

Автор ер.

и 20

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ им. М. В. Ломоносова

Инженер Б. М. ИВАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДАЧИ ДАВЛЕНИЙ
ЗЕРНА НА СТЕНЫ СИЛОСА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ
ПАРАМЕТРАХ ЗЕРНОВОГО ПОТОКА

05.175 - Машины и аппараты пищевой промышленности

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

Научный руководитель
доктор технических наук
профессор П. Н. ПЛАТОНОВ.

Одесса - 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ им. М. В. Ломоносова

Инженер Б. М. ИВАНОВ

Переучет 19.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДАЧИ ДАВЛЕНИЙ
ЗЕРНА НА СТЕНЫ СИЛОСА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ
ПАРАМЕТРАХ ЗЕРНОВОГО ПОТОКА.

ОБ.175 - Машины и аппараты пищевой промышленности.

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
профессор П. Н. ПЛАТОНОВ.

ОНАХТ 26.09.13
Исследование механиз



v011778

Одесса - 1971

к. б. 11778

Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова
Б И Б Л И О Т Е К А

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ПЛАТОНОВ П.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ТРУХЛОВ А.М.
кандидат технических наук,
доцент ШУМСКИЙ О.Д.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский экспериментальный и проектный институт по сельскому строительству, ЦНИИЭПсельстрой.

Автореферат разослан "21" апреля 1971 г.

Защита диссертации состоится "21" мая 1971 г.
на заседании Ученого Совета Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГИПП.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направить в Совет института по адресу: г.Одесса-39, ул.Свердлова, 112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

С каждым годом в нашей стране увеличивается валовое производство зерновых культур. К 1980 году производство зерна должно составить 18-19 млрд. пудов. Обеспечение в кратчайшие сроки приема и полной сохранности такого количества зерна планируется путем строительства наиболее прогрессивной и высокomeханизированной емкости - зерновых элеваторов.

В течении всей истории строительства элеваторов ученых и практиков волновал вопрос прочности стен силосов, так как случаи нарушения целостности стен нарастали пропорционально объему построенной силосной емкости.

Для объяснения сложившегося положения выдвигался ряд причин, были предложены различные гипотезы о механизме передачи давлений в сыпучем материале и соответствующие им методы расчета.

Самое широкое распространение во всех странах получил метод определения давлений на дно и стенки силоса, предложенный Янсенom. Но с момента опубликования этой теории (1895 г.) она сразу же вступила в противоречия с практикой. По мере накопления экспериментального материала противоречия углублялись, все отчетливее было видно несовершенство принятого метода расчета.

Попытки сгладить противоречия путем введения поправочных коэффициентов к желаемому результату не привели. Нарушение прочности стен силосов продолжало иметь место. Интерес к этой проблеме растет с объемом строительства элеваторов.

Только за последние 2-3 года прошли международные и всесоюзные симпозиумы и конференции, в решениях которых подчеркивается насущная необходимость дальнейшей теоретической разработки вопросов механики сыпучих материалов, создания научно-обоснованного метода расчета силосов, проведения широких экспериментальных исследований.

Реферируемая работа посвящена развитию одного из указанных

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ПЛАТОНОВ П.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ТРУХЛОВ А.М.
кандидат технических наук,
доцент ШУМСКИЙ О.Д.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский экспериментальный и проектный институт по сельскому строительству, ЦНИИЭПсельстрой.

Автореферат разослан "21" апреля 1971 г.

Защита диссертации состоится "21" мая 1971г.
на заседании Ученого Совета Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИПП.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направить в Совет института по адресу:
г.Одесса-39, ул.Свердлова,112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

С каждым годом в нашей стране увеличивается валовое производство зерновых культур. К 1980 году производство зерна должно составить 18-19 млрд. пудов. Обеспечение в кратчайшие сроки приема и полной сохранности такого количества зерна планируется путем строительства наиболее прогрессивной и высокомеханизированной емкости - зерновых элеваторов.

В течении всей истории строительства элеваторов ученых и практиков волновал вопрос прочности стен силосов, так как случаи нарушения целостности стен нарастали пропорционально объему построенной силосной емкости.

Для объяснения сложившегося положения выдвигался ряд причин, были предложены различные гипотезы о механизме передачи давлений в сыпучем материале и соответствующие им методы расчета.

