

В. Д. ШУХМАН, Н. Б. УРЬЕВ, Н. В. МИХАЙЛОВ,  
академик П. А. РЕБИНДЕР

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР

В настоящей работе рассматривается одна из распространенных схем уплотнения дисперсных структур с малым содержанием жидкой фазы в виде модели упруго-вязкой среды с переменными упругостью и вязкостью на жестком основании, уплотняемой вибрацией со свободно лежащим и подрессоренным пригрузом. Решение задачи по выбору оптимальных режимов (1, 2, 18) и обоснование критерия эффективности рассматриваемой схемы имеет непосредственное значение для ряда прикладных задач (3-10) уплотнения жестких бетонных смесей, порошков, металлокерамики.

Исследования проводились на модельных системах дисперсных структур из жестких смесей песчаного бетона следующего состава (в расчете на 1 м<sup>3</sup>): песок Тучковский с  $M = 2,0-1600$  кг; тонкомолотое вяжущее с удельной поверхностью 5000 см<sup>2</sup>/г по ПСХ-2—600 кг (480 кг цемента «Гигант» исходной марки «400», 120 кг тонкомолотого песка); воды 180 л; лигносульфонат кальция — ССБ 0,2% от веса цемента. Бетонная смесь приготавливалась виброперемешиванием в течение 3 мин. в смесителе при частоте вибрации 1500 кол/мин и амплитуде 3 мм.

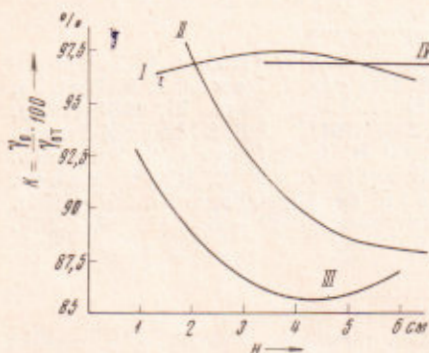


Рис. 1. Зависимость степени уплотнения песчано-бетонной смеси от толщины слоя при изменении кинетического момента вибратора и одночастотной вибрации (с частотой  $f = 42$  гц)

№№ кривых	I	II	III	IV
$M_0$ , кг/см	10,000	6,672	3,334	10,000
$P$ , кг	698	465	233	698
$Q$ , г/см <sup>2</sup>	50	50	50	80

Экспериментальная установка представляла собой стенд в виде поличастотного вибрационного поверхностного уплотнителя с регулируемыми параметрами двухчастотной вибрации.

В качестве переменных факторов изучались частота изменения возмущающей силы, кинетический момент вибратора, величина статического пригруза, толщина уплотняемого слоя. В процессе уплотнения измерялась амплитуда колебаний в различных точках виброуплотнителя, ускорение вибрации, кинетика и степень уплотнения по изменению во времени омического сопротивления смеси с помощью датчика омического сопротивления с записью на шлейфный осциллограф и определением объемного веса уплотняемой среды. В результате гармонического анализа виброграмм и статистической обработки данных измерений с помощью вычислительной машины «Проминь» были получены зависимости, представленные на рис. 1, 2. Для выяснения эффективности применения поличастотной вибрации в процессе уплотнения дисперсных структур с малым содержанием жидкой фазы на низкую частоту накладывалась высокая. Сравнение кри-

вых рис. 2 показывает, что введение второй высокой частоты значительно повышает степень уплотнения и ее роль возрастает по мере увеличения толщины слоя. Это означает, что высокая частота, накладываемая на низкую в условиях уплотнения особо жестких смесей со слабо выраженными пластическими свойствами и повышенной упругостью, затухает незначительно в пределах максимальной изученной толщины и ее действие весьма эффективно.

Анализ кривых рис. 1 и I—III рис. 2 показывает, что уменьшение кинетического момента вибратора ниже 10 кгсм приводит к резкому снижению степени уплотнения. Со снижением кинетического момента режим вибрации переходит из виброударного в безотрывный гармонический с резким уменьшением глубины и степени уплотнения и потому с ярко выраженной зависимостью степени уплотнения от толщины слоя.

