

**ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Молодченко Геннадій Анатолійович

УДК 624.954.012.45

**ЗАЛІЗОБЕТОННІ СИЛОСИ З
РАЦІОНАЛЬНИМ ФОРМУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВПЛИВІВ**

**Спеціальність 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі
та споруди**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ХАРКІВ - 2000

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківській державній академії міського господарства (ХДАМГ) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
КЛІМОВ Юлій Анатолійович,
завідувач відділу теорії і методів
розрахунку залізобетонних конструкцій
Науково-дослідного інституту будівельних
конструкцій (НДІБК), м. Київ;

доктор технічних наук, професор
КРИЧЕВСЬКИЙ Олександр Павлович,
професор кафедри залізобетонних
конструкцій Донбаської державної
академії будівництва і архітектури,
м. Макіївка;

доктор технічних наук, професор
СТОРОЖЕНКО Леонід Іванович,
професор кафедри конструкцій з металу,
дерева і пластмас Полтавського
державного технічного університету
ім. Ю.Кондратюка

Провідна установа: Харківський державний технічний
університет будівництва і архітектури,
кафедра залізобетонних та кам'яних
конструкцій, м. Харків
Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться “ 21 ” грудня 2000 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий “ ” листопада 2000 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

Єрмак Є.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Мировая практика перехода на закрытое хранение сельскохозяйственных и промышленных сыпучих материалов в емкостях силосного типа обусловлена применением высокомеханизированных и автоматизированных комплексов погрузочно-разгрузочных работ, а также экологическими требованиями охраны окружающей среды. Накопленный опыт эксплуатации железобетонных силосов свидетельствует о частых случаях повреждений стен, возникновении аварийных ситуаций. Интенсивные разрушения стен с внутренней стороны наблюдаются в емкостях для горячих сыпучих материалов. Указанное во многом связано с недостаточной изученностью процессов формирования нагрузок на стены силосов, закономерностей распределения температуры нагрева их в процессе эксплуатации, с неполным учетом этих воздействий в нормативных документах. Свидетельством тому служит факт параллельного действия в Украине двух нормативных документов по проектированию силосов для промышленных (СН 302-65) и сельскохозяйственных (СН 261-77) сыпучих материалов.

Требуют совершенствования методы оценки несущей способности стен силосов, их жесткости при работе с трещинами.

Отсутствие полных данных о физической природе явлений, происходящих внутри сыпучего материала при выгрузке, сдерживает разработку новых конструкций силосов, создание единых норм Украины по их проектированию.

Отмеченное предопределяет необходимость совершенствования методов расчета силосов и разработки научных принципов их конструирования на основе рационального формирования технологических воздействий.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа проводилась по целевой комплексной программе НТП 055.01.121.Н1, а также по координационному плану Министерства образования Украины, задание 21. Автор являлся научным руководителем и ответственным исполнителем базовых для подготовки диссертации научно-исследовательских работ, имеющих номера госрегистрации: Б 194658, Б 316535, Б 505211, Б 884985, 02830053785.

Цель работы - построение научных принципов регулирования напряженно-деформированным состоянием стен силосов путем направленного формирования технологических воздействий и разработка на их основе новых

конструктивных решений, отвечающих требованиям эффективности и эксплуатационной надежности применительно к новому строительству и реконструкции.

Задачи исследований:

- разработать физическую модель процесса истечения и формирования давления, описывающую кинематику системы “сыпучий материал - стена силоса”;

- экспериментально на моделях и в натуральных условиях изучить особенности перемещения сыпучего материала внутри емкости при выгрузке и закономерности формирования повышенного давления на стены силосов;

- теоретически оценить степень повышения горизонтального давления сыпучего материала при выгрузке, установить характер его изменения по поверхности стен силосов и сопоставить с результатами экспериментов;

- на основе созданной физической модели процесса разработать метод расчетного определения температуры нагрева стен силосов при внецентренной выгрузке горячего сыпучего материала;

- разработать методику расчета стен силосов, учитывающую изменение их жесткостных характеристик и, как следствие, трещинообразование и нелинейность деформирования бетона;

- разработать метод расчета дополнительного давления сыпучего материала на стены силосов в зависимости от суточных колебаний температуры воздуха;

- построить метод расчета несущей способности стен железобетонных силосов при их разрушении на локальных участках и переменном армировании по высоте;

- разработать новые конструктивные решения силосов с учетом управления кинематикой процесса истечения при их разгрузке;

- внедрить результаты исследований в практику проектирования, строительства и реконструкции силосов.

Объект исследования - железобетонные силосы для хранения и переработки промышленных и сельскохозяйственных сыпучих материалов.

Предмет исследования - технологические воздействия, определяющие формирование давления на стены силосов, температуру нагрева стен с внецентренной выгрузкой горячих сыпучих материалов при различных режимах эксплуатации.

Методы исследования:

- анализ и синтез конструктивных решений силосов во взаимосвязи с характером и степенью их повреждений и разрушений в процессе эксплуатации;

- феноменологическое построение физической модели процесса перемещения сыпучего тела внутри емкости и изучение на ее основе закономерностей формирования

давления на стены силосов, формулирование и обоснование гипотезы механического теплопереноса, обусловленного многоразовым контактом со стеной силоса горячего сыпучего материала в процессе его внецентренной выгрузки;

- экспериментальное определение перемещений сыпучего тела внутри емкости, включающее разработанный автором способ "замораживания", процедуру и алгоритм его реализации;

- сопоставительный анализ результатов экспериментальных исследований на моделях (качественная сторона) и в натуральных условиях (количественная сторона процесса) при изучении закономерностей формирования давления сыпучего материала на стены емкостей при их загрузке и выгрузке, обработка полученных результатов с использованием методов математической статистики;

- сопоставление основных теоретических положений с экспериментальными данными и информацией, полученной путем промышленного внедрения при новом строительстве и реконструкции.

Научную новизну полученных результатов определяют:

- разработанная и апробированная экспериментально и теоретически физическая модель процесса перемещения сыпучего тела внутри емкости и установленная его связь с формированием давления на стены силосов;

- принципы конструирования силосов, основанные на рациональном формировании потока истечения сыпучего материала внутри емкости при выгрузке;

- экспериментально полученные качественные и количественные характеристики давления сыпучего материала на стены силосов и особенности их трансформации;

- новые закономерности перемещения слоев сыпучего материала внутри емкостей в начальный период выгрузки, а также в условиях стационарного режима разгрузки и проточного режима;

- зависимости, позволяющие оценить степень повышения горизонтального давления сыпучего материала на стены силосов при выгрузке и проточном режиме;

- впервые установленный эффект и сформулированная гипотеза взаимного влияния эксцентриситета внецентренной разгрузки для горячего сыпучего материала на качественные и количественные показатели температурного поля в системе "сыпучий материал-оболочка силоса", новые закономерности взаимосвязи между изучаемыми величинами, подтвержденные тестированием на моделях силосов и в производственных условиях;

- методика расчета дополнительного давления в зависимости от суточных колебаний температуры наружного воздуха, учет нелинейного перепада температуры по толщине стен силосов;

- построенные принципы расчета несущей способности стен силосов, учитывающие их пространственную работу, локальные повреждения стен и их переменное армирование по высоте емкости;

- новые эффективные конструктивные решения силосов с рациональным формированием технологических воздействий.

Практическое значение полученных результатов. На основе полученных экспериментально-теоретических данных появляется возможность дальнейшего совершенствования конструктивных решений силосов с обеспечением их эффективности и эксплуатационной надежности, оценки остаточной несущей способности сооружений, получивших повреждения и разрушения в связи с принятыми неудовлетворительными конструктивными решениями, возникновением повышенных давлений сыпучего материала, а также в результате воздействий температуры нагрева стен силосов при внецентренной разгрузке горячих сыпучих материалов. Получен критерий необходимости усиления стен силосов в виде критического значения высоты зоны разрушения, позволяющий обосновать оптимальные методы усиления, восстановления и реконструкции.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований использованы в “Рекомендациях по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений предприятий при реконструкции”, в “Рекомендациях по проектированию и усилению железобетонных хранилищ для сыпучих материалов, в том числе с повышенной температурой, для условий реконструкции”, а также при проектировании и реконструкции ряда объектов силосного типа на действующих предприятиях различных отраслей промышленности, в том числе:

- при реконструкции силосов для горячего клинкера на Карачаево-Черкесском, Сухоложском, Брянском, Разданском, Щуровском цементных заводах, на цементном заводе “Пролетарий” АО “Новоросцемент”, на Ново-Акмянском и Балаклейском цементно-шиферных комбинатах;

- при реконструкции силосов для клинкера на объектах АО “Осколцемент”;

- при реконструкции и усилении силосов закрытых складов угля на Авдеевском КХЗ, Череповецком и Ново-Липецком МК;

- при реконструкции и усилении сборных железобетонных силосов каннелюрного типа для семян Сватовского МЭЗ.

