

Н. П. ЛУШНОВ

УЧЕТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА  
КАМЕННО-НАБРОСНЫХ ПЛОТИН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ  
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ НА МОДЕЛЯХ

Приводятся результаты изучения зависимости угла естественного откоса крупно-бломочных каменных материалов от плотности наброски, обусловливаемой их физико-механическими свойствами.

В ближайшие годы в СССР предусматривается строительство ряда крупных гидроузлов, в том числе высоких плотин из местных материалов. Большинство из них возводится в районах со сложным рельефом и повышенной сейсмичностью. В связи с этим вопросы проектирования, расчета и возведения плотин из местных материалов в этих районах становятся весьма актуальными, в особенности для высоких каменно-земляных плотин типа Нурекской на р. Вахш.

Существующие методы расчета сейсмостойкости плотин обладают некоторыми недостатками, например, не учитываются физико-механические свойства материалов в процессе колебаний. Ввиду сложности задачи в ряде случаев приходится пользоваться экспериментальными методами исследования сейсмостойкости каменно-земляных плотин, которые (за исключением метода центробежного моделирования) не позволяют полностью осуществлять динамическое подобие напряженного состояния в процессе колебаний, так как грунты в отличие от воды или воздуха изменяют свои свойства в зависимости от размера их частиц, а также характера и времени действия динамических нагрузок. Это обстоятельство, как отмечает Г. И. Покровский [1], явилось причиной того, что до последнего времени моделирование в области грунтов, особенно моделирование воздействия вибрации на грунты, исследовались в меньшей степени по сравнению с моделированием в области гидравлики или аэrodинамики.

Все сказанное о моделировании воздействия вибрации на грунты в одинаковой степени относится и к каменным материалам каменных и каменно-земляных плотин в случае воздействия на них сейсмических колебаний.

Целью настоящей статьи является установление влияния физико-механических свойств материала модели и натуры на результаты моделирования сейсмического воздействия и, по-возможности, учет этого влияния в процессе моделирования.

Согласно общим принципам моделирования при сейсмическом воздействии должны соблюдаться:

1) широко известные условия геометрического и динамического (силового) подобия натуры и модели;

2) условия кинематического подобия, когда траектории, описываемые соответствующими частицами натуры и модели в соответственные моменты времени, геометрически подобны; при моделировании сейсмического воздействия это условие сводится прежде всего к тому, чтобы колебания натуры и модели проходили в одной фазе;

3) условия материального подобия, т. е. массы (или плотности) соответственных частиц материала натуры и модели должны находиться в одном и том же отношении, что особенно важно в случае моделирования сооружений, состоящих из различных грунтов.

Критерии подобия, характеризующие напряженное состояние каменного (или грунтового) массива под воздействием внешних сил, в частности сейсмических колебаний, и вытекающие из них масштабные соотношения, проще всего получаются при рассмотрении обобщенного термодинамического критерия подобия Н. А. Наседкина [2].

Этот критерий при подобных отрезках времени имеет следующий общий вид:

$$\frac{T \cdot dS - \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right) d \left( \frac{1}{\rho} \right)}{dF} = \text{idem}, \quad (1)$$

где  $T$ —абсолютная температура;

$S$ —энтропия;

$U$ —внутренняя энергия;

$V$ —удельный объем;

$\rho$ —плотность среды;

$F$ —свободная энергия.

