

Авторефер

Н-34

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

НАУМЕНКО Николай Васильевич

УДК 664.724:539.215

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
И ДАВЛЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ МАССЫ В СИЛОСАХ ЭЛЕВАТОРОВ

Специальность 05.18.03 - хранение зерна  
(элеваторно-складское хозяйство) и других  
сельскохозяйственных продуктов

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1982

ПЕРЕОБЛІК

Общая характеристика работы

20.12.82

Актуальность проблемы. Основными направлениями социального

и экономического развития СССР на 1981-85 гг. и на период до 1990 года предусмотрено увеличить производство зерна в стране до одной тонны на человека. Для его хранения необходимо осуществить проектирование и строительство новых элеваторов, увеличить их долю в общем объеме складского хозяйства. Одним из важных направлений в реализации этих задач является обеспечение эксплуатационной надежности и увеличение срока службы элеваторных сооружений.

Преждевременный выход из строя элеваторов можно объяснить тем, что методы расчета базируются на физических и соответствующих им математических моделях, неадекватно отражающих физическое состояние зерна в силосах и связи между основными характеристиками зерновой массы и закономерностями изменения давлений по высоте и периметру силосов.

Эти модели не могут объяснить и не отражают экспериментально установленные явления пульсаций и локальные повышения давлений в процессе выгрузки зерна из силосов. Поэтому создание физических и математических моделей зерновых сред, адекватно отражающих их состояние является основным методологическим направлением совершенствования расчета и повышения надежности силосных сооружений.

В связи с изложенным автор защищает:

- структурно-феноменологический подход построения физической модели зерновой среды и ее расчетные характеристики;
- разработанную в континуальном приближении теорию напряженного состояния зерновой массы как среды с анизотропной структурой;

v018102  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

Автореф v018102  
НЗ4 Науменко Н.В.  
Исследование структуры,  
напряженного состояния и давления  
1982 0,00




ОНАХТ 20.06.12  
Исследование структу  
v018102



- методику решения задач о напряженном состоянии зерновой массы в силосах элеваторов, в том числе с разгрузочными трубами;

- методику определения давления в силосах с жесткими и податливыми стенками при различных способах формирования структуры зернового столба;

- рекомендации по применению методов расчета давлений зерна в силосах и выбору оптимальных размеров разгрузочных труб;

- рекомендации по загрузке силосов, обеспечивающих повышение их эксплуатационной надежности.

Цель работ. Построение физической и математической моделей зерновой среды, учитывающих ее гранулометрические, деформативные и структурные характеристики в связи с совершенствованием методов расчета силосных сооружений, гарантирующих их надежность.

Задачи работы:

- выбрать модель зерновой среды, позволяющую установить качественные и количественные связи между ее геометрическими, структурными, механическими и кинематическими характеристиками;

- построить девиатор макроскопического тензора напряжений различного состояния зерновой среды, позволяющий получить уравнения связи между его компонентами;

- установить закономерности распределения плотности и напряжений по объему зернового столба и в потоке;

- разработать методику определения давления в силосах с жесткими и податливыми стенками при различных способах формирования структуры зернового столба;

- разработать рекомендации для использования в проектировании и эксплуатации зерновых силосов.

Научная новизна. Разработана методика определения структурно-механических и физических характеристик зерна, необходимых

для оптимизации технологических режимов, процессов длительного хранения, прогнозирования распределения давлений и прочностных параметров стен силосов.

Разработана система моделей:

- геометрическая модель формы зерновок, учитывающая корреляционные связи между главными размерами и параметрами гранулометрического состава;

- геометрические модели упаковок эллипсоидальных и шарообразных зерен в локальных микроструктурах с учетом вариации размеров;

- стохастическая модель макроскопической области зерновой среды, репрезентативной по гранулометрическому составу, числу зерен и контактов, плотности и относительно ее линейных размеров, площади сечений и объема;

- дискретная модель напряженного состояния среды, структурными элементами которой являются шарообразные шероховатые зерна, упруго деформируемые для статического и абсолютно твердые для динамического состояний;

- математическая модель состояния зерновой среды, включающая макроскопический тензор напряжений и физические уравнения, вытекающие из его девиатора.

Составлена система уравнений состояний зерновой среды, содержащая компоненты напряжений, скоростей и скалярное поле давлений. Установлены закономерности распределения плотности, давлений, напряжений и скоростей по объему зернового столба (потока).

Решены задачи о напряженном состоянии зернового столба, учитывающие анизотропию структуры и распределение плотности по объему силоса, в том числе при наличии укороченной разгрузочной трубы. На этой основе разработана методика определения ее оптимальных размеров.

Практическая ценность. Разработанные рекомендации по выбору способов загрузки силосов зерновых элеваторов вошли в "Руководство по проектированию силосов для сыпучих материалов" и в проект новой "Инструкции по проектированию элеваторов, зерноскладов и других предприятий, зданий и сооружений по обработке и хранению зерна" СН 261-77.