Самое широкое распространение во всех странах получил метод определения давлений на дно и стенки силоса, предложенный Янсенем. Но с момента опубликования этой теории (1895 г.) она сразу же вступила в противоречия с практикой. По мере накопления экспериментального материала противоречия углублялись, все отчетливее было видно несовершенство принятого метода расчета.

Попытки сгладить противоречия путем введения поправочных коэффициентов к желаемому результату не привели. Нарушение прочности стен силосов продолжало иметь место. Интерес к этой проблеме растет с объемом строительства элеваторов.

Только за последние 2-3 года прошли международные и всесоюзные симпозиумы и конференции, в решениях которых подчеркивается насущная необходимость дальнейшей теоретической разработки вопросов механики сыпучих материалов, создания научно-обоснованного метода расчета силосов, проведения широких экспериментальных исследований.

Реферируемая работа посвящена развитию одного из указанных

направлений и преследует цель, - на основе рассмотрения физической природы идеального сыпучего материала и экспериментальных исследований на натурных силосах действующих элеваторов Советского Союза выяснить влияние конструктивных особенностей силосов и различных режимов их эксплуатации на характер распределения и величины давлений.

Диссертация состоит из четырех глав, выводов и приложений.

В первой главе приводится анализ состояния вопроса о прочности стен железобетонных силосов, теоретических и экспериментальных работ по давлению зерна в силосах.

Для выявления факторов, определяющих появление остаточных деформаций в стенах силосов, были изучены акты обследования по 97-ми аварийным элеваторам и проведены собственные наблюдения за состоянием стен силосов.

Показано, что наибольшая частота случаев появления деформаций приходится на высоту силоса, лежащую в пределах 8-16 м. от подсилосного перекрытия.

Появление деформаций в определенных зонах по высоте силоса, наличие в этих зонах наиболее прогрессирующих вертикальных трещин и зависимость их возникновения от интенсивности эксплуатации, их интенсивное развитие при выпуске сыпучего материала, показывает, что одной из причин разрушения силосов является неполное представление о величинах и характере действующих давлений по высоте зернового слоя.

Вопросы теории передачи давлений сыпучим материалом на ограждающие поверхности, в основном, развиваются по трем направлениям: первое принимает за основу общую теорию предельного равновесия, рассматривая сыпучий материал как сплошную изотропную среду; другое направление применяет основные уравнения теории упругости для получения зависимости величины давления от высоты

слоя; в основу третьего направления положена способность сыпучего материала заключенного в сосуде образовывать структуры подобные сводам, которые и определяют механизм передачи давлений.

Рассмотрение сыпучего материала как сплошной изотропной среды не позволяет учесть явлений внутри слоя, что приводит к исключению из расчетных уравнений основных физико-механических параметров сыпучего материала.

Справедливость уравнений теории упругости для расчета напряженного состояния в сыпучем материале была опровергнута практикой, показавшей значительные расхождения теоретических и практических результатов. Попытки улучшить конечные уравнения введением эмпирических коэффициентов лишило их теоретического смысла.

Характерной особенностью теории сводообразования является рассмотрение сыпучего материала не как сплошной среды, а как среды, состоящей из отдельных зерен, образующих статистическую систему.

Последнее обстоятельство затрудняло создание стройных и точных теоретических предпосылок, которые могли бы лечь в основу теории сводообразования, так как вопросы статистической физики сыпучих материалов еще недостаточно полно разработаны.

Тем не менее, придерживаясь основных положений теории сводообразования, стало возможным более глубоко объяснить многие явления, как-то: экспоненциальный характер распределения давлений по высоте силоса, пульсационный характер давления при выпуске сыпучего материала, неравномерность распределения давлений по периметру силоса и др.

В результате почти столетних теоретических и эксперименталь-

ных исследований для определения величин давлений сыпучего материала на дно и стенки сосуда был предложен целый ряд расчетных формул.

Для сопоставления характера распределения и величин давлений, определяемых по этим выражениям, проведен сравнительный анализ 14-ти наиболее характерных расчетных формул.

Анализ полученных данных показал, что большинство формул дают конечные результаты, качественно и количественно незначительно отличающиеся от полученных по формуле Янсена.

В большинстве анализируемых формул не учтены физико-механические параметры (плотность укладки, коэффициент внутреннего трения), характеризующие внутренние связи в сыпучем материале.