Кроме того, материалы исследований использованы в учебных изданиях для студентов, обучающихся по специальности “Промышленное и гражданское строительство”.

Лично полученные соискателем результаты:

- анализ конструктивных решений силосов во взаимосвязи с характером и степенью их повреждений в процессе эксплуатации. Используются полученные автором данные обследований более пятисот силосов на пятидесяти пяти объектах различных отраслей промышленности (угольной, коксохимической, цементной, алюминивно-магниевого, горнодобывающей, машиностроительной и др.);

- сформулирована физическая модель процесса истечения сыпучего материала из силосов и формирования повышенного давления на стены при выгрузке;

- методы экспериментальных исследований процесса истечения сыпучего материала внутри емкости при центральной и внецентренной разгрузке и результаты этих исследований на моделях силосов и в натуральных условиях;

- результаты экспериментальных исследований давления сыпучего материала на стены силосов на моделях и в натуральных условиях при различных режимах эксплуатации, результаты статистической обработки полученных опытных данных;

- теоретический анализ истечения сыпучего материала при разгрузке силосов на стадиях неустановившегося и установившегося движения. Подтверждена взаимосвязь особенностей процесса истечения сыпучего и формирования давления на стены силосов;

- сформулирована гипотеза механического теплопереноса при внецентренной разгрузке емкостей с горячим сыпучим материалом, получено теоретическое и экспериментальное ее обоснование как на моделях силосов, так и в производственных условиях на силосах для горячего клинкера трех действующих цементных заводов. Установлена взаимосвязь процесса повышенного нагрева стен силосов с их интенсивным повреждением;

- методика учета нелинейных деформаций железобетонных стен силосов с трещинами с использованием ниспадающей ветви диаграммы средних напряжений в бетоне на участках между трещинами в зависимости от напряжений (деформаций) в растянутой арматуре;

- методика оценки несущей способности железобетонных стен силосов при локальных нагружениях за счет выключения из работы на растяжение горизонтальной кольцевой арматуры внутреннего ряда и при переменном армировании по высоте;

- конструкции силосов с рациональным формированием технологических воздействий, адаптированные к условиям проектирования нового строительства и осуществления реконструкции действующих объектов;

- методики расчета узла крепления металлической воронки к монолитной железобетонной стене силоса, оболочек каннелюрного типа, оболочек с радиальными перегородками.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на: Всесоюзных конференциях “Механика сыпучих материалов” (II конференция, г. Одесса, 1971 г.; III конференция, г. Одесса, 1975 г.; IV конференция, г. Одесса, 1980 г.); VIII Всесоюзной конференции по бетону и железобетону, г. Харьков, 1977 г.; V Всесоюзной конференции “Экспериментальные исследования инженерных сооружений”, г. Киев, НИИСК, 1981 г., Республиканской конференции “Совершенствование конструкций, работающих на сложные виды деформации и их внедрение в сельскохозяйственное строительство”, г. Полтава, 1982 г.; Республиканской конференции “Технология и организация реконструкции промышленных предприятий”, г. Днепропетровск, 1985 г.; научно-технической конференции “Экономия и рациональное использование сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов в строительстве”, г. Харьков, 1986 г.; Всесоюзном семинаре “Индустриальные технические решения для реконструкции зданий и сооружений промпредприятий”, г. Макеевка, 1986 г.; Республиканской научно-технической конференции “Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций и их внедрение в строительную практику”, г. Полтава, 1989 г.; Всесоюзной конференции “Новые технологии возведения зданий, расчет строительных конструкций”, г. Белгород, 1991 г.; Международной конференции “Эффективные конструкции, методы расчета и возведения зданий и сооружений”, г. Белгород, 1993 г.; Международной конференции “Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций”, г. Белгород, 1995 г.; Первой Всеукраинской научно-технической конференции “Научно-практические проблемы современного железобетона”, г. Киев, 1996 г.; Международном конгрессе МКПК-98 “Пространственные конструкции в новом строительстве и при реконструкции зданий и сооружений”, г. Москва, 1998 г.; научно-практических конференциях ХГАГХ 1984-2000 гг.

В полном объеме диссертация докладывалась и получила одобрение на заседании межвузовского семинара “Строительные конструкции” докторских специализированных ученых советов Д 64.820.02 при ХарГАЖТ и Д 64.056.04 при ХГТУСА в 2000 году.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 37 научных работах, в том числе в 2-х брошюрах и 7-ми авторских свидетельствах.

В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежат:

[4] - разделы, относящиеся к конструированию, расчету усиления и реконструкции силосов;

[5] - часть пособия, относящаяся к железобетонным и каменным конструкциям;

[26] - идея постановки задачи, обработка экспериментальных данных и их обоснование.

В остальных работах в соавторстве автору принадлежат идеи методологии исследований и конструкторских разработок.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из вступления, 8 разделов, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Изложена на 365 страницах, в том числе 139 рисунков и 23 таблицы на 69 страницах, списка использованных источников из 325 наименований на 33 страницах и 6 страниц приложений.

Автор считает своим долгом выразить благодарность научному консультанту лауреату Государственной премии Украины, доктору технических наук, профессору Шмуклеру В.С.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ современных тенденций проектирования и строительства железобетонных силосов (призматических емкостей, высота которых H при круглой в плане форме поперечного сечения диаметром D удовлетворяет условию $H \geq 1,5D$ или при произвольной форме плана - $H \geq 1,5\sqrt{A}$, где A - площадь поперечного сечения) для хранения и переработки сыпучих материалов во взаимосвязи с их конструктивными решениями и опытом эксплуатации в различных отраслях промышленности подтверждает наличие технологических воздействий на стены емкостей, природа возникновения которых является предметом изучения отечественных и зарубежных исследователей. К таким воздействиям в первую очередь относятся изменения количественных и качественных характеристик давления сыпучего материала на стены силосов в зависимости от условий и режимов эксплуатации (загрузка, разгрузка, проточный режим и др.), особенности формирования повышенных температур нагрева стен при внецентренной выгрузке горячих сыпучих материалов.

Первыми экспериментальными исследованиями С.Г.Тахтамышева и М.И.Хаймовича на натуральных силосах, а позже и опытами В.С.Кима, П.Н.Платонова было установлено, что используемая в мировой практике теория Х.Янсена, опубликованная в 1895 году, удовлетворительно описывает полученные данные по величине давления при загрузке емкости и в состоянии покоя. При выгрузке ситуация существенно меняется - зарегистрированные в опытах величины давления в 2-3 и более раз превысили расчетные значения. С 1941 года в нормах введен поправочный коэффициент $a \leq 2$ к формуле Янсена. Последующие исследования Г.И.Бердичевского, Г.В.Зарудского и И.И.Дубешко, Б.М.Иванова, Ф.А.Иссерса, Н.И.Карпенко и С.Е.Беловой, П.Коллинза, Д.Ленцнера, Г.Е.Панкратовой и А.М.Трухлова, Б.А.Петрова, К.Пипера и Ф.Венцеля, К.Такахаси и

Х.Гамахара, И.С.Хорошего и Н.Ф.Красичковой-Терновской подтвердили и уточнили указанные закономерности, а опытами М.С.Бернштейна, А.В.Дженике, Н.Г.Дубынина, А.Г.Иммермана, Р.Квапила, Г.М.Малахова, М.М.Осипова, Д.В.Шумского и др. установлена взаимосвязь характера истечения и давления сыпучего материала на стены силосов. Вид этой взаимосвязи недостаточно полно изучен ввиду отсутствия достоверных экспериментальных данных.

Вопросам оценки и совершенствования конструктивных решений силосов, анализа нагрузок и усилий при взаимодействии сыпучего материала с их стенами посвящены исследования А.Я.Барашикова, Г.И.Бердичевского, С.М.Кузнецова, А.М.Курочкина, М.Е.Липницкого, В.И.Литвиненко, А.Н.Новикова, И.И.Романенко, Е.М.Смирновой, Г.К.Хайдукова, И.С.Хорошего и др, но в них не нашли достаточного отражения вопросы формирования технологических воздействий.

Теоретические исследования давления, основанные на рассмотрении предельного состояния сыпучей среды, проведены Г.А.Гениевым, С.С.Голушкевичем, Г.К.Клейном, К.Терцаги, А.Кезди и др. Их анализ показывает, что представление сыпучего материала как твердого тела не позволяет описать процессы формирования нагрузок на стены силосов. Это же следует и из решений М.С.Бернштейна, В.Е.Глушкова, Л.В.Гячева, В.В.Ковтуна, Б.С.Фиалкова, в которых сыпучее представлено моделью дискретной среды, состоящей из зерен без сцепления между ними. Ряд исследователей конструируют расчетные модели для описания напряженного состояния на контакте сыпучий материал-стена силоса.

