

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНИРОВАНИЯ СТЕН В ГРУНТЕ

**Менейлюк А. И.** (*Одесская Государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*)

**Показаны основные этапы теоретических исследований по разработке новой технологии стен в грунте, оборудования для её реализации и последовательность технологических операций.**

При выполнении строительных работ значительная часть их связана с возведением заглубленных и подземных сооружений. Они не требуют арендной платы за землю, значительно снижают эксплуатационные расходы на отопление и охлаждение помещений. Специалисты США считают, что более 60% энергии в быту затрачивается на эти цели. По данным НИИСП применение способа «стена в грунте» обеспечивает снижение сметной стоимости строительства заглубленных сооружений до 25%, подпорных стен и ограждений до 50%, противофильтрационных диафрагм до 65% по сравнению с другими проектными решениями. Несмотря на преимущества и высокую эффективность метода «стена в грунте» в целом он имеет и ряд недостатков, связанных с особенностями традиционных технологий производства работ, применяемыми механизмами и материалами. Для монолитных стен – это высокий расход цемента при использовании литых бетонных смесей или обязательное применение дорогостоящих пластифицирующих добавок.

С целью дальнейшего повышения эффективности способа были проведены исследования, разработаны новые технологии и оборудование для их реализации. Автором был выполнен анализ конструктивных схем существующего оборудования для вибрационной укладки бетонных смесей в условиях, аналогичных возведению стены в грунте. Он позволил сделать вывод о наиболее перспективном типе такого оборудования. Это бетонолитная труба с плоскостным или лопастным виброизлучателем в нижней части.

Для анализа работы такого оборудования, оптимизации его пара-

Метод определения размеров захватки и т.п. необходимо было решить задачу определения параметров колебаний в различных точках бетонируемой стены в грунте. Принято считать, что ускорения порядка  $2g$  и более достаточны для разрушения структурных связей в бетонной смеси, превращения её в вязкую тяжёлую жидкость и последующего самоуплотнения. Для решения этой задачи была разработана физико-математическая модель процесса.

Пренебрегая вибрационным воздействием трубы на смесь и зазором между излучателем и стенками траншеи, можно считать, что напряженно-деформированное состояние смеси не меняется по ширине траншеи, т.е. это состояние является плоским. Таким образом, для описания волновых процессов в бетонной смеси, вызванных воздействием плоскостного виброизлучателя, принята следующая физико-математическая модель. Горизонтальная полоса (слой) из вязкоупругого материала постоянной толщины  $h$  располагается на абсолютно жестком гладком основании. В ней находится абсолютно жесткая тонкая пластинка, совершающая поступательные гармонические колебания в горизонтальном направлении с амплитудой  $w_0$ . Показано, что амплитудные перемещения точек вязкоупругого слоя толщиной  $h$ , лежащего на абсолютно жестком гладком основании, от действия горизонтальной гармонической с частотой  $\omega$  силы, имеющей единичную амплитуду и приложенной в точке  $x_1 = 0, x_2 = y$  определяются из формулы

$$u(x_1, x_2, y) = u_F(x_1, x_2, y) + U(x_1, x_2)$$

где

$$u_F(x_1, x_2, y) = - \left[ \frac{\Gamma_{11}(x_1, x_2 - y) + \Gamma_{11}(x_1, x_2 + y)}{\Gamma_{21}(x_1, x_2 - y) + \Gamma_{21}(x_1, x_2 + y)} \right],$$

$\Gamma(x_j, x_k)$  ( $j, k = 1, 2$ ) – элементы матрицы фундаментального уравнения Ламе для установившихся колебаний вязкоупругой среды.

$$U_j(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_j^*(\xi, x_2) \exp(-i\xi x_1) d\xi,$$

$\xi$  – переменная (параметр) преобразования Фурье;

\* – обозначает образ Фурье (т.е. функцию после преобразования Фурье по  $x_1$ );

$i$  – мнимая единица.

