезернистым песком крупностью 1...2 мм. Стены ячейки были оклеены частицами песка. Как видим из таблицы, в этом опыте расчетные данные (99,4 г/см²) несколько выше, чем полученные в опытах (94,0 г/см²), однако расхождение невелико – 5,7 %. Превышение расчетных данных может объясняться тем, что Пиперу не удалось создать абсолютно шероховатые стенки, поскольку полученный им угол трения у стен $\delta = 31,7^\circ$ меньше, чем угол внутреннего трения $38,8^\circ$.

Коэффициент, полученный в опытах ($k = \gamma R / \sigma_z = 22,11 / 94 = 0,235$), в среднем

на 15,6 % больше, чем коэффициент, полученный Латышенковым (0,192...0,217) для сухого песка (с углом внутреннего трения $\varphi = 36...37^\circ$). Однако он близок к полученному авторами в опыте 1 ($k = 0,25$) с разницей 6,4 %.

В соответствии с расчетной методикой Гениева (при $\delta = \varphi = 38,8^\circ$) по формуле (5) коэффициент $k = 0,219$. Для экспоненциального решения с использованием формулы (4) $k = \gamma R / \sigma_z = 1,474 \times 15 / 100,9 = 0,219$, т. е. эти данные, как и в предыдущем опыте, совпадают, что свидетельствует о равнозначности формул (4) и Гениева.

В *опыте 3 (Пипер)* исследования проведены в ячейке с шероховатыми стенками и песком крупностью 0,7...1 мм. Давление на днище получено равным 94,0 г/см², как и в опыте 2. Формула (4) дает для этих условий $\sigma_z = 96,9$ г/см². Разница – всего 3,1 %, т. е. опыты подтвердили правомерность используемой формулы. Здесь расчетный коэффициент $k = \gamma R / \sigma_z = 21,615 / 97,96 = 0,221$, а коэффициент, полученный по данным опытов, равен $21,615 / 94 = 0,23$. Это несколько ниже наших значений для люберецкого песка (0,25, разница – 8,6 %), но выше верхних значений Латышенкова (0,217).

В *опыте 4 (Пипер)* в той же цилиндрической ячейке в качестве заполнителя использовалось зерно. Стены ячейки были оклеены частицами песка (угол контактного трения $\delta = 30,9^\circ$).

Как видим из таблицы, расчетные данные практически совпали с экспериментальными (5,8 и 45,0 г/см³). Это можно объяснить тем, что в опытах у стен коэффициент трения близок к коэффициенту внутреннего трения. Расчетный коэффициент для зерна $k = \gamma R / \sigma_z = 0,697 \times 15 / 46,3 = 0,226$, а опытный $k = \gamma R / \sigma_z = 0,697 \times 15 / 45 = 0,232$. Интересно, что эти данные близки к полученным в опытах Янсена для зерна (0,203 ...0,217) [7].

Отметим также, что значения коэффициента k , определенные по методике Гениева (5) и с использованием формулы (4) (при $\delta = \varphi = 32,6^\circ$), в обоих случаях одинаковы: $k = 0,226$.

Выводы

Все четыре серии опытов с песком и зерном подтверждают правомерность использования формулы (4) для определения давления заполнителя на основание (в условиях шероховатых стен).

Во всех случаях расчетные значения по формуле (4) больше, чем полученные

в опытах. При этом превышение расчетных значений над опытными составляет для случая с зерном и мелким песком 1,8 и 3,1 %, а для среднезернистого и люберецкого песка – 5,7 %, что свидетельствует о достаточной точности формулы.

Формула (4), в основе которой лежит эпюра давления заполнителя на основании параболической формы, равнозначна формуле Г. А. Гениева, учитывает пространственный характер распределения нагрузок от веса заполнителя в ячейках как квадратной, так и круглой формы в плане.

Обобщены данные для коэффициента k , полученные в опытах в условиях шероховатых стен:

для люберецкого песка ($D_{cp} = 0,22$ мм) $k = 0,25$ (по Шаркову);

для мелкого и среднего песка $k = 0,235...0,23$ (по Пиперу);

для сухого речного песка $k = 0,192...0,217$ (по Латышенкову);

для песков $k = 0,13...0,26$ (опыты Вятских с ряжами 1,87×1,87 м) [8].

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

2. Гениев Г. А. Вопросы динамики сыпучей среды. – М.: НИИ строительных конструкций 1958. – 122 с.

3. Шарков В. П. О максимальном давлении грунтового заполнителя на стенку

ячеистой конструкции в процессе его осаждения при глубинном виброуплотнении / Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2009. – Ч. 2. – С. 135–141.

4. Шарков В. П. О резерве устойчивости ячеистых сооружений на скальном основании // Гидротехническое строительство. – 2001. – № 2. – С. 20–24.

5. Латышенков А. М. Лабораторные исследования давления загрузки в ряжах // Гидротехническое строительство. – 1938. – № 5. – С. 7–10.

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

7. Ianssen H. A. Versuche in Silozelle // V.D.I. – 1895. – № 35. – P. 1027–1044.

8. Вятских Н. М. Опытная проверка предположений расчета высоких ряжей как силосов // Известия НИИГ. – 1934. – Т. 12. – С. 70–91.

Материал поступил в редакцию 31.05.13.

Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60

Шарков Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент
Тел. 8-926-538-40-83

УДК 502/504:627.838:532.5

М. Ю. СИВАК

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАТОПЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА НА МЕСТНЫЙ РАЗМЫВ ЗА КОНУСНЫМ ЗАТВОРОМ

Рассмотрены актуальные задачи применения гасителей энергии в нижнем бьефе водопропускных сооружений, оборудованных конусными затворами.

Конусные затворы, гаситель энергии, местный размыв, затопление гидравлического прыжка.

There are considered urgent problems of using dissipaters in downstream culverts equipped with cone valves.

Cone valves, dissipater, erosion, hydraulic jump flooding.