

В. П. ШАРКОВ

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

КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ У СТЕН ЯЧЕИСТЫХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ОСАДОК ЗАПОЛНИТЕЛЯ

На основе анализа опытных данных дано обоснование допустимости принятия величины главного касательного напряжения в качестве верхнего предела касательных напряжений для условий интенсивных осадок заполнителя в ячеистых сооружениях. Использована относительно крупная модель силоса.

Ячейка, заполнитель, осадки, горизонтальное давление заполнителя, касательные напряжения.

On the basis of the analysis of the tentative data there is given a substantiation of the permissibility of adoption of the value of the basic tangential stress as the upper limit of tangential stresses for the conditions of intensive aggregate settlements in cellular structures. There is used a relatively large model of silo.

Cell, filler, settlements, horizontal pressure of the aggregate, tangential stresses.

В статических условиях распределение вертикальных напряжений σ_z в ячеистой конструкции с заполнителем, как известно, неравномерно: у стен напряжения меньше, в центре – больше (рис. 1). Причина этой неравномерности – развитие касательных напряжений у стен, поскольку именно их появление вызывает уменьшение вертикальных напряжений.

Касательные напряжения на некоторой глубине z от поверхности могут определяться по формуле Янсена [1]:

$$\tau = \tau_0(1 - \exp(-kz/R)), \quad (1)$$

где $\tau_0 = \gamma R$ – предельные значения касательных напряжений у стен ячеек; γ и R – объемная масса (плотность) грунта и гидравлический радиус поперечного сечения ячейки; z – глубина рассматриваемой точки; k – параметр вертикального давления грунта, определяемый по формуле $k = \tau/\sigma_z$ (σ_z – вертикальное давление).

Как видно из формулы (1), предельное значение наступает при больших глубинах z , когда сомножитель в скобках близок к единице, тогда $\tau = \tau_0$.

В настоящее время считается, что эпюры касательных напряжений в соответствии с зависимостью (1) имеют формы, представленные на рис. 1. При этом эпюры 1 и 2 характерны для

условий статики, т.е. имеют место после заполнения ячеистой конструкции [2]. В динамических условиях, сопровождающихся интенсивными осадками заполнителя, происходит уменьшение вертикального давления грунта, связанное именно с развитием касательных напряжений.

К таким динамическим явлениям можно отнести, например, процесс виброуплотнения обратной засыпки подпорной

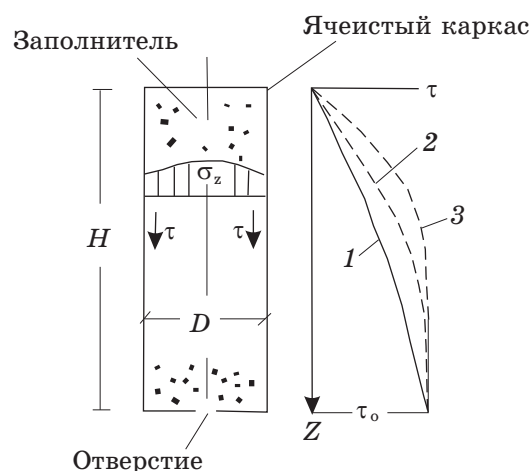


Рис.1. Эпюры касательного напряжения в ячейке: 1 и 2 – при гладких и при шероховатых стенках (статика); 3 – в динамических условиях

стенки (или ячеистой конструкции), интенсивные сейсмические воздействия на сооружение (рис. 2), процесс выгрузки заполнителя силоса (бункера) через донное отверстие (см. рис. 1).

До настоящего времени считалось (это отражают и проведенные исследования [3]), что и в динамических условиях в эпюре касательных напряжений предельная величина неизменная и равна $\tau_0 = \gamma R$ (см. эпюру 3 на рис. 1). Однако имеются данные, которые свидетельствуют о том, что верхний предел касательных напряжений для динамических условий превышает предельную величину τ_0 .

Была поставлена задача – обосновать принятие скорректированного максимального значения динамических касательных напряжений.

Автором проведен анализ опытных данных, полученных на крупной модели цилиндрического силоса (высота около 3 м, диаметр 0,6 м) [4]. Модель была собрана из отдельных цилиндров высотой по 0,28 м, каждый из которых измерял среднее (по их высоте и периметру) касательное напряжение на контакте заполнителя со стенкой.