Для нашего случая, когда плотность среды остается постоянной во времени:

$$\frac{T \cdot dS}{dF} = \text{idem}. \quad (2)$$

Раскрывая выражение термодинамического критерия подобия и полагая, на основе четвертой теории прочности [3], что устойчивость каменного массива обусловливается касательными напряжениями, получаем:

$$\frac{T_{tp} \cdot \Delta l}{P + MWl} = \text{idem} \quad (3)$$

или

$$\frac{T_{tp}}{P} \cdot \frac{\Delta l}{1 + \frac{MW}{P}} = \text{idem}, \quad (4)$$

где  $f = \frac{T_{tp}}{P}$ —отношение сил трения к объемным силам (гидростатическое давление и собственный вес) или иначе коэффициент трения;

$\frac{1}{Ne} = \frac{MW}{P}$ —отношение инерционных сил к объемным силам или иначе величина, обратная критерию Ньютона ( $M$ —масса каменного массива,  $W$ —ускорение при сейсмическом воздействии);

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ —относительное горизонтальное смещение центра тяжести каменного массива при воздействии объемных и инерционных сил ( $\Delta l$ —деформация сдвига,  $l$ —вертикальная осадка).

Таким образом, для каменного массива при действии объемных и инерционных сил термодинамический критерий подобия принимает вид:

$$\frac{f_e}{1 + \frac{1}{Nl}} = \text{idem}, \quad (5)$$

т. е. рассматриваемый процесс характеризуется: одним критерием подобия Ньютона  $N_1$  и двумя безразмерными, простыми отношениями (симплексами)  $f$  и  $\varepsilon$ .

Эти величины при моделировании должны быть равны для модели и натуры. Тогда, при соблюдении геометрического подобия, между параметрами, характеризующими процесс воздействия сейсмических или вибрационных колебаний, должны иметь место следующие соотношения:

1) для относительной деформации:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m \text{ или } \frac{\Delta l_n}{l_n} = \frac{\Delta l_m}{l_m}; \frac{\Delta l_n}{\Delta l_m} = \frac{l_m}{l_n} = \lambda \cdot \frac{1}{\lambda} = 1, \quad (6)$$

т. е. это условие соблюдается тождественно;

2) для критерия Ньютона:

$$N_{e_n} = N_{e_m} \text{ или } \frac{M_n W_n}{P_n} = \frac{M_m W_m}{P_m}; \quad \frac{P_n}{P_m} = \frac{M_n W_n}{M_m W_m} \quad (7)$$

и учитывая, что

$$W_n = A_n \frac{4 \pi^2}{T_n^2} \text{ и } W_m = A_m \cdot \frac{4 \pi^2}{T_m^2},$$

где:

$A_n$  и  $A_m$  — максимальная амплитуда колебаний, соответственно, натуры и модели;

$T_n$  и  $T_m$  — периоды колебаний натуры и модели;  
после подстановки получаем масштаб сил:

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{M_n}{M_m} \cdot \frac{A_n}{A_m} \cdot \frac{T_m^2}{T_n^2} = m \cdot \lambda \frac{1}{\tau^2}. \quad (8)$$

Численное значение масштаба сил получается при рассмотрении отдельных членов равенства (8). При тождестве материала натуры и модели масштаб масс выражается через линейный следующим образом:

$$m = \frac{\rho_n V_n}{\rho_m V_m} = \lambda^3 (\rho_n = \rho_m \text{ по условию}).$$

При равенстве ускорений в натуре и на модели:

$$W_n = W_m; A_n \frac{4 \pi^2}{T_n^2} = A_m \frac{4 \pi^2}{T_m^2}; \quad \frac{A_n}{A_m} = \frac{T_m^2}{T_n^2}; \quad \lambda = \tau^2$$

$$\text{или } T_m = T_n \frac{1}{\tau} = T_n \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \quad (9)$$

тогда масштаб сил принимает следующий вид:

$$\frac{P_n}{P_m} = \lambda^3 \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\lambda} = \lambda^3 \text{ или } P_m = \frac{P_n}{\lambda^3};$$

3) для коэффициента трения:

$$f_n = f_m \text{ или } \operatorname{tg} \varphi_n = \operatorname{tg} \varphi_m (\varphi_n = \varphi_m), \quad (10)$$

т. е. материал натуры и модели должен быть один и тот же.

Однако на практике каменно-набросные плотины моделируются при помощи песка. При этом, чтобы удовлетворить требование (10) о равенстве углов внутреннего трения (или естественного откоса), песчаную модель уплотняют искусственно, например, вибраторием.