В последние годы в работах О.П.Бушмановой, А.Ф.Ревуженко, С.Б.Стажевского развивается теория напряженно-деформированного состояния сыпучей среды, обладающей свойствами дилатансии и изменчивости характеристик внутреннего и внешнего трения.

Особенности формирования температурных полей в стенах силосов для горячих сыпучих материалов рассмотрены в исследованиях Б.В.Латышева и М.В.Ракова, Б.А.Петрова, С.Л.Фомина и др. Это направление получило развитие в последние годы в связи с многочисленными разрушениями стен силосов с внутренней стороны и требует своего дальнейшего развития.

Суточные колебания температуры воздуха создают дополнительное давление сыпучего материала на стены силосов. Исследования в этой области А.В.Бурсиана, А.П.Еремина, М.Кельнера, К.Кордины, А.М.Курочкина, О.Таймера, Л.Т.Яковлева и других авторов обосновывают необходимость учета указанного воздействия в расчетах силосов. Особенности силового взаимодействия на контакте массива с оболочкой в сталебетонных и пластобетонных элементах рассматривали Ф.С.Клименко, В.П.Пусто-войтов, Г.Ш.Салия, Л.И.Стороженко, Э.Д.Чихладзе, А.Л.Шагин и другие.

Задачи нелинейного перепада температуры по сечению стен оболочек рассмотрены в работах Б.Боли и Дж.Уэйнера, Е.Мелана и Г.Паркуса, С.П.Тимошенко, а с учетом нелинейного деформирования железобетона - в работах А.К.Гончарова, А.П.Кричевского, С.Л.Фомина и других исследователей. Существенное влияние на напряженно-деформированное состояние стен оказывает максимальный температурный момент в кольцевом сечении, величина которого для случая железобетонных стен силосов специально не исследовалась.

Жесткость железобетона с трещинами исследовали О.Я.Берг, В.М.Бондаренко, Я.М.Немировский, В.Б. Протопопов, П.П.Романов, А.Л.Шагин и др. С учетом особенностей работы стен емкостных сооружений, привлечение введенного В.И.Мурашовым коэффициента ψ_s позволяет учесть вклад растянутого бетона как на восходящей, так и на ниспадающей ветвях диаграммы $\tilde{\sigma}_{bt}-\sigma_s$, оценить предельную деформативность железобетона и коэффициент длительности при кратковременном, длительном и многократно-повторном нагружениях.

Основываясь на общих положениях теории надежности конструкций, сформулированных А.Я.Барашиковым, В.В.Болотиным, В.Д.Райзером, А.Р.Ржаницыным, применительно к стенам силосов проведены исследования отказов и оценка несущей способности Ф.И.Берманом, Л.А.Мельниковой, В.Н.Попельнухом, Л.М.Пухонто, Б.А.Скориковым, Л.В.Шипель и другими. Следует отметить недостаточную изученность этих вопросов при локальных загрузках и переменном армировании по высоте емкостей.

На основании выполненного анализа определены и сформулированы задачи настоящих исследований.

По установившейся терминологии различают три основные формы истечения сыпучего материала при выгрузке: истечение воронкой с образованием в массиве сыпучего материала трубки потока над выпускным отверстием; истечение столбом (гидравлическое), когда на поверхности засыпки не образуется воронка истечения; смешанная форма истечения, при которой происходит одновременное движение сыпучего материала по первой и второй описанным схемам. Увеличение горизонтального давления сыпучего материала на стенки силосов практически все исследователи зафиксировали при второй форме истечения, она и рассматривается далее как наиболее неблагоприятная. Ее появление определяется конструктивными параметрами емкостей (отношение высоты к диаметру) и технологическими факторами, включающими особенности заполнения, выдержки, выгрузки или проточного режима.

В предлагаемой физической модели процесса истечения и формирования давления на стенки силосов рассматриваются три последовательно протекающие стадии выгрузки и соответствующие им схемы движения сыпучего материала внутри емкости.

На первой стадии выгрузки сыпучего над выпускным отверстием образуется зона разуплотнения (дилатансии), представляющая собой форму эллипсоида вращения с расположением длинной его оси по вертикали. С увеличением времени выпуска t эллипсоид увеличивается в размерах, представляя собой последовательно фигуры 1, 2 и 3 (рис. 1,а). В пределах объема зоны разуплотнения сыпучий материал приходит в движение, превращаясь к квазижидкое состояние. Первая стадия характеризуется неустановившимся движением и сопровождается трансформацией напряженного состояния в массиве сыпучего материала - снижением вертикальных и горизонтальных давлений в зоне разуплотнения и повышением вертикальных давлений в кольцевой области.

На второй стадии выгрузки достигается предельное состояние сыпучего материала в кольцевой области высотой Δz на глубине засыпки z (рис. 1,б). Оно характеризуется переходом сыпучего из состояния твердого тела в квазижидкое, при котором происходит его перемещение в горизонтальном направлении от пристенных участков к оси емкости. Попадая в зону разуплотнения с меньшим давлением, сыпучее потоком истечения вовлекается в движение по направлению к выпускному отверстию. Горизонтальное давление в рассматриваемой области повышается, приближаясь по величине к вертикальному давлению, а вышерасположенный объем засыпки высотой z начинает перемещаться вниз всем столбом. Движение сыпучего материала на второй стадии имеет установившийся характер и продолжается по мере снижения уровня засыпки до критической отметки. При проточном режиме работы емкости вторая стадия сохраняется на всем протяжении его осуществления.

На третьей стадии выгрузки (рис. 1, в) происходит смешанное движение сыпучего столбом и воронкой с последующим переходом к воронкообразному истечению. Давление сыпучего на стенку существенно снижается, процесс истечения приближается к завершению в описанном режиме.

Предложенная физическая модель процесса истечения и формирования давления сыпучего материала послужила основой для принятия исходных предпосылок проведения экспериментальных и теоретических исследований. Так, в частности, для изучения закономерности перемещения слоев сыпучего материала внутри емкости при выгрузке из моделей силосов предложен и реализован способ “замораживания”, позволяющий фиксировать положение частиц сыпучего в любой момент времени истечения. Модели, разъемные по диаметральной плоскости, изготовлены из оргстекла с учетом принципов

подобия в масштабе 1:200 и 1:60 к натурным силосам, с возможностью варьирования относительного эксцентриситета расположения выпускного отверстия. Большая модель снабжена месдозами давления, адаптированными к стандартным комплексам измерительной аппаратуры с дискретной (ЦТМ-5) и непрерывной (Н-700) регистрацией показаний в процессе разгрузки емкости.

Представленные на рис. 2 диаграммы перемещений закрашенных слоев сыпучего подтверждают справедливость принятой физической модели. Фигура зоны разуплотнения (пунктирная линия) близка к форме эллипса, а уменьшение расстояния между 4-6 слоями на контакте со стенкой емкости свидетельствует о наличии горизонтального движения сыпучего материала.

Описанная выше кинематика движения сыпучего материала внутри емкости предопределяет введение следующих гипотез и предпосылок:

- сыпучий материал в зоне дилатансии и в кольцевой области высотой Δz рассматривается как находящийся в квазижидком состоянии;

- все частицы сыпучего материала в зоне дилатансии (первая стадия) и в воронке истечения (вторая и третья стадии) перемещаются по радиусам к оси расположения выпускного отверстия;

- принимается принцип неразрывности движущихся струй;

- движение сыпучего материала в зоне дилатансии происходит за счет увеличения его объема V в λ раз

$$V_q = \lambda V ,$$

(1)

где $\lambda = 1,05-1,06$ - коэффициент дилатансии; V - первоначальный объем сыпучего материала.

Из условия равенства расходов в любом сечении струи и с учетом второй и третьей предпосылок следует, что скорость движения сыпучего материала в сечении струи на расстоянии l от ее вершины обратно пропорциональна этому расстоянию. Представляя далее объем выпуска сыпучего материала за время t в сечении струи на уровне выпускного отверстия диаметром d ($d = 2r_1$) как приращение его объема в струе длиной l за счет дилатансии (четвертая предпосылка), получено уравнение связи скорости истечения в рассматриваемом сечении и длины струи в виде

$$v_{r_0} = cl^3 - D ,$$

(2)

где $C = \frac{4}{3} \cdot \frac{(\lambda - 1) \cos^2 \varphi}{td^2}$; $D = \frac{d(\lambda - 1)}{6t \cos \varphi}$; φ - угол внутреннего трения сыпучего материала.

