

УДК 69.001.5

О.А. Калмыков, Е.А. Тен

*Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО НА КРИВОЛИНЕЙНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

Проведение экспериментальных исследований в технических дисциплинах является наиболее достоверным способом подтверждения полученных теоретических результатов. Авторами разработана экспериментальная методика определения характера распределения бокового давления несвязного сыпучего на криволинейную поверхность. В статье описывается построенная на базе разработанной методики экспериментальная установка, а также приведены результаты исследований.

Ключевые слова: сыпучая среда, криволинейная поверхность, датчик, эпюра бокового давления.

Постановка проблемы

В определенных случаях инженерной практики присутствуют конструктивные элементы, воспринимающие боковое давление от сыпучих материалов. В горнодобывающей промышленности – это конструкции шахт, укрепительные сооружения; в химической, пищевой промышленности, а также промышленности строительных материалов – бункера, силосы, закрома; в землеустройстве прибрежных и горных районов – противооползневые и берегоукрепительные сооружения; в среде городской застройки – крепления стен котлованов, стены подвалов, подземные сооружения и др. В нормативных и справочных рекомендациях, определение бокового давления сыпучего основывается, как правило, на теории Кулона [7]. На ряду с этим, в работах [9,10] сыпучая среда и боковая поверхность, воспринимают давление от этой среды, рассматриваются как единый биагрегат, в котором конфигурация поверхности задает функцию бокового давления сыпучего, действующего на нее. В работе [8] получено точное решение в виде уравнения 4-ой степени, взаимосвязывающее заведомо назначаемую функцию эпюры бокового давления и конфигурацию поверхности, обеспечивающей это давление. В связи с чем, определенный интерес представляет определение экспериментальным путем фактического бокового давления сыпучего на криволинейную поверхность.

Анализ последних исследований и публикаций

Для сыпучих тел проведение экспериментальных исследований особенно важно и является определяющим, что обусловлено сложностью процессов, происходящих при деформировании дискретных сред по сравнению с твердыми и жидкими. Экспериментальные исследования являются основным критерием применимости различных допущений,

используемых в теоретических исследованиях. Подобные исследования рассматривались и анализировались в работах З.В. Цагарели., А.И. Прилижаев, В.И. Курдюмов, И.В. Яропольский, К. Терцаги, Г.А. Дуброва [1-6] и др. Во всех известных нам экспериментах, исследователи имели дело с плоской поверхностью, воспринимающей боковое давление от сыпучей среды. В отдельных случаях эта поверхность располагалась под углом к вертикальной оси, однако, в литературе не найдено описания экспериментов, где поверхность, воспринимающая боковое давление от сыпучей среды, имела бы переменный по высоте угол наклона к вертикали. Данное обстоятельство предопределило необходимость разработки и обоснования специализированной методики определения бокового давления от сыпучего на криволинейную поверхность. В связи с чем, целью настоящего эксперимента является определение фактического распределения бокового давления сыпучего на криволинейную поверхность. Объект исследования – оболочка, криволинейная поверхность которой построена путем назначения эпюры бокового давления сыпучего.

Изложение основного материала

Если экспериментальное моделирование распределения бокового давления от сыпучего на плоскую поверхность в лабораторных условиях является сложной процедурой, то постановка эксперимента по определению бокового давления на криволинейную поверхность содержит в себе значительные трудности. В первую очередь, это касается эксплуатируемой системы измерения. Сложность проблемы здесь вызвана, в большей степени, отсутствием специализированной приборной базы по определению давления от сыпучей среды. Приспособление для требуемой процедуры датчиков по определению давления в жидкостях или газах, механических или электрических динамометров, наталкивается на зна-

чительные сложности, вызванные спецификой работы указанных приборов, а также малой величиной бокового давления от сыпучего при его моделировании в лабораторных условиях. В известных экспериментах [1-6] боковое давление сыпучего измерялось, как правило, с использованием специально изготовленных датчиков пластинчатого или мембранного типа, с наклеенными на них тензорезисторами (рис. 1, а, б). Вследствие восприятия нагрузки от сыпучего датчик деформируется. Деформации тензорезисторов регистрируются при помощи специализированной аппаратуры. Переход к фактическому давлению от сыпучего осуществляется, в этом случае, по графикам, полученным в результате торировочных испытаний датчиков.