Метод оценки оптимальных параметров этих труб и рекомендаций по снижению горизонтальных давлений путем уменьшения жесткости элементов стен силосов предполагается использовать в проектной практике институтов Главпромзернопроекта Министерства заготовок СССР и Минсельстроя СССР.

Предложенную методику определения объемной массы зерна в силосах можно использовать для уточнения его количества в элеваторах.

Методика определения давления зерна в силосах использована НИИЖБ Госстроя СССР для обоснования и расчета оптимальных размеров разгрузочных труб. Замена разгрузочной трубы диаметром 0,84 м и высотой 27 м, подвешенной на 12 тягах, на оптимальную разгрузочную трубу (диаметр 0,60 м, высота 12 м), устанавливаемую на выпускной воронке, позволяет значительно снизить капитальные затраты.

Конструкция силосов с укороченной трубой использована в типовых чертежах серии 3702-2.

В результате только на строительстве Бендерского элеватора удалось сократить расход стали на 250 т по сравнению с первоначальным проектом и получить экономический эффект около 50 тыс. руб.

Предложенные конструкции месдоз позволяют осуществлять экспериментальную проверку расчетных параметров силосов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на трех Всесоюзных научных конференциях по механике

сыпучих материалов (г. Одесса, 1971, 1975, 1980 гг.) и на координационном совещании по механике дискретных сред (Ленинград, 1972) и опубликованы в 17-ти работах. Результаты исследований использованы при проектировании силосов каньелюрного типа на комбинате хлебопродуктов № 9 (г. Бендеры) МССР.

Объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 212 наименований, в том числе 51 зарубежных, и приложения, включающего акт о результатах испытаний, две справки о внедрении и экономическом эффекте. Работа содержит 150 страниц машинописного текста, 11 таблиц и 82 рисунка.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведено современное состояние вопроса о надежности методов расчета силосов зерновых элеваторов, дана общая характеристика моделей зернистых сред и исследований по определению давления зерна в силосах, обсуждены технологические способы и устройства, снижающие рост и пульсации давлений, а также сформулированы цель и задачи исследования.

Для современного состояния проблемы повышения надежности силосов зерновых элеваторов характерным является отсутствие общепринятых данных о нагрузках от давления зерна и методов их расчета, что обусловило развитие множества физических и математических моделей зерновой среды и конструктивных решений для уменьшения давления на стены силосов. В теоретических исследованиях используют следующие модели:

- модели сплошной среды, которые не способны внутренне отразить механизм межзернового взаимодействия и возможные структурные состояния зерновых масс;

- дискретные модели, учитывающие локальную структуру упаковки зерен. Дискретный подход к изучению напряженного состояния

зернистой среды отражен известными моделями советских и зарубежных ученых (И.И. Кандауров, Л.В. Гячев, С.Ф. Jenkin, H.A. Dezesiewicz, R. Buttefield и др.). Модели с регулярной укладкой равновеликих сферических или цилиндрической формы зерен обладают лишь общими, но далеко не всегда характерными для зернистых сред свойствами. Стохастические модели рассматривали Г.И. Покровский, Р.А. Муллер, В.В. Куликов, И.Т. Сергеев, J. Litwiniszyn и др. Укажем, что применимость стохастических моделей к задачам механики зерновых масс в силосах требует более обоснованного построения исходной системы физических предпосылок. Кроме того, ни одна из этих моделей не дает достаточно удовлетворительного объяснения двум важнейшим экспериментально установленным фактам, которые наблюдаются в процессе выгрузки зерновых силосов: появление пульсаций и локальных пиковых давлений на определенном уровне.

Работы С.Г. Тахтамышева, А.Г. Иммермана, М.С. Бернштейна, В.С. Кима, Р.Л. Зенкова, Г.А. Гениева, П.Н. Платонова, К.И. Куценко, И.С. Хорошего, А.В. Анатольева, А.П. Ковтуна, В.Г. Лебединского, Е.А. Банина, Я.Б. Львина, Л.В. Гячева, А.М. Трухлова, А.П. Галетова, Н.Ф. Красичковой-Терновской, В.Н. Чоботова, В.И. Комарницкого и других были посвящены вопросам совершенствования расчетных методов определения нагрузок от зерна на стены силосов.

Особенностью процесса выгрузки силосов является большая неравномерность и изменчивость во времени давлений. Анализ этих явлений приведен в обзорных работах А.М. Курочкина и в монографии Е.З. Болтянского и др. - "Эксплуатационная надежность элеваторов". Здесь рассмотрены также существующие технологические способы и устройства, позволяющие регулировать нагрузки от давления зерна на стены и днища силосов. Исследования в этом направлении проведены в ЦНИИПромзернопроекте, ЦНИИЭСельстрое, НИИЖБ и ОТИП им. М.В. Ломоносова под руководством В.С. Кима и А.М. Ку-

рочкина, И.С. Хорошего, Г.К. Хайдукова, П.Н. Платонова и А.В. Анатольева.

Изменение структуры зернового столба можно достичь также уменьшением жесткости стенок оболочки и днища силоса. Специальным вопросам этого направления посвящены работы, проводимые в ЦНИИПромзернопроекте, ЦНИИЭСельстрое, Саратовском политехническом и Одесском технологическом институтах.