Проверка известных критериев эффективности вибрации ( $A$ ,  $\omega$ ,  $A\omega$ ,  $A\omega^2$ ,  $P/Q$ ), где  $A$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота,  $P$  — возмущающая сила,  $Q$  — вес груза (<sup>6, 11</sup>), показала, что при уплотнении сверхжестких смесей типа песчаного бетона, приготовленного по усовершенствованной технологии, по принятой схеме ни один из этих критериев не может достаточно полно характеризовать процесс уплотнения и не является решающим.

Необходимым условием процесса вибрационного уплотнения (<sup>12, 14</sup>), является непрерывное разрушение упрочняющихся по мере повышения плотности пространственных структур, которое в свою очередь связано с определенной затратой энергии в виде работы разрушения, тем большей, чем выше прочность структуры. Поэтому критерием эффективности вибрации в процессе виброуплотнения должна быть выбрана энергетическая характеристика.

При виброударном режиме с отрывом источника вибровозбуждения от уплотняемой среды следует принять такой критерий эффективности уплотнения, который оценивает характер взаимодействия источника вибровозбуждения с уплотняемым материалом в период их контакта.

Такой характеристикой для ударного режима может быть импульс силы  $I_p$ , являющийся энергетической характеристикой удара и полученный путем обработки данных гармонического анализа (<sup>15</sup>)  $I_p = 2P\tau_n/\pi(I'_a/I_a)$ , где  $I_p$  — импульс силы в период передачи энергии в смесь,  $P$  — возмущающая сила,  $\tau_n$  — промежуток времени,  $I'_a/I_a$  — отношение «импульсов амплитуд», характеризующее поглощение средой колебаний источника вибровозбуждения.

Наличие энергетического критерия позволило применить метод математического моделирования с помощью аналоговой вычислительной машины МН-7 для исследования описанных выше систем.

При построении математической модели уплотняемая среда рассматривалась как упруго-вязкое тело. Основание принято абсолютно жестким. Масса уплотняемой песчано-бетонной смеси (ввиду ее незначительности

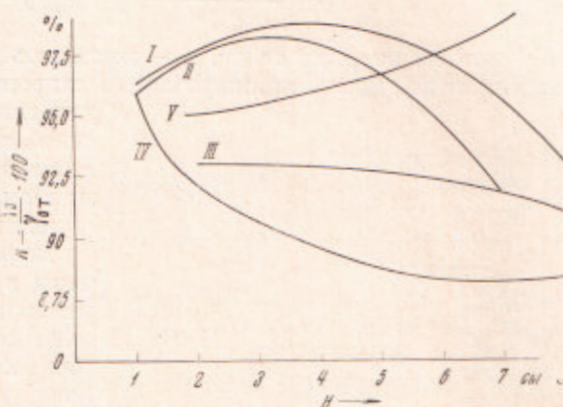


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при двухчастотной вибрации  $f_1 = 42$  гц;  $f_2 = 84$  гц

№ кривых	I	II	III	IV	V
$M_{k1}$ , кгсм	10,000	10,000	6,672	3,344	10,00
$M_{k2}$ , кгсм	2,40	1,49	2,40	2,40	2,40
$Q$ , Г/см <sup>2</sup>	50	50	50	50	80

по сравнению с массой уплотнителя) была присоединена к массе уплотнителя. Динамическая схема стендовой установки приведена на рис. 3.

