Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Теоретическая механика»

Работа допущена к защите
Зав. кафедрой
_____ **А.М.Кривцов**
"__"_____20__г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ СЫПУЧИХ СРЕД

По направлению 01.03.03 "Механика и математическое моделирование"
По образовательной программе
Механика и математическое моделирование сред с микроструктурой

Выполнил А.Т. Иващенко
студент гр.43604/1
<подпись>

Руководитель М.Б. Бабенков
доцент, к.ф.-м.н.
<подпись>

Санкт-Петербург
2018

РЕФЕРАТ

На 38с., 40 рисунков

СЫПУЧИЕ СРЕДЫ, ГРАНУЛИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, УПРУГИЕ МОДУЛИ, СДВИГОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, SOLIDWORKS, ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Данная работа посвящена определению упругих модулей сыпучих сред. Поведение гранулированных материалов зависит от многих параметров, таких как размер частиц, трение, влажность. Для определения упругих модулей сыпучих сред была создана лабораторная установка. Детали установки разработаны в SolidWorks и распечатаны на 3Д принтере из ABS пластика. После сборки установки был исследован ряд гранулированных материалов. Построены графики зависимости сдвигового напряжения от деформации, результаты проанализированы.

THE ABSTRACT

38 pages, 40 pictures

GRANULAR MEDIA, SHEAR STIFFNESS, SHEAR STRESS, SOLIDWORKS, LABORATORY STAND

The research is dedicated to determination shear stiffness for granular media (GM) which is an actively researched field of mechanics. The mechanics of a GM depend on many parameters such as particle size, substance, degree of humidity, so the determination of elastic modules for each media can be a problem. For its solution, a laboratory stand was created, which allows quickly determine the elastic modules for different GM, such as sand or rice. Parts were designed in CAD Solidworks and printed on the 3D printer by ABS plastic. Using the laboratory stand, several GM elastic modules were determined. Dependence of the shear stress from deformation was calculated, the results are analyzed.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……... 5

Глава 1. Создание лабораторной установки для измерения сдвиговой жесткости гранулированных сред……...…….. 6

1.1 Постановка задачи ……...… 6

1.2 Создание 3D модели …….……... 8

1.3 Сборка установки …….….…….….. 14

1.4 Снятие измерений …….….. 19

Глава 2. Исследование характеристик сыпучих сред …….……... 22

2.1 Определение сдвигового напряжения …….…… 22

2.2 Испытание гранулированного материала, представленного эллипсоидами …….…..…. 23

2.3 Испытание гранулированного материала, представленного мелкодисперсными средами ……...……..……... 32

Заключение……... 36

Список используемых источников…….…….….. 38

ВВЕДЕНИЕ

За последние 30 лет активно ведутся исследования гранулированных сред. Для сыпучих материалов характерны эффекты, не присущие другим материалам, такие как псевдоожижение, гранулированная конвекция, эффект Лейденфроста, дилатансия и осциллионы для гранулированных сред [4], [5]. Сыпучие материалы повсеместно распространены в природе и являются наиболее используемыми материалами в промышленности [6]. Например, в нефтедобывающей промышленности для повышения эффективности отдачи скважин с применением технологии гидроразрыва пласта используется гранулированный материал - пропант [1]. Для описания механики гранулированных сред необходимо знать такой параметр материала, как жесткость. Одна из актуальных задач механики это определение упругих модулей гранулированных сред. Модуль сдвига и объемного