Попытки многих авторов сблизить данные, получаемые по методу Янсена, с опытными результатами путем введения поправочных коэффициентов не изменило положение, а только позволило частично компенсировать незнание истинного положения.

Анализ теоретических и экспериментальных работ в области передачи давлений сыпучим материалом на стены и днище силосов показал, что существующие методы определения давлений не в состоянии дать теоретически обоснованные и достоверные результаты, которые могли бы быть положены в основу расчетной практики.

Состояние вопроса теории и практики определения характера и величины давления зерна на стены силоса определило направление исследования:

1. Предложить предпосылки к созданию физической модели сыпучего материала.

2. Исследовать распределение вертикальных и горизонтальных давлений по оси симметрии силоса для различных режимов работы зернового потока: а) заполнение, б) выпуск, в) повторный

выпуск, г) установившееся движение, д) проточный режим.

3. Исследовать распределение нормальных и тангенциальных давлений на стенку силоса в различных точках высоты и периметра с учетом мест стыковки соседних силосов при указанных режимах работы зернового потока.

4. Провести выполнение исследований п.п. I, 2 на различных типах силосов, отличающихся по конфигурации, технологии выполнения, характеру внутренней геометрии стен, характеру выпуска.

5. Исследовать влияние на величину давления зернового потока параметров стенок силоса.

6. Исследовать влияние возможных способов заполнения силосов с целью управления величинами давлений на их стены.

Вторая глава посвящена рассмотрению физической природы идеального сыпучего материала, позволяющей описать структурно-механические свойства столба сыпучего материала в различных его состояниях и определить величины давлений в этих состояниях.

Предлагается идеально-сыпучими материалами считать такие зернистые системы, единственными силами в контактах между частицами которых являются гравитационные силы веса самих частиц.

Выдвигается гипотеза, что основными величинами, определяющими поведение столба сыпучего материала, является подвижность его частиц и потенциальная энергия сжатия частиц вышележащих слоев, зависящая как от величины плотности укладки, так и от отношения диаметра сосуда к его высоте $-\frac{H}{D}$.

В столбе сыпучего материала, как статистической системе, возможно возникновение при определенных условиях в средней части столба структур - взаимного упорядоченного расположения зерен в макрообъемах, существующих определенный промежуток времени.

Рассматриваются четыре возможных состояния столба сыпучего материала: статика сформированного столба (заполнение); установившееся движение сыпучего материала при снижающейся высоте столба (выпуск); статика столба после прекращения выпуска (квазистатическое состояние); установившееся движение при постоянной высоте столба (проточный режим).

Выделено три зоны по высоте столба сыпучего материала и показано, что наиболее благоприятные условия для возникновения и существования структур в столбе сыпучего (например, сводов) имеет место во второй зоне в трех последних вышеприведенных состояниях.

При выпуске и проточном режиме структуры в столбе сыпучего материала являются динамическими образованиями, их устойчивость и условия существования зависят не только от физико-механических свойств сыпучего, но и от граничных условий - податливости ограждающих поверхностей, состояния их внутренней поверхности и формы.

Для квазистатического состояния столба сыпучего материала, когда образовавшиеся структуры оказываются "замороженными", из рассмотрения условий равновесия криволинейного элемента этих структур (сводов), получены выражения для определения вертикального q и касательного давления p к образующей свода. (В центре силоса p - есть горизонтальное давление в силу симметрии свода, у стены - давление, направленное под углом α).

$$q = \frac{\gamma \Delta B(\alpha)}{4f \sqrt{1+\gamma^2}} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{4f \sqrt{z}}{B(\alpha) \Delta} \right] \right\} \quad (1)$$

$$p = \frac{\gamma \Delta}{4f} B(\alpha) \sqrt{1+\gamma^2} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{4f \sqrt{z}}{B(\alpha) \Delta} \right] \right\} \quad (2)$$

В уравнениях (I-2):

- Z - высота засыпки сыпучего материала;
- Δ - диаметр силоса;
- γ - объемная масса сыпучего материала;
- f_1 - коэффициент внешнего трения;
- ν - коэффициент бокового давления;
- α - угол наклона касательной к своду;
- $B(\alpha)$ - величина, зависящая от формы свода.

Методы формирования сыпучего материала в емкости определяют плотность укладки его частиц, число контактов, приходящихся на одну частицу. Наличие определенного количества рабочих контактов и их распределение по сечению сосуда определяют анизотропию столба сыпучего материала.