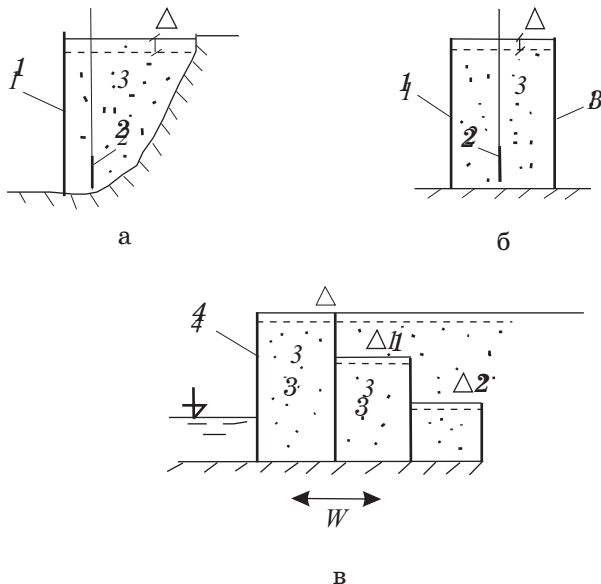


Рис. 2. Условия интенсивного развития касательных напряжений в гидротехнических сооружениях: а, б – виброуплотнение засыпки подпорной стенки и ячеистой конструкции соответственно; в – сейсмическое воздействие; 1 – подпорная стенка; 2 – глубинный вибратор; 3, 4 – ячеистая конструкция (4) с засыпкой (3)

Проанализируем формулу (1) для условий перехода от статики к динамике, считая ее структуру неизменной. Для этого рассмотрим входящие в формулу параметры: плотность заполнителя γ , гидравлический радиус R и параметр k . Можно быть уверенным в том, что при переходе от статики к динамике радиус R однозначно не меняется. Можно также предположить, что и плотность грунта γ остается прежней, хотя известно, например, что в реальных условиях при выгрузке через донное отверстие в некоторой нижней части силоса заполнитель разуплотняется (плотность уменьшается), поскольку происходит разгрузка вертикального давления. Однако в верхней части имеется зона, в которой возможно доуплотнение рыхлого заполнителя. Учитывать численно эти изменения простой и ясной закономерностью сложно.

Проанализируем параметр k , входящий во 2-й сомножитель формулы (1). На некоторой глубине $z = h_1$, как известно, при подвижках заполнителя могут измениться вертикальное давление σ_z и касательное напряжение τ , причем первое в сторону уменьшения, а второе в сторону повышения. В результате, как видно из выражения для параметра $k = \tau/\sigma_z$, должен наблюдаться рост этого параметра при переходе в динамическое состояние. Такое повышение, как следует из формулы (1), должно привести к увеличению интенсивности нарастания касательных напряжений (см. на рис. 1 эпюру 3). Таким образом, при переходе заполнителя в динамические условия, т.е. при начале интенсивных осадок, как это происходит при выгрузке силоса, должен увеличиваться только параметр k , входящий в формулу (1).

Для проверки этих предпосылок приведены некоторые результаты опытов немецких исследователей [4]: для статических условий – табл. 1, для динамических условий – табл. 2 и 3.

Табл. 1 содержит данные сопоставления расчетных и экспериментальных значений максимальных касательных

напряжений t для статических условий, т.е. после заполнения модели. Использовалось четыре вида заполнителя, причем

в одной серии опытов стены были гладкими (сталь), а в другой – шероховатыми (на стены наклеивался песок).

Таблица 1

Предельные касательные напряжения: расчетные и опытные

Заполнитель	$\tau_0 = \gamma R$, расчетные	τ_{ct} Эксперимент в условиях		Разница ($\tau_0 - \tau_{ct}$)/ τ_0 , %
		гладких стен	шероховатых стен	
Песок крупный	22,65	20... 20,5 ...20,5*	20,5... 20,5 **...20	-9,5 %
Песок средний	22,11	20... 20,5 ...20	20... 21 ...20,3	-7,3...5,0 %
Песок мелкий	21,615	21,5... 22	21 ...20,2	-0...2,8 %
Зерно	10,54	9,5... 10 ...10	10,5 ...10,5...10,4	-5,1...0 %

Примечания: * Здесь и ниже в табл. 2 выбраны 2-3 смежных значения максимальных напряжений по высоте ячейки, зарегистрированных в опытах.