$$U_1^* = \sum_{k=1}^2 C_{1k} \operatorname{ch} \alpha_k x_2, U_2^* = \sum_{k=1}^2 C_{2k} \operatorname{sh} \alpha_k x_2,$$

$$C_{11} = \frac{Z_1 q_{22} \operatorname{sh} \alpha_2 h - Z_2 q_{12} \operatorname{ch} \alpha_2 h}{\Delta_0},$$

$$C_{12} = -\frac{Z_1 q_{21} \operatorname{sh} \alpha_1 h - Z_2 q_{11} \operatorname{ch} \alpha_1 h}{\Delta_0},$$

$$C_{2k} = C_{1k} \beta_k, \quad k = 1, 2, \quad \beta_1 = \frac{i \alpha_1}{\xi}, \quad \beta_2 = \frac{\xi}{i \alpha_2},$$

$\chi_k$  при  $k = 1, 2$  означает:  $\chi_1 = \rho \omega^2 / \lambda + 2\mu$ ;  $\chi_2 = \rho \omega^2 / \mu$ ;  $\lambda = \lambda_0 - \lambda_1 \omega$ ;  $\mu = \mu_0 - i \mu_1 \omega$ ,

$\lambda_0, \mu_0$  – постоянные Ламе для упругой среды;  $\lambda_1, \mu_1$  – коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости,  $\rho$  – плотность среды (бетонной смеси).

$$Z_1 = i \xi \lambda u_{1F}^*(\xi, h, y) - (\lambda + 2\mu) u_{2F}^{*'}(\xi, h, y),$$

$$Z_2 = -u_{1F}^{*'}(\xi, h, y) + i \xi u_{2F}^*(\xi, h, y),$$

$u_{1F}^*(\xi, h, y)$  – образ Фурье горизонтальных перемещений точек;  $u_{2F}^*(\xi, h, y)$  – образ Фурье вертикальных перемещений точек;  $u_{1F}^{*'}, u_{2F}^{*'}$  – производные указанных функций по переменной  $x_2$

$$q_{11} = \frac{i\mu}{\xi} \left( 2\xi^2 - \frac{\rho\omega^2}{\mu} \right), \quad q_{12} = 2i\mu\xi, \quad q_{21} = 2\alpha_1, \quad q_{22} = \frac{1}{\alpha_2} \left( 2\xi^2 - \frac{\rho\omega^2}{\mu} \right),$$

$$\Delta_0 = \frac{i\mu}{\xi\alpha_2} \left[ \left( 2\xi^2 - \rho\omega^2 / \mu \right)^2 \operatorname{ch} \alpha_1 h \operatorname{sh} \alpha_2 h - 4\xi^2 \alpha_1 \alpha_2 \operatorname{sh} \alpha_1 h \operatorname{ch} \alpha_2 h \right],$$

Обозначим через  $G(x_2, y)$  функцию влияния слоя, т.е. горизонтальные амплитудные перемещения точек слоя, лежащих на оси  $x_2$  от действия горизонтальной гармонической единичной силы, приложенной в точке  $(0, y)$ :

$$G(x_2, y) = u_1(0, x_2, y)$$

где:  $u_1(0, x_2, y)$  – определяется из вышеприведенных формул при  $x_1 = 0$ .

Пользуясь принципом суперпозиции, горизонтальные перемещения точек слоя, лежащих на прямой  $x_1 = 0$ , от действия контактных напряжений  $p(x_2)$ , распределенных вдоль виброизлучателя, т.е. вдоль этой прямой от точки  $x_2 = a$  до точки  $x_2 = b$ , можно записать следующим образом:

$$u_1^{(p)}(0, x_2) = 2 \int_a^b G(x_2, y) p(y) dy$$

Обозначим амплитудное перемещение виброизлучателя через  $w_0$ . Тогда на участке оси  $x_2$  от  $x_2 = a$  до  $x_2 = b$  перемещения  $u_1^{(p)}(0, x_2)$  должны равняться  $w_0$ . Отсюда вытекает равенство

$$\int_a^b G(x_2, y) p(y) dy = w_0/2 (a \leq x_2 \leq b),$$

которое является интегральным уравнением для определения контактных напряжений между средой и виброизлучателем. Это уравнение относится к классу интегральных уравнений Фредгольма первого рода.