Но при таком подходе к моделированию имеет место значительное качественное и количественное различие в физико-механических свойствах, в частности, величинах плотности материала модели и натуры, что может отразиться на результатах испытаний.

Учесть влияние физико-механических свойств материала на напряженное состояние натуры и модели можно, если предположить, что в общем виде коэффициент внутреннего трения, по крайней мере для несвязных грунтов, характеризуется следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg} \varphi = \xi \cdot F \left( \frac{\gamma_{\text{ск}}}{\gamma}; \frac{Sd_{cp}}{V}; \frac{d_{\max}}{d_{\min}}; \frac{a_{n+1}-a_n}{d_{n+1}-d_n} d_{cp} \right), \quad (11)$$

где  $\xi$  — коэффициент шероховатости поверхности зерен материала;

$\frac{\gamma_{\text{ск}}}{\gamma}$  — плотность материала в наброске;

$\frac{Sd_{cp}}{V}$  — коэффициент, характеризующий форму зерен материала ( $S$  — суммарная поверхность зерен,  $V$  — их объем,  $d_{cp}$  — средняя крупность);

$\frac{d_{\max}}{d_{\min}}$  — коэффициент неоднородности;

$\frac{a_{n+1}-a_n}{d_{n+1}-d_n}$  — коэффициент, характеризующий изменение гранулометрического состава материала.

В силу указанного выше равенства коэффициента трения натуры и модели, между элементами зависимости (11) должны существовать следующие соотношения:

$$1) \frac{\gamma_{\text{скн}}}{\gamma_n} = \frac{\gamma_{\text{скм}}}{\gamma_m} \text{ или } \frac{\gamma_{\text{скн}}}{\gamma_{\text{скм}}} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} = \frac{\rho_n g}{\rho_m g} = 1, \quad (12)$$

так как модель изготавливается из такого же материала, что и натура;

$$2) \frac{S_n d_{cp,n}}{V_n} = \frac{S_m d_{cp,m}}{V_m} \text{ или } \frac{S_n}{S_m} \cdot \frac{d_{cp,n}}{d_{cp,m}} \cdot \frac{V_m}{V_n} = \lambda^2 \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\lambda^3} = 1, \quad (13)$$

т. е. требование соответствия формы зерен материала удовлетворяется тождественно в силу принятого геометрического подобия;

$$3) \frac{d_{\max,n}}{d_{\min,n}} = \frac{d_{\max,m}}{d_{\min,m}} \text{ или } \frac{d_{\max,n}}{d_{\max,m}} \cdot \frac{d_{\min,n}}{d_{\min,m}} = \lambda; \quad (14)$$

$$4) \frac{(a_{n+1}-a_n)_n}{(d_{n+1}-d_n)_n} d_{cp,n} = \frac{(a_{n+1}-a_n)_m}{(d_{n+1}-d_n)_m} d_{cp,m},$$

$$\frac{(a_{n+1}-a_n)_n}{(a_{n+1}-a_n)_m} \cdot \frac{d_{cp,n}}{d_{cp,m}} \cdot \frac{(d_{n+1}-d_n)_m}{(d_{n+1}-d_n)_n} = 1$$

$$\text{или } \frac{(a_{n+1}-a_n)_n}{(a_{n+1}-a_n)_m} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\lambda} = 1, \quad (15)$$

или иначе  $(a_{n+1}-a_n)_n = (a_{n+1}-a_n)_m$ , т. е. гранулометрические составы материала натуры и модели должны быть одинаковы. Это очень важное следствие, которое до сих пор не учитывалось в опытах по моделированию сооружений из крупно-обломочных материалов;

5)  $\xi_n = \xi_m$  — равенство коэффициентов шероховатости, очевидно, удовлетворяется, если материал натуры и модели, а также способ дробления этого материала одни и те же.