** Максимальные величины.

Как видно, в ячейке с гладкими и шероховатыми стенами максимальные значения экспериментальных напряжений τ_{ct} практически одинаковы: для крупного песка – 20,5 и 20,5; для среднего – 20,5 и 21,0; для мелкого – 22 и 21,0; для зерна – 10 и 10,5. При этом опытное значение напряжения для зерна и мелкого песка практически совпадает с расчетным τ_0 , что свидетельствует о полном развитии (насыщении) напряжений в месте их регистрации. Для песка среднего и крупного экспериментальные значения (хотя и в пределах точности измерений) несколько ниже расчетных: соответственно для среднего – 20,5...21,0 против 22,11, а для крупного – 20,5 против 22,65.

Видно, что чем крупнее грунт, тем больше разница, и складывается впечатление о появлении масштабного эффекта. Рассмотрим соотношение размеров измерительного устройства и крупности заполнителя. Например, для крупного песка отношение диаметра ячейки (600 мм) к среднему диаметру частицы (2,5 мм) составляет 240, что превышает допустимую цифру 100, полученную в опытах [5]. Это может свидетельствовать об отсутствии масштабного эффекта. (Даже если за исходный размер прибора взять высоту цилиндра ячейки, равную 280 мм, соотношение все равно

превышает допустимую величину).

По мнению автора, причина некоторого недобора напряжений может быть связана и с особенностью конструкции измерительного устройства в опытах (см. ниже).

Таким образом, в статических условиях экспериментальные данные (в экстремальных точках) явно достигают своих предельных значений для мелкого песка и зерна. При этом наблюдается некоторый недобор для крупного песка, составляющий 9,5 %, для среднего – около 6 %.

Как видно из табл. 1, величины опытных значений τ_0 практически не зависят от степени шероховатости стен, что подтверждает правомерность формулы (1).

На втором этапе рассмотрим результаты, полученные в опытах для динамических условий, т.е. касательные напряжения в условиях вертикальных подвижек заполнителя, зарегистрированные при опорожнении модели силоса.

Как видно из табл. 2, экспериментальные значения максимальных касательных напряжений для обеих серий опытов с гладкими и шероховатыми стенами здесь также практически одинаковы, с небольшим преимуществом значений при шероховатых стенках. Так, для песка крупного – 24,7 (гладкие стены) и – 25,0 (шероховатые); для песка среднезернистого – соответственно

Таблица 2

Динамика. Расчетные и экспериментальные значения касательных напряжений

Заполнитель	Опытные значения касательных напряжений $\tau_{дин}$ в условиях		Расчетные предельные касательные напряжения $\tau_0 = \gamma R$	Превышение опытных данных над предельным $(\tau_{дин} - \tau_0)/\tau_0, \%$
	гладких стен	шероховатых стен		
Песок крупный	23,5...24,6... 24,7	24,5... 25 ...24,5	22,65	9,05...10,4
Песок средний	23... 24,5 ...23,7	25... 25,7 ...25	22,11	10,8...16,2
Песок мелкий	23,5... 24,5	24... 24,5	21,615	13,3
Зерно	11,2... 11,9 ...11,5	11,6... 11,7 ...11,5	10,54	12,9...11,0

Примечание. Выделены максимальные величины.

24,5 и 25,7; для мелкого песка – 24,5 и 24,5; для зерна – 11,9 и 11,7.

Наибольшая разница – 4,9 % – в пределах точности измерений зарегистрирована в опытах со средним песком. Как видно, во всех без исключения опытах достигнутые при опорожнении значения касательных напряжений превышают предельное касательное напряжение $\tau_0 = \gamma R$.

Как видно из табл. 2, превышение экспериментальных значений над расчетными составляет 9,05...16,2 %. Поскольку речь идет о превышении всех опытных данных над расчетными, то, видимо, это можно считать закономерностью.

Объяснять такой рост τ повышением плотности заполнителя в формуле (1) некорректно еще и потому, что в этом случае, согласно формуле Янсена, должны одновременно расти и вертикальные напряжения, что противоречит результатам – в опытах эти напряжения уменьшаются. Более того, в ячейке с уплотненным грунтом после динамического воздействия сейсмоплатформы

плотность заполнителя оставалась прежней, а вертикальное давление однозначно уменьшалось [5].