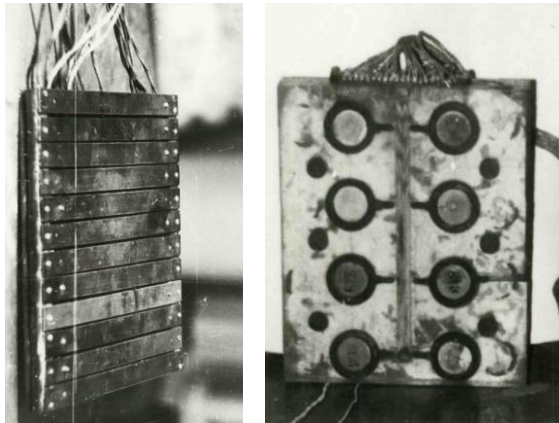


Рис. 1. Датчики измерения давления от сыпучего а – пластинчатые; б – мембранные.

Описанный способ, фактически, является классическим при замере давления от сыпучего на боковую поверхность. Его развитие связано, в основном, с усовершенствованием методов замера прогиба или деформации рабочей поверхности (мембраны или пластины).

Однако, применение классического способа замера бокового давления сыпучего наталкивается на значительную сложность при исследовании криволинейной поверхности. Указанное обстоятельство связано с тем, что кривизна исследуемой поверхности определяет переменный для каждого датчика угол наклона к вертикальной оси. При замерах давления сыпучего на боковую поверхность речь идет об активной составляющей этого давления σ_a , имеющей горизонтальное направление. Таким образом, при изготовлении криволинейной поверхности из какого-либо жесткого материала с последующим монтажом в различных ее местах набора мембранных датчиков, либо моделировании криволинейной поверхности набором пластинчатых датчиков, каждый из которых будет воспринимать нагрузку от сыпучего с различным углом ее приложения (рис. 2). В таком случае, помимо необходимости учета углов наклона каждого из датчиков, давление от сыпучего, действующее на отдельный

датчик, необходимо раскладывать на его горизонтальную и вертикальную составляющую по отношению к поверхности датчика. Данное обстоятельство приводит к сложной схеме деформирования датчиков, учет которой невозможен без значительных погрешностей.

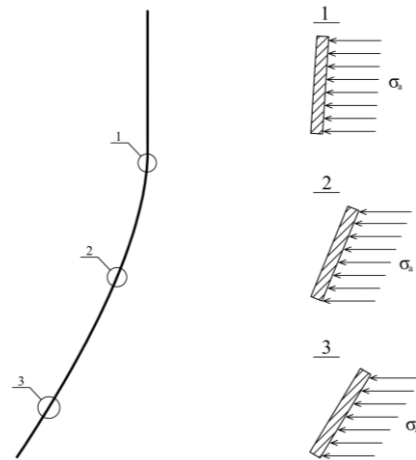


Рис. 2. Криволинейная поверхность, образованная набором пластинчатых датчиков.

Учитывая описанные сложности, в настоящей работе разработан способ экспериментального определения бокового давления сыпучего на поверхность сложной конфигурации путем аппроксимации криволинейной поверхности ступенчатой системой, состоящей из отдельных датчиков пластинчатой формы (далее - датчиков). При этом, направление активного давления сыпучего σ_a перпендикулярно поверхности каждого из датчиков (другими словами – все датчики расположены вертикально). Определение местоположения датчиков выполняется графическим способом с использованием систем автоматизированного проектирования (AutoCAD) [11]. Построения выполняются в вертикальной плоскости, перпендикулярной исследуемой криволинейной поверхности.

В результате графического построения определяются координаты положения каждого из датчиков ($x_i; y_i$), необходимые для построения искомой поверхности (рис. 3).

Руководствуясь разработанной методикой определения бокового давления от сыпучего на криволинейную поверхность, запроектирована и построена модельная установка. Вертикальный размер установки назначался из соображения построения криволинейной поверхности не менее чем из 25 датчиков. Продольный размер продиктован углом естественного откоса испытуемого сыпучего и вертикальной проекцией криволинейной поверхности. Поперечный размер назначался из удобства эксплуатации установки, а также из расчета применения датчиков, выполненных из оргстекла.

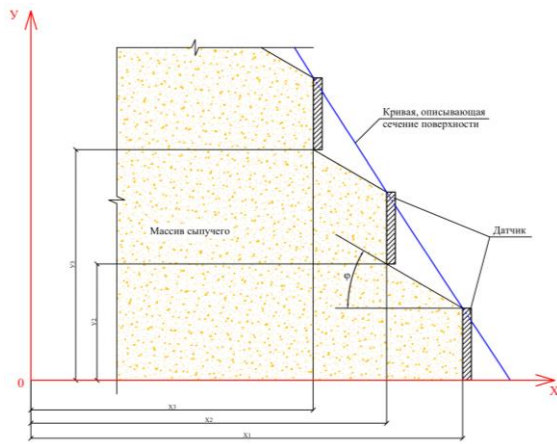


Рис. 3. Графический способ определения местоположения датчиков.

Таким образом, внешние размеры установки приняты 1150×1270×270мм. Каркас установки выполнен из равнополочного уголка 50×4 мм. Для повышения жесткости установки ее боковые стенки усилены ребрами из уголка 50×4 мм. Устройство стенок модельной установки осуществлялось из оргстекла толщиной 10мм и пятислойной фанеры толщиной 10мм, поверхность которой зашлифовывалась и вскрывалась пятью слоями лака (рис. 4).



Рис. 4 Вид модельной установки.

Вид эпюры бокового давления, определяющей конфигурацию воспринимающей это давление поверхности, представлен на (рис. 5). Высота ровного участка поверхности z_0 , в пределах которого боковое давление пропорционально увеличивается, в данном испытании принята 300мм. На участке от 300мм до нижней отметки поверхности 920мм величина давления, для наглядности и удобства анализа результатов, назначена постоянной и, с учетом характеристик принятого сыпучего, равной 159,47кг/м².

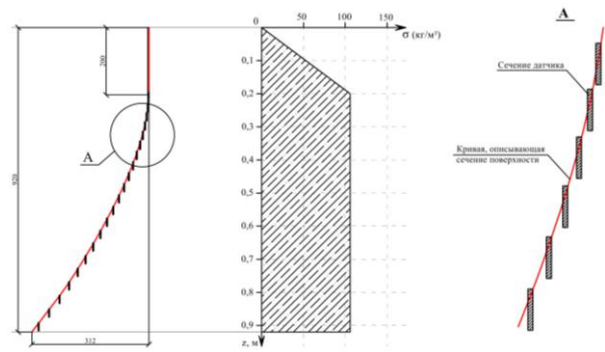


Рис. 5. Вид эпюры бокового давления и конфигурация поверхности, обеспечивающей это давление.

Лицевая грань модельной установки, моделирующая криволинейную поверхность, формировалась путем расположения в разработанной последовательности 29 датчиков, изготовленных из оргстекла марки ГОСП, выполненного по ГОСТ 17622-72. Размер каждого датчика принят 240×25×4мм, вес датчика составил 0,0286кг. Изготовление датчиков осуществлялось посредством лазерной резки, что обеспечило гарантированную точность размеров 0,1мм. Фиксация датчиков на боковых стенках установки осуществлялось при помощи двух пар угольковых креплений размером 25×15мм. (рис. 6).



Рис.6 Вид расположения датчиков.

В качестве материала, воздействующего на поверхность и определившего ее конфигурацию, принят сухой просеянный песок средней крупности частиц с удельным весом $\gamma = 1,73\text{кН/м}^3$, углом внутреннего трения $\phi = 32^\circ$. Нагружение осуществлялось постепенно, путем засыпания в модельную установку песка с противоположной от испытуемой поверхности стороны (рис. 7).

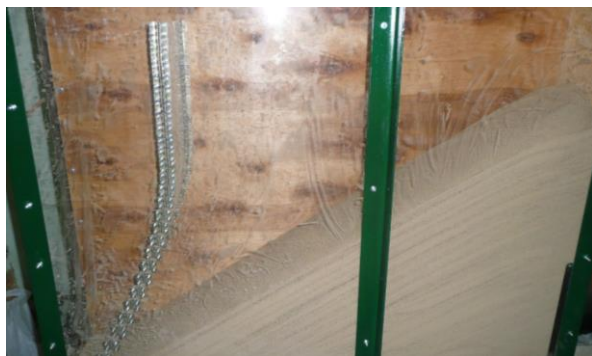


Рис. 7. Процесс нагружения модельной установки.

Замеры деформаций датчиков осуществлялись при помощи тензорезисторов с базой 20 мм и сопротивлением 200 Ом. В качестве регистрирующего устройства принята измерительная система СИИТ-3, преобразующая сигналы тензорезисторов в цифровой вид (рис. 8). Функциональная схема измерительного комплекса представлена на (рис. 9). Сигналы тензорезисторов (ТР-1...Тр-29) группируются по десять (в последнем случае девять) штук на разъемах (Ш-1...Ш-3), куда также последовательно поступает сигнал от компенсационного тензорезистора (ТК). Через Ш-1...Ш-3 сигналы тензорезисторов подаются на блок дистанционного релейного переключения (БДРП), где они коммутируются и подаются на блок системы СИИТ-3. Метод выбора каналов – адресный, что позволяет опрашивать тензорезисторы в требуемой последовательности.



Рис. 8. Блок обработки информации.

Проведение эксперимента производилось в следующей последовательности:

- проверялась работоспособность каждого датчика;
- снимались нулевые показания;
- производилось загрузке установки (рис. 10) путем заполнения ее песком;
- снимались показания приборов без выдерживания времени;
- снимались повторные показания спустя полтора часа.

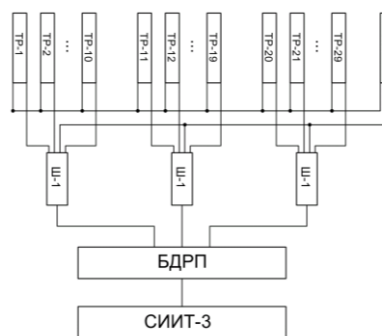


Рис. 9. Функциональная схема измерительного комплекса.



Рис. 10. Вид модельной установки (стенки из оргстекла и фанеры) в ходе испытаний.

Результаты испытания иллюстрируются графиками (рис. 11, а,б). Максимальное расхождение значительно составило 11,86%. Здесь, при подсчете погрешности, во внимание принимался участок эпюры с постоянным значением бокового давления ($z=0,3-0,92m$).

Выводы

Полученный результат может служить подтверждением корректности разработанной экспериментальной методики, а также является подтверждением достоверности предложенной в работе [8] теории.

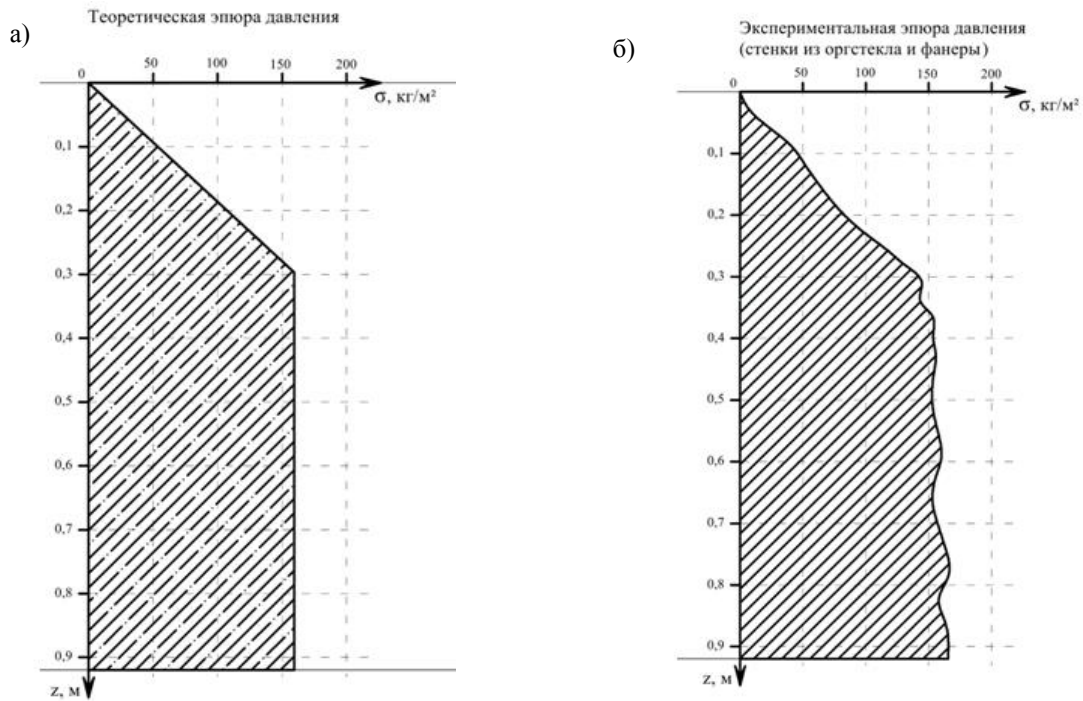


Рис.11. Результаты проведения эксперимента
а - теоретическая эпюра давления; б – экспериментальная эпюра давления.

Литература

1. Цагарели З.В. Экспериментальное исследование давления сыпучей среды на подпорные стены с вертикальной задней гранью и горизонтальной поверхностью засыпки. - Основания, фундаменты и механика грунтов, 1965, № 4. - с.1-3.
2. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. -М. Стройиздат. : 1977. -292 с.
3. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г.Михлин. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
4. Яропольский И.В. Лабораторные исследования давления песка на стенку. -В кн.: Труды ЛИИВТ. Л. ОГИЗ. Ленгосстранициздат. 1933. вып. 2. – с. 110-157.
5. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. - М. Гостройиздат. 1936. - 390 с.
6. Дуброва Г.А. Взаимодействие грунта и сооружений. - М.: Речной транспорт. 1963. -219 с.
7. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. Изд.Высшая школа, М.: 1964г. - 196 с.
8. Калмыков О.А. Подпорная стена рационального очертания / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» - Вип.78. – Київ. ДП НДІБК. 2013, с.232-239.

9. Шмуклер В. С. Метод прямого проектирования подпорных стен / В.С.Шмуклер, О.А.Калмыков - Вісник НУ «Львівська політехніка» Теорія і практика будівництва, Вип. №742 – Вид. Львівської політехніки, 2012. с.97-105.
10. Rational design of retaining walls / BabaevV.N. ShmuklerV.S. FeirushahS.H. KalmikovO.A. ZinchenkoV.M. BUIITEMS “Journal of applied and emerging sciences” – Vol. 3, Issue 1, p.94-121, July 2012, Pakistan
11. Autodesk. Autocad 2012. Руководство пользователя. Autodesk, 2011. – 2572с.

Рецензент: д.т.н., профессор В.С. Шмуклер, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

Автор: КАЛМЫКОВ Олег Александрович
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, ассистент

Автор: ТЕН Евгения Андреевна
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, студентка

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТИСКУ СИПЧОГО НА КРИВОЛІНІЙНУ ПОВЕРХНЮ

О.О. Калмыков, Е.А. Тен

Проведення експериментальних досліджень в технічних дисциплінах є найбільш достовірним способом підтвердження отриманих теоретичних результатів. Авторами розроблена експериментальна методика визначення характеру розподілу бокового тиску незв'язного сипучого на криволінійну поверхню. У статті описується побудована на базі розробленої методики експериментальна установка, а також наведені результати досліджень.

Ключові слова: сипуча середина, криволінійна поверхня, датчик, епюр бокового тиску.

DEFINITION OF EXPERIMENTAL PRESSURE ON CURVED SURFACE

O. Kalmikov, E. Ten

Pilot studies in the technical disciplines is the most reliable way to confirm the theoretical results. The authors have developed an experimental method of determining the nature of the distribution of lateral pressure on cohesionless bulk curved surface. This article describes how to build on the basis of the developed technique experimental setup and the results of research.

Keywords: granular medium, curved surface, the sensor, lateral pressure diagram.