Во второй главе разработаны физические и математические модели зерновой массы как макроскопически дискретной среды. Новый метод построения моделей состоит в анализе гранулометрического состава и корреляционных связей между главными размерами зерновок, плотности укладки и координационного числа в локальных микроструктурах, напряженно-деформированного состояния зерновок с учетом распределения контактных усилий по их поверхности. Переход к макроскопическим областям зерновой среды, репрезентативным по гранулометрическому составу, числу зерен и контактов, плотности, линейным размерам, площадям сечений и объемам позволили для шероховатых зерен шарообразной формы построить методом статистического усреднения тензор макроскопических напряжений:

$$\sigma_{ij}^q = P \cdot \delta_{ij} + \frac{1}{2} J_q (v_i \tau_j + v_j \tau_i), \quad q=1,2.$$

Девизорная часть содержит индикатор  $J_q$ , различающий две модели. Первая модель ( $q=1$ ) предполагает зерна упруго-деформируемым ( $J_1 = C_{11} \Delta P$ ), а вторая модель ( $q=2$ ) абсолютно твердым ( $J_2 = f_c P$ ). Коэффициенты  $C_{11}$  и  $f_c$  являются физическими константами. В рамках первой модели описывается статическое состояние зерновой среды, а в рамках второй - динамическое.

В третьей главе исследуется структура и напряженное состояние зернового столба при различных способах заполнения силосной емкости. На основании предложенной физической модели процесса

уплотнения получено уравнение состояния зерновой массы. Параметры уравнения состояния и деформативные характеристики зерна определены на приборе специальной конструкции ОИМФА, позволяющем исключить влияние внешнего трения образца за счет продольной деформации обоймы.

Исходя из вероятностной трактовки процесса формирования структуры зернового столба и уравнения состояния, найдены законы распределения плотности (табл. I) для различных способов загрузки цилиндрического силоса. В табл. I приведены числовые значения параметров для силоса  $H = 30$  м,  $D = 6$  м.

При исследовании напряженного состояния зерновой массы система уравнений равновесия, содержащая функцию плотности  $\rho(x_i)$  дополнена физическими уравнениями, полученными из рассмотрения дивергента тензора напряжений первой модели ( $q = 1$ ):

$$\text{Div } \sigma_{ij} = -\frac{2}{3} x_0 f_0 \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} \tau_j + \frac{\partial P}{\partial x_j} \tau_i \right), \quad \text{grad } P \cdot \tau_i = 0,$$

$$x_0 = \bar{c}_0 \cdot \bar{l}_0, \quad f_0 = \text{tg } \bar{\psi}_0, \quad \bar{l}_0 = \frac{\bar{K} e \cdot d_0}{6 \delta_0^2}, \quad P = \frac{1}{3} \sigma_{mm},$$

$$\bar{c}_0 = \frac{4 \bar{d}^{2/3}}{\pi \cdot (1 + \mu_0)(2 - \mu_0)} \cdot \left[ \frac{E}{3(1 - \mu_0^2)} \cdot \frac{e^{\gamma_{\text{max}}}}{e_{\psi} \cdot P_{\psi}^{\text{max}}} \right]^{1/3}.$$

Этим завершается построение градиентной теории давления, в соответствии с которой поставлены осесимметричные краевые задачи о напряженном состоянии зернового столба (рис. I).

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \pm \mu \left( -\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right) + g \bar{\rho}_H(z, z),$$

$$P(z, z) = 0, \quad \text{при } z = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad \text{при } z = 0;$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \pm \beta_R P = 0, \quad \text{при } z = 0, \quad \beta_R = \frac{3 \text{tg } \psi_R}{\sqrt{2} \chi_0 f_0} \cdot \frac{\sin \bar{\psi}_R}{2 \cos^2 2 \bar{\psi}_R \pm \sin 4 \bar{\psi}_R \text{tg } \psi_R}.$$