Дифференциальное уравнение, приведенное к машинному виду

$$\ddot{y} = \frac{c_2 L}{m} \varphi - \left( \frac{c_1}{m} + \frac{c_2}{m} \right) y - \frac{n_1}{m} \dot{y} + \frac{P}{m} \sin \omega t, \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi} = - \frac{(c_2 L^2 + c_3 l^2)}{I} \varphi + \frac{c_2 L}{I} y - \frac{F l}{I}, \quad (1a)$$

где  $I$  — момент инерции связи,  $c_2$  — жесткость прижимной пружины,  $c_3$  — приведенная жесткость прижимающего гидроцилиндра,  $m$  — масса вибро-

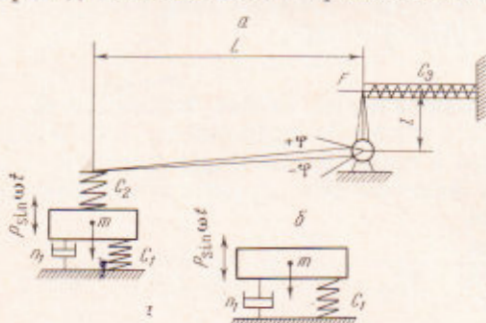


Рис. 3. Динамические схемы исследуемых систем

уплотнителя,  $c_1$  — жесткость смеси в кг/см,  $n_1$  — демпфирование смеси в кг · сек/см,  $L$  — длина связи в см,  $F$  — усилие давления гидроцилиндра.

Величины  $c_1$  и  $n_1$  были получены в результате построения резонансных кривых по данным гармонического анализа для промежуточных значений и для конца периода уплотнения  $t = 40$  сек.

Изменяющиеся величины жесткости и вязкости в процессе уплотнения определились в соответствии с уравнением кинетической

кривой уплотнения, полученной в результате записи изменений омического сопротивления по времени и по результатам исследования реологических свойств песчано-бетонных смесей при уплотнении (<sup>10</sup>)

$$\frac{1}{c} = 2,1769 + \frac{3,7788}{t} - \frac{1,258}{t^2}. \quad (2)$$

При отрыве поверхностного уплотнителя от уплотняемой среды уравнения (1) примут вид

$$\ddot{y} = \frac{c_2 L}{m} \varphi - \frac{c_2}{m} y + \frac{P}{m} \sin \omega t - g, \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} = - \frac{(c_2 L^2 + c_3 l^2)}{I} \varphi + \frac{c_2 L}{I} y - \frac{F l}{I}. \quad (3a)$$

Первоначально исследовали систему без прижимов пружины — поверхностный уплотнитель свободно лежит на смеси. При этом уравнение движения в момент контакта источника вибровозбуждения с уплотняемым материалом принимает вид

$$\ddot{y} = - \frac{c}{m} y - \frac{n}{m} \dot{y} + \frac{P}{m} \sin \omega t. \quad (4)$$

При отрыве от уплотняемого материала

$$\ddot{y} = \frac{P}{m} \sin \omega t - g. \quad (5)$$

При наложении второй частоты уравнения примут вид:

$$(4) \rightarrow \ddot{y} = - \frac{c}{m} y - \frac{n}{m} \dot{y} + \frac{P_1}{m} \sin \omega_1 t + \frac{P_2}{m} \sin \omega_2 t; \quad (6)$$

$$(5) \rightarrow \ddot{y} = \frac{P_1}{m} \sin \omega t + \frac{P_2}{m} \sin \omega_2 t - g. \quad (7)$$

Блок-схема для решения указанных систем, составленная применительно к 2 аналоговым машинам МН-7, позволяет записать на шлейфный осциллограф амплитуду, скорость, ускорение колебаний, импульс силы и энергию удара.

По результатам обработки полученных осциллограмм построены зависимости  $E = f(c, n)$ , где  $E$  — энергия удара (рис. 4). Эти зависимости позволяют сделать вывод, что в начале уплотнения ( $c = 2200$ ,  $n = 6,25$ ) параметры вибрации ( $A, \omega$ ) существенно не влияют на величину  $E_1$ , так как она оказывается достаточно высокой для всего диапазона изученных режимов вибрации. С повышением же жесткости и вязкости смеси по мере уплотнения четко выделяется оптимальный для исследуемой системы режим (42 гц), применимый для широкого диапазона жесткостей и вязкостей.

