

Автор ер.

ц 45

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Аспирант ЧОБОТОВ Валерий Павлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЙ  
В ГЛУБОКОМ СИЛОСЕ  
ПРИ ДВИЖЕНИИ СТОЛБА  
СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА**

Специальность 01.02.07. Механика грунтов, горных пород  
и сыпучих материалов

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Переучет 19.8.74 г.

ОДЕССА — 1974

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
УССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

на правах рукописи

Аспирант ЧОБОТОВ Валерий Павлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЙ В ГЛУБОКОМ СИЛОСЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ  
СТОЛБА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Специальность 01.02.07. Механика грунтов, горных пород  
и сыпучих материалов

ОНАХТ 10.05.12  
Исследование давлени



v012339

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

к. б. 12339 ✓

Одесский технологический  
институт  
промышленности  
имени Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

Одесса - 1974 г.

Автор. | v 012339  
Ч-45 | ЧОБОТОВ В. П.  
Иссл. ДАВЛЕНИЙ В ГЛУБ  
1974 814

12

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов  
Одесского технологического института пищевой промышленности  
им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент А.В. Анатольев.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор РЕУТ В.И.

кандидат технических наук, доцент КОВТУН А.П.

Ведущая организация - ЦНИИПромзернопроект

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1974 г.

Защита диссертации состоится " 28 " июня 1974 г.

на заседании Ученого Совета механического и инженерно-экономического факультетов Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СТИПИ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим прислать в Ученый Совет института по адресу: 270039, г. Одесса, А-39, ул. Свердлова, 113, Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук

А.А. Запорожец

## Введение

Сыпучие материалы находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства и, в частности, в зерноперерабатывающей промышленности. В связи с высоким ростом производства зерна в СССР, предусмотренным Директивами XXIV съезда КПСС, в последние годы наблюдается значительное увеличение объема элеваторостроения. Это требует повсеместного перехода на самые прогрессивные методы строительства зернохранилищ элеваторного типа и предъявляет высокие требования к методам их расчета и проектирования.

Особое влияние на прочность стен силосов и, следовательно, на надежность элеватора в целом оказывают процессы, сопровождающие движение сыпучего материала при выгрузке. Правильная количественная и качественная оценка этих процессов позволяет рационально спроектировать силосное сооружение, выбрать оптимальные конструктивные его параметры с учетом всех особенностей истечения сыпучего материала, а также наиболее разумно эксплуатировать действующие силосные корпуса.

Несмотря на обширную практику эксплуатации силосов у нас в стране и за рубежом, на значительные исследования в этой области проблема повышения прочности и долговечности силосных стен стоит весьма остро. Это является следствием недостаточной изученности причин изменения напряженного состояния стен силоса при движениях в нем сыпучего материала всем столбом. Изложенное послужило основой для выполнения настоящей работы.

Целью работы является исследование причин изменения давлений в глубоком силосе и деформаций его стен при движениях столба сыпучего материала.

Диссертационная работа состоит из пяти глав и заключения.

Первая глава посвящена обзору литературы по изучению закономерностей распределения давлений по высоте силоса при его заполнении и изменения нагрузок на стены силоса при движениях сыпу-

чего материала.

Обзор работ С.Г. Тахтамышева, П.Н. Платонова, В.С. Кима, А.В. Анатольева, А.П. Ковтуна, А.М. Курочкина, К.И. Куценко, Г.К. Клейна, И.С. Хорошего, Реймбертов и других советских и зарубежных авторов показал необходимость уточнения особенностей распределения нагрузок на стены и дно силоса при его заполнении с учетом влияния жесткого днища.

На основании обзора работ (С.Г. Тахтамышева, П.Н. Платонова, Е.А. Банита, В.Г. Лебединского, В.С. Кима, А.П. Ковтуна, Б.М. Иванова, А.М. Курочкина, И.С. Хорошего и многих других), посвященных изучению закономерностей истечения и изменения нагрузок на стены силоса при выпуске сыпучего материала, и работ (С.Г. Тахтамышева, А.М. Трухлова, Г.И. Бердичевского, И.С. Хорошего, Ф.А. Исверса, Г.Е. Панкратовой, В.П. Гамаюнова, Р. Колинза, Реймбертов и других), в которых изучались закономерности изменения деформаций стен силоса при заполнении и выгрузке, сделан вывод о весьма неблагоприятных условиях работы стен силоса в процессе его эксплуатации. При выпуске наблюдается значительный рост давлений, который сопровождается пульсациями. Повышенные давления сохраняются длительное время. Значительно возрастают при выпуске деформации стен. Напряженно-деформированное состояние стен носит циклически переменный характер. Указанные факторы, как показывает анализ литературных источников, недостаточно полно учитываются при расчете и, главное, при проектировании железобетонных силосов, поскольку часто считаются следствием случайных причин, обусловленных конкретными условиями проведения эксперимента. В первую очередь это связано с тем, что нет единого взгляда на причины изменения давлений при выпуске сыпучего материала, а существующие гипотезы не объясняют в полной мере закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния стен силоса и столба сыпучего материала при его движении.

Изложенное привело к необходимости решить следующие задачи:

1. Описать закономерности распределения нагрузок на стены и дно силоса при его заполнении с учетом влияния жесткого днища.
2. Получить зависимости для расчета динамических нагрузок на стены и дно силоса.
3. Описать изменение напряженно-деформированного состояния стен при движении столба сыпучего материала.
4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных теоретических положений.

Во второй главе описаны закономерности распределения нагрузок на дно и стены силоса с учетом влияния жесткого днища.

Рассмотрен механизм передачи горизонтального распора, предложенный П.Н. Платоновым, А.В. Анатольевым, А.П. Ковтуном.

В процессе образования столба сыпучего материала в глубоком силосе происходит необратимый сдвиг сначала внутри столба, а затем между столбом сыпучего материала и стенками силоса. Изоклины, которые лежат в поверхностях сдвига, криволинейны на участках внутри столба сыпучего материала ( $BM$  и  $B'M'$ ) и принимают форму силоса у его стен ( $AB$  и  $A'B'$ ) (рис. 1). На участке  $AB$  горизонтальные слои сыпучего материала находятся в условиях предельного равновесия относительно стен и здесь горизонтальный распор передается по параболическим линиям минимальной кривизны определяемой углом внутреннего трения  $\varphi$ . В зоне  $B\bar{D}$  горизонтальные слои сыпучего материала находятся в условиях допредельного равновесия относительно стен и на этом участке кривизна параболических линий передачи горизонтального распора изменяется от наибольшей у параболы  $\bar{D}O_3\bar{D}'$  до минимальной кривизны параболы  $BO_1B'$ . Выделяя внутри области, ограниченной изоклинами  $BM$  и  $B'M'$  двумя горизонтальными плоскостями элементарный слой сыпучего материала (объемный вес  $\gamma'$ ) и рассматривая условия его равновесия получим дифференциальное уравнение относительно горизонтального

давления  $\sigma_z$ :

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \sigma_z \frac{2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{(1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi) z} = \frac{\gamma}{1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (1)$$

( В формуле (1)  $z(z)$  - уравнение изоклины ).

Решение дифференциального уравнения (1) показывает, что на участке предельного равновесия относительно стен горизонтальные давления изменяются по экспоненциальному закону, определяемому формулой Янсена. В зоне допредельного равновесия они уменьшаются достигая минимальных значений у дна силоса. В частности, для круглого силоса диаметром  $D$ , горизонтальные давления на стены силоса в зоне  $BD$  рассчитываются по формуле:

$$\sigma_z(z) = \frac{\gamma D \alpha}{4(1 + \alpha) f(z)} + C \cdot f^\alpha(z), \quad (2)$$

где  $f(z) = -\frac{2(n-z)}{D} + \sqrt{4\left(\frac{n-z}{D}\right)^2 + b^2}$ ;  $\alpha, n, b$  - постоянные,

связанные функциональными зависимостями с параметрами столба сыпучего материала и конструктивными размерами силоса;

$C$  - постоянная, определяемая из граничных условий.

Полученные формулы реализованы на ЭЦВМ "БЭСМ-4" и построены графики изменения горизонтальных давлений по высоте глубокого силоса диаметром 6м и высотой 30м. Теоретические зависимости хорошо совпадают с соответствующими экспериментальными данными полученными С.Г. Тахтамышевым, И.С. Хорошим и другими учеными.

Получена формула для расчета вертикальных напряжений в зоне допредельного равновесия относительно стен:

$$\begin{aligned} \sigma_z(z) = & Q_1 f^{-1}(z) + Q_2 z f^{-1}(z) + Q_3 \ln \frac{b^2}{f(z)} + Q_4 f^{\alpha-1}(z) + Q_5 f^{\alpha+1}(z) + \\ & + Q_6 f^{-3}(z) + Q_7 f(z) + Q_8 f^{\alpha-2}(z) + Q_9 f^{\alpha+2}(z) + Q_{10} + \gamma z. \quad (3) \end{aligned}$$

Расчеты, проведенные с использованием формулы (3), хорошо совпадают с экспериментальными данными П.И. Платонова и А.В. Анатольева.

В третьей главе рассмотрены закономерности изменения давлений и напряженно-деформированного состояния стен силоса при движении сыпучего материала всем столбом.

Выпуск сыпучего материала из отверстия в дне силоса приводит к изменению условий равновесия - переходу к предельному равновесию относительно стен горизонтальных слоев, расположенных в зоне ВС (рис. 2) (участок  $CD$  - зона воронки, высота  $CD$  определяется углом динамического откоса  $\beta$ ). Рассмотрим на высоте  $h_i$ , при  $CD < h_i < h_n$   $i$ -тый слой сыпучего материала, проходящий через точки пересечения кривой передачи горизонтального распора I и изоклин  $A_1$  и  $A'_1$ . Переход этого слоя к предельному равновесию сопровождается уменьшением кривизны линии передачи горизонтального распора. На рис. 2 показано последовательное изменение кривизны этой линии (от кривой I до кривой 3). После того, как точки пересечений линий передачи горизонтального распора (1-2-3) и изоклин ( $A_1 - A_2 - A_3$ ) переместятся к стенам силоса, силы трения у стен станут полными и создадутся условия предельного равновесия относительно стен  $i$ -того слоя. (На рис. 2 показано также последовательное искривление  $i$ -того слоя при его переходе к предельному равновесию - от кривой  $B_1$  до кривой  $B_3$ ). Смещение слоя  $C-C'$  в процессе перехода к предельному равновесию будет максимальным. Каждый слой, расположенный в зоне ВС, в процессе перехода к предельному равновесию относительно стен перемещается на величину, равную значению предварительного смещения. Этим перемещениям соответствует распространение зоны предельного равновесия на участок ВС и здесь горизонтальные напряжения увеличиваются, а вертикальные - уменьшаются, что приводит к уменьшению модуля упругости  $E$  в этой зоне до некоторого значения  $E_1$ . Как только все

горизонтальные слои сыпучего материала, расположенные в зоне BC, окажутся в условиях предельного равновесия относительно стен, происходит смещение-скачок столба АВ, после чего по горизонтальным осям в зоне BC восстанавливаются условия допредельного равновесия. Срыв столба АВ сопровождается увеличением давлений на дно и стены силоса.

Из условия равенства работ при срыве столба сыпучего материала (были сделаны следующие допущения: 1) участки столба сыпучего материала АВ, ВС и CD деформируются как упругие тела, при этом следует оперировать некоторыми средними значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона  $\mu$ ; 2) стенки силоса абсолютно жесткие; 3) коэффициент внутреннего трения сыпучего материала при движении мало отличается от коэффициента трения покоя; 4) в процессе срыва столба АВ модуль упругости сыпучего материала в зоне BC не изменяется; 5) силы инерции, действующие на частицы столбов BC и CD при их сжатии мало отличаются от нуля) получены зависимости для расчета горизонтальных динамических давлений на стены силоса:

$$\sigma_{zg}(z) = \sigma_{zg}(H_1) \cdot \frac{1 - e^{-4\phi_1 \tan \varphi_1 \frac{z}{D}}}{1 - e^{-4\phi_1 \tan \varphi_1 \frac{H_1}{D}}} \quad (\text{зона АВ}); \quad (4)$$

$$\sigma_{zg}(z) = \sigma_{zg}(H_1) \cdot e^{-4\phi_1 \tan \varphi_1 \frac{z - H_1}{D}} \quad (\text{зона ВС}); \quad (5)$$

$$\sigma_{zg}(z) = \sigma_{zg}(H_1) \cdot e^{-4\phi_2 \tan \varphi_2 \frac{H_2 - H_1}{D}} \cdot \frac{f(z)}{\tan^2 \varphi} \quad (\text{зона CD}). \quad (6)$$

Здесь величина  $\sigma_{zg}(H_1)$  определяется по формуле

$$\sigma_{zg}(H_1) = \sigma_2(H_1) (1 - \nu) \sqrt{\frac{K_0}{K_1 + \nu(K_2 + K_3)}}, \quad (7)$$

где  $\nu = \frac{E_1}{E}$  - величина, характеризующая изменение модуля упругости в зоне BC при переходе горизонтальных слоев сыпучего материала к предельному равновесию относительно стен;  $K_0, K_1, K_2, K_3$  - постоянные связанные функциональными зависимостями с высотой силоса  $H$ , его диаметром  $D$ , углами внутреннего и внешнего трения.

Динамическую нагрузку  $Q_g$  на дно силоса при срыве столба сыпучего материала можно определять по формуле:

$$Q_g = \frac{\pi D^2 \sigma_{zg}(H_1) f^2(H)}{4\phi_1 \tan^2 \varphi} e^{-4\phi_1 \tan \varphi_1 \frac{H_2 - H_1}{D}} \quad (8)$$

Анализ полученных результатов, хорошо совпадающих с данными экспериментов Р. Коллинза, М. Перри, Такахаски и других исследователей, показывает, что величина динамических давлений на стены силоса может достигать 10-20% от давлений перед скачком столба сыпучего материала, а величина динамических нагрузок на дно силоса - 5% от нагрузок перед скачком столба сыпучего материала.

При срыве столба сыпучего материала под действием динамических давлений стены силоса дополнительно деформируются. Тотчас же после остановки столба сыпучего материала стены силоса стремятся вернуться к первоначальному положению, однако вследствие сопротивления сыпучего материала дополнительные деформации стен полностью не снимаются.

Рассмотрено кольцо (радиус  $R$ , толщина стенки  $\delta$ , модуль упругости материала стенки  $E_c$ ), заполненное сыпучим материалом (жесткость  $A$ ). Процесс перехода системы кольцо-сыпучий материал в равновесное состояние после прекращения действия динамических давлений описывается уравнением:

$$\sigma_{zg} - k\varepsilon = A \int_0^{\varepsilon} (\sigma_2 + \sigma_{zg} - k\varepsilon) d\varepsilon. \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  - относительная деформация,  $\kappa = \varepsilon_c \frac{\delta}{R}$ .

Решение полученного уравнения показывает, что в результате скачка столба сыпучего материала давление на стенку и ее деформации возрастут соответственно на величины:

$$\Delta G_1 = \frac{A G_{2g} (G_{2g} + G_2)}{\kappa + A (G_{2g} + G_2)}; \quad \Delta \varepsilon = \frac{\Delta G_2}{\kappa} \quad (10)$$

После большого числа скачков столба сыпучего материала деформация стенок кольца и давление на них будут значительно отличаться от первоначальных, но расти беспрестанно, как показывает анализ они не могут. Максимальное значение давления на стенку силоса ограничено пределом несущей способности сыпучего материала. В случае  $\lambda = G_{2g}/G_2 > \sqrt{3}$   $G_{2 \max} = 3(2+\lambda)G_S/\lambda(3+2\lambda)$ . Если же  $\lambda < \sqrt{3}$ , а для зерновых силосов характерно, что приращеня давлений при скачке меньше давлений перед скачком столба сыпучего материала, то  $G_{2 \max} = G_S$ .

Исследование процесса накопления деформаций показывает, что максимальное давление на стенку силоса при частоте пульсаций  $\Omega$  будет наблюдаться через время  $T$  после начала выпуска:

$$T = \frac{\kappa + A(1+\lambda)G_2}{\lambda\Omega(1+\lambda)AG_2} \left[ \frac{G_S}{G_2} - 1 \right] \quad (11)$$

Сравнение времени  $T_n$  наступления максимума деформаций в стенах натурального силоса и времени  $T_m$  наступления максимума деформаций в стенах модели силоса показывает, что  $T_n$  значительно больше  $T_m$ , это хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями.

Рассмотрен более общий случай - цилиндрическая оболочка (жесткость  $D_0$ ). В этом случае уравнение перехода системы оболочка-сыпучий материал в равновесное состояние имеет вид:

$$G_{2g}(z) - f_1\left(\frac{W}{R}\right) = A \int_0^{W/R} [G_2(z) + G_{2g}(z) - f_1(\varepsilon)] d\varepsilon, \quad (12)$$

где  $W$  - радиальное перемещение срединной поверхности оболочки при переходе системы оболочка-сыпучий материал в равновесное состояние;  $f_1(\varepsilon)$  - величина изменения дополнительного давления на сыпучий материал в зависимости от деформации оболочки (для кольца  $f_1(\varepsilon) = \kappa\varepsilon$ ). Решение полученного уравнения позволяет получить дифференциальное уравнение для определения  $W(z)$ :

$$\frac{d^4 W}{dz^4} + \left[ \frac{A}{D_0 R} (G_2 + G_{2g}) + 4\beta_1^4 \right] W = \frac{G_{2g}}{D_0}, \quad (13)$$

где  $\beta_1^4 = \frac{3(1-\nu_1^2)}{R^2 \delta^2}$ ,  $\nu_1$  - коэффициент Пуассона.

Если бы дополнительные деформации стенки силоса полностью снимались после скачка столба сыпучего материала, то срединная поверхность оболочки переместилась бы на величину  $W_1$ , которая связана с динамическими давлениями соотношением:

$$\frac{d^4 W_1}{dz^4} + 4\beta_1^4 W_1 = \frac{G_{2g}}{D_0}. \quad (14)$$

Решая полученные дифференциальные уравнения, можно найти разность  $W_1(z) - W(z)$ , которая характеризует накопление деформаций в стенах силосной оболочки при скачках столба сыпучего материала. Построены графики изменения функции  $W_1(z) - W(z)$  по высоте зернового силоса диаметром 6 м и высотой 30 м.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее значительное увеличение давлений и деформаций стен силоса наблюдается в нижней части зоны АВ, это хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями С.Г. Тахтамышева, П.Н. Платонова, А.П. Ковтуна, В.С. Кима, И.С. Хорошего и многих других отечественных и зарубежных ученых.

На основании физических представлений о характере изменения условий равновесия при выпуске сыпучего материала высказано предполо-

ложение о возможности плавного безостановочного движения столба сыпучего материала, обеспечивающего отсутствие циклически переменного напряженно-деформированного состояния стен силоса и накопления в них деформаций.

В четвертой главе сформулированы задачи экспериментальных исследований, описаны экспериментальная база и методика измерений.

Для изучения деформаций стен модели силоса и нагрузок на ее дно была создана экспериментальная установка. Модель цилиндрического силоса (высота 1,25 м; диаметр 0,2 м; толщина стенки 0,003 м), изготовленная из органического стекла, была принята в масштабе 1/30 к натуральному силосу высотой 30 м, диаметром 6 м, толщиной стенки 0,18 м. При этом были использованы зависимости теории аффинного подобия цилиндрических оболочек, позволяющая учесть различие коэффициентов Пуассона железобетона и органического стекла, и уравнение совместности деформаций теории подобия, для выбора сыпучего материала. ( В экспериментах использовался сухой кварцевый песок ( ГОСТ 6139-52 ) ).

На модель были наклеены 22 тензодатчика, позволяющие при использовании тензостанции БАНЧ-7М, гальванометра М108/1 и шлейфового осциллографа МПО-2 регистрировать изменение деформаций стенок модели при ее заполнении и выгрузке. Для тарировки датчиков использовалась специальная балочка равного сопротивления. До начала экспериментов были исследованы погрешности в геометрии модели. Эксперименты проводилось при минимальном влиянии температурного эффекта, обусловленного различие температур кварцевого песка и органического стекла.

Для определения давлений на дно последнее свободно подвешивалось при помощи двух тяг, в разьемах которых были устроены шарнирные элементы с наклеенными на них тензодатчиками.

Стабильные условия заполнения обеспечивал бункер. Скорость заполнения варьировалась от 0,1 н/сек до 1,5 н/сек.

При исследовании динамических характеристик протекающих процессов использовался внешний отсчетчик времени.

Изучение распределения давлений по высоте силоса и характеристик предварительного смещения проводилось на специальной разъемной модели. Модель силоса набиралась из дюралюминиевых блоков правильной геометрической формы диаметром 0,2 м и высотой 0,1 м либо 0,2 м. В одном из блоков был вмонтирован датчик давления. Изменяя положение этого блока в сборной модели, можно было определять давления на различных высотах. Для измерения давлений использовались тензостанция ТА-5, гальванометр М108/1, шлейфовый осциллограф МПО-2 и внешний отсчетчик времени П104. Тарировка датчика проводилась перед экспериментами с помощью манометра (М0-160) и компрессора.

Для изучения характеристик предварительного смещения модель набиралась из двух частей: подвижной высотой 0,3 м и неподвижной высотой 0,9 м. Подвижная часть подвешивалась на двух тягах жесткого весового рычага. На другом конце рычага подвешивались сосуды для разновесов и воды. При выпуске воды уменьшался противовес и подвижная часть перемещалась книзу. В момент перехода горизонтальных слоев в зоне ВС (рис. 2) к предельному равновесию относительно стенок вследствие скачка столба сыпучего материала происходил срыв нижней части цилиндра. Два индикатора, расположенные в диаметрально противоположных точках, позволяли оценивать параллельность смещения и фиксировать величину предварительного смещения  $\Delta_{max}$ . Специально тарированный индикатор, расположенный на весовом рычаге, позволял судить о величине нагрузки, передаваемой сыпучим материалом в неподвижной части модели на верхний слой сыпучего материала в подвижной части.

Стабильные условия заполнения модели обеспечивал бункер. Скорость заполнения варьировалась от 0,1 н/сек до 1,5 н/сек.

В пятой главе приведены данные экспериментальных исследований, подтверждающие и дополняющие основные положения и резуль-

таты теоретических разработок.

Полученные закономерности распределения горизонтальных давлений по высоте модели силоса дополнительно к данным П.Н.Платонова, А.В. Анятольева, А.П. Ковтуна, И.С. Хорошего, С.Г. Тахтамышева подтверждают существование зон предельного и допредельного равновесия относительно стен.

Эксперименты на моделях силосов, натуральных силосах убедительно свидетельствуют о том, что скачкообразное движение столба сыпучего материала в глубоком силосе подчиняется определенным закономерностям. Так, движение столба зерна в натурном силосе (диаметр 6 м, высота 30 м) в широком диапазоне скоростей было прерывистым (лишь при расходе 667 в/сек в отдельные промежутки времени оно становилось плавным, безостановочным), причем большим расходам соответствовала большая частота и меньшие амплитуды; при снижении высоты столба сыпучего материала период и амплитуды существенно уменьшались. Так же наглядно проявились указанные закономерности при движении столба сыпучего материала в моделях силосов.

Исследования показали, что скачкообразное движение столба сыпучего материала происходит периодическими подбросами с частотой и амплитудой, зависящими от параметров столба сыпучего материала и расхода. Большей скорости заполнения и меньшей высоте столба сыпучего материала соответствовали большие частоты и меньшие амплитуды, что определяется взаимосвязью между предварительным смещением в зоне допредельного равновесия и периодическими срывами столба сыпучего материала.

Эксперименты на разъемной модели силоса позволили определить величины изменения горизонтальных давлений и вертикальных нагрузок в зоне ВС при переходе горизонтальных слоев сыпучего материала в этой зоне к предельному равновесию относительно стен. Полученные результаты подтвердили ряд выводов теоретических исследований.

Определены величины предварительного смещения в зоне допредельного равновесия. Это дало возможность приблизительно подсчитать частоту пульсаций  $\Omega_T$  при прерывистом движении столба сыпучего материала. Частота пульсаций  $\Omega_3$  определялась также экспериментально. Сравнение (табл. 1) частот, рассчитанных теоретически, с частотами, определенными экспериментально, убедительно свидетельствует о том, что скачок столба сыпучего материала происходит после перехода к предельному равновесию относительно стен горизонтальных слоев, расположенных в зоне ВС (рис. 2).

Проведено исследование деформированного состояния стен модели силоса при движении сыпучего материала по второй форме. Скачки столба сыпучего материала сопровождалось увеличением деформаций стен модели. Полученные осциллограммы свидетельствуют о синхронности процессов изменения деформаций по периметру и высоте стен при скачках столба сыпучего материала. Характер зависимостей амплитуды и частоты изменения деформаций от расхода и параметров столба сыпучего материала определяется зависимостью величины предварительного смещения от нагрузки на контакты между частицами.

Исследовано изменение давлений и деформаций стенки модели силоса при первом скачке после начала выпуска в зависимости от времени неподвижного контакта между частицами сыпучего материала. Увеличение времени неподвижного контакта приводит к заметному возрастанию приращений давлений и деформаций стенки модели, это является следствием зависимости величины предварительного смещения от времени неподвижного контакта между частицами.

Экспериментально подтверждено высказанное предположение о возможности плавного движения столба сыпучего материала. Для всех, без исключения, условий формирования столба сыпучего материала в модели силоса, были определены соответствующие значения критических скоростей (табл. 2), обеспечивающих плавное, безостановочное движение

столба сыпучего материала.

Исследовано изменение деформаций стен модели силоса при заполнении и опорожнении. На полученных осциллограммах (рис. 3) видно, что после скачка столба сыпучего материала деформации стенки модели увеличиваются, затем уменьшаются, но при этом не всегда достигают первоначальных значений. Затем происходит новый скачок, новое увеличение деформаций и т.д. Таким образом, в стенке модели силоса происходит постепенное накопление деформаций. Через некоторое время после начала выпуска наступает динамическое равновесие, когда приращение деформаций стенки силоса, вызванное скачком столба сыпучего материала, уменьшается до нуля.

Получены графики изменения деформаций стенки модели силоса при обычном выпуске, проточном режиме, а также при сложном режиме, состоящем в заполнении, выдержке, частичном выпуске, повторном заполнении и т.д. Максимальные деформации при выпуске превышали деформации при заполнении на 50-60%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований, общих положений науки о трении и анализа известных экспериментальных данных описаны причины и характер изменения давлений в глубоком силосе, деформаций его стен при движении в нем столба сыпучего материала.

1. Получены аналитические зависимости для определения горизонтальных давлений на стены силоса, вертикальных напряжений и сил трения у стен с учетом влияния жесткого дна.

2. Описан процесс перехода горизонтальных слоев сыпучего материала к предельному равновесию относительно стен при выгрузке и получены формулы для расчета динамических нагрузок на дно и стены силоса при периодических срывах столба сыпучего материала.

3. Исследовано накопление деформаций в стенах силоса при скачкообразном движении столба сыпучего материала. Получены аналитические выражения для расчета величин давлений и деформаций стен в зависимости от времени истечения.

4. Результаты исследования позволяют предложить пути определения величин и зоны приложения максимально возможных нагрузок на стены силоса при скачкообразном движении столба сыпучего материала.

5. На основании физических представлений о характере изменения условий равновесия при выпуске сыпучего материала высказано и экспериментально подтверждено предположение о возможности плавного безостановочного движения столба сыпучего материала.

6. Экспериментально подтверждено наличие динамических нагрузок на дно и стены силоса при периодических срывах столба сыпучего материала, исследован характер изменения нагрузок на стены силоса в зависимости от расхода и параметров столба сыпучего материала, исследовано изменение деформаций стен силоса при скачкообразном движении столба сыпучего материала.

7. Результаты исследования позволяют предположить, что одной из основных причин весьма быстрого нарушения прочности железобетонных стен глубоких зерновых силосов является наличие циклически переменных нагрузок при значительном их возрастании в процессе движения столба сыпучего материала по второй форме.

8. Результаты исследования позволяют считать, что повышение надежности и долговечности стен глубоких силосов наряду с совершенствованием методов строительства следует видеть в совершенствовании методов их расчета с учетом явлений, сопутствующих скачкообразному движению столба сыпучего материала, либо в коренном улучшении условий их работы. Последнее требует выполнения одного из следующих условий: 1) обеспечения движения сыпучего материала по первой форме; 2) обеспечения (соответствующим расходом) плавного безостановочного

движения столба сыпучего материала; 3) наличия конструктивных дополнений, ликвидирующих накопление деформаций при скачках столба сыпучего материала.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах автора:

1. О распределении давления сыпучей среды по высоте стенки глубокого сосуда. Материалы II всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971. (Соавтор Анатолев А.В.)
2. Давление сыпучей среды на стенку глубокого сосуда. Изв. вузов СССР, Пищевая технология, 1972, № 3. (Соавтор Анатолев А.В.)
3. Теоретические и экспериментальные исследования по продлению срока службы стен силосов для зерна. Научно-исследовательский отчет, № гос. регистрации 73052407, рукопись, Одесса, 1972.  
(Соавторы: Анатолев А.В., Комарницкий В.И.)
4. Динамические давления при истечении сыпучего материала из глубоких сосудов. "Прикладная механика", 1973, т. IX, вып. 12.  
(Соавтор Анатолев А.В.)
5. Распределение давления по высоте стенки глубокого сосуда при установке на его дне вставки-стакана. Изв. вузов СССР, Пищевая технология, 1973, № 1. (Соавторы: Анатолев А.В., Комарницкий В.И.)

Результаты исследования по теме диссертации доложены на:

1. II всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971.
2. XXXIII научной конференции ОТИПН, Одесса, 1972.

#### ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\sigma_r$  - радиальные напряжения в сыпучем материале, н/м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_z$  - вертикальные напряжения в сыпучем материале, н/м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{zg}$  - динамические давления на стенку силоса, н/м<sup>2</sup>;  
 $Q_d$  - динамическая нагрузка на дно силоса, н;  
 $D$  - диаметр силоса, м;  
 $R$  - радиус силоса, м;  
 $\delta$  - толщина стенки силоса, м;  
 $D_0$  - цилиндрическая жесткость силосной оболочки, н·м;  
 $E_c$  - модуль упругости материала стенки силоса, н/м<sup>2</sup>;  
 $\nu_1$  - коэффициент Пуассона материала стенки силоса;  
 $W$  - радиальное смещение срединной поверхности силосной оболочки, м;  
 $H$  - высота силоса, м;  
 $H_1$  - высота зоны предельного равновесия, м;  
 $H_2$  - расстояние от уровня засыпки до уровня образования "воронки", м;  
 $Q_i$  - постоянные, зависящие от конструктивных размеров силоса и параметров столба сыпучего материала, н/м<sup>2</sup>;  
 $\gamma$  - объемный вес сыпучего материала, н/м<sup>3</sup>;  
 $\varphi$  - угол внутреннего трения сыпучего материала;  
 $\varphi_1$  - угол трения сыпучего материала о стенку силоса;  
 $E$  - модуль упругости сыпучего материала, н/м<sup>2</sup>;  
 $M$  - коэффициент поперечной деформации сыпучего материала;  
 $A$  - жесткость сыпучего материала;  
 $\sigma_s$  - предел несущей способности сыпучего материала, н/м<sup>2</sup>;  
 $\xi_1$  - коэффициент передачи бокового давления;  
 $\Omega$  - частота пульсаций, гц.

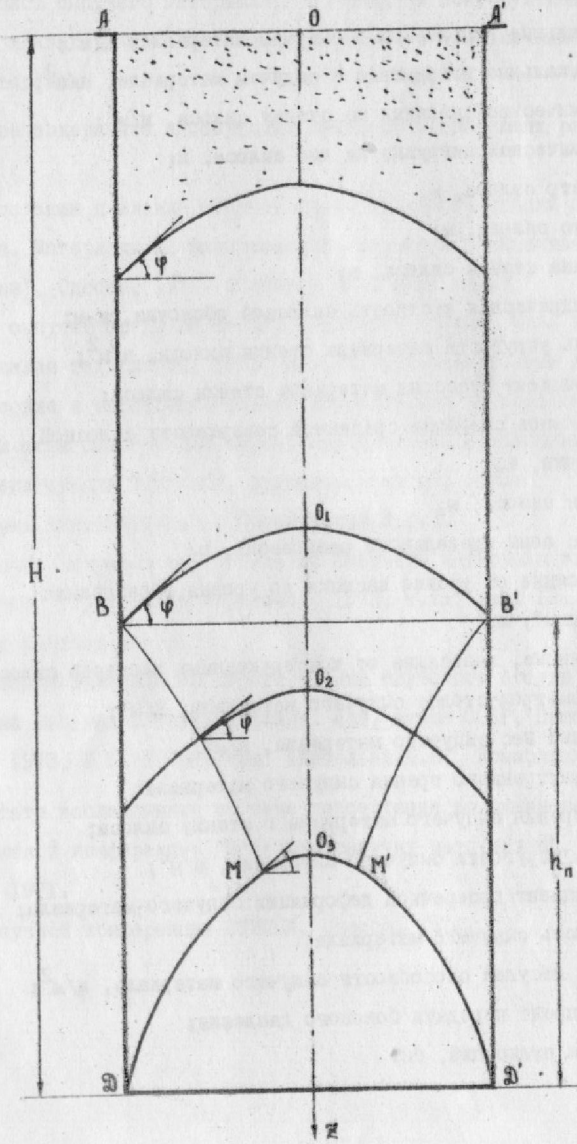


Рис. I

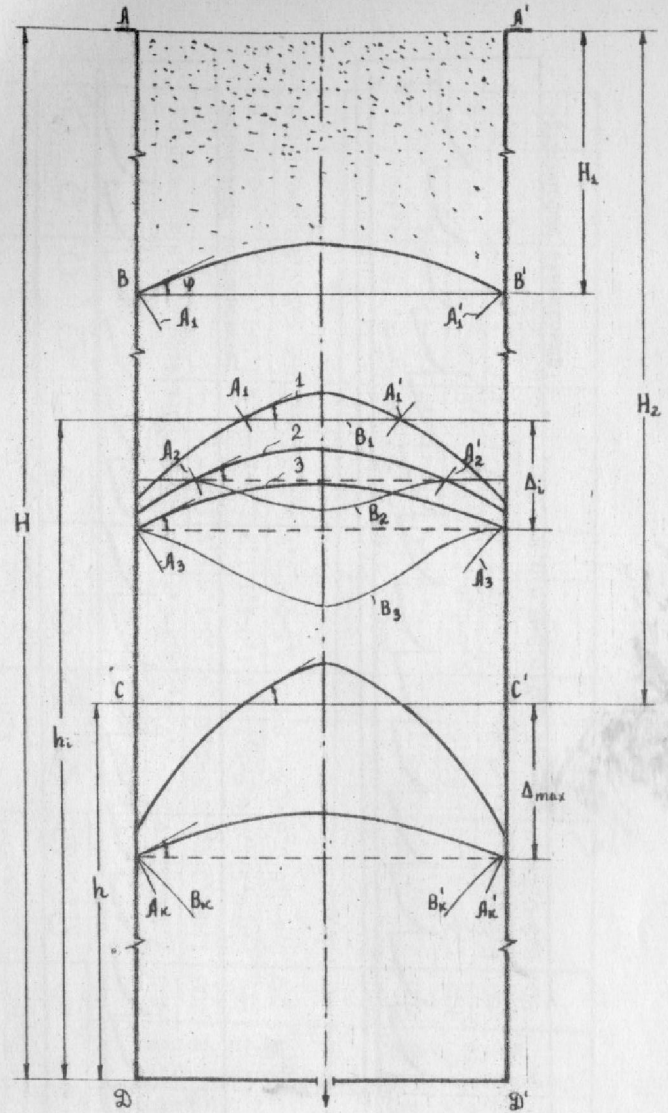
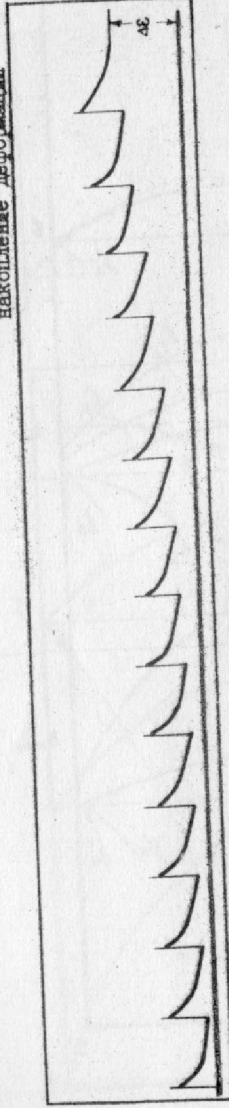


Рис. 2

накопление деформаций



динамическое равновесие

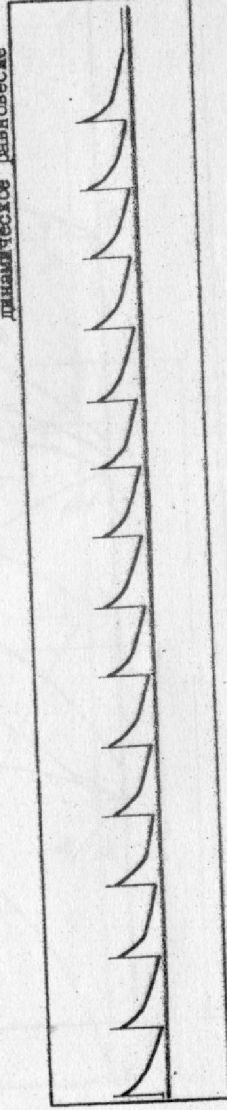


Рис.3

Таблица I

Высота засыпки, м	I,2		I,1		I,0		0,9		0,8		0,7			
	$\Omega_3$	$\Omega_T$	$\Omega_3$	$\Omega_T$	$\Omega_3$	$\Omega_T$	$\Omega_3$	$\Omega_T$	$\Omega_3$	$\Omega_T$	$\Omega_3$	$\Omega_T$		
Скорость заполнения 1,5 н/сек	Скорость выпуска $\nu \cdot 10^6$ м/сек	900	6,2-6,6	6,6	6,3-6,6	6,5	7,1-7,6	7,4	7,5-7,6	7,7	6,1-6,8	8,8	9,0-9,1	9,2
		400	2,3-2,5	2,7	2,4-2,7	2,9	3,1-3,2	3,3	3,5-3,7	3,4	4,0-4,2	3,9	4,0-4,2	4,1
		200	1,0-1,3	1,4	1,1-1,3	1,5	1,3-1,5	1,7	1,8-1,9	1,7	2,2-2,4	1,9	2,2-2,5	2,1
		160	0,8-0,9	1,1	0,9-1,1	1,2	1,0-1,1	1,3	1,0-1,2	1,4	1,0-1,2	1,5	1,0-1,2	1,6
		90	0,4-0,5	0,6	0,5-0,6	0,7	0,5-0,6	0,7	0,5-0,6	0,8	0,5-0,6	0,9	0,5-0,7	0,9
Скорость заполнения 0,8 н/сек	Скорость выпуска $\nu \cdot 10^6$ м/сек	900	6,6-6,8	6,7	6,9-7,2	7,3	7,6-7,7	7,8	8,1-8,4	8,7	8,7-9,1	9,6	9,4-9,8	11
		400	2,5-2,7	3,0	2,9-3,1	3,2	3,1-3,3	3,4	3,5-3,8	3,9	4,0-4,4	4,3	4,2-4,6	4,8
		200	1,3-1,4	1,5	1,3-1,5	1,6	1,3-1,6	1,7	1,6-1,7	1,9	1,8-2,0	2,2	1,9-2,0	2,4
		160	0,9-1,0	1,2	1,1-1,2	1,3	1,1-1,2	1,3	1,3-1,4	1,6	1,3-1,6	1,7	1,3-1,6	1,9
		90	0,3-0,4	0,7	0,3-0,5	0,7	0,3-0,5	0,8	0,3-0,7	0,9	0,3-0,7	1,0	0,5-0,6	1,1

Таблица 2

Скорость заполнения, м/сек	1,5	1,2	0,8	0,5	0,25	0,11
Высота засыпки, м	Критическая скорость выпуска $v_c \cdot 10^{-3}$ м/сек					
1,0	6	5,5	5,1	4,7	3,2	2,0
0,9	5,7	5,4	4,9	4,3	2,7	1,6
0,8	4,1	3,9	3,3	2,6	1,9	1,3
0,7	2,7	2,4	2,0	1,7	1,3	1,1
0,6	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9

БР 04716 18.04.74 г. Формат 60 x 84 1/16  
Объем 1,5 п.л. Заказ № 1267 Тираж 200 экз.  
Городская типография управления по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли Одесского облисполкома.

г. Одесса, Ленина, 49