Зависимость (2) получена для общего случая наклона струи потока под углом α к горизонтали и может быть использована при обработке результатов экспериментальных исследований. Пренебрегая в ней вторым слагаемым в виду малости, запишем

$$v_{\gamma_0}(\alpha) = \frac{4}{3} \cdot \frac{(\lambda - 1) \cos^2 \varphi}{t \cdot d^2} \cdot l_{on}^3(\alpha).$$

(3)

При аналитическом описании формы зоны дилатансии используем предложенную Покровским Г.И. и Арефьевым А.И. зависимость между объемом выпуска сыпучего материала V в единицу времени и радиусом

выпускного отверстия r_1 в виде $V = \eta_1 r_1^{2,86} t$. Для функции влияния угла наклона струи предлагается эмпирическая зависимость $F(\alpha) = \sin^m \alpha$. С учетом сказанного из выражения (3) после преобразований получим уравнение

$$l^3(\alpha) = \eta \cdot r_1^{2,86} t \frac{\sin^m \alpha}{(\lambda - 1) \cos^2 \varphi},$$

(4)

где $\eta = 90 \text{ см} \cdot \frac{0,14}{\text{сек}}$; $m = \alpha - 20$ - опытные параметры.

Результаты сопоставления опытных и расчетных с учетом формулы (3) относительных скоростей истечения из круглого выпускного отверстия, а также размеров опытных и расчетных по формуле (4) фигур зоны дилатансии представлены соответственно на рис. 3 и 4. Они подтверждают достаточную степень соответствия физической модели кинематике реального процесса истечения.

Зависимость (4) является уравнением границ зоны разуплотнения и принята исходной для определения положения z кольцевой области Δz максимального повышения горизонтального давления сыпучего материала на стены силосов. Рассматривая условие равновесия вертикальных усилий в массиве сыпучего материала по горизонтальным сечениям и обозначив большую и малую полуоси эллипса соответственно через a и b , получено выражение для вертикального давления $p_{\text{вк}}$ в кольцевой области

$$p_{\text{вк}} = \frac{\gamma R}{kf} (1 - B) \frac{a^2 r^2 - k(a^2 r^2 - F)}{F}.$$

(5)

где $B = \exp\left(-\frac{kfz}{\rho}\right)$; $F = a^2 r^2 - b^2 \left[a^2 - (H - z - a)^2 \right]$; γ , k - соответственно

плотность и коэффициент бокового давления сыпучего материала; f - коэффициент внешнего трения; ρ - гидравлический радиус поперечного сечения силоса.

Проведенным численным анализом установлено, что функция $p_{\text{вк}}$ является унимодальной с экстремумом типа максимума и на области определения ($H \leq z \leq 0$) не имеет особенностей.

Положение максимальных сжимающих напряжений по высоте емкости определяется из экстремума функции

$$p'_{\text{вк}} = 0.$$

(6)

Рассматривая предельное состояние сыпучего материала в кольцевой области Δz на второй стадии установившегося движения и привлекая условие прочности, например, Кулона

$$(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi = 0,$$

получено значение коэффициента бокового давления

$$k = \frac{1 + \sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi + 4tg^2 \varphi},$$

(7)

из которого следует, что переход реальных сыпучих материалов в квазижидкое состояние наступает при условии $0,6 \leq k \leq 1$. Уменьшение угла внутреннего трения в 2 раза приводит к увеличению коэффициента бокового давления до $k \approx 0,9$, а при $\varphi \rightarrow 0$ имеем $k \rightarrow 1$. Таким образом, полученное выражение перехода сыпучего в квазижидкое состояние дает возможность при $k = 1$ получить максимальное увеличение горизонтального давления $p_{\text{Гк}}$ на стены в кольцевой области, которое по величине равно вертикальному давлению $p_{\text{Гк}} = p_{\text{вк}}$.

Кроме того, рассмотрено условие равновесия кольцевой области высотой Δz с наружным и внутренним радиусами r_2 и r_1 под действием вертикальных сжимающих $p_{\text{вк}}$, горизонтальных p_r и p_θ давлений и сил трения по горизонтальным площадкам в предельном

состоянии перемещения сыпучего в горизонтальном направлении. Получено дифференциальное уравнение, решение которого относительно горизонтального давления сыпучего материала на контакте со стенкой силоса имеет вид

$$P_{Гг} = P_{вк} \left[\frac{tg\varphi}{\Delta z} (r_2 - r_1) + k \right].$$

(8)

Из уравнения (8) следует, что при $\varphi \rightarrow 0$, $k \rightarrow 1$ и тогда $P_{Гг} = P_{вк}$, то есть получен аналогичный результат повышения горизонтального давления.

Напряженное состояние сыпучего материала на третьей стадии движения не представляет практического интереса, так как процесс истечения приближается к завершению, уровень засыпки снижается, а давление на стены падает.

Для окончательных выводов о соответствии предложенной физической модели истечения и формирования давления сыпучего материала на стены силосов реальным условиям обоснована постановка, разработана методология и проведены экспериментальные исследования:

- на моделях силосов из оргстекла с различными сыпучими материалами (песок, щебень, уголь, керамзит, клинкер); регистрировались давления сыпучего материала с помощью тензометрированных месдоз и его перемещения внутри массива;

- в натуральных условиях на угловом силосе железобетонного зернового элеватора в г. Гадяч Полтавской области (высота силоса 30 м, диаметр 6 м, расположение разгрузочного отверстия центральное); регистрация давлений по двум образующим по высоте и на двух уровнях в плане осуществлялась месдозами акустического типа, велось наблюдение за изменением формы поверхности засыпки в процессе выгрузки;

- в натуральных условиях на силосе для руды после первой стадии дробления обогатительной фабрики Лебединского ГОКа (высота силоса 14,7 м, внутренний диаметр 11,0 м, расположение разгрузочного проема центральное); давление руды на стены определялось косвенно, посредством расчетного анализа напряженно-деформированного состояния оболочки с последующим сопоставлением опытных и расчетных кольцевых деформаций стен в двух уровнях по высоте.

С использованием стандартных методов и специально разработанных методик были исследованы:

- физико-механические характеристики применявшихся в экспериментах сыпучих материалов;

- особенности перемещения слоев и движения сыпучего материала внутри емкости в зависимости от соотношения геометрических размеров силосов и технологических режимов эксплуатации;

- качественное и количественное распределение горизонтальных давлений сыпучего материала на стены емкостей при различных режимах эксплуатации и их взаимосвязь с особенностями движения сыпучего внутри емкостей на разных стадиях разгрузки;

- давления сыпучего материала внутри массива в зоне дилатансии и в кольцевой области максимальных горизонтальных давлений.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил теоретические предпосылки условий силового взаимодействия сыпучего тела с оболочкой и внутри массива, соответствующие предложенной физической модели истечения и формирования горизонтального давления на стены емкостей.

При внецентренной выгрузке сыпучих материалов с относительным эксцентриситетом e , представляющим отношение расстояния от центра силоса до центра выпускного отверстия к радиусу силоса и удовлетворяющим условию $e > e_{cr}$, где e_{cr} - значение предельного относительного эксцентриситета, при превышении которого истечение следует отнести к внецентренному, кинематика движения сыпучего внутри емкости существенно меняется. В относительно низких силосах ($H/D \leq 2,0$) на поверхности засыпки образуется воронка истечения, смещенная в сторону расположения выпускного отверстия, происходит интенсивное пристенное движение, поток которого пополняют массы сыпучего материала из центральной части объема. Подобная картина наблюдается и в высоких емкостях.

В процессе обследования силосов для горячего клинкера было установлено интенсивное разрушение железобетонных стен с внутренней стороны в зоне отмеченного пристенного движения сыпучего тела. Для обоснования взаимосвязи двух явлений сформулирована гипотеза влияния относительного эксцентриситета внецентренной разгрузки горячего сыпучего материала относительного на формирование повышенного нагрева стен силосов, состоящая в следующем. Описанная выше особенность движения при внецентренной выгрузке для случая горячего сыпучего материала приводит к эффекту повышенного нагрева стен на близлежащих к выпускному отверстию образующих за счет механического теплопереноса. Перемещаясь от центра к периферии горячий сыпучий материал вступает в новые контакты с уже нагретой стеной и температура ее поверхности повышается в 2-3 раза по отношению к статическому состоянию при загрузке. При выраженной нелинейности эпюры распределения температуры по сечению стены с максимумом на внутренней ее поверхности в бетоне возникают температурные сжимающие

напряжения, превышающие предел его прочности на сжатие. Защитный слой разрушается, кольцевая рабочая арматура стен внутреннего ряда оголяется, теряет связь с сечением стенки силоса, провисает и обрывается.