Путем замены переменных интегральное уравнение приводится к виду

$$\int_{-1}^1 G_0(\zeta, \eta) q(\eta) d\eta = \frac{w_0}{b-a}$$

Следуя известной методике, решение уравнения разыскивается в следующем виде:

$$q(\eta) = \sum_{j=0}^{\infty} q_j \frac{T_j(\eta)}{(1-\eta^2)^{1/2}}$$

Здесь  $T_j(\eta)$  – полиномы Чебышева первого рода,  $q_j$  – искомые коэффициенты. Используя свойства полиномов Чебышева, интегральное уравнение приводим к системе алгебраических уравнений для коэффициентов  $q_j$ , с помощью которых находим  $q(\eta)$ . Контактные напряжения между виброизлучателем и средой определяются по формуле

$$p(y) = q \left( \frac{2y - a - b}{b - a} \right) \quad (a \leq y \leq b)$$

Можно считать, что волновые движения в слое вызваны не виброизлучателем, а нагрузкой, определяемой по изложенному выше алгоритму и приложенной на отрезке  $[a, b]$  оси  $x_2$ .

Таким образом, задача определения перемещений в слое от действия плоского виброизлучателя сводится к определению перемещений  $u_j^{(p)}(x_1, x_2)$  ( $j = 1, 2$ ), вызванных гармонической нагрузкой  $p(x_2)$ , распределенной вдоль отрезка  $[a, b]$  оси  $x_2$ .

Из принципа суперпозиции следует, что они могут быть найдены по формуле

$$u_j^{(p)}(x_1, x_2) = 2 \int_a^b p(y) u_j(x_1, x_2, y) dy \quad (j = 1, 2)$$

Эта формула дает возможность вычислить проекции перемещения на оси координат в любой момент времени. Проекции и модуль ускорения точки среды на оси координат определяются из формул

$$a_j^{(p)}(x_1, x_2, t) = -\omega^2 u_j(x_1, x_2, t), \quad |a^{(p)}(x_1, x_2)| = \omega^2 |u^{(p)}(x_1, x_2)|.$$

Рассмотрим теперь случай, когда слой бетонной смеси находится под слоем глинистого бентонитового раствора. Показано, что для учета пригрузки в приведенных выше выражениях следует положить

$$Z_1 = i\xi\lambda u_{1F}^*(\xi, h, y) - (\lambda + 2\mu) u_{2F}^*(\xi, h, y) + N^*$$

где  $N^* = 2N \sin(L\xi)/\xi$ ,  $L$  – длина траншеи,  $N = \rho_0 g h_0$  ( $\rho_0$  – плотность бентонитового раствора,  $h_0$  – толщина его слоя,  $g$  – ускорение свободного падения тел).

Изложенная выше методика легко трансформируется на случай лопастного виброизлучателя.