В этих уравнениях знак "+" соответствует заполнению силоса

Таблица I

№ III	Загрузка силоса	Законы распределения плотности $\rho_H(z, z)$ и давления $P(z, z)$	Значения параметров	- II -	
				$\rho_{\text{max}}^0$	$\rho_{\text{max}}^c$
Внецентральная - - струей		$\rho_H(z, z) = \rho_{\text{max}}^0 e^{-\chi_0 \frac{\chi_0 \cos \theta}{\sqrt{2} R}} \cdot [1 - e^{-(a_0 + b_0 z)}]$	$\rho_{\text{max}}^0 = 0,65 \rho_0, \quad \chi_0 = 0,01$ $\alpha_0 = 1,923, \quad b_0 = 0,08345, \text{ м}^{-1}$		
Центральная - - струей		$\rho_H(z, z) = \rho_{\text{max}}^c e^{-\chi_c \left(\frac{z}{R}\right)^2} [1 - e^{-(a_c + b_c z)}]$ $P(z, z) = \frac{\sqrt{2} R}{b_c} \cdot e^{-\frac{\beta_c^2}{2 R}} \cdot [1 - e^{-\frac{b_c z}{R}} + \frac{b_c \cdot e^{-a_c}}{1 - b_c} (e^{\frac{b_c z}{R}} - e^{-b_c z})]$	$\rho_{\text{max}}^c = 0,655 \rho_0, \quad \chi_c = 0,05$ $\alpha_c = 1,879, \quad b_c = 0,08345, \text{ м}^{-1}$		
Кольцевая - - по периметру		$\rho_H(z, z) = \rho_{\text{max}}^k e^{-\frac{z^2 \rho^2}{R^2}} \cdot [1 - e^{-(a_k + b_k z)}]$ $P_k(z, z) = \frac{\sqrt{2} \cdot R}{b_k} \cdot e^{-\frac{\beta_k^2}{2 R}} \cdot [1 - e^{-\frac{b_k z}{R}} + \frac{b_k \cdot e^{-a_k}}{2_k - b_k} \cdot (e^{\frac{b_k z}{R}} - e^{-b_k z})]$	$\rho_{\text{max}}^k = 0,648 \rho_0, \quad \chi_k = 0,0435$ $\alpha_k = 1,889, \quad b_k = 0,08827, \text{ м}^{-1}$		
Равномерная - - "дождем"		$\rho_H(z) = \rho_{\text{max}}^g [1 - e^{-(a_g + b_g z)}]$ $\sigma_{zR}(z) = \frac{\sqrt{2} R}{2_g} [1 - e^{-\frac{z}{R}} + \frac{z \cdot e^{-a_g}}{2_g - b_g} \cdot (e^{\frac{z}{R}} - e^{-b_g z})]$	$\rho_{\text{max}}^g = 0,668 \rho_0$ $\alpha_g = 1,881, \quad b_g = 0,0851, \text{ м}^{-1}$		

струей по центру (рис. Ia), а знак "-" - по периметру (рис. Ib) и приняты обозначения

$$\mu = \frac{\chi_1^2 + \chi_2^2}{\chi_2 + \chi_1 \operatorname{tg} \bar{\psi}}, \quad \bar{\rho}_n(z, z) = \nu \rho_n(z, z), \quad \nu = \frac{\chi_2}{\chi_2 + \chi_1 \operatorname{tg} \bar{\psi}},$$

$$\chi_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \chi_0 f_0 \cdot \frac{\sin 4 \bar{\psi}}{\sin \bar{\psi}}, \quad \chi_2 = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \chi_0 f_0 \cdot \frac{\cos^2 2 \bar{\psi}}{\sin \bar{\psi}}.$$

Для данных краевых задач методом акад. Л.В. Канторовича получены аналитические решения (табл. I), которые позволяют определять компоненты напряжений

$$\sigma_{zz} = P \pm \chi_1 \frac{\partial P}{\partial z}, \quad \sigma_{zz} = P \mp \chi_1 \frac{\partial P}{\partial z}, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz} = \mp \chi_2 \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Распределение давления зерна в силосе с разгрузочной трубой (рис. Ic) получено обобщением краевой задачи на двухсвязную область (зона II), что позволило определить условия для выбора ее оптимальных размеров.

Для всех рассмотренных аналитических решений составлены алгоритмы расчета распределения давлений.

В четвертой главе описаны экспериментальная база и методики измерений, приведены результаты и дан анализ экспериментальных исследований влияния способов формирования структуры зернового столба, жесткости стен на его напряженное состояние и распределение давлений в силосах.

Для обеспечения экспериментальных исследований были разработаны и испытаны базовая модель двухкомпонентных тензорезисторных мессдоз и опытный образец многокомпонентной мессдозы в форме куба (0,12 м x 0,12 м x 0,12 м) для измерения 12-ти составляющих напряженного состояния зерновой среды. На основании базовой модели были разработаны две модификации мессдоз для испытания силосов каннелюрного типа при внедрении экспериментального элеватора в г. Бендеры МССР. Толщина упруго-деформируемых элементов была выбрана расчетным путем для пяти уровней установки мессдоз