Абсолютную температуру в точке соприкосновения сыпучего материала со стенкой силоса при n -разовом контакте рекомендуется определять по формуле

$$t^k = (t^m - t^c)\Delta + t^c.$$

(9)

где t^k , t^m и t^c - соответственно температура на контакте соприкасающихся тел, температура загружаемого сыпучего и температура стены перед загрузением.

Для относительной температуры нагрева внутренней поверхности стены получена зависимость

$$\Delta = 1 - (1 - \omega)^n \leq 1,0,$$

(10)

где $\omega = k_\varepsilon / (1 + k_\varepsilon)$ - относительная температура нагрева при однократном контакте тел;

$k_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_m \cdot C_m \cdot \gamma_m}{\lambda \cdot C \cdot \gamma}}$ - коэффициент тепловой активности контактирующих сред;

λ_m, C_m, γ_m - соответственно коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотность сыпучего материала; λ, C, γ - тоже, для материала стены.

Количество контактов n зависит от величины относительного эксцентриситета ($e_u \leq e \leq 1,0$) расположения выпускного отверстия, геометрических характеристик емкости (отношение высоты к диаметру), а также технологических особенностей работы силоса в условиях простой выгрузки или проточного режима.

Предельный относительный эксцентриситет внецентренной разгрузки получен на основании рассмотрения предложенной расчетной схемы истечения сыпучего материала с привлечением угла θ наклона плоскости скольжения и угла внутреннего трения сыпучего материала φ

$$e_u = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \theta}.$$

(11)

Угол наклона плоскости скольжения сыпучего определяется из условия равновесия слоя сыпучего материала при его смещении от поверхности стены к центру емкости

$$tg\theta = tg\varphi + \sqrt{tg^2\varphi + 1} = \frac{1 + \sin\varphi}{\cos\varphi}.$$

(12)

Совместное решение (11) и (12) приводит к выражению

$$e_u = \frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}.$$

(13)

Для определения количества контактов горячего сыпучего материала со стенкой предложена эмпирическая зависимость вида

$$n = 1 + A_0 \cdot (e - e_u)\xi, \quad (14)$$

где A_0 - опытный коэффициент; ξ - параметр, учитывающий отклонения геометрических размеров емкости от исследуемых и режим работы силосов.

Для сопоставления расчетных значений температуры нагрева стен силосов при внецентренной выгрузке горячего сыпучего материала с экспериментом и определения опытных коэффициентов, проведены исследования на моделях и в натуральных условиях:

- кинематика движения сыпучего материала при внецентренной выгрузке изучена на разъемных моделях из оргстекла;
- качественная сторона эффекта повышения давления исследована на модели, выполненной из песчаного бетона; температуру нагрева стены на контакте с сыпучим материалом измеряли хромель-копелевыми термопарами в четырех точках на ближайшей к выпускному отверстию образующей и в двух точках на удаленной образующей;
- количественная сторона явления повышенного нагрева железобетонных стен емкостей изучалась на натуральных силосах для горячего клинкера (табл. 1).

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований

№№ п/п	Объект	e	Си- лос, №	$t_{on}^m,$ °C	$t_{on}^c,$ °C	Простая выгрузка			
						$t_{on}^k,$ °C	Δ_{on}	n_{on}	A_0
1.	Балаклейский ЦШК	0,71	5	260	30	150	0,51	2,43	4,04
2.	Цементзавод “Пролетарий” АО “Новорос-цемент”	0,52	2	150	28	79	0,44	2,0	5,75
3.	АО “Оскол- цемент”	0,71	13	82	16	50	0,56	2,8	5,08
4.	АО “Оскол-	1,0	13	105	22	93	0,83	6,05	7,72

цемент”									
Среднее									
значение $A_0=5,65$									

Для сопоставимости результатов экспериментов использованы относительные значения температуры нагрева стен в точке контакта клинкер - железобетонная стена силоса. Опытные значения количества контактов n_{on} , относительной температуры нагрева Δ_{on} и параметра A_0 определялись по разработанному алгоритму с учетом зависимостей:

$$n_{on} = \frac{\ln(1 - \Delta_{on})}{\ln(1 - \omega)}; \quad \Delta_{on} = \frac{t_{on}^k - t_{on}^c}{t_{on}^M - t_{on}^c}; \quad A_0 = \frac{n_{on} - 1}{e - e_u}.$$

(15)

Результаты исследований на моделях силосов и в натуральных условиях качественно совпали. Подтверждено наличие повышенного нагрева и интенсивного разрушения стен, установлена идентичность расположения зон интенсивного пристенного движения сыпучего на моделях силосов и зон разрушения поверхности стен с внутренней стороны на силосах для горячего клинкера разных цементных заводов.

Распределение температуры нагрева стен по периметру и высоте емкостей неравномерное. Максимальный нагрев стен зафиксирован на близлежащей к выпускному отверстию образующей на высоте 6-7 м от подсилосной плиты. Как и предполагалось, наиболее неблагоприятным с точки зрения формирования температурных воздействий оказался проточный режим, а также разгрузка клинкера через боковые отверстия в стенах.

Кроме нагрева стен силосов горячим сыпучим материалом, рассмотрен вопрос о дополнительном давлении засыпки при суточных колебаниях температуры наружного воздуха. Анализ напряженно-деформированного состояния системы массив сыпучего - оболочка выполнен с привлечением следующих предпосылок: в процессе суточных колебаний температура массива сыпучего сохраняется постоянной, а средняя температура по сечению стены снижается на величину Δt ; материал оболочки и сыпучее работают упруго, а выделенный двумя горизонтальными плоскостями участок системы удален от верха засыпки на расстояние, при котором взаимный сдвиг на контакте с оболочкой отсутствует.

Из рассмотрения условий равновесия и условий совместности деформаций по вертикальному и радиальному направлениям, учета свободных температурных деформаций оболочки, представления связи между напряжениями и деформациями на основании обобщенного закона Гука для плоского напряженного состояния применительно к участку оболочки и для трехмерного по отношению к массиву сыпучего материала, из совместного

решения получена зависимость для дополнительного за счет температуры давления p_t на стенку оболочки

$$p_t = \frac{\alpha \Delta t E_M [a(1 + \nu_z) + \nu_{\theta M} + 1]}{(b + 1 - \nu_{ZM})(a + 1) - (b\nu_{\theta} + 2\nu_{\theta M})(a\nu_z + \nu_{\theta M})},$$

(16)

где α - коэффициент температурной деформации материала оболочки; E_M, E - соответственно модули упругости сыпучего материала и материала оболочки; F_M, F - площади горизонтальных сечений соответственно для массива засыпки и оболочки; δ - толщина стенки оболочки; $a = E_M \cdot F_M / EF$, $b = r \cdot E_M / E\delta$ - безразмерные коэффициенты; ν_z, ν_{ZM} , $\nu_{\theta}, \nu_{\theta M}$ - коэффициенты поперечной деформации соответственно в вертикальном направлении для материала оболочки и для сыпучего материала и в тангенциальном направлении для материала оболочки и для сыпучего материала.

При последовательном упрощении принятых допущений зависимость (16) трансформируется в известные формулы, полученные О.Таймером, А.В.Ереминым, А.В.Бурсианом, М.Кельнером.

Применительно к работе железобетонных стен силосов с трещинами вдоль образующих, оболочка находится в квазиодноосном напряженном состоянии, что эквивалентно обращению в нуль коэффициентов ν_z и ν_{θ} . В этом случае

$$p_t = \frac{\alpha \Delta t E_M (a + \nu_{\theta M} + 1)}{(b + 1 - \nu_{ZM})(a + 1) - 2\nu_{\theta M}^2}.$$

(17)

Учет особенностей нелинейного деформирования железобетонных стен силосов с трещинами выполнен с привлечением коэффициента ψ_s по зависимости

$$\psi_s = \frac{\mu^2 \sigma_s^2 - R_{bt,ser}^2 - R_{bt,ser} \cdot \sigma_{s,crc} \mu}{\mu^2 \sigma_s^2}$$

(18)

и использования приведенного секущего модуля деформации арматуры

$$E_{red} = \frac{E_s \cdot \mu^2 \sigma_s^2}{\mu^2 \sigma_s^2 - R_{bt,ser}^2 - \sigma_{s,crc} \mu \cdot R_{bt,ser}},$$

(19)

учитывающего ниспадающую ветвь диаграммы $\tilde{\sigma}_{bt} - \sigma_s$. Процедура расчета дополнительного температурного давления основана на итерационном процессе с учетом суперпозиции силовых и температурных по формуле (17) воздействий.