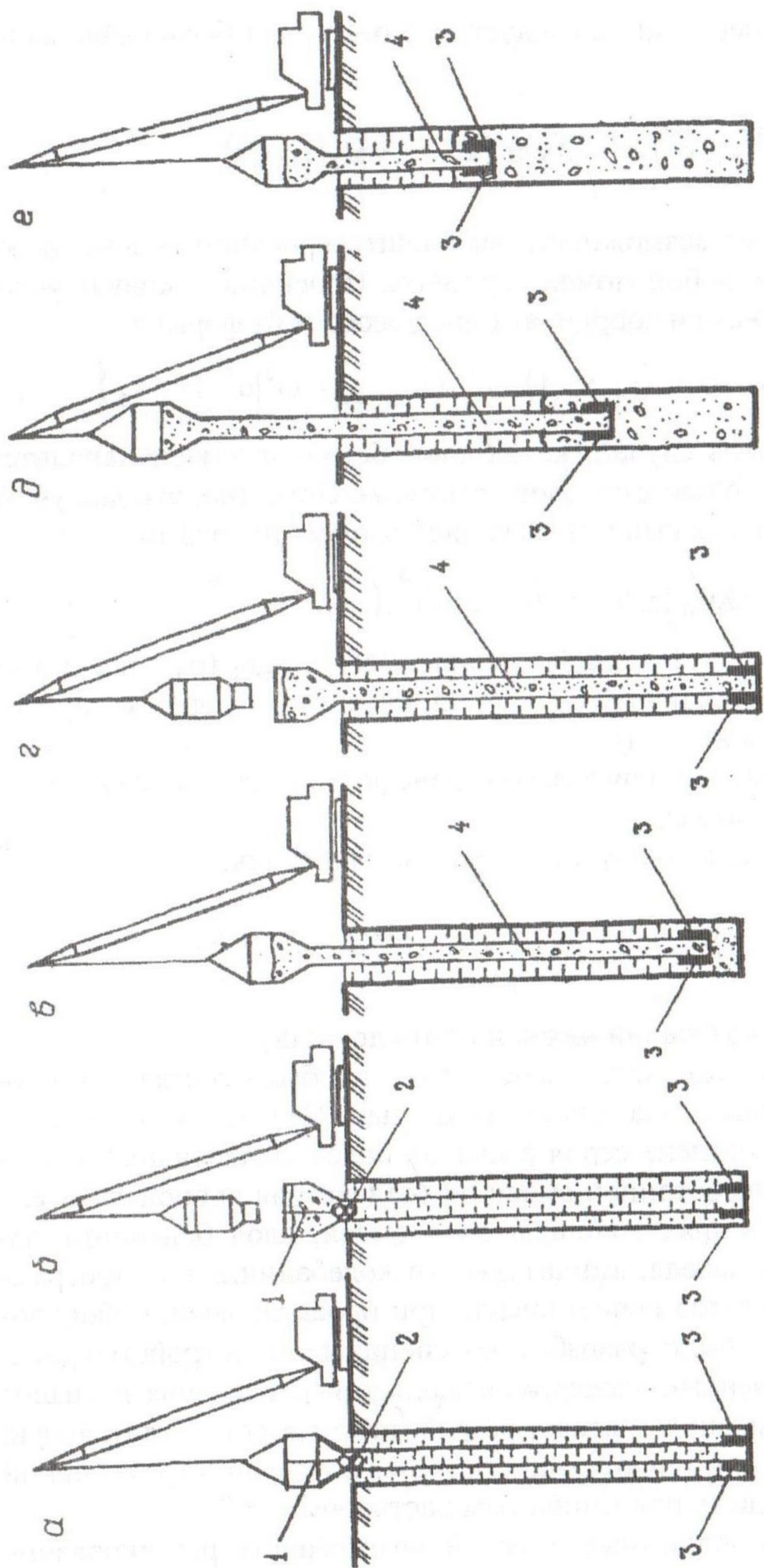
Интегральное уравнение будет теперь выглядеть так:

$$\int_a^b G(x_2, y) p(y) dy = [w_0 + w_1 x_2 / c] / 2 \quad (a \leq x_2 \leq b)$$

( $w_1$  – амплитуда колебаний нижней грани лопасти).

На основании изложенного выше алгоритма была составлена программа для персонального компьютера на языке C++. С помощью этой программы была проведена серия расчетов полей амплитудных значений ускорений в слое бетонной смеси от воздействия виброизлучателя при различных значениях толщины слоя смеси, слоя бентонита, заглубления виброизлучателя, амплитуды его колебаний и т.д. Программа и результаты расчетов использованы при проектировании оборудования. В частности, было разработано специальное устройство (А.с. №1278405). Выполненные экспериментальные исследования и анализ их результатов позволили автору разработать вибронагнетательную технологию укладки и уплотнения бетонных смесей ограниченной подвижности в траншеях под глинистым раствором.

Переход на малоподвижные смеси и возможность регулирования



**Рис. 1. Виброагрегативной технологии бетонирования стен в грунте**

а — установка на забой бетонолитной трубы с подвешенной скользящей пробкой; б — заполнение приемной воронки бетонной смесью; в — пропуск первой порции бетонной смеси: бетонолитная труба приподнята над забоем; г — заполнение приемной воронки второй и последующими порциями бетонной смеси; д — бетонолитная труба приподнята на высоту подъема гака стрелы крана; е — бетонирование после изъятия секции трубы; 1 — подвес пробки; 2 — пробка; 3 — вибратор; 4 — бетонная смесь.

скорости укладки уменьшили примеси глинистых частиц. Улучшилась однородность, повысилась относительная прочность бетона на 15-20%. Такая технология позволяет снизить расход цемента на 100-150 кг/м<sup>3</sup> по сравнению с использованием литых бетонных смесей, исключить необходимость применения суперпластификаторов.

Проверка новой технологии и оборудования при возведении подземных сооружений в Украине и Казахстане показали их высокую эффективность.