Неизменным в формуле (1) остается и гидравлический радиус R . Небольшие распорные прогибы стен ячейки после динамического воздействия (до 35 мкм), зафиксированные в опытах, столь малы, что говорить о влиянии этого геометрического параметра нет смысла, тем более что вызванное этим увеличение площади поперечного сечения компенсируется ростом его периметра.

В табл. 3 приведены выбранные из табл. 2 значения максимальных касательных напряжений, а также расчетные значения главных касательных напряжений τ_{max} , соответствующие условиям опытов. Главный результат – экспериментальные значения больше предельных, но несколько меньше величин главных касательных напряжений: для крупного песка – на 14,4...15,4 %; для среднего – на 9,95...14,8 %; для мелкого – на 10,6 %; для зерна – на

Таблица 3

Главные касательные напряжения и экспериментальные значения касательных напряжений в условиях динамики

Заполнитель	Максимальные значения касательных напряжений в опытах $\tau_{дин}$	Главные касательные напряжения (расчет) $\tau_{max} = \gamma R / \cos \phi$	Превышение расчетных данных над опытными $\tau_{max}/\tau_{дин}, \%$
Песок крупный	24,7... 25,0	29,2	15,4...14,4
Песок средний	24,5... 25,7	28,4	14,8...9,95
Песок мелкий	24,5	27,4	10,6
Зерно	11,9 ...11,7	12,5	4,8...6,4

4,8...6,4 %, т.е. разница составляет 15...5 % (прослеживается некоторая связь с крупностью частиц песка, хотя средняя крупность зерна идентична крупному песку).

К возможным причинам недобора опытных данных $\tau_{\text{дин}}$ можно отнести следующие:

1) измерительная система, использованная в опытах в виде высокого кольца, имеет свойство в точках локальных экстремумов усреднять значения, т.е. уменьшать максимальные величины;

2) в опытах исследователям создать абсолютно шероховатые стены в полной мере не удалось. При наклейке на поверхность стен песчинок, например для среднего песка, угол контактного трения составлял $35,3^\circ$ при угле внутреннего трения $38,8^\circ$. Разница в углах дает отношение в коэффициентах трения $\text{tg } \varphi / \text{tg } \rho = 1,136$ раза (13,6 %), что практически соответствует отношению расчетного и экспериментального значений касательных напряжений.

Приведенные причины позволяют считать, что в опытах разгрузки силоса, т.е. динамических условиях, могут реализоваться главные касательные напряжения. Это дает право использовать такие напряжения в расчетных моделях.

Принятие такой предпосылки объясняет причину существенного повышения горизонтального давления в динамике, связанного, как известно, напрямую с касательными напряжениями. Кроме того, это также упрощает расчетную зависимость.

Для таких случаев динамики касательные напряжения в ячейке предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$\tau_{\text{дин}} = \tau_{\text{мах}} [1 - \exp(-kz/R)], \quad (2)$$

где $\tau_{\text{мах}} = \tau_0 / \cos \rho = \gamma R / \cos \rho$ – главное касательное напряжение; ρ – угол внутреннего трения заполнителя; k – параметр, принимаемый для динамических условий ($k = \tau_{\text{мах}} / \sigma_{\text{дин}}$), причем для динамических условий он должен быть больше, чем для статических – $k_{\text{дин.}} > k_{\text{стат.}}$.

Предлагаемая зависимость на рис. 3 иллюстрируется кривой 3.

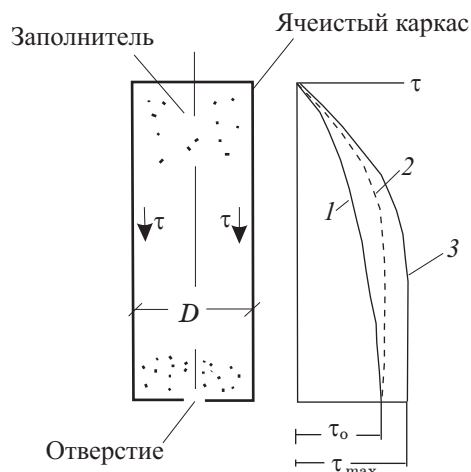


Рис. 3. Эпюры касательных напряжений в ячеистой конструкции: 1, 2 – в статике; 3 – в динамических условиях

С учетом формулы (2) максимальное горизонтальное давление для условий шероховатых стен

$$\sigma_{\text{дин}} = \sigma_{\text{стат.}} / \cos^2 \rho. \quad (3)$$

Отклонение рассчитанных по данной формуле давлений от опытных для рассмотренных случаев составляет 2...11 %.