Деформативность для общего случая нагружения растянутых железобетонных стен силосов в практических задачах описывается с помощью

функции ψ_s^* , представляющей суперпозицию кратковременного, многократно повторного и длительного нагружений

$$\psi_s^* = \psi_s(1 + z + F),$$

(20)

где $z = \Delta' \frac{n_x}{n_u} (1 - \rho_0^m) [1 - \exp(-\alpha_1 N)]$ - функция многократно повторной нагрузки;

$F = \Delta' \left(\rho_0^m \frac{n_x}{n_u} + 1 - \frac{n_x}{n_u} \right) \left[1 - \exp\left(-\alpha_2 \frac{N}{n_x}\right) \right]$ - функция длительности действия нагрузки;

Δ' - предельно возможное относительное приращение коэффициента ψ_s , введенное В.М.Бондаренко; n_x, n_u - соответственно частота и предельная частота повторения нагрузки; ρ_0 - характеристика цикла; N - количество циклов нагружения; m, α_1, α_2 - опытные коэффициенты.

При рассмотрении принципов надежности и характеристики отказов в железобетонных силосах установлены наиболее распространенные из них, а также причины их вызвавшие: низкая степень достоверности расчетных нагрузок, неудачные конструктивные решения и схемы приложения нагрузок, неудовлетворительное качество производства работ при возведении, влияние температурных, коррозионных и ударно-истирающих воздействий. Отказы сгруппированы по указанным признакам, а в силосах для горячего клинкера проанализованы также с учетом степени повреждения стен с внутренней стороны емкостей. На фотографиях (рис. 5 и 6) представлены характерные разрушения железобетонных стен силосов для горячего клинкера. Оголение кольцевой рабочей арматуры внутреннего ряда на локальных участках по высоте и последующее ее выключение из работы на растяжение приводит к снижению несущей способности стен.

В соответствии с указаниями СН 302-65 несущая способность стены силоса определяется в предположении ее работы как кольцевого элемента и эпюра усилий, характеризующих несущую способность сечений при переменном по высоте силоса армировании, имеет ступенчатый характер. В действительности, применительно к работе

стен силосов как оболочек, эта эпюра должна изменяться плавно при переходе от одной зоны армирования к другой.

При расчете несущей способности оболочки исходим из условия, при котором ее величина является суммой несущей способности отдельных стержней арматуры, расположенных выше и ниже рассматриваемого сечения. Усилию в арматурном стержне $N = A_s \cdot R_s$ соответствует распределенное по окружности нормальное давление на стенку силоса

$$p_1 = \frac{A_s R_s}{r} \cdot m_s,$$

(21)

где m_s - количество рядов кольцевой арматуры.

С учетом радиальных перемещений оболочки, определенных по моментной теории, несущая способность сечения на расстоянии z от рассматриваемого арматурного стержня может быть представлена в виде

$$N_{ul}(z) = \frac{p_1 E \delta S}{8 \eta^3 D r} \cdot W(\eta z),$$

(22)

где δ, S - толщина стенки и шаг арматуры; $W(\eta z) = (\sin \eta z + \cos \eta z) \cdot \exp(-\eta z)$ - балочная

функция А.Н.Крылова; $D = \frac{E \delta^3}{12(1 - \nu^2)}$ - цилиндрическая жесткость.

Полная несущая способность стены в любом по высоте сечении оболочки определяется суперпозицией несущей способности отдельных стержней на выше- и ниже расположенных участках. При переходе от одной зоны армирования к другой учитываются соответствующие им значения распределенных давлений стержней на стену емкости.

Функция изменения несущей способности по высоте имеет плавный вид, скачки отсутствуют.

Аналогичный подход использован при оценке остаточной несущей способности за счет обрыва кольцевой рабочей арматуры на локальных по высоте силоса участках размером b . В данном случае появилась возможность определять и предельный размер b_u , при котором несущая способность стен снижается до величины действующего в ней усилия от внешней нагрузки. Именно это использовано в качестве критерия для оценки степени разрушения стен, при которой дальнейшая их эксплуатации без усиления становится невозможной.

Разработанная и подтвержденная экспериментально-теоретически физическая модель процесса истечения сыпучего материала и формирования давления на стены силосов при выгрузке, а также сформулированная и обоснованная гипотеза внецентренного истечения и связанного с ним эффекта повышения температуры нагрева стен на локальных участках и интенсивного их разрушения, составляют основу научных принципов разработки новых конструкций силосов с учетом рационального формирования технологических воздействий. Исследованные особенности истечения сыпучего материала при выгрузке позволяют использовать их при управлении потоком движения внутри емкостей, чем достигается эффективность конструкций и их эксплуатационная надежность. Суть рационального формирования потока истечения и величины давления на стены силосов состоит в том, что внутри емкости над выпускным отверстием устанавливается разгрузочное устройство в виде наклонного желоба открытого со стороны днища профиля, перекрывающего поток истечения и направляющего его под желобом в требуемом направлении. Разгрузочное устройство может быть выполнено из составных желобов (а.с. № 670713), установленных друг над другом, из желобов в виде различных винтовых спиралей (а.с. № 941520), в виде полых элементов, установленных друг над другом с зазором (а.с. № 842184) или в виде разгрузочной трубы с последовательным открыванием перепускных отверстий (а.с. № 750028). Характерные примеры конструктивного решения силосов с центральной разгрузкой представлены на рис. 7. Во всех конструкциях обеспечивается полная разгрузка сыпучего материала в автоматическом режиме. В процессе разгрузки давление сыпучего материала не повышается, так как истечение начинается с верхних слоев засыпки.

Конструкции силосов предназначенные для внецентренной разгрузки также снабжаются разгрузочными устройствами, позволяющими изменять кинетику несимметричного истечения и приводить ее к кинетике, близкой к центральной разгрузке, чем исключается эффект повышения температуры нагрева стен на локальных участках (а.с. №№ 941519, 800328, 1686102). Примеры разработанных конструкций приведены на рис. 8.

Разработаны рекомендации по определению конструктивных параметров силосов с разгрузочными устройствами как для условий нового строительства, так и при реконструкции емкостей. Опыт более чем десятилетней работы новых конструкций силосов на цементных заводах показал их высокую эффективность с исключением дополнительных эксплуатационных затрат.

В процессе проведения реконструкции и усиления силосов различных конструкций разработаны и внедрены при проектировании методики расчета:

- узла сопряжения стальной воронки с монолитным железобетонным силосом-оболочкой;

- сопряженных оболочек силосов каннелюрного типа;
- цилиндрических силосов с радиальными перегородками;
- разрушения защитного слоя бетона внутреннего ряда арматуры под влиянием температурных воздействий.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Мировая практика расчета и конструирования силосов базируется на привлечении теории Янсена для оценки горизонтального давления в стадии загрузки емкостей. Увеличение давления при выгрузке оценивается введением поправочного коэффициента дифференцированно для разных зон по высоте, при этом не учитываются закономерности движения сыпучего внутри емкости в силу отсутствия достоверных результатов исследований.

Отсутствует единая методика оценки температурных воздействий на стены силосов, а нагрев стен горячим сыпучим материалом при внецентренной выгрузке вообще не рассматривается по причине неизученности проблемы. Недостаточно разработаны вопросы жесткости стен силосов, их пространственная работа при оценке несущей способности, в том числе и при разрушениях стен на локальных участках, появляющихся в процессе эксплуатации.

2. Предложена физическая модель процесса истечения и формирования давления на стены силосов при выгрузке сыпучего, учитывающая его дилатансию и последовательное протекание стадий неустановившегося и установившегося движения внутри емкостей.

3. Впервые получена картина перемещения слоев сыпучего в процессе выгрузки, при этом использованы разработанные автором способ “замораживания” сыпучего, процедура и алгоритм его реализации. В характерных зонах истечения измерены величины давления сыпучего материала.

4. Экспериментально на моделях и в натуральных условиях установлена прямая связь кинетики истечения сыпучего с характером и величиной его давления на стены емкости при выгрузке. Максимальное давление на стены возникает в зонах радиального перемещения сыпучего материала, размер зон по высоте находится в пределах величины радиуса силоса r .

5. Теоретически обосновано наличие двух стадий истечения, влияние дилатансии, положение зоны горизонтального движения сыпучего по высоте емкости, предельные величины давления сыпучего на стены при выгрузке. Показано, что сыпучий материал в этих зонах из состояния твердого тела переходит в псевдожидкое состояние, при котором горизонтальное его давление на стены емкости по величине стремится к вертикальному

($p_T \rightarrow p_g$) и превышает давление в состоянии покоя в 2,25-3,0 раза, что согласуется с экспериментами.