Рассматривая процесс формирования столба сыпучего материала при заполнении сосуда, исходя из распределения вероятности попадания зерен в различные сечения по нормальному закону, получено выражение, описывающее величину плотности укладки частиц и характер ее изменения по высоте и сечению силоса.

Высказана гипотеза о возможности управления величиной горизонтального давления на стенку силоса путем создания при заполнении силоса переменной по сечению плотности укладки сыпучего материала, позволяющей снижать величину горизонтального давления на стенку силоса при выпуске из него зерна.

Третья глава - посвящена методике экспериментальных исследований.

Положительные стороны тензометрического метода измерения давлений в сыпучем материале, наличие стандартной высокочувствительной измерительной аппаратуры определили выбор метода из-

измерения давлений зерна в натуральных силосах.

На базе проведенных в ОТИП им.М.В.Ломоносова разносторонних исследований в области измерения давлений сыпучего материала в силосах в лаборатории сыпучих материалов были сконструированы два типа датчиков: плавающий - для измерения вертикальных и горизонтальных давлений в любой точке потока сыпучего материала и настенный, - для измерения нормальной и тангенциальной составляющих давления на стенку силоса.

Получение информации об изменении заданного положения плавающего датчика при его движении совместно с зерном, устранение влияния температурных колебаний и изменения влажности окружающей среды на стабильность работы датчика осуществлялось применением специальных приспособлений.

Минимальный диаметр плавающих датчиков определялся возможностью его выхода из выпускного отверстия силоса после окончания опыта и равнялся 240-300 мм. Размер настенных датчиков давления выбирался в этих же пределах.

Для регистрации давлений, воспринимаемых измерительной мембраной, использовались многоканальные тензометрические усилители.

Тарирование датчиков осуществлялось на специальном рычажном стенде с последующей контрольной тарировкой непосредственно в испытываемой среде.

Данные, полученные при тарировании датчиков в сыпучем материале, отличались от получаемых на стенде на 5,4% в сторону уменьшения.

Выбор объектов исследования определен, исходя из условий проверки влияния на характер распределения и величины давлений

геометрических размеров и степени жесткости стен силосов, способов формирования сыпучего материала, влияния внутренней геометрии и пр.

Эксперименты были проведены на производственных зерновых силосах, имеющих в горизонтальном сечении круглую, квадратную и восьмигранную форму со стенами различной степени жесткости и различной внутренней геометрией. Опыты были проведены на Одесском портовом элеваторе, элеваторе ст. Любашевка, - силосные корпуса которых выполнены в подвижной опалубке; элеваторе ст. Спицевка, - сборные силосы с ребристыми стенами и перепускными отверстиями; Целиноградском элеваторе, представляющем комплекс разных силосов - монолитные, из предварительно напряженных объемных элементов, сборных восьмигранных.

Характеристика подопытных силосов и сыпучего материала приведена в таблице I.

Настенные датчики в рабочем силосе Одесского портового элеватора установлены, исходя из принципа множественности точек наблюдения, что позволило не только снимать величины нормальных и касательных давлений на стены, но и получить закономерности распределения давлений по высоте и периметру при различном состоянии зернового потока.

Датчики установлены по образующей силоса на уровнях 9, 12, 15, 20, 22 и 25 метров от верхнего перекрытия. В средней зоне по высоте силоса, где процесс передачи давлений носит наиболее сложный характер, установлены по 3-4 датчика по периметру на отметках 12, 15, 18, 20 метров.

При обработке данных эксперимента использован аппарат вариационной статистики, позволивший оценить достоверность результатов исследования.

Таблица I

Месторасполо- жение элевато- ра	Тип силосных корпусов	Размер в пла- не, м	Высота, м	Внутренняя геометрия, толщина стен, см	С о р т пшеницы	Объем- ная масса, кг/м ³	Влаж- ность, %	Сор- ность, %
Портовый г. Одесса	П-5 х 350 монолитный	$\alpha=6$	30	гладкая 16	а. Манитоба-2 б. Украинская -краснозер- ная.	796 792	12,3 13,9	1,0 1,2
ст. Любашевка Одесской обл.	Л - 2х100 монолитный	3,2х3,2 (3х3)	25	гладкая 15	Одесская	786	12,8	1,5
ст. Спичевка Ставрополь- ский край	РЭС-I-63 сборный	3х3	30	ребристая панели $\delta=5$ выступы $\delta=16$	Рядовая	782	13,2	1,6
г. Целиноград з-р при мель- комбинате	а. монолитный б. сборный круглый	$\alpha=6$ $\alpha=6$	30 30	гладкая 16 ребристая панели $\delta=6$ выступы $\delta=15$	а. Рядовая б. саратов- ская.	780 786	12,0 11,7	1,5 1,5
	в. сборный восьмигранный	круг вписан в окр. $\alpha=6$	30	ребристая панели $\delta=6$ выступы $\delta=15$				

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

Проведенные исследования по измерению величин давлений зерна на стенку силоса и внутри зернового потока на натуральных силосах различных типоразмеров показали, что характер изменения давлений при установившемся движении сыпучего материала по высоте различен по трем зонам. В пределах первой (верхней) зоны значительного повышения давлений по сравнению с давленями при неподвижном столбе не наблюдается, - эта зона характеризуется началом процесса образования "сводчатой" структуры, параметры которой изменяются по мере увеличения высоты слоя.

В пределах второй (средней) зоны наблюдается резкое повышение давлений, носящее ярко выраженный пульсирующий характер с частотой пульсации 0,1-0,2 гц., что может быть объяснено завершением процесса образования динамических "сводчатых" структур, которые и вызывают рост горизонтального давления в 2,5÷3,3 раза при одновременном снижении величины вертикальных давлений.

Третья (нижняя) зона - зона несвязанного движения столба сыпучего, вызванного образовавшейся воронкой истечения. Увеличение горизонтального давления наблюдается только на границе второй и третьей зоны.

Проведенные эксперименты позволили определить высоту каждой зоны.

Существующие конструкции железобетонных стен зернового силоса не предусматривают их работу в условиях циклично действующих давлений. Как следствие, по истечению некоторого времени в стенах силоса появляются трещины, появление и дальнейшее развитие которых приводит к прогрессирующему нарушению прочности стен.

При прекращении выпуска зерна давления в потоке сохраняют свою величину. Последующее догружение и повторный выпуск к увеличению давлений практически не приводил, что является одним из непосредственных доказательств существования "сводчатых" структур в потоке сыпучего материала.

Эксперименты показали, что коэффициент бокового давления $\mu = \frac{P_r}{P_v}$, принятый в расчетной практике постоянным, изменяется по высоте силоса.

При неподвижном состоянии зерна величина μ изменяется с увеличением глубины от 0,91 до 0,42, а при установившемся движении от 1,0 до 2,4.

Такое изменение величины μ объясняется изменением напряженного состояния столба сыпучего материала: активное - в неподвижном столбе и пассивное - в движущемся. Изменение коэффициента бокового давления позволило вычислить изменение коэффициента внутреннего трения по высоте силоса.

Коэффициент бокового давления изменяется не только от глубины засыпки зерна в силосе, но и от формы и геометрических размеров последних, геометрии внутренней поверхности стен, методов заполнения силоса.

Опыты по определению величин давления зерна в силосах мельничного комбината в Целинограде и Спицевского элеватора позволили выяснить степень влияния внутренней геометрии стен на величины давлений и характер их распределения.

Наличие ребер на внутренней поверхности стен силосов незначительно сказывается на изменении величин давлений по сравнению с гладкими стенами во всех режимах работы. Однако, в силосе с ребристыми стенами наблюдается более интенсивный рост величин давления на стены с высотой зернового слоя. Наличие выступов

ускоряет формирование структур в зерновом потоке на меньших высотах и увеличивает их несущую способность.

В ребристых силосах наиболее ярко выражен пульсирующий характер изменения величин горизонтального давления при выпуске зерна и особенно при проточном режиме работы. При пульсации пределы изменения давлений по величине выше, чем в силосах с гладкими стенами.

Стены наружных силосов работают в более неблагоприятных условиях чем внутренние. При проектировании силосов с перепускными отверстиями необходимо учитывать, что абсолютные величины давлений зависят от плотности укладки зерна в силосе. Опыты показали, что более плотной укладке соответствуют более высокие давления. Поэтому необходимо стремиться, чтобы плотность укладки имела большую величину во внутренних силосах, а не наоборот, как это принято при проектировании элеваторов типа РЭС-І-63 (Спицевский элеватор).