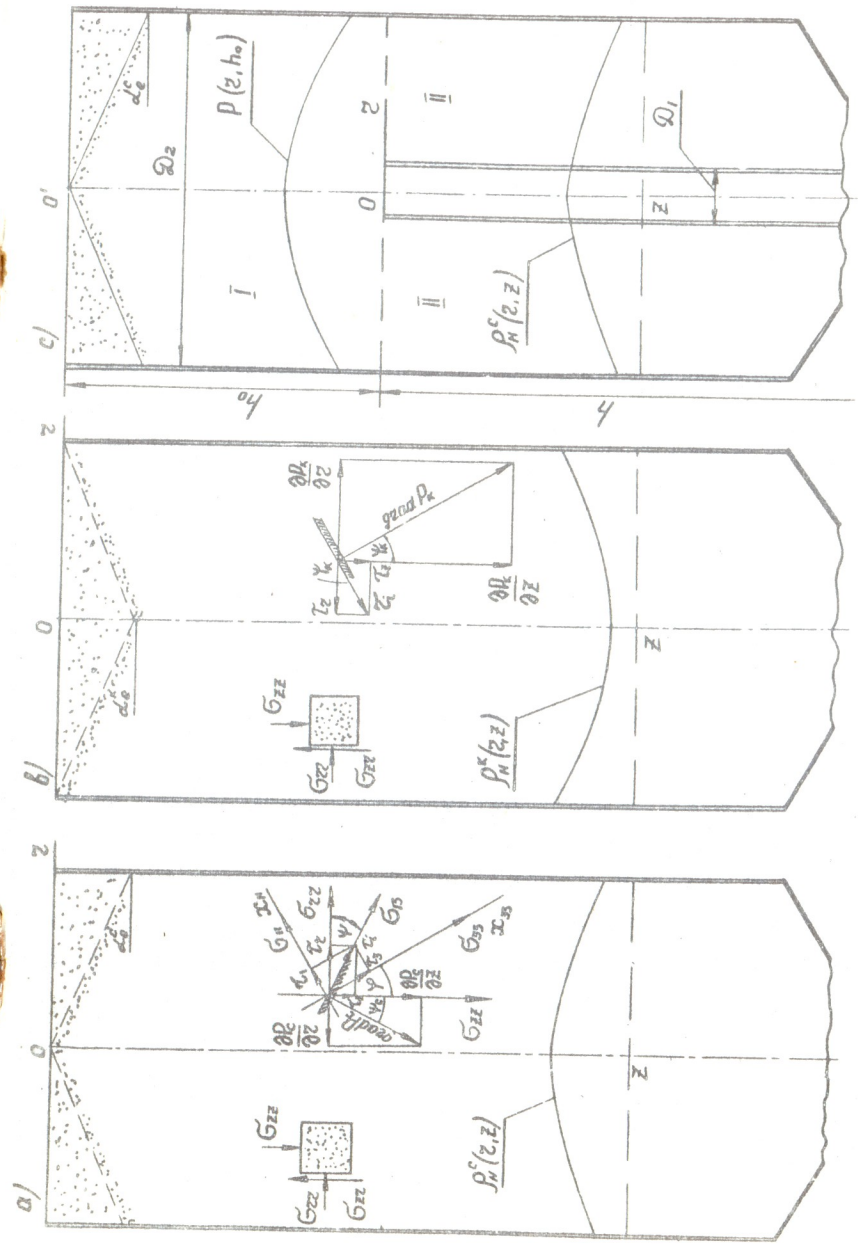


Рис. I

по высоте силоса. Оценка надежности работы выборочного числа мессдоз проводилась в ЦНИИСКе им. Кучеренко по методике Д.С. Баранова. Полученные данные и результаты измерений давлений в натурных условиях позволили рекомендовать эти мессдозы в практику испытания силосов зерновых элеваторов.

Натурные испытания проводились в силосах № 178 (мелькомбинат им. А.Д. Цорупы, г. Москва), № 325 (элеватор на ст. Гайчур Запорожской обл.) и № 13 (комбинат хлебопродуктов в г. Бендеры МССР). Экспериментальные кривые на рис. 2 показывают распределение горизонтальных давлений на стены натурных силосов № 178 (кривые 1, 2), № 325 (кривые 3, 4) и № 2511 Одесского портового элеватора (кривые 5, 6 заимствованы для сравнения из работ Б.М. Иванова). Результаты теоретических расчетов горизонтальных давлений представлены на этом рисунке кривыми: 7 - заполнение "дождем", 8 - струей по центру и 9 - по периметру. Кривые 1 и 3 соответствуют измеренным давлениям по образующим оболочки силоса с большей жесткостью стен, а кривые 5 и 6 - заполнению силоса по периметру и струей по центру.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретический вывод, что наибольшие давления на стены силосов имеют место при центральной загрузке (кривая 8), а наименьшие - при загрузке по периметру (кривая 9). Это противоречит опытам Б.М. Иванова (кривые 5 и 6), однако соответствуют опытам М.С. Бернштейна, В.С. Кима и проведенным дополнительно нами лабораторным исследованиям. Наблюдаемое отклонение общей закономерности на отдельных участках кривых можно объяснить внецентренным способом загрузки и неравномерной жесткостью оболочек силосов № 178 и № 325. Было установлено, что уменьшение жесткости стенок приводит к снижению давлений. Так как в натурных условиях жесткость оболочки не изменяется, то были проведены исследования на моделях силосов с естественной податливостью ( $H = 5 \text{ м}$ ,  $D = 1 \text{ м}$ )

и принудительной раздвижкой стен ( $H = 1,5 \text{ м}$ ,  $D = 0,3 \text{ м}$ ). Исследования на моделях показали, что наибольший эффект снижения горизонтальных давлений достигается при радиальной деформации стенок порядка среднеэффективного размера зерен.

Полученные в работе теоретические распределения давлений на стены силосов с разгрузочными трубами были сопоставлены с экспериментальными исследованиями И.С. Хорошего и Н.Ф. Красичковой - Терновской (Кустанайский элеватор, силос № 226,  $D = 6 \text{ м}$ ,  $H = 30 \text{ м}$ , пшеница:  $\gamma = 7,4 \text{ кН/м}^3$ ,  $W = 12-13\%$ ) и данными комплексных испытаний силосов каннелюрного типа, проведенными совместно НИИЖБ Госстроя СССР и ОТИП им. М.В. Ломоносова при участии автора (Бендерский элеватор, силос № 13,  $H = 36 \text{ м}$ ,  $D = 12 \text{ м}$ , пшеница:  $\gamma = 7,4 \text{ кН/м}^3$ ,  $W = 13,2\%$ ). В этих силосах осесимметрично были установлены перфорированные разгрузочные трубы (№ 226 -  $d = 1 \text{ м}$ ,  $h = 30 \text{ м}$ ; № 13 -  $d = 0,84 \text{ м}$ ,  $h = 27 \text{ м}$ ). Снижение горизонтальных давлений по всей высоте силоса № 226 (рис. 3) и в зоне влияния укороченной разгрузочной трубы (силос № 13, рис. 4) подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями. Однако, во всех циклах испытаний значения давлений некоторых мессдоз (IV цикл, ломанные кривые рис. 4) превышают теоретические (кривая 1 - по Янсену, кривая 2 - по В.И. Комарницкому, 3 - наша расчетная кривая). Это можно объяснить недостаточно полным учетом граничными условиями действующих факторов во время загрузки силосов. Но несмотря на то, что формулы для расчета давлений были получены при ряде допущений относительно параметров физических уравнений, метода аналитического представления решений краевых задач, можно считать хорошим совпадением с экспериментальными данными расчетных давлений не только для односвязных (рис. 1, схемы а и в), но и двухсвязных областей зерновой среды (рис. 1, схема с).

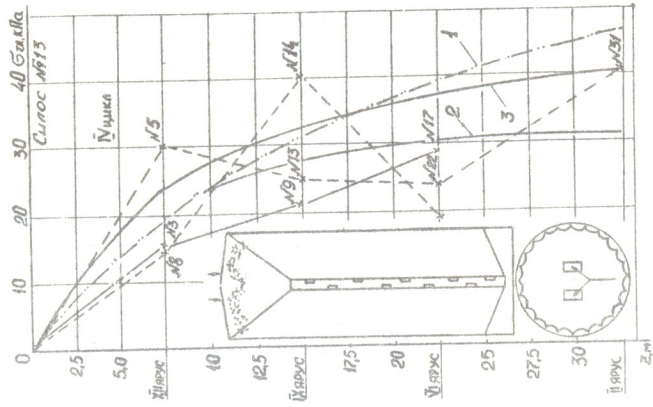


Рис. 4

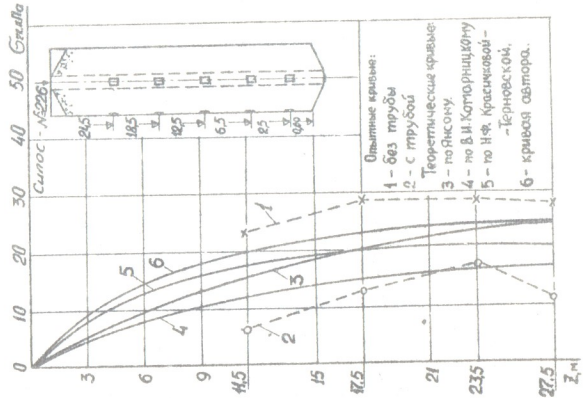


Рис. 3

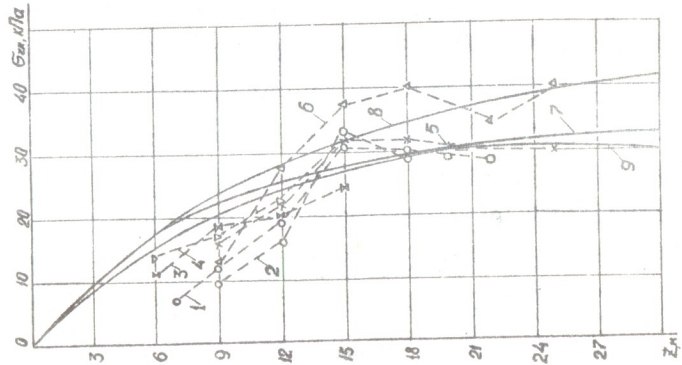


Рис. 2

Опыты подтвердили, что распределение давлений в силосах с относительно жесткими стенками определяются, главным образом, способами загрузки (инерционный или гравитационный; струей по центру или внецентренно, по периметру или "дождем"). Внецентренная загрузка является наиболее неблагоприятным фактором, вызывающим асимметричную неравномерность распределения давлений не только при загрузке, но и выгрузке силосов. Вторым по значимости фактором являются локальные смещения и деформации стенок с неравномерной по периметру оболочки силоса жесткостью. Установлено, что снижение жесткости стенок, изменение внутренней геометрии силосов не исключает полностью появление пульсаций, что объясняется перераспределением плотности внутри и на границах зернового потока. Физико-механические свойства и гранулометрический состав зерновой среды составляют третий по значимости фактор формирования напряженного состояния. В опытах установлено, что величина давления растет с увеличением объемной массы и уменьшением размера зерен. Одновременно с указанными факторами всегда действуют релаксационные процессы, связанные с продолжительностью хранения зерна в силосах.