Вывод

При динамических процессах в ячеистых конструкциях, сопровождаемых интенсивными осадками заполнителя, например при виброуплотнении грунта, сейсмических воздействиях или при разгрузке силоса, верхним порогом касательных напряжений может являться не предельное τ_0 , а главное касательное напряжение $\tau_{\text{дин}} = \tau_0 / \cos \rho$.

1. **Ynsen H. A.** Versuche uber getreidedruck in Silozellen // Zeitschrift der Vereines. – 1895. – P. 1045–1050.

2. **Курочкин А. М.** Напряжения сыпучих материалов в силосах / Исследования, относящиеся к расчетам силосов ж/б зернового элеватора: сб. науч. трудов. – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1966. – С. 111–228.

3. **Шарков В. П.** О максимальных и минимальных величинах вертикального давления заполнителя в ячейке в статических и динамических условиях // Природообустройство. – 2008. – № 5. – С. 53–56.

4. **Пипер К.** Исследование силосных нагрузок на моделях // Конструирование

и технология машиностроения: труды Американского общества инженеров-механиков. – 1969. – № 2. – С. 80–86.

5. Шарков В. П. Некоторые вопросы сейсмостойкости ячеистых гидротехнических сооружений на скальном основании:

автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГМИ, 1982.

Материал поступил в редакцию 20.03.10.

Шарков Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (499) 976-24-60

УДК 502/504:626

И. Ж. АТАБИЕВ

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

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ N-СЛОЙНОГО РАССЕИВАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПОДЗЕМНОГО КОНТУРА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрен принцип действия рассеивающего выходного элемента многослойной конструкции из n слоев (n > 2).

Коэффициент фильтрационного сопротивления, проницаемость, пьезометрические напоры, многослойная конструкция, проницаемая геомембрана.

The action of the scattering output element of the multilayer structure consisting of n number of layers (n > 2) is considered.

Coefficient of filtration resistance, permeability, hydraulic heads, multilayer structure, permeable geomembrane.

Принцип действия рассеивающего выходного элемента ступенчатой проницаемости (РВЭ-Ст) и способ расчета частного случая, когда он состоит из двух слоев дискретно проницаемых геомембран, изложен автором в работах [1, 2]. Многослойная конструкция из n (n > 2) слоев требует специального рассмотрения в силу трудностей составления системы n + 1 числа уравнений и сложностей ее дальнейшего разрешения (рисунок).

Искомыми следует считать следующие параметры: длины участков $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_i, \dots, \Delta l_n$, каждый из которых имеет постоянную проницаемость; коэффициенты их фильтрационного сопротивления транзитному потоку по длине $\Delta \zeta_1, \Delta \zeta_2, \dots, \Delta \zeta_i, \dots, \Delta \zeta_n$; пьезометрические напоры в начале каждого участка $H_1,$

$H_2, \dots, H_i, \dots, H_{n-1}$. Значения суммарного коэффициента сопротивления элемента ζ_p , коэффициента сопротивления, возникающего в конце элемента на выходе в нижний бьеф $\zeta_{\text{ВЫХ}}$, пьезометрических напоров в начале $H_n = H_n$ и в конце $H_k = h_{\text{ВЫХ}}$ определяются как в [2, 3]. Толщина грунтовых слоев t и $\Delta t = \text{const}$ принимается конструктивно, с учетом технологических особенностей, а расстояние между центрами отверстий (ширина фрагмента с одним отверстием) каждой геомембраны $l_\phi = \text{const}$ и размер отверстия δ определяются отдельно из условия сохранения местной фильтрационной прочности (рисунок):

$$I_1 = I_2 = \dots = I_i = \dots I_n \leq I_{\text{ен}}. \quad (1)$$

Считая, что вдоль каждого участка падение пьезометрического напора происходит линейно, можно записать: