

сертификационных испытаний (лет); $T_{3\gamma}$ ($T_{m\gamma}$) – гарантированный срок службы защитных (металлизационных) покрытий с доверительной вероятностью $\gamma=0,95$ (лет); $T_{в\gamma}$ – гамма-процентный срок восстановления противокоррозионной защиты (лет).

1. Горохов Е.В., Брудка Я., Королев В.П. и др. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции. – М.: Стройиздат, 1994. – 483 с.

2. Королев В.П. Теоретические основы инженерных расчетов стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность // Науч. труды ДонГАСА. Вып.1. – Макеевка, 1995. – 110 с.

3. Королев В.П., Пожарская Г.А., Шевченко О.Н. Построение базы данных показателей коррозионной стойкости и долговечности строительных металлоконструкций на основе сертификационных испытаний // Строительство, реконструкция (теория, исследования, практика ...). Материалы междунар. конф. – М., 1999. – 652 с.

Получено 25.03.2001

УДК 624.954.012.45

Г.А.МОЛОДЧЕНКО, д-р техн. наук

Харьковская государственная академия городского хозяйства

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА МОДЕЛИ СИЛОСА

Приведены результаты экспериментальных исследований горизонтального давления сыпучего материала как на стены емкости, так и внутри потока сыпучего при истечении. Прозрачная модель силоса снабжена датчиками давления (месдозами), расположенными на одной образующей, разгрузка центральная и внецентренная.

При проведении экспериментов исходной принята разработанная нами физическая модель истечения сыпучего и формирования давления на стенки емкости [1].

В дальнейшем будем различать физическую модель процесса истечения и формирования давления на стенки емкостей – "физическую модель" и "модель силоса", представляющую собой геометрически подобную натурному силосу емкость для проведения непосредственно экспериментальных исследований.

Модель из оргстекла имеет масштаб геометрического подобия к оригиналу 1:60. Ее внутренний диаметр 200 мм, высота 1000 мм при соотношении высоты к диаметру, равном 5,0. По диаметральной плоскости модель разъемна на две части. Первая часть выполнена на жестком стальном каркасе с возможностью поворота вокруг горизонтальной оси. Вторая часть изготовлена составной из отсеков по высоте. Каждый отсек имеет самостоятельный жесткий металлический каркас,

обшитый с внутренней стороны прозрачным оргстеклом. Размеры отсеков по высоте составляют 167 и 83 мм, в центре каждого из них вмонтирован датчик-месдоза, работающий по принципу перемещения штампа. Рабочая часть месдозы, воспринимающая давление сыпучего материала, имеет размеры: высота – 50, ширина – 60 мм. Она вырезана непосредственно из оболочки, поэтому повторяет ее кривизну и опирается на рабочую часть месдозы – балку на двух гарнизирных опорах. В зоне чистого изгиба в сжатой и растянутой зонах наклеены тензодатчики омического сопротивления. Они подключены к измерительной системе по мостовой схеме, при этом один из них использован как активный, а второй – как компенсационный. При принятой схеме измерения давлений чувствительность регистрирующей аппаратуры повышается в два раза, компенсация погрешности за счет изменения температурно-влажностных характеристик окружающей среды сводится к минимуму за счет расположения обоих датчиков в непосредственной близости друг к другу (рис.1).

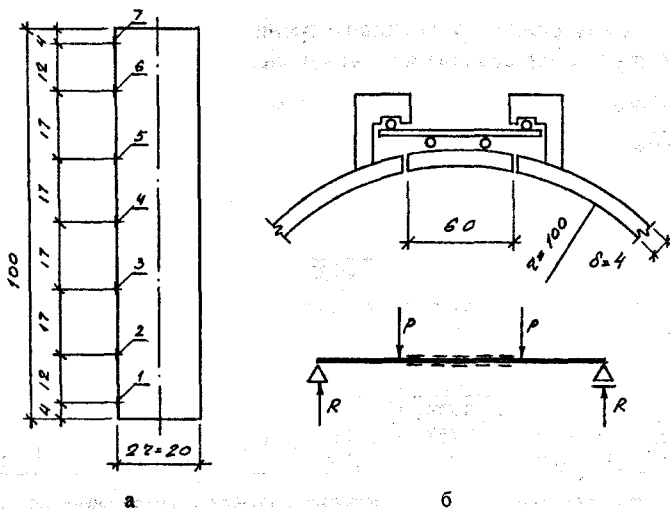


Рис.1 – Геометрические параметры модели силоса:

а – общие размеры (см); 1-7 – датчики давления; б – схема датчика давления и первичного преобразователя (мм); - - - - - тензодатчики

Регистрацию показаний первичных преобразователей осуществляли серийно выпускаемыми приборами, часть опытов проведена с использованием тензостанции ЦТМ-5.

Конструкция модели силоса предусматривала установку днища с

возможностью варьирования расположения выпускного проема с относительным эксцентриситетом $0 \leq e \leq 1,0$.

В качестве сыпучего материала для исследований были взяты песок, гранитный щебень, уголь, керамзит, клинкер. Крупность фракции (табл.1) моделировалась условиями устойчивости истечения при минимальных скоростях выпуска в процессе разгрузки моделей.

Таблица 1 – Гранулометрический состав сыпучих материалов

Сыпучий материал	Объемный вес, 10^{-2} Н/см ³	Гранулометрический состав в % по фракциям (мм)					
		3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0
Песок*	1,58	-	-	1,6	33,1	60,9	4,4
Щебень	1,47	34,7	50,6	-	14,7	-	-
Уголь	1,0	44,5	51,3	-	4,2	-	-
Керамзит	0,87	38,3	51,0	-	10,7	-	-
Клинкер	1,60	37,6	49,3	-	13,1	-	-

* При исследованиях на малой модели использовали только песок.

Углы внутреннего и внешнего трения применяемых для исследования сыпучих определены по стандартной методике [2].

Таблица 2 – Характеристики сыпучих материалов

Характеристики материала	Уплотняющее напряжение, Па·10 ⁻²	Сыпучие материалы				
		песок	щебень	уголь	керамзит	клинкер
φ_0	-	34,75	40,33	39,79	41,33	37,04
φ	46	32,6	33,0	31,0	34,0	36,5
φ	92	29,5	42,0	29,0	39,6	39,2
φ	138	29,8	38,5	27,0	35,6	41,0
f (по орг-стеклу)	22,5	0,249	0,377	0,262	0,413	0,393
	45,0	0,258	0,377	0,272	0,428	0,400
	68,0	0,266	0,402	0,285	0,440	0,437

* В расчетах горизонтального давления в модели приняты значения характеристик, соответствующие нормальному напряжению $22,5 \cdot 10^{-2}$ Па: для песка $\varphi=33^\circ$; для щебня $\varphi=33^\circ$; для угля $\varphi=31^\circ$; для керамзита $\varphi=34^\circ$; для клинкера $\varphi=36,5^\circ$.

При исследовании характера изменения давления на стенки модели силоса провели более 70 опытов, в которых варьировали высоту засыпки, относительный эксцентриситет внецентренного расположения разгрузочного отверстия, вид сыпучего материала, скорость истечения и другие параметры процесса. Не останавливаясь детально на

результатах экспериментов, назовем лишь основные из них, подтверждающие сформулированную физическую модель процесса [1]. Прежде всего отметим, что характер истечения сыпучих материалов при выгрузке полностью соответствует принятой физической модели процесса, а результаты измерения геометрических параметров кольцевой зоны разрушения, приведенные в табл.3, вполне коррелируются с графиками горизонтального давления сыпучих материалов (рис.2). Во всех экспериментах зафиксировано увеличение давления сыпучего на стены в нижней трети силоса по высоте. Очевидно, что не во всех опытах максимальное давление совпадало с уровнем расположения датчиков давления (месдоз), что не позволяет определить максимально возможную величину давления. Вместе с тем приведенные на рис.2 графики следует рассматривать с точки зрения качественной стороны физического явления. Количественная характеристика процесса должна базироваться на результатах экспериментальных исследований натуральных объектов.

Таблица 3 – Геометрические характеристики кольцевой области истечения сыпучего

Сыпучий материал	Песок*	Щебень	Уголь	Керамзит	Клинкер
Верхняя граница области, см	83	26,6	26,0	24,9	26,8
Нижняя граница области h_n , см	50	15,0	16,6	17,3	18,3
Расчетное значение h_n , см	51,6	16,6	15,9	16,9	17,8
$\Delta z/r$, см	1,18	1,16	0,94	0,76	0,85

* Данные приведены для малой модели (мм).

Основной задачей экспериментальных исследований на модели было установление напряженного состояния внутри массива сыпучего при выгрузке. В соответствии с принятой физической моделью истечения при неустановившемся движении сыпучего в зоне разуплотнения горизонтальные давления снижаются. Для проверки этой концепции проведены специальные исследования, в которых центр зоны истечения (эллипсоида вращения) был максимально приближен к месдозам. В опытах удалось выполнить приближение оси зоны к стенке модели при относительном эксцентриситете расположения выпускного отверстия, равном 0,8. При изменении угла между диаметральной плоскостью расположения выпускного отверстия и диаметральной плоскостью, проходящей через образующую расположения месдоз от 0 до 180°, удалось измерить горизонтальные давления сыпучего как в

зоне дилатансии, так и за ее пределами. Данные измерений для внецентренной выгрузки песка с эксцентриситетом $e=0,8$ на уровнях расположения датчиков давления (месдоз) 1-4 приведены на рис.3. Из диаграмм рис.3 следует, что после начала выгрузки горизонтальное давление в эллипсообразной зоне разуплотнения снижается на всех уровнях. Происходит трансформация напряженного состояния всего массива сыпучего, изменяются статические условия его равновесия. На рис.3 показана заштрихованная область зоны разуплотнения. Отметим, что диаграммы измерения горизонтального давления на рис.3 следует рассматривать совместно со схемой перемещения слоев сыпучего при выгрузке, зафиксированной на контакте со стеной модели (рис.4).

Для наглядности представления трансформации напряженного состояния в массиве сыпучего материала на рис.5 приведен график изменения горизонтального давления в процессе выгрузки. Из этого графика следует, что первоначальные величины давления по датчикам 1-4 при загрузке емкости характеризовались прямыми линиями, параллельными оси абсцисс (R_i). При выгрузке сыпучего из центрального расположенного отверстия горизонтальные давления в зоне разуплотнения (дилатансии) снижаются к оси симметрии, достигая значений, близких к нулю. На границе зоны разуплотнения давления повышаются по отношению к состоянию покоя (загрузки) и за ее пределами плавно снижаются. Этот эффект обнаружен впервые благодаря специально разработанной методике экспериментальных исследований. Он дает основание полагать, что явление дилатансии существенно влияет на формирование напряженного состояния в массиве сыпучего материала при выгрузке его из цилиндрической емкости силосного типа.

Одним из основных результатов исследований на большой модели является изучение характера распределения по высоте и величины горизонтального давления в области кольцевого участка. Разработанная нами методика эксперимента позволила управлять положением кольцевого участка по высоте и его стабилизацией. В таком положении датчик давления подводили в центр зоны, а затем перемещали вверх. В результате проведенных опытов получены значения давлений по высоте в кольцевой зоне. Кривая изменения давлений показана на рис.6. Из ее анализа следует, что максимальное горизонтальное давление при выпуске p_0 превышает давление в состоянии покоя $p_{ст}$ в 2,2 раза. Эта величина получена при высоте рабочей мембраны месдозы 50 мм. Очевидно, что размер месдозы оказал влияние на по-

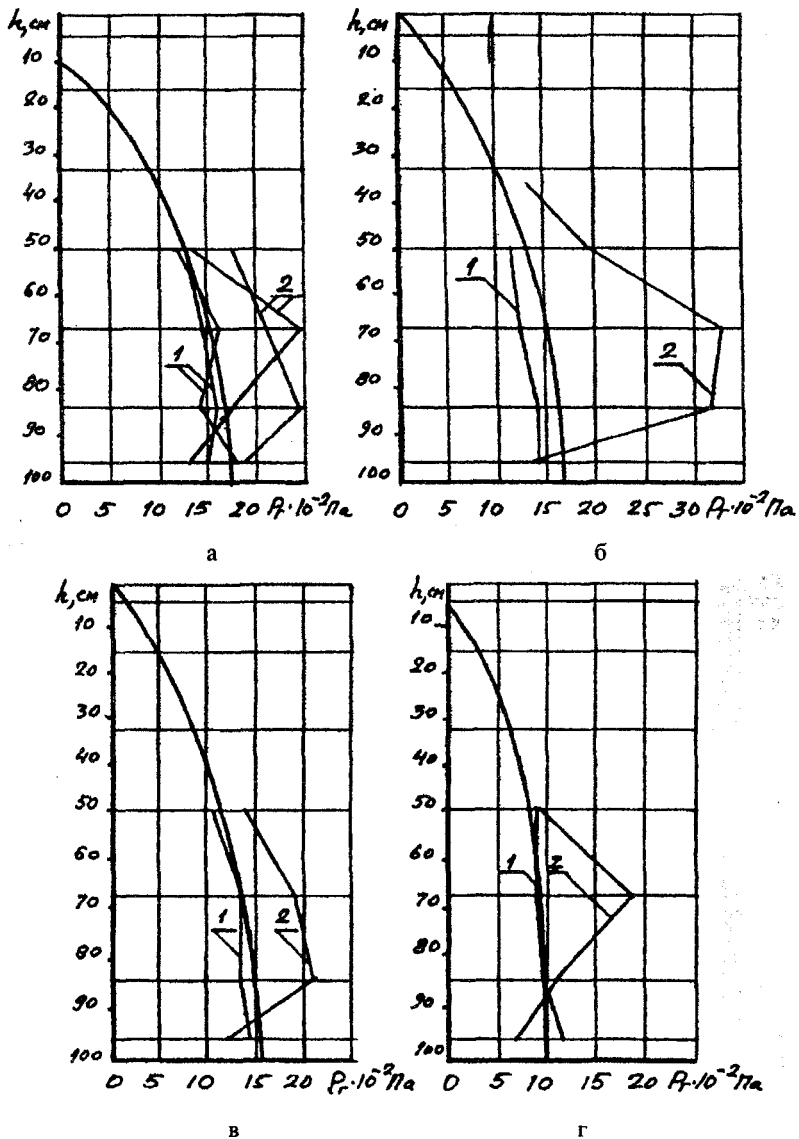


Рис.2 – Горизонтальное давление при центральной нагрузке:
 а – щебень; б – клинкер; в – уголь; г – керамзит;
 — — — — — расчетное по Янсену

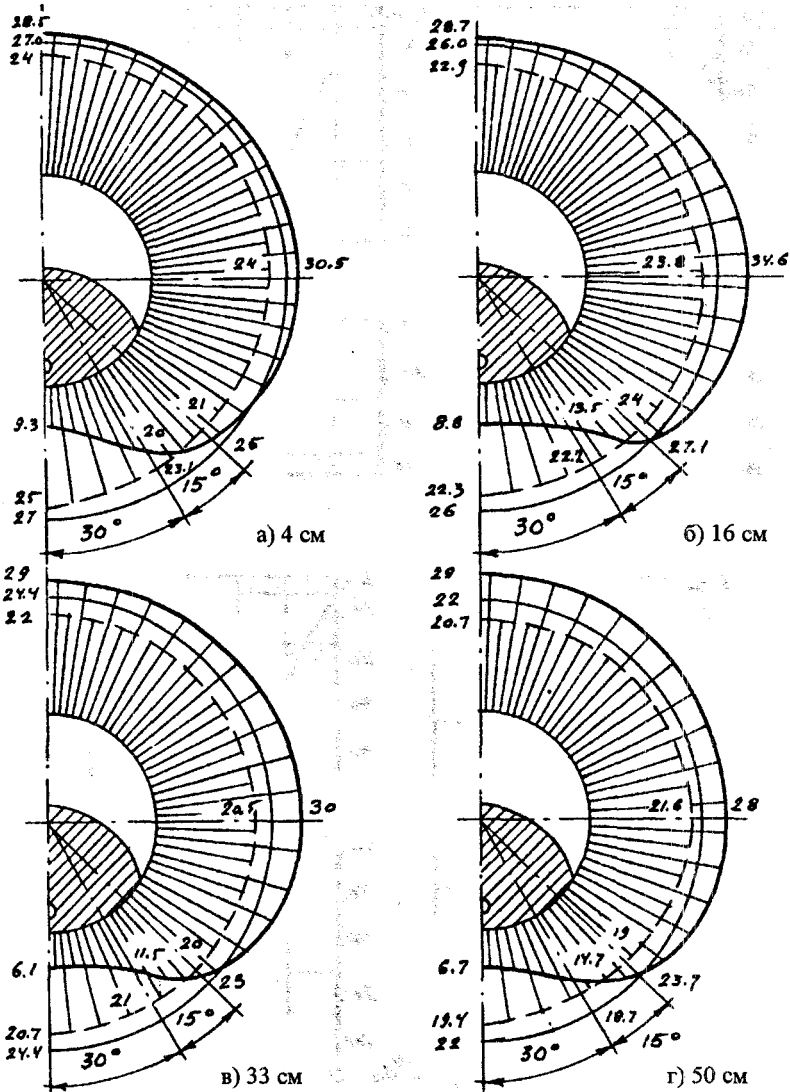


Рис.3 – Горизонтальное давление песка в Па·10⁻² в плане при выгрузке с относительным эксцентриситетом $e=0,8$ в сечениях:
 а, б, в, г – соответственно на уровнях датчиков от дна;
 - - - - при загрузке; — — — при выгрузке; — — — расчетное по Янсону

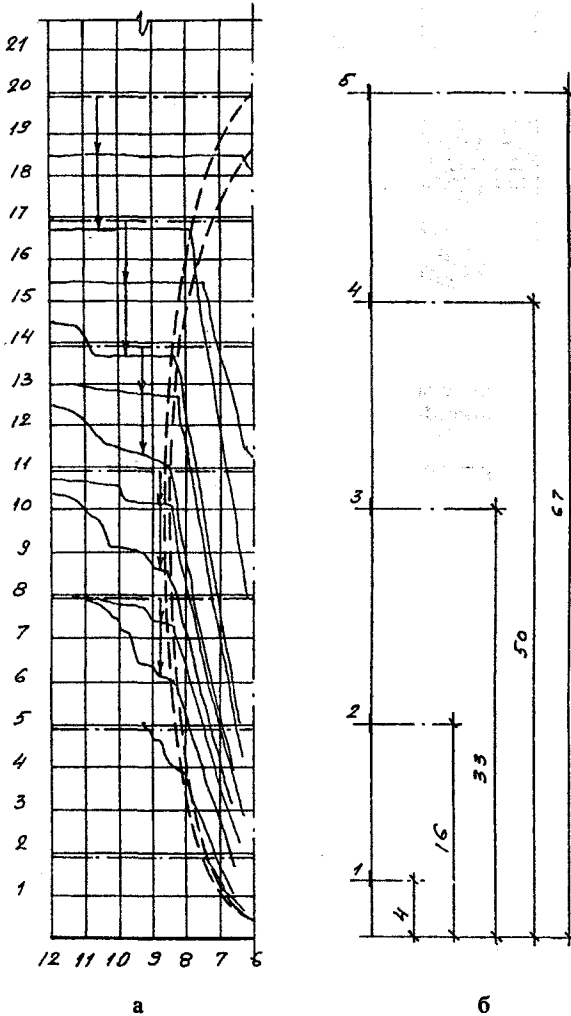


Рис.4 – Схема перемещения слоя сыпучего по поверхности стены при внецентренной выгрузке (а) и уровни установки датчиков давления (б)

грешность измерения, однако оценить ее невозможно. Кроме того, результаты исследований на модели в основном характеризуют качественную сторону явления. Количественные характеристики процесса нужно принимать по результатам натуральных экспериментов.

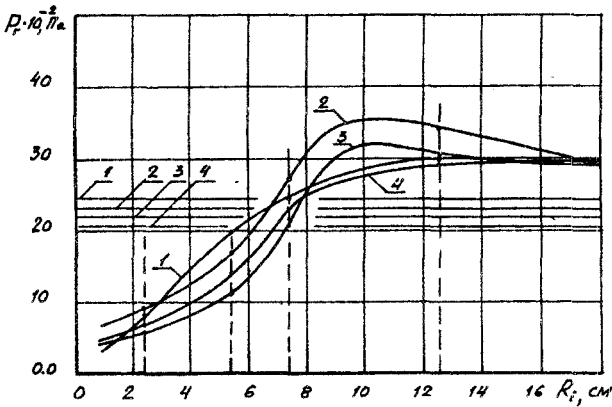


Рис.5 – Давление песка в зоне разуплотнения и за ее пределами на уровнях 1-4, прямые линии – в состоянии покоя

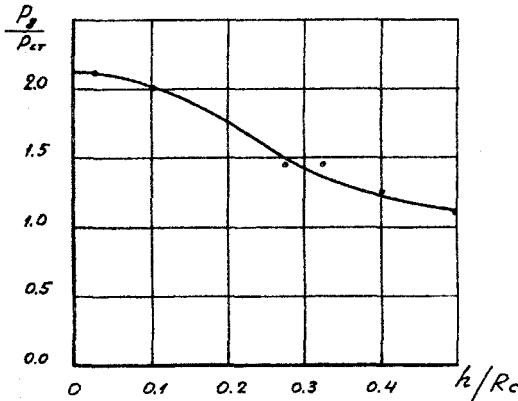


Рис.6 – Давление на стенку в кольцевой области dz

Установлено, что повышение давления наблюдается на локальном участке по высоте, а его размер равен радиусу силоса. Полученные экспериментальные данные можно использовать для расчетного обоснования увеличения давления сыпучего на стены силосов при выгрузке.

1. 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.

2. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров. – М.: Стройиздат, 1978. – 25 с.

Получено 15.04.2001