В пятой главе рассмотрены кинематика и напряженное состояние зернового потока при выгрузке силосов, решены задачи по определению форм движения и зон разрыхления, скоростей и траекторий зерен в потоке, длительности переходного режима к установившемуся истечению. Установлен эффект резкого повышения производительности выгрузки в начальной фазе образования воронки, что дает метод определения момента перехода второй формы движения в первую. Процесс истечения зерна сопровождается пульсациями скоростей и возникновением поперечных движений зерен не только в зоне разрыхления, но и на границах зернового потока, что под-

4018102  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

тверждает выводы М.М. Осипова о совпадении области поперечного движения зерен с зоной максимального увеличения давления на стенку силоса.

Выявлена зависимость кинематических характеристик зернового потока от его начального напряженного состояния, определяемого способом заполнения силосной емкости.

Полученные результаты явились основой построения физической модели формирования зернового потока и сопутствующих явлений в процессе истечения зерна.

Математическая модель напряженного состояния потока включает уравнения движения и сплошности зерновой среды, уравнение условия отсутствия вихрей и физические уравнения, полученные из выражения дивергента макроскопического тензора напряжений для второй модели ( $q = 2$ )

$$\text{Div } \sigma_{ij} = \frac{f \cdot D}{2 \sqrt{V}} \left( v_i \frac{\partial V}{\partial x_j} + v_j \frac{\partial V}{\partial x_i} - 2 \frac{v_i \cdot v_j}{V^2} v_m \frac{\partial V}{\partial x_m} \right)$$

Отсюда видна зависимость дивергента от поля скоростей, давления и межзернового трения.

Для плоской задачи из выражения дивергента следуют соотношения:

$$\frac{2\sigma_{xz}}{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}} = \frac{1}{2} \frac{v_x^2 - v_z^2}{v_x \cdot v_z}, \quad \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{\sigma_{xx} + \sigma_{zz}} = 2f \frac{v_x \cdot v_z}{V^2}$$

Первое из этих равенств было получено ранее А.Ю. Ишлинским и Г.А. Гениевым. Второе равенство дает зависимость коэффициента бокового распора зерновой среды от скоростей и коэффициента межзернового трения.

$$f = \frac{v_x^2 + v_z^2 + 2f v_x v_z}{v_x^2 + v_z^2 - 2f v_x v_z}$$

Для осесимметричной задачи при условии прямолинейности траекторий зерен по оси и на границах сужающейся части зернового

потока в режиме установившегося истечения получены распределения плотности, компонент скоростей и формулы для определения производительности выгрузки силоса и напряжений внутри и на границах зернового потока.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в настоящей работе, можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика определения структурно-механических и физических характеристик зерна, необходимых для оптимизации технологических режимов, процессов длительного хранения, прогнозирования напряженного состояния, распределения плотности и давления зерновой массы в связи с выбором прочностных параметров стен силосов зерновых элеваторов.

2. Создана модель зерновой среды, которая адекватно отражает дискретность и анизотропию, присущую реальным структурным состояниям зерновых масс.

3. На базе физической модели составлена математическая модель, устанавливающая связи между гранулометрическими, деформативными, структурными и другими параметрами зерновой среды.

4. На основе этих моделей осуществлено построение макроскопического тензора напряжений, сохраняющее геометрические и физико-механические характеристики зерновой среды для различных ее структурных состояний.

5. Из дивергентной части тензора получены физические уравнения, определяющие зависимость компонент напряжений от градиентов функций скалярных полей давлений и скорости, что полностью отражает анизотропные свойства зерновой среды.

6. В соответствии с физическими уравнениями поставлены и решены краевые задачи о напряженном состоянии зернового столба,

учитывающие предисторию формирования его структуры и распределение плотности по объему силоса, в том числе при наличии укороченной разгрузочной трубы. На этой основе разработана методика определения ее оптимальных размеров.

7. Полученная система уравнений динамического состояния зерновой массы дает метод определения напряжений и коэффициента бокового распора внутри и на границах зернового потока в зависимости от распределения скоростей и плотности по его объему при выгрузке силоса.

8. Предложенный структурно-феноменологический подход можно рекомендовать как основу методики определения геометрических и физико-механических характеристик зерновой среды, являющихся параметрами распределения макроскопических величин плотности, давления и скорости.

9. Полученные в работе результаты аналитических и экспериментальных исследований использованы при усовершенствовании действующих норм СН 261-77, а также при обосновании размеров оптимальной разгрузочной трубы для силосов каннельного типа Бендерского элеватора.

10. Методика применения предложенной конструкции месдоз при натурных испытаниях элеваторов может быть использована для проверки действующих нагрузок от зерна на стены и днища силосов.