Величины нормальных давлений на стенку по периметру силоса распределены неравномерно. На участках стен, обладающих большей жесткостью, давления выше на 60-80%.

Испытания, проведенные на восьмигранных силосах, имеющих большую степень податливости панелей, показали существенное уменьшение величин горизонтальных давлений по сравнению с величинами давлений в монолитных силосах.

Для изучения влияния податливости стен на величины горизонтального давления были проведены специальные исследования.

В опытной модели силоса жесткость его стен была выбрана из расчета значительной их податливости в пределах упругой деформации. Силос изготовлен из полиэтиленовой пленки толщиной

$\delta = 0,15$ мм, высотой $H = 5,0$ м, диаметром $D = 1,0$ м. Для предохранения пленки от чрезмерных деформаций по высоте силоса

с шагом $t = 0,5$ м были установлены горизонтальные пояса жесткости изготовленные из полосовой стали шириной $a = 3$ см.

Испытания показали надежность работы данной конструкции силоса. В результате значительной податливости полиэтиленовой пленки происходило перераспределение давлений в зерновом столбе, резко снижалось горизонтальное давление при одновременном росте давления на дно.

Полученные результаты позволили высказать предположение о возможности снижения горизонтальных давлений путем применения специальных конструкций зерновых силосов.

Исследование влияния переменной плотности укладки зерна по сечению силоса на величины давлений показало возможность регулирования давлений путем изменения способа заполнения силоса. Так, заполнение силоса по периметру приводит к образованию у стен кольцевого цилиндра повышенной плотности укладки (внутренней рубашки), и, как следствие, к некоторому росту давления при заполнении за счет повышения плотности слоя. При выпуске зерна из силоса увеличения давлений на стены почти не наблюдалось.

В таблице 2 приведены некоторые результаты по измерению нормальных и тангенциальных давлений на стенку силоса и горизонтальных и вертикальных давлений по оси потока для различных типов силосов. Полученные результаты позволяют рекомендовать практике простой метод снижения давлений зерна на стены силоса.

В конце IV главы рассмотрен метод определения величины $B(\alpha)$ на основе экспериментальных данных для силоса $D = 6$ м, $H = 30$ м. Показано, что величина $B(\alpha)$ минимальная на границе первой и второй зоны, растет с увеличением глубины засыпки, достигая максимального значения на границе второй и третьей зоны.

Таблица 2

Высота за- сыпки, м	Силос $\Delta = 6\text{м}$, $H = 30\text{ м}$, стены гладкие, внутренний			Высота зерна над датчиком, м		$\Delta = 6\text{м}$, $H = 30\text{м}$ гладкие		$\Delta = 6\text{м}$, $H = 30\text{м}$ ребристые		$\Delta' = 6\text{м}$, $H =$ $= 30\text{м}$. воль- мигранне, ребристые		$3 \times 3\text{м}$, $H = 25\text{м}$ Гладкие		$3 \times 3\text{м}$, $H = 30\text{м}$ Ребристые	
	от дин	$\tau \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\sqrt{\frac{\text{см}}{\text{дин}}}$	$\sqrt{\frac{\text{см}}{\text{дин}}}$	$\tau \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	внутренний	внешн	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$	$\frac{R}{r} \frac{\text{см}}{\text{дин}}$
9	166 247	25 50	152 140	26 50	3	118 213	165 173	94	126 210	238 117	44 240	74 136	165 118	122 152	196 214
12	228 470	53 97	248 298	55 60	6	240 500	394 345	190	255 412	415 260	102 461	165 312	334 230	214 319	419 310
15	308 659	73 146	361 433	81 139	9	327 758	613 442	291	348 620	636 384	161 460	265 477	542 263	211 437	568 385
18	316 694	98 208	385 445	96 106	12	358 1045	787 506	349	322 612	850 513	220 290	221 490	558 250	210 404	534 308
20	310 620	80 194	342 392	90 101	15	368 1145	840 455	352	321 600	846 458	243 560	$P_T, P_B \times 10^2 \text{ Н/м}^2$			

к.б 11778

Получено безразмерное трансцендентное уравнение для определения величины $B(\alpha)$, затабулированные корни которого позволяют определить значение $B(\alpha)$ для различных типов силосов.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования подтвердили существенные расхождения величин и характер распределения опытных давлений от вычисленных по методу Янсена.

