

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. И. В. СТАЛИНА

Инженер А. В. АНАТОЛЬЕВ

С40

А

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ НА СТЕНУ И ДНО ГЛУБОКОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОСУДА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель — кандидат технических наук доцент ПЛАТОНОВ П. Н.

ОДЕССА—1958

Экспериментальное исследование выполнено
в Одесском технологическом институте им. И. В. Сталина

ОНАХТ 14.03.11
Распределение давлен



199081

199081

Одесский Технологический
Институт
им. И. В. Сталина
БИБЛИОТЕКА

Перечет 19.07.

Диссертационная работа посвящена определению механизма передачи усилий в идеальной сыпучей среде и вопросу распределения давлений идеальной сыпучей среды на стену и дно глубокого цилиндрического сосуда¹. На основании положений, установленных в науке о трении, предлагается рабочая гипотеза, объясняющая механизм передачи усилий в идеальной сыпучей среде. В рабочей гипотезе явление предварительного смещения между трущимися частицами сыпучей среды, вызываемого возрастающими объемными силами и силами реакции, рассматривается, как явление, вследствие которого возникает сводообразование, соответствующее изменению кривизны линий давления. Экспериментальными исследованиями подтверждена предполагаемая гипотезой и положенная в основу теоретического исследования функция для коэффициента трения между частицами при передаче усилий внутри идеальной сыпучей среды и закономерность кривой линии давления.

Подтверждена зависимость суммы предварительных смещений частиц от нагрузки, действующей на контакты между ними, при разной плотности укладки.

Получена эмпирическая зависимость нагрузки столба сыпучей среды от суммы предварительных смещений частиц в процессе сводообразования. Найдена зависимость, позволяющая определить высоту столба сыпучей среды, в пределах которой происходит процесс сводообразования, а также положение, по высоте стены, места возможных максимальных давлений (до истечения и в процессе истечения).

Путем экспериментального исследования доказано предполагаемое гипотезой распределение нагрузки на стену и дно глубокого цилиндрического сосуда. Вводится понятие о коэффициентах распределения нагрузки и предлагается формула для

¹ Под глубоким сосудом мы имеем ввиду такой сосуд, у которого высота не менее чем в 6—7 раз больше наибольшего размера его поперечного сечения.

определения возможных максимальных нормальных давлений на стенки сосуда.

На основании результатов исследования, подтвердивших рабочую гипотезу, сделан практический вывод о рациональном конструктивном решении стен хранилища для сыпучих грузов типа силосной банки.

* * *

Сыпучие грузы занимают значительное место среди всех видов материалов, встречающихся в народном хозяйстве. Хранение сыпучих грузов и их перемещение вызывает необходимость создавать соответствующие конструкции хранилищ для сыпучих грузов и находить наиболее приемлемые решения вопросов, возникающих в процессе производства, где сыпучие среды составляют сырье и продукты его переработки.

Рациональное проектирование конструкций, несущих нагрузку сыпучей среды, возможно только при наличии известной величины усилий и закона их распределения. Размеры сечений сооружений силосного типа для хранения зерна, цемента, различных нерудных материалов, кокса и т. п. в настоящее время рассчитываются на усилия, вычисленные с помощью методов, не учитывающих особенности распределения усилий в сыпучей среде и зависимости величины этих усилий от жесткости сечений несущей конструкции. Применение этих методов приводит к результатам, которые не согласуются с данными наблюдений.

В действительности наблюдаемые давления сыпучей среды превосходят расчетные, что сказывается на прочности сооружения. Несоответствие наблюдаемых давлений сыпучей среды тем, которые дают современные расчетные методы, вызывает необходимость тщательных экспериментальных исследований с целью выяснения механизма передачи усилий в сыпучей среде и, на основании полученных результатов, пересмотра существующих методов расчета.

Касаясь данного вопроса, А. А. Гвоздев (1949 г.) приходит к выводу, что новый метод расчета должен быть методом предельных нагрузок.

XX съездом КПСС установлены основные направления развития промышленности на базе технического прогресса и высшей техники.

Во исполнение решений XX съезда, в отраслях народного хозяйства, связанных с хранением и переработкой сыпучих ма-

териалов, должен быть решен ряд проблем и среди них такие, которые требуют углубления наших знаний в области механики сыпучей среды.

Углубление этих знаний создает возможность:

— автоматизировать процессы производства, где сырье и продукты переработки представляют собой сыпучие среды;

— обосновать соответствующий метод определения давления сыпучей среды на стены и дно хранилищ типа силосной банки и

— позволяет судить о наиболее рациональном конструктивном оформлении стен при выполнении их в сборном железобетоне.

Диссертация состоит из четырех глав текста на 211 страницах с 67 рисунками, списка использованной литературы и приложения.

I.

Первая глава посвящена обзору литературы по исследованию в области распределения давлений сыпучей среды на стены и дно глубокого цилиндрического сосуда.

Ознакомление с литературой показало, что вопрос распределения давления внутри сыпучей среды, а также давления на стены и дно глубоких сосудов, давно занимает внимание исследователей. Этим вопросом занимались в России и за рубежом еще с прошлого века и им посвящено значительное количество работ (Робертс — 1882—1884 г. — Англия, Лигнер — 1887 г. — Франция, Фрид — 1890 г. — Россия, Делокроа — 1892 г. — Россия, Янсен — 1894—1895 г. — Германия, Прантэ — 1896 г. — Германия, Джемсон, Бовей — 1900—1903 г. — Канада, Плейснер — 1902—1905 г. — Германия, Луффт — 1902—1903 г. — Аргентина, Тольц — 1903 г. — США, Кетчум — 1902—1909 г. — США, Фельд — 1921—1923 г. — США, Дерр — 1926 г. — Италия, Фультон — 1931 г. — Шотландия, Токабей — 1932 г. — Япония, Генель — 1936 г. — Италия, Тахтамышев — 1938 г. — СССР, Вестлунд — 1939 г. — Швеция, Трифанов, Бернштейн — 1945 г. — СССР, Ким — 1952 г. — СССР, Куценко — 1953 г. — СССР, Дженик, Чесман — 1954 г. — Англия, Тахтамышев — 1954 г. — СССР и др.).

Несмотря на значительное число исследователей, в силу разобщенности методики исследования, низкого уровня техники эксперимента, незнания, а подчас игнорирования основных фи-

зико-механических свойств сыпучей среды, проведенные исследования не позволили создать стройной теории и разработать теоретически и экспериментально обоснованный метод расчета.

Основываясь на данных экспериментальных и теоретических исследований, Робертсон (1882—1884 г.), Фрид (1890 г.), Янсен (1894—1895 г.), Эри (1897 г.) предложили свои теории для определения расчетных давлений на стены и дно глубоких сосудов.

Из всех предложенных теорий практическое применение получила теория Янсена и способ аналитического определения давления, предложенный Эри.

Результаты многочисленных опытов целого ряда исследователей за последние пятьдесят лет не подтвердили правильности теории Янсена. А способ Эри, в силу большой погрешности, не получил широкого распространения.

Несмотря на это, метод Янсена с введением различных поправочных коэффициентов, как более простой, используется по настоящее время.

Введение поправочных коэффициентов лишило метод Янсена всякого теоретического смысла, и, по существу, расчетное уравнение Янсена стало уравнением эмпирического порядка.

Попытка построить теорию давления сыпучих сред, основываясь на аппарате математической теории пластичности (Соколовский В. В., Голушкевич С. С.), дали возможность решить этот вопрос в общем виде для условий статики. Однако применение этого метода для инженерного использования громоздко и затруднено. Обзор специальной литературы позволяет сделать нижеследующие заключения.

Исследования в области давлений сыпучей среды проводились при использовании наиболее современной технической базы и имели своей целью выяснить физическую сторону явлений, происходящих в сыпучей среде, и этим создать надежные предпосылки для построения теории. Однако в результате исследований физическая сторона явлений оказывалась в значительной мере невыясненной, и многие исследователи ограничивались практической стороной, рекомендуя те или другие способы для отдельных конкретных случаев.

Цель настоящей работы — попытаться раскрыть механизм передачи усилий в идеальной сыпучей среде, проверить теоретические предположения экспериментальными исследованиями, на основании полученных результатов исследования указать

пути создания метода по определению расчетных давлений сыпучей среды на стену глубокого сосуда и выбрать наиболее рациональную конструкцию стен.

II.

Во второй главе изложена рабочая гипотеза. Рабочая гипотеза построена на предположении наличия явления предварительного смещения между частицами сыпучей среды, которое имеет место вследствие возрастающих объемных сил и сил реакции.

Условия равновесия идеальной сыпучей среды, рассмотренные в переходе от состояния допредельного равновесия к предельному равновесию, позволяют предположить наличие линий давления, которые при переходе от допредельного к предельному равновесию изменяют свою кривизну. Такой процесс изменения кривизны линий давления, в пределах предварительного смещения частиц сыпучей среды, рассматривается как явление подобное сводообразованию.

Таким образом, в сыпучей среде переход неполных сил трения покоя к полным силам трения покоя можно рассматривать как явление, при котором сыпучая среда изменяет свою несущую способность, приобретает новые механические свойства.

На этом основании предполагается, что при загрузке идеального сыпучего в глубокий цилиндрический сосуд, вследствие возрастающих объемных сил и сил реакции со стороны стен, будут расти неполные силы трения покоя между частицами, а так же между частицами и стеной сосуда, т. е. будет происходить явление предварительного смещения и сопутствующее ему сводообразование. При этом на некоторой предельной высоте (h_n) от неподвижного дна, кривизна линий давления будет изменяться.

Начиная с высоты h_n и выше, непрерывному смещению слоев (вследствие деформации нижележащих слоев) будет сопутствовать сводообразование, и кривизна линий давлений по горизонтальным слоям должна быть неизменной.

Рассмотрены условия равновесия горизонтального слоя столба сыпучей среды. Учитывая однородность структуры, принята функция для коэффициента трения при передаче усилий внутри слоя

$$f = f_0 \frac{x}{a}$$

где f_0 — коэффициент трения между частицами сыпучей среды и стеной сосуда;

a — половина ширины сосуда;

x — текущая координата;

и определено, что ординаты линии давления изменяются по закону квадратной параболы.

На этом основании определена максимальная высота линии давления в конце процесса сводообразования

$$y_{\max} = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{nn}} \right),$$

где φ_{nn} — угол, определяющий направление полной силы трения покоя (угол обрушения).

Гипотеза о сводообразовании в сыпучей среде дала возможность высказать предположение о закономерности изменения нагрузки на стену сосуда по ее высоте.

Нагрузка на стену сосуда растет, начиная от твердого (неподвижного) дна и достигает максимального значения лишь на высоте h_n .

Вводя коэффициенты распределения вертикальной нагрузки по горизонтальному сечению для столба сыпучей среды высотой H — $\theta = \frac{Q_v}{Q}$ и $\eta = \frac{Q'_v}{Q_v}$ (где Q_v — вертикальная нагрузка на твердое (неподвижное) дно сосуда, Q'_v — вертикальная нагрузка на горизонтальное сечение столба сыпучей среды; Q — вес столба сыпучей среды высотой H), — получено выражение для определения интенсивности горизонтальной нагрузки по высоте стены сосуда:

$$p = \frac{\theta(1-\eta)}{L \operatorname{tg} \varphi} Q,$$

где L — периметр горизонтального сечения сосуда.

φ — угол между горизонталью и касательной к линии давления в точке ее пересечения со стеной сосуда. Величина φ изменяется в пределах

$$\frac{\pi}{2} > \varphi > \frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{nn}}.$$

Предполагая, что величины Q'_v и φ по высоте столба сыпучей среды в своих минимальных значениях практически постоянны

и соответственно равны $Q'_v = C$, $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{nn}}$, то величина максимальной интенсивности нормального давления может быть определена уравнением:

$$p = \frac{\theta Q - C}{L \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{nn}} \right)}$$

III.

Третья глава посвящена методике экспериментального исследования.

Методика экспериментального исследования предопределена рабочей гипотезой. Наличие линий давления и закон изменения их кривизны определен по полученным, необратимым перемещениям частиц сыпучей среды.

Если с началом перемещения изменения направления и величины сил, действующих в сыпучей среде, будет происходить в одной плоскости, то относительное перемещение частиц в этой плоскости можно рассматривать, как следствие этих изменений. Относительное перемещение частиц в одной плоскости достигалось путем перемещения параллельных стен сосуда прямоугольного сечения. Наличие при этом двух стеклянных стенок сосуда позволило по закрашенным горизонтальным слоям сыпучей среды проследить за вызванными перемещениями частиц столба сыпучей среды. На основании полученной функции для коэффициента трения между частицами сыпучей среды и найденному закону изменения кривизны линий давления, были построены ожидаемые картины необратимых смещений частиц столба сыпучей среды, — после раздвижки стен и вслед за раздвижкой при выпуске.

Изменяющиеся давления на стену сосуда определялись индуктивными датчиками, показания которых записывались на остиллограммы.

При раздвижке стен по полученным картинам необратимых смещений определялось влияние высоты столба сыпучей среды на величину h_n , а также влияние однородности структуры сыпучей среды на передачу усилий в ней.

Измерение величины предварительного смещения и соответ-

ственно нагрузки на дно и по горизонтальным сечениям столба сыпучей среды производилось на установке, которая представляла из себя подвешенный цилиндр диаметром 200 мм и высотой 1100 мм. Цилиндр собирался из отдельных звеньев, и высота цилиндра могла изменяться, а следовательно, могло изменяться и соотношение между высотой и диаметром. Верхняя часть цилиндра укреплялась на станине, а подвижная нижняя часть подвешивалась на весовом рычаге.

Измерения величины, перемещения подвижной нижней части цилиндра производились индикаторами с ценой делений 10 мк. Начало перемещения определялось одновременными показаниями индикаторов и датчика давления, установленного в стене сосуда непосредственно над подвижной частью цилиндра или дном.

Нагрузка на горизонтальные сечения столба сыпучей среды определялась после загрузки цилиндра и после длительного выпуска.

В процессе перемещения дна сосуда, а также в начале истечения частиц из отверстия дна, снимались остиллограммы давлений на стену цилиндра при разной высоте расположения датчика. Измерение давлений производилось при разной плотности укладки частиц.

Данные этих опытов сопоставлялись с полученными картинами смещений после раздвижки стен.

В качестве сыпучего материала применялся привольский песок — ГОСТ 6139-52 и крупа из чумизы.

Обработка результатов исследования производилась по методу наименьших квадратов.

Точность производимых измерений, — точность эксперимента, — определялась на основании анализа поля разброса данных эксперимента, характеристикой которого является вероятное отклонение наблюдаемых величин. Порядок проведения исследования, производство измерений и сопоставление результатов опытов излагаются в диссертации.

IV.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования.

Экспериментальные исследования подтвердили положения, выдвинутые гипотезой.

Картины смещений в столбе сыпучей среды полученные как при раздвижке стен, так и при последующем выпуске частиц среды соответствовали предполагаемым.

Опыты по определению перемещений в столбе сыпучей среды, вызываемых раздвижкой стен сосуда, хорошо согласуются с наблюдаемыми изменениями давлений, записанными на остиллограммы.

Фотографии смещения в сыпучей среде и остиллограммы давлений даны в диссертации.

В результате экспериментального исследования установлено, что полученные после раздвижки стен кривые из закрашенных частиц соответствуют закону квадратной пораболы. При определении вертикальных нагрузок на дно сосуда и по горизонтальным сечениям столба сыпучей среды были получены результаты, которые хорошо согласуются с картинами смещений в столбе сыпучей среды, полученными после раздвижки стен.

Опыты по определению вертикальных нагрузок дали следующие результаты:

— Нагрузка на неподвижное — твердое дно цилиндра возрастает интенсивно до тех пор, пока высота столба сыпучей среды не достигает высоты $h_n = d \operatorname{tg} \varphi_{\text{нп}}$, где d — диаметр цилиндра.

— Вертикальные нагрузки по горизонтальным сечениям уменьшаются пропорционально расстоянию от твердого дна и на высоте h_n принимают минимальное и неизменное значение. Такое изменение вертикальных нагрузок имеет место и после длительного выпуска частиц из отверстия, расположенного в центре дна сосуда.

— При перемещении дна или нижней части цилиндра, высота которой $h < h_n$, нагрузка на дно или на сечение столба сыпучей среды уменьшается пропорционально смещению дна и доходит до некоторой предельной величины, которая не зависит от высоты столба сыпучей среды над этим сечением или твердым дном (при условии, что высота столба не меньше, чем высота линии давления, т. е. при условии, что

$$h \geq \frac{d}{4} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{нп}} \right).$$

Величина смещения дна или подвижной части цилиндра δ выражающая собой некоторую сумму предваритель-

ных смещений частиц, возрастает пропорционально нагрузке действующей в контактах между частицами, обратно пропорционально плотности укладки частиц.

— Зависимость нагрузки на дно цилиндра (Q_b) от величины его смещения (δ) при определенной плотности сыпучей среды, достаточно постоянна и может быть выражена уравнением:

$$Q_b = a\delta^2 - b\delta + c$$

— При перемещении подвижной части цилиндра или его твердого дна нормальное давление на стену, в пределах высоты h_n возрастает пропорционально падению вертикальной нагрузки.

— Если производить выпуск частиц сыпучей среды через отверстие в центре дна сосуда, нормальное давление на его стены, в пределах высоты от $\frac{h_n}{2}$ до h_{nn} , возрастает и изменяется

по тому же закону, что и при перемещении твердого дна.

— Кривая вертикальной нагрузки на стену сосуда по его высоте (T_n) изменяется аналогично кривой нормального давления, — вертикальная нагрузка на стены растет, начиная от твердого дна, и принимает максимальное значение лишь на высоте h_n .

Выводы и предложения

Результаты экспериментального исследования подтверждают основные положения, выдвинутые рабочей гипотезой, и дают основание сделать следующие выводы и предложения.

Закономерности, установленные в науке о трении, объясняют физическую сторону явлений, наблюдаемых в идеальной сыпучей среде, раскрывают модель механизма передачи усилий в этой среде, а отдельные элементарные процессы, установленные в науке о трении на примере идеальной сыпучей среды, находят себе подтверждение. В частности, изучение процессов, происходящих в зоне предварительного смещения столба сыпучей среды, подтверждает зависимость величины предварительного смещения от нагрузки действующей на контакт трущейся пары, а именно — величина предварительного смещения увеличивается пропорционально усилиям, действующим на контакты частиц (по мере уменьшения плотности сыпучей среды). Следовательно, в процессе предварительного смещения

происходит преодоление связей, обусловленных взаимным внедрением поверхностей трения, и имеет место механическая деформация, — частично упругая, частично пластическая.

— В идеальной сыпучей среде, при возрастании объемных и реактивных сил, предварительное смещение частиц вызывает явление, подобное сводообразованию, — явление, когда кривизна линий давления непрерывно уменьшается и доходит до некоторого определенного значения, соответствующего данной плотности сыпучей среды. Так, в процессе загрузки и формирования сыпучей среды в глубоком цилиндрическом сосуде вследствие явления предварительного смещения между частицами и сопутствующего ему сводообразования, начиная от твердого (неподвижного) дна, изменяются условия равновесия по горизонтальным слоям — вертикальные нагрузки уменьшаются, а горизонтальные соответственно возрастают.

Высота, в пределах которой просходит процесс сводообразования (h_n), определяется уравнением:

$h_n \approx a \operatorname{tg} \varphi_{nn}$, где a — наибольший размер поперечного сечения сосуда.

— Явления, — предварительное смещение и сопутствующее ему сводообразование, — имеют место при истечении. При истечении из отверстия в центре дна цилиндрического сосуда (в пределах высоты от $\frac{h_n}{2}$ до h_n), в силу упруго-пластических

деформаций в контактах частиц, происходит непрерывный процесс сводообразования.

При этом периодически, после завершения процесса сводообразования происходит необратимое перемещение столба сыпучей среды относительно стен сосуда.

— В столбе идеальной сыпучей среды, равновесие которого осуществляется под действием объемных и реактивных сил со стороны стен, линии передачи давления (горизонтального распора) изменяются по закону квадратной параболы.

Высота этих парабол, после предварительного смещения, определяется уравнением:

$$b = \frac{a}{4} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{nn} \right)$$

— Теория Янсена, применяемая в настоящее время для определения нагрузок от столба сыпучей среды, лишена физиче-

ского смысла вследствие неправильного представления о механизме передачи усилий в идеальной сыпучей среде.

Наблюдаемые величины давлений столба сыпучей среды на стену и дно ни по своим значениям, ни по характеру распределения не соответствуют вычисленным по формуле Янсена. Горизонтальные давления во много превосходят давления, полученные по формуле Янсена, а вертикальные нагрузки по сечениям столба сыпучей среды значительно меньше тех, которые дает формула Янсена.

Наблюдаемые исследователями максимальные давления не могут соответствовать действительным, имеющим место в начале смещения частиц сыпучей среды.

Это несоответствие объясняется несовершенством методов измерения давлений, применяемых при исследовании. Давление, регистрируемое измерительными приборами, возрастает пропорционально перемещению воспринимающей давление поверхности, а в действительности оно уменьшается в силу явления предварительного смещения и сопутствующего сводообразования. Поэтому величины фактических максимальных давлений превосходят данные Янсена более, чем это отмечают исследователи. Опыты показали, что в начале смещения сыпучей среды величина горизонтальных давлений на стену глубокого цилиндрического сосуда превышает давления, полученные по формуле Янсена примерно в 6—7 раз.

— По мере того, как плотность укладки частиц в столбе сыпучей среды растет, увеличивается несоответствие между наблюдаемыми исследователями величинами давлений и давлениями, которые имеют место в действительности (тем более при сравнении с данными формулы Янсена).

Такое расхождение величины давления объясняется тем, что над воспринимающей давление поверхностью измерительного прибора, сводообразование происходит при относительно небольшой величине суммы предварительных смещений частиц сыпучей среды. Вместе с тем, при плотной укладке частиц в столбе сыпучей среды повышается высота, в пределах которой происходит сводообразование (h_n).

— Наиболее нагруженные участки силосных стен проектируются из расчета возможной (ожидаемой) предельной нагрузки, превышающей данные формулы Янсена в 4 раза. Если в период эксплуатации стена силоса, запроектированная лишь с 4-х кратным запасом против данных формулы Янсена,

оказывается прочной, то это говорит о том, что ее деформация на отдельных участках лишенных опор достаточна, чтобы вызвать соответствующее перераспределение нагрузок и сохранить этим цельность конструкции. Если перераспределение давлений будет происходить в результате только упругих деформаций, то и при непрерывном истечении и движении всем столбом каждый переход через значение максимальных давлений (в пределах высоты от $\frac{h_n}{2}$ до h_n) будет вызывать

упругие деформации и соответствующее им перераспределение давлений. Незначительное превышение деформации стен за пределы упругости, при периодическом переходе через значения максимальных давлений, должно привести к суммированию, — к последовательному наложению остаточных деформаций и при соответствующем длительном истечении (с непрерывной догрузкой) к разрушению стен.

— Применяемый на практике метод определения расчетного давления на стены и дно глубокого сосуда типа силосной банки исходит из двух ошибочных положений: формулы Янсена, в основе которой лежит неправильное представление о механизме передачи усилий в сыпучей среде, и эксплуатационных давлений, определенных приборами не по началу перемещений и без учета деформации стен.

Кроме того, этот метод не охватывает разнообразных случаев практики, когда приходится иметь дело с различными размерами сосудов и различными сыпучими материалами.

Представление о процессе сводообразования, как о следствии возрастающих объемных сил и сил реакции в пределах предварительного смещения, — представление о механизме передачи усилий в идеальной сыпучей среде, объясняет ожидаемый характер распределения давлений по высоте стены глубокого сосуда при различных геометрических размерах и даст возможность предложить метод по определению интенсивности давления на стену глубокого цилиндрического сосуда.

— Интенсивность нормального давления идеальной сыпучей среды на стену глубокого цилиндрического сосуда p (на какой либо глубине h), при данной шероховатости стен и его геометрических размерах, может быть определена при известных величинах Q_v , Q_v^1 и φ из уравнения

$$p = \frac{\theta(1-\eta)}{Ltg\varphi} Q$$

При расчете конструкции стен глубокого цилиндрического сосуда, испытывающих нагрузку сыпучей среды, следует исходить от предельного значения интенсивности нормального давления на стену после сводообразования. Величина предельной интенсивности на стену, после сводообразования на высоте h , будет при минимальном значении коэффициента η т. е. при минимальных значениях Q^I_v и угла φ .

Величины Q^I_v и φ для всех сечений в своих минимальных значениях, при данной плотности, практически постоянны и равны $Q^I_v = C$, $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_{mn}$.

В силу этого, величина предельной интенсивности нормального давления может быть определена уравнением:

$$p_{пред.} = \frac{\theta Q - C}{\text{Ltg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{mn} \right)}$$

— На основании представления о механизме передачи усилий в сыпучей среде, с достаточной для практики точностью, может быть выделен участок стены глубокого сосуда в пределах высоты от $\frac{h_n}{2}$ до $h_n = \text{atg} \varphi_{mn}$ испытывающей резко изменяющиеся нагрузки, соответствующие, периодически, неполным и полным силам трения, при которых нагрузки принимают предельное значение.

— Величина горизонтального давления на стену сосуда пропорциональна коэффициенту распределения вертикальной нагрузки θ , значение которого уменьшается по мере того, как возрастает шероховатость стен. Поэтому, для обеспечения минимального горизонтального давления, шероховатость стен должна быть не меньше, чем шероховатость воображаемой поверхности обрушения внутри сыпучей среды при данной ее плотности.

Исходя из этих соображений, конструкция стен сосуда тогда рациональна, когда стены на поверхности имеют периодические впадины. При таком конструктивном решении периодически изменяются жесткость стены — образуются участки обладающие сравнительно малой и большой жесткостью. Участки стены с меньшей жесткостью должны быть выполнены так, чтобы их упругие деформации оказались достаточными для того,

чтобы в сыпучей среде между частицами были проделаны соответствующие предварительные смещения и в какой-то мере произошло сводообразование. При таком конструктивном оформлении стен, с приданием им заданной жесткости по участкам, они являются рациональными не только с точки зрения снижения величины горизонтальной нагрузки, но и с точки зрения ее правильного распределения. Вместе с тем, проектируя стены из ребристых сборных железобетонных плит, представляется возможным обеспечить их соответствующую прочность при небольшой затрате материала. Тем более, если бетон ребер плит получит, в промышленных условиях, предварительное напряжение.

— Таким образом, представление о механизме передачи усилий в идеальной сыпучей среде не только дает возможность предвидеть характер распределения давлений по высоте стены и метод по определению интенсивности горизонтального давления на стены, но и дает возможность рекомендовать наиболее рациональное конструктивное оформление стен глубокого сосуда.

* * *

Материалы диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. Механизм передачи усилий в идеальной сыпучей среде. Труды Одесского технологического института имени И. В. Сталина, том 9, 1958 г.

2. К вопросу о распределении давления сыпучей среды на дно и стену глубокого цилиндрического сосуда. Труды Одесского технологического института имени И. В. Сталина, том II, 1958 г.

Одесский Технологический
Институт
им. И. В. Сталина
БИБЛИОТЕКА