11. На основе проведенных исследований рекомендовано исключить из практики проектирования силосов внецентренный способ загрузки для избежания асимметричного распределения нагрузок, снижающих эксплуатационную надежность зерновых элеваторов, а также предложено строительство силосов с равномерной и меньшей жесткостью из стенок.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. К вопросу исследования физико-механических свойств сыпучих материалов / П.Н. Платонов, В.Е. Глушков, Л.И. Корнаушенко, Н.В. Науменко. - Инж.-физич. журн., 1971, т.18, №4, с.702-708.

2. Глушков В.Е., Науменко Н.В. Принципы построения физических моделей зернистых сред. - В кн.: Материалы II Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов". Одесса, 1971, с.11-12.

3. Науменко Н.В., Платонов П.Н. О построении уравнений статики в механике зернистых сыпучих сред. - Там же, с.12-14.

4. Платонов П.Н., Науменко Н.В., Бубело В.В. К вопросу о расчете некоторых геометрических характеристик зернистых материалов. - Там же, с.17-19.

5. Глушков В.Е., Науменко Н.В., Платонов П.Н. Фазовые превращения и физические основы математической модели сыпучих материалов. - В кн.: Тр. Координационных совещаний по гидротехнике. Л., Энергия, 1972, вып.77, с.96-98.

6. Механизм передачи давления сыпучего материала при податливых ограждающих поверхностях / Б.М. Иванов, Н.В. Науменко, П.Н. Платонов и др. - Там же, с.69-71.

7. Платонов П.Н., Науменко Н.В., Иванов Б.М. О совместной работе сыпучего материала со стенками силоса. - Прикл. механика, 1972, т.8, №9, 103-109.

8. Платонов П.Н., Науменко Н.В. Влияние жесткости стенок силосной емкости на напряженное состояние зернистого материала. - В кн.: Строительные конструкции, здания и сооружения. М., ОНТИ ЦНИИЭП-Сельстрой, 1974, вып. 8, с.113-119.

9. Обобщенные результаты исследования давления зерна в силосах П.Н. Платонов, Б.М. Иванов, В.Е. Глушков, Н.В. Науменко. - В кн.: Исследование напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. - Саратов, изд-во Саратовского ун-та, 1975, в.4, с.64-83.

10. Науменко Н.В., Платонов П.Н., Рачек И.Ю. Напряженное состояние материала при хранении в силосах концентрического типа. - В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.107-108.

11. Науменко Н.В., Гамолит В.Я., Платонов П.Н. Влияние начальной укладки на деформативные свойства сыпучих материалов. - Там же, с.15-17.

12. Науменко Н.В., Гамолич В.Я. Пределные деформации и уравнение состояния сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов", Одесса, 17-19 сентября, Одесса, 1980, с.36-37.

13. Науменко Н.В., Аэро Э.Л. Об одном варианте метода тензорных представлений в механике сыпучих сред. - Там же, с.10-11.

14. Науменко Н.В. Плотность укладки зерен в локальных микроструктурах неоднородной сыпучей среды. - Там же, с.35.

15. Бугаев В.Т., Науменко Н.В. О распределении давления по высоте стенки в процессе образования засыпки. - Там же, с.139.

16. Науменко Н.В., Платонов П.Н. Базовая модель измерителя давления сыпучего материала. - Там же, с.334-335.

17. Давление зерна в силосах каннелюрного типа / Б.М. Иванов, В.Г. Лебединский, В.Я. Гамолич, Н.В. Науменко. - Там же, с.134-135.

Основные обозначения

$d_0, \mu_0, E_0$  - средние значения диаметра, коэффициента Пуассона и модуля Юнга;  $e_j^{max}, p_j^{max}$  - максимальные значения деформации  $e_j$  и контактной силы сжатия  $p_j$ , соответствующие пределу упругости зерновки;  $\delta_e, K_e$  - коэффициент вариации линейного размера макрообласти и соответственно плотности укладки зерен в его пределах;  $\psi_0, \psi_R$  - углы межзернового и внешнего трения;  $\bar{\psi}, \bar{\psi}_R$  - средние значения углов сопротивления сдвигу внутри и на границах зернового столба;  $\tau_i, \nu_i$  - орты направления сдвига и ориентации площадок;  $\bar{\gamma}, b$  - расчетные значения объемной массы и параметра распределения давления зерна;  $\gamma, w$  - объемная масса и влажность зерна;  $P = \frac{1}{3}(\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})$ ,  $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}, \sigma_{zx}$  - среднее давление, горизонтальная, радиальная, вертикальная и тангенциальная компоненты тензора  $\sigma_{ij}$ ;  $V, v_i, v_j, v_m, v_x, v_z$  - модуль и компоненты вектора скорости  $\bar{V}$ ;  $\|\bar{N}\| = |\bar{V} \times \text{grad } V|^{1/2}$  - нормирующий множитель;  $c, k, q$  - индексы способа заполнения;  $m$  - немой индекс;  $i, j$  - тензорные индексы.

Наче -