2. Явления, наблюдаемые в потоках сыпучих материалов при их формировании и движении в силосах, могут быть объяснены только с позиций рассмотрения физической природы сыпучего материала как дискретной статистической системы, основными параметрами которой для идеальных сыпучих материалов являются подвижность частиц, плотность их укладки и отношение $\frac{H}{D}$.

3. Установлен и объяснен характер изменения величин давлений во второй зоне по высоте силоса. Неизбежность наличия пульсирующего характера изменения давлений требует его учета при определении расчетных нагрузок на стены силосов по высоте второй зоны.

4. Рассмотрение механизма передачи давлений по криволинейным поверхностям позволило в общем виде получить изменение вертикальных давлений и касательных давлений к этим поверхностям по высоте силоса.

Обработка экспериментальных данных позволила рассчитать изменение величины $B(\alpha)$ по высоте и предложить методику расчета превышения давлений при выпуске по сравнению с неподвижным столбом сыпучего материала.

5. Экспериментальные исследования позволили расширить и уточнить общую картину о механизме передачи давлений сыпучим материалом в натурных силосах различных типов и размеров, наме-

тить пути снижения величин давлений сыпучего материала на стены силоса.

6. Одним из простых, но довольно эффективных методов снижения величин горизонтального давления на стены силосов, является заполнение силоса сыпучим материалом по периметру. Изменение плотности укладки сыпучего материала по сечению силоса существенно снижает абсолютную величину горизонтального давления сыпучего материала на стены при его выпуске из силоса.

7. Второй путь снижения величин горизонтального давления — изменение конструкций силосов. Силосы со стенами, обладающими упругой податливостью, позволяют значительно снизить величину горизонтального давления на стены при выпуске зерна из силосов.

Основные положения диссертации были доложены на XXIX-XXXII (1967-1971 г.г.) научных конференциях ОТИ им. Ломоносова, на Всесоюзном симпозиуме по проблемам давления сыпучих материалов в бункерах и силосах (Москва, 1967), Всесоюзной межвузовской научной конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках (Одесса, 1967), Международном симпозиуме по хранению и транспортировке сыпучих материалов (США, Бостон, 1968), Третьем Международном конгрессе ХИСА - Симпозиум по механике сыпучего материала (ЧССР, Марианске Лазне, 1969), на I-ой научной конференции ЦНИИЭПсельстроя (Москва, 1970).

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К вопросу о давлении зерна в силосах. Ж. "Мукомольно-элеваторная промышленность", № 3, 1968.
2. Приборы и методы определения давлений зерна в силосах. Изв. ВУЗов "Пищевая технология", № 1, 1969.
3. Механические свойства и давления идеальной сыпучей среды в потоке. Сб. "Давление сыпучих материалов в силосах и бункерах", ЦИНТИ Госкомзага, Москва, 1969.
4. Влияние плотности укладки сыпучего материала на механизм передачи давлений. Сб. "Современные проблемы механики сыпучих материалов", ЦИНТИ Госкомзага, Москва, 1969.
5. Давление зерна в силосах. Сб. "Современные проблемы механики сыпучих материалов", ЦИНТИ Госкомзага, Москва, 1969.
6. Результаты измерений давления зерна в силосах. Сб. "Материалы Всесоюзной межвузовской научной конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках", Одесса, 1967.
7. Механизм передачи давлений в потоке сыпучей среды. Сб. "Материалы Всесоюзной межвузовской научной конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках". Одесса, 1967.

8. Исследование напряженного состояния столба зерна в натуральных квадратных силосах. Материалы Всесоюзного симпозиума по проблемам давления сыпучих материалов в бункерах и силосах, Москва, 1967.

9. *Pressure of Flow Material on Rigid Walls of Deep Cylindrical Bins. ASME, New York, 1968.*

10. *Laying of a granular material in a silo and Influence of its Parameters on the Mechanism of Stress Transference. Czechoslovakia, Marianске Lazne, CHISA, 1969.*

БР 05409. Подписано к печати 2.IV.1971 г. Объем 1,2 печ.л.
Учено-издат. 1,2 лист. Заказ № 155 Тираж 180 экз.

Отпечатано на ромайоре копировально-множительного
отдела МСС, г.Одесса, Приморский бульвар, 1.