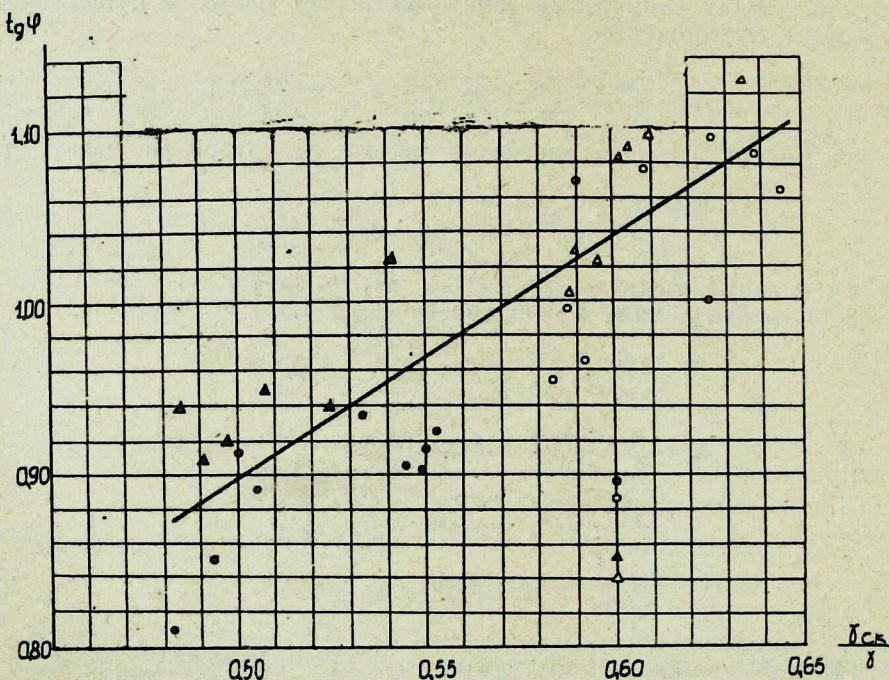
Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования советских и иностранных исследователей [4] показывают, что плотность зернистого материала данной горной породы, способ дробления (определенный формой и шероховатостью зерен), рассев (гранулометрического состава) и способ уплотнения обусловливаются только системой заполнения ограниченного пространства зернами этого материала, независимо от их крупности. Откуда следует, что зависимость (11) может быть упрощена и представлена в следующем виде:

$$\operatorname{tg} \varphi = \beta \cdot \psi \left( \frac{\tau_{ck}}{\gamma} \right), \quad (16)$$

где  $\beta$  — постоянный обобщенный эмпирический коэффициент, учитывающий физико-механические свойства каменного материала.

Данная зависимость, как показывают опыты, проведенные в лаборатории гидротехнических сооружений ВНИИ ВОДГЕО для нурекского песчаника и известняка и представленные ниже в табл. 1, описывается линейной функцией (фиг. 1) и может быть выражена следующим эмпирическим уравнением:

$$\operatorname{tg} \varphi = 1,375 \frac{\tau_{ck}}{\gamma} + 0,21. \quad (17)$$



Фиг. 1. Зависимость угла естественного откоса Нурекской каменно-земляной плотины от плотности укладки каменного материала

Значения коэффициента и свободного члена этого уравнения вычислены с точностью до  $\pm 18,5\%$ , причем дисперсия экспериментальных данных носит четко выраженный случайный характер и подчиняется закону Гаусса.

Вычисленные по уравнению (17) величины тангенсов углов естественного откоса (см. графы 7 и 10 табл. 1) мало отличаются от экспериментальных; наблюдающиеся в нескольких случаях наибольшие отклонения не превышают 7,5% при рыхлой укладке исследуемого материала. О достаточно хорошей сходимости вычисленных и экспериментальных данных свидетельствует также достаточно близкое расположение опытных точек вокруг осредненной прямой, соответствующей уравнению (17).

Таблица 1

**ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ,**

характеризующие зависимость угла естественного откоса Нурекской каменно-земляной плотины от плотности укладки каменного материала (средние значения из 114 опытов)

Крупность зерен материала, мм	Содержание материала по крупности, %	Значение плотности материала при укладке		Значение угла естественного откоса при укладке		Опытное значение тангенса угла естественного откоса при укладке		Вычисленное значение тангенса угла естественного откоса при укладке	
		рыхл.	плотн.	рыхл.	плотн.	рыхл.	плотн.	рыхл.	плотн.
<b>a) Нурекский песчаник (<math>\gamma=2,6 \text{ г/см}^3</math>)</b>									
3—5	100	0,482	0,582	39°00'	43°40'	0,811	0,955	0,873	1,01
5—7	100	0,4925	0,591	40°30'	43°55'	0,854	0,9625	0,8875	1,02
7—10	100	0,50	0,59	42°30'	46°52'	0,916	1,069	0,898	1,02
10—20	100	0,505	0,587	41°45'	44°55'	0,894	0,996	0,905	1,016
10—20	50+50	0,5325	0,609	43°05'	47°07'	0,934	1,078	0,944	1,046
7—20	50+50	0,547	0,624	42°05'	45°00'	0,903	1,00	0,964	1,067
5—20	33,3+33,3+33,4	0,55	0,626	42°25'	47°36'	0,914	1,095	0,966	1,071
3—20	25+25+25+25	0,55	0,645	42°00'	46°50'	0,901	1,065	0,966	1,096
		0,554	—	42°50'	—	0,9275	—	0,972	—
<b>б) Нурекский известняк (<math>\gamma=2,71 \text{ г/см}^3</math>)</b>									
3—5	100	0,484	0,594	43°12'	45°37'	0,9375	1,023	0,876	1,026
5—7	100	0,491	0,584	42°25'	45°20'	0,914	1,0125	0,886	1,012
7—10	100	0,4975	0,589	42°37'	45°47'	0,92	1,030	0,895	1,019
10—20	100	0,524	0,605	44°20'	47°26'	0,977	1,089	0,981	1,041
10—20	50+50	0,5075	0,602	43°34'	47°15'	0,951	1,082	0,903	1,036
3—7	33,3+33,3+33,4	0,5225	0,611	43°15'	47°40'	0,941	1,0975	0,928	1,050
3—10	25+25+25+25	0,541	0,635	45°05'	48°28'	1,005	1,129	0,955	1,082

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение термодинамического критерия Н. А. Наседкина упрощает задачу по выбору определяющих критериев подобия при моделировании сейсмостойкости каменно-набросных плотин, находящихся под воздействием объемных сил. При соблюдении геометрического подобия основными определяющими параметрами являются критерий Ньютона и безразмерное отношение (симплекс) — коэффициент трения.

2. При моделировании сейсмостойкости каменно-набросных плотин необходимо соблюдать условие равенства коэффициентов трения (или углов естественного откоса) при тождестве материала натуры и модели. В этом случае при соблюдении подобия гранулометрических составов каменного материала обеспечивается тождественность физико-механиче-

ских свойств материала модели и натуры и, следовательно, их напряженных состояний, независимо от линейного масштаба моделирования.

3. Приведенное эмпирическое уравнение (17), по-видимому, в первом приближении, правильно отображает зависимость угла естественного откоса крупнообломочных каменных материалов от плотности наброски, обусловливаемой физико-механическими свойствами этих материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Покровский. О моделировании действия вибрации на грунты. Тр. Гидропроекта. Сб. № 7, М., 1962.
2. Г. И. Покровский и И. С. Федоров. Центробежное моделирование для решения инженерных задач, М., 1953.
3. М. М. Филоненко-Бородич. Механические теории прочности, М., 1961.
4. Г. Дересевич. Механика зернистой среды. Проблемы механики. Сб. переводных статей, вып. III, М., 1962.

ВОДГЕО Госстроя СССР.