6. Экспериментально на моделях и на натуральных объектах изучен характер движения сыпучего при внецентренной выгрузке. Применительно к силосам для горячих сыпучих материалов впервые сформулирована гипотеза механического теплопереноса при многократном контакте со стенкой емкости, что приводит к повышенному в 2-3 раза нагреву стен, а при проточном режиме температура контакта t^k достигает температуры загружаемого сыпучего материала t^m . Это является источником интенсивного разрушения стен силосов.

7. Разработана методика расчета стен силосов на температурные воздействия при внецентренной выгрузке горячего сыпучего, учитывающая введенное понятие предельного относительного эксцентриситета внецентренного расположения разгрузочного проема, соотношение геометрических размеров емкостей и особенности технологического процесса эксплуатации - простая выгрузка или проточный режим.

8. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных стен силосов с трещинами, установлена их работа на внецентренное растяжение по первому расчетному случаю. Приведены зависимости для жесткости стен, учтен длительный и многократно-повторный режим нагружения, даны рекомендации по учету коэффициента длительности.

9. Решена осесимметричная задача формирования дополнительного горизонтального давления на стены силосов при суточных колебаниях температуры наружного воздуха. Полученное решение при упрощающих допущениях трансформируется в известные выражения О.Таймера, М.Кельнера и других авторов.

10. Предложено решение для практического учета нелинейного перепада температуры по сечению стены силоса, основанное на его линеаризации и достижении максимального температурного момента при нестационарном теплообмене.

11. Разработана методика расчета нелинейного деформирования растянутых элементов с учетом работы бетона на участках между трещинами на ниспадающей ветви диаграммы $\tilde{\sigma}_{bt} - \sigma_s$.

12. Рассмотрены и систематизированы характеристики отказов, определяющие надежность силосов. Несущая способность их стен оценена применительно к работе пространственной системы, предложены зависимости для определения несущей способности стен силосов, в том числе для случаев локального по высоте разрушения в процессе

эксплуатации. В качестве критерия необходимости усиления стен силосов принята предельная

величина зоны b_{II} обрыва кольцевой рабочей арматуры внутреннего ряда по высоте емкости.

13. Разработаны новые конструктивные решения силосов, основанные на управлении кинетикой истечения и исключающие повышение давления на стены при выгрузке, а также исключающие повышение температуры нагрева стен и их разрушение при внецентренной выгрузке. Долговечность сооружений повышается в 2 - 3 раза.

14. Для использования в практике проектирования и при реконструкции разработаны методики:

- расчета узла примыкания стальной воронки к железобетонным цилиндрическим стенам;
- расчета плоской системы сопряженных оболочек силосов каннелюрного типа;
- расчета стен силосов с радиальными перегородками;
- расчета прочности бетона защитного слоя при температурных воздействиях и под действием давления сыпучего материала;
- по проведению реконструкции силосов.

15. Результаты исследований включены в рекомендации, внедрены при проектировании, в процессе строительства и реконструкции хранилищ силосного типа.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Молодченко Г.А. Надежность сооружений силосного типа. - Харьков: ХОП НТО Стройиндустрии, ХПСНИИП, 1981. - 52 с.

2. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н., Довнар Ч.С. Реконструкция хранилищ для сыпучих материалов: Учебное издание. - Харьков: ХОП НТО Стройиндустрии, ХИИКС, 1989. - 68 с.

3. Молодченко Г.А., Фомин С.Л., Лучковский И.Я., Тойбис В.Б. и др. Рекомендации по проектированию и усилению железобетонных хранилищ для сыпучих материалов, в том числе с повышенной температурой, применительно к условиям реконструкции. - Харьков: Госстрой СССР, ХПСНИИП, 1984. - 82 с.

4. Кузнецов Ю.Д., Рунцо Н.П., Рабинович Е.А., Молодченко Г.А. и др. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Ч. 1. Наземные конструкции. - Харьков: Госстрой СССР, ХПСНИИП, НИИЖБ, НИИСП, 1985. - 242 с.

5. Молодченко Г.А., Гринь В.И. Реконструкция и усиление зданий и сооружений: Учебное пособие. - К.: ИСИО, 1993. - 171 с.

6. Повышение качества и долговечности строительных конструкций и материалов / Молодченко Г.А., Рунцо Н.П., Бильченко А.В., Шипель Л.В. и др. / Под ред. С.И.Орбелина и И.Н.Заславского. - К.: Будівельник, 1976. - 104 с.

7. Молодченко Г.А., Заковоротный Ю.Г., Зарудский Г.В. Оценка погрешности датчиков давления при определении контактных напряжений / В кн. ХПСНИИП. Расчет конструкций подземных сооружений. - К.: Будівельник, 1976. - С. 75-77.

8. Молодченко Г.А. Давление зерна на стенки силоса // Исследование напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. Вып. 6. - Саратов, СПИ. - 1977. - С. 82-93.

9. Молодченко Г.А., Моденов Е.А. Совершенствование конструкций клинкерных силосов // Цемент. - 1981. - № 9. - С. 11-13.

10. Молодченко Г.А. Надежность силосов для сыпучих материалов с повышенной температурой хранения // Исследование напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. Межвед. научн. сборник. - Саратов: СПИ, 1982. - С. 28-38.

11. Бильченко А.В., Молодченко Г.А., Шипель Л.В., Рунцо Н.П. Анализ конструктивных решений силосов коксохимического производства // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1982. - № 4. - С. 14-18.

12. Молодченко Г., Перцель Ю., Поволоцкая И. Совершенствование проектирования заглубленных емкостных сооружений // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - 1984. - № 3. - С. 25-26.

13. Вербицкий Д.Н., Соболев Н.Е., Чикиш В.Г., Молодченко Г.А. Опыт реконструкции силосов горячего клинкера на Балаклейском комбинате // Цемент. - 1985. - № 11. - С. 3-4.

14. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н. Учет температурных воздействий в цилиндрических силосах // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1991. - № 6. - С. 12-16.

15. Попельнух В.Н., Молодченко Г.А. Особенности эксплуатации и реконструкции силосов // Эксплуатация и ремонт систем городского хозяйства. Сб. науч. трудов. - К.: УМК ВО, 1992. - С. 38-44.

16. Заславский И.Н., Молодченко Г.А., Тищенко Б.Т., Учитель А.М. Опыт усиления железобетонной грануляционной башни аммиачной селитры // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - 1985. - № 3. - С. 31-33.

17. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н. Оценка надежности эксплуатируемых силосов // Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства. Сб. научн. трудов ХИИКС. - К.: ИСИО, 1994. - С. 31-38.

18. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н. Особенности нагрева стен цилиндрических оболочек при выгрузке горячего сыпучего // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 13. - К.: Техніка, 1998. - С. 43-46.
19. Molodhenko G.A. Reconstruction of reinforced concrete cylindrical siloes // Proceedings international Congress ICSS-98, v. II. - Moscow, Russia, 1998. - p. 939-945.
20. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н. Разрушение защитного слоя бетона в цилиндрических силосах для горячих сыпучих материалов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 18. - К.: Техніка, 1999. - С. 31-35.
21. Молодченко Г.А. Закономерности нагрева железобетонных стен силосов горячим сыпучим материалом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета, вып. 81. Новые решения в современных технологиях. - Харьков: 2000. - С. 68-70.
22. Молодченко Г.А. Расчет сопряженных оболочек силосов каннелюрного типа // Коммунальное хозяйство городов: Сб. науч.-техн. сб. Вып. 19. - К.: Техніка, 1999. - С. 67-70.
23. Молодченко Г.А. Расчет цилиндрических стен силосов с радиальными перегородками // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 20. - К.: Техніка, 1999. - С. 31-37.
24. Молодченко Г.А. Экспериментальные исследования горизонтального давления руды в цилиндрической емкости // Науковий вісник будівництва. Вип. 7. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 1999. - С. 91-96.
25. Молодченко Г.А. Влияние конструктивного решения силосов на их эксплуатационную надежность // Науковий вісник будівництва. Вип. 8. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 1999. - С. 97-102.
26. Молодченко Г.А., Фомин С.Л. Учет нелинейного перепада температуры по толщине стен железобетонных силосов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будови та споруди: Вісник Рівненського держ. ун-ту, Зб. науков. праць. Вип. 3. - Рівне, 1999. - С. 221-226.
27. Молодченко Г.А. Пятибрат С.А. Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных стен силосов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 21. - К.: Техніка, 2000. - С. 9-14.
28. Молодченко Г.А., Попельнух В.Н., Авдиенко Л.Л. К расчету деформаций железобетонных элементов // Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону: Сб. тез. Першої Всеукр. наук.-техн. конф. - К.: 1996. - С. 164-166.

29. Молодченко Г.А. Физическая модель истечения сыпучего и особенности формирования давления на стены силосов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 23. - К.: Техніка, 2000. - С. 86-95.

30. Молодченко Г.А. Напряженно-деформированное состояние узла сопряжения стальной воронки с железобетонным силосом-оболочкой // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 22. - К.: Техніка, 2000. - С. 38-41.

31. А.с. 750028. СССР, М Кл³.Е 04G 11/22. Хранилище для сыпучих материалов / Г.А.Молодченко, Г.В.Зарудский (СССР). - № 2634589/29-33; Заявлено 15.06.78; Оpubл. 25.07.80, Бюл. 27. - 3 с.

32. А.с. 670713. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Хранилище для сыпучих материалов / Г.А.Молодченко, В.В.Кандыба (СССР). - № 22583777/29-33; Заявлено 21.02.78; Оpubл. 27.06.79, Бюл. 24. - 3 с.

33. А.с. 842184. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Хранилище для сыпучих материалов / Г.А.Молодченко (СССР). - № 2682558/29-33; Заявлено 10.11.78; Оpubл. 30.06.81, Бюл. 24. - 3 с.

34. А.с. 941519. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Хранилище для сыпучих материалов с боковым выпускным отверстием / Г.А.Молодченко (СССР). - № 2487686/29-33; Заявлено 23.05.77; Оpubл. 7.07.82, Бюл. 25. - 3 с.

35. А.с. 941520. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Хранилище для сыпучих материалов / Г.А.Молодченко (СССР). - № 2753722/29-33; Заявлено 12.04.79; Оpubл. 7.07.82, Бюл. 24. - 3 с.

36. А.с. 800328. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Хранилище для сыпучих материалов / Г.А.Молодченко, Е.А.Моденов (СССР). - № 27381446/29-33; Заявлено 19.03.79; Оpubл. 31.01.81, Бюл. 4. - 3 с.

37. А.с. 1686102. СССР, М Кл³.Е 04Н 7/22. Способ выпуска сыпучего материала из емкости / Г.А.Молодченко. Ч.С.Довнар, Н.А.Пронякин (СССР). - № 4066325/63; Заявлено 24.03.86; Оpubл. 23.10.91, Бюл. 39. - 3 с.

АННОТАЦИИ

Молодченко Г.А. Залізобетонні силоси з раціональним формуванням технологічних впливів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. - Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2000.

Дисертація присвячена побудові наукових принципів та розробці на їх основі нових конструкцій силосів, які відповідають вимогам ефективності та експлуатаційної надійності. Запропонована фізична модель процесу руху сипучого матеріалу усередині ємкості при розвантажуванні і формування його тиску на стіни силосів. Здійснено її експериментальне та теоретичне обґрунтування, установлені граничні значення підвищення тиску сипучого матеріалу на стіни силосів під час розвантаження. Обґрунтована гіпотеза підвищеного нагріву та руйнування стін силосів при позацентровому розвантаженні гарячого сипучого матеріалу. Запропоновано методики розрахунку несучої здатності стін силосів, їх жорсткості з урахуванням виникнення тріщин по твірним. Розроблені нові конструкції силосів з раціональним формуванням технологічних впливів, виконано упровадження їх при новому будівництві та при реконструкції.

Ключові слова: силос, кінетика витікання, дилатансія, технологічні впливи, позацентрове розвантаження, відносний ексцентриситет, температурні впливи, несуча здатність.

Молодченко Г.А. Железобетонные силосы с рациональным формированием технологических воздействий. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. - Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2000.

Диссертация посвящена построению научных принципов и разработке на их основе новых конструкций силосов, отвечающих требованиям эффективности и эксплуатационной надежности применительно к проектированию, новому строительству и реконструкции действующих объектов.

В качестве технологических воздействий рассмотрены вопросы повышения давления на стены силосов в производственных режимах эксплуатации (простая выгрузка и проточный режим), а также повышения температуры нагрева стен на локальных участках и их интенсивное разрушение при внецентренной выгрузке горячих сыпучих материалов.

На основании проведенных обследований дан анализ характера и степени разрушения железобетонных стен емкостей с учетом их конструктивного решения и технологических воздействий. Предложена физическая модель процесса истечения сыпучего материала внутри емкости при выгрузке и формирования давления на стены силосов. Рассмотрены две стадии движения сыпучего материала - неустановившаяся и установившаяся. Теоретический

анализ кинематики системы сыпучий материал - оболочка силоса выполнен с привлечением свойств сыпучего: дилатансии, изменчивости углов внутреннего и внешнего трения. Установлены предельные значения горизонтального давления сыпучего на стены силосов, формирующиеся в процессе разгрузки, определены зоны их возникновения.

Экспериментальное обоснование принятой физической модели реализовано в лабораторных условиях, на моделях силосов из оргстекла и цементно-песчаного бетона, и в натуральных условиях, на железобетонных силосах: зернового элеватора, емкости для руды. Получено качественное соответствие результатов исследований на моделях силосов и на натуральных объектах.

Применительно к внецентренной разгрузке силосов для горячих сыпучих материалов сформулирована и подтверждена гипотеза механического теплопереноса, устанавливающая связь между характером движения засыпки, повышением температуры нагрева стен на локальных участках и их интенсивным разрушением. Теоретический анализ и экспериментальное обоснование гипотезы подтвердили корреляцию процессов и наличие рассмотренного эффекта. Установлено, что при простой внецентренной выгрузке горячего клинкера температура нагрева внутренней поверхности стены увеличивается в 1,8-2,2 раза и более, в зависимости от величины относительного эксцентриситета расположения выпускного отверстия. При проточном режиме эта температура может достигать температуры загружаемого сыпучего материала.

При суточных колебаниях температуры наружного воздуха получено общее решение задачи для объемного напряженно-деформированного состояния системы массив сыпучего материала - оболочка силоса, которое при упрощенных граничных условиях трансформируется в известные решения О.Таймера, М.Кельнера и другие. Учтены особенности работы железобетонных стен силосов с трещинами по образующим, нелинейные деформации бетона на участках между трещинами, в том числе на ниспадающей ветви диаграммы $\tilde{\sigma}_{bt} - \sigma_s$.

Разработаны новые конструкции силосов с управлением кинематикой движения сыпучего внутри емкостей, исключаяющие повышение давления на стены емкостей и повышение температуры нагрева стен при внецентренной выгрузке.

Разработаны методы расчета несущей способности стен силосов-оболочек, учитывающие локальные нагружения и переменное армирование по высоте емкостей, методы расчета жесткости стен с трещинами. Рассмотрены задачи оценки напряженно-деформированного состояния оболочек силосов каннелюрного типа, силосов с радиальными перегородками, условия температурного разрушения защитного слоя бетона внутреннего ряда рабочей кольцевой арматуры. Осуществлено внедрение новых

конструкций силосов через рекомендации по проектированию, при новом строительстве и реконструкции.

Ключевые слова: силос, кинетика истечения, дилатансия, технологические воздействия, внецентренная разгрузка, относительный эксцентриситет, температурные воздействия, несущая способность.

Molodchenko G.A. Reinforced-concrete siloes with the most efficient formation of technological actions. - Manuscript.

The thesis for higher degree of doctor of sciences (engineering) on speciality 05.23.01 - engineering constructions, buildings and structures. - Kharkov state academy of railway transport, Kharkov, 2000.

The thesis deals with frame of scientific principles and elaboration of new constructions of siloes on their basis meeting the requirements of the efficiency and operate reliability. Suggested is the physical model of loose material flow process inside the silo while unloading as well as formation of its pressure on silo walls. Its experimental and theoretical control is executed; limiting values of pressure increase of loose material on silo walls are determined when unloading. Substantiated is hypothesis of increased heating and destruction of silo walls at eccentric unloading of hot loose material. Suggested is the estimation procedure of the load-carrying capacity of silo walls, their rigidities taking into account the formation of cracks on the generating lines. Elaborated are the new constructions of siloes with the most efficient formation of technological actions. Their introduction is executed at new construction and reconstruction.

Key words: silo, the flow out kinetics, dilatation, technological actions (influences), eccentric unloading, relative eccentricity, temperature stresses, load-carrying capacity.

Молодченко Геннадий Анатольевич

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ СИЛОСЫ С РАЦИОНАЛЬНЫМ
ФОРМИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Специальность 05.23.01 - строительные конструкции,
здания и сооружения

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

Ответственный за выпуск

Шаповалов А.Н.

Подп. к печати 14.10.2000

Формат 60 x 84 1/16

Бумага офисная № 1.

Печать на ризографе.

Объем 1,8 усл.-печ. лист

Тираж 100 экз.

Зак. №

Бесплатно

Сектор оперативной полиграфии ИВЦ ХГАГХ.