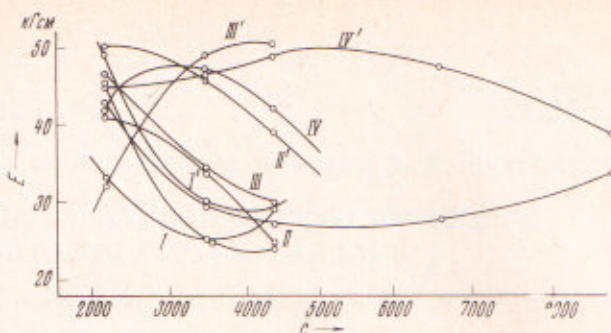


Рис. 4. Зависимость энергии удара от коэффициентов жесткости и демпфирования цементно-песчаной смеси №№ кривых I I' II II' III III' IV IV' f, ц 50 50—100 25 25—50 33 33—66 42 42—84

Наложение высокой частоты сопровождалось возрастанием величины энергии удара на всех режимах вибрации. Однако существует область оптимальных жесткостей и вязкостей, в которых этот эффект проявляется.

Анализ результатов моделирования процесса виброуплотнения на аналоговой счетной машине показал, что с переходом от виброударного режима к гармоническому резко снижается энергия, передаваемая источником вибрации в уплотняемую среду, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований виброуплотнения песчанобетонных смесей, представленными на рис. 1, 2.

Приведенные зависимости могут быть использованы для оценки уплотняемости смеси по величине энергии, переданной ей за принятый период изменения жесткости и вязкости. Величина энергии, передаваемая системе и изменяющаяся в зависимости от реологических свойств уплотняемой среды, может быть оценена графически площадью между кривой  $E = f(c, n)$  (рис. 4) и осью абсцисс или получена путем интегрирования уравнений соответствующих кривых по выбранным пределам.

Институт физической химии  
Академии наук СССР

Поступило  
25 XII 1969

Специальное конструкторское бюро  
«Мелиормаш»  
Минск

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 П. А. Ребиндер, Сборн. статей Физико-химическая механика дисперсных структур, «Наука», 1966, стр. 3.
- 2 П. А. Ребиндер, Н. В. Михайлов, Вести. АН СССР, № 10, 70 (1961).
- 3 И. Г. Шаталова, Н. С. Горбунов, В. И. Лихтман, Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов, «Наука», 1965.
- 4 Н. В. Михайлов, Основные принципы новой технологии бетона и железобетона, М., 1961.
- 5 Н. Я. Хархута, Уплотнение грунтов и щебnochных оснований методом вибрирования, М., 1952.
- 6 А. Е. Десов, Вибрированный бетон, М., 1956.
- 7 М. П. Зубанов, Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей и грунта, М., 1959.
- 8 Д. Д. Баркан, Виброметод в строительстве, М., 1959.
- 9 Г. Я. Куниос, Вибрационная технология бетона, Л., 1967.
- 10 Л. А. Файтельсон, П. П. Линарт, И. П. Бриедис, Опыт вибропрорисовочного формования сборных железобетонных конструкций, Рига, 1965.
- 11 С. А. Осмаков, Сборн. Тр. Всесоюз. н.-и. инст. гидротехн. и санит.-техн. работ, № 20, 1962.
- 12 В. Н. Шмигальский, Об оценке эффективности вибрации при уплотнении бетонных смесей. Научн. докл. высш. школы, № 2 (1958).
- 13 Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, Колл. журн., 30, № 5, 767 (1968).
- 14 Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер, ДАН, 184, № 3, 665 (1969).
- 15 Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер, ДАН, 184, № 2, 387 (1969).
- 16 Г. А. Козодаев, В. Д. Шухман и др., Тез. докл. конф., Физико-химическая механика дисперсных материалов, Минск, 1969.
- 17 Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, там же, стр. 12.
- 18 И. А. Добрушина, М. Р. Спасский и др., ДАН, 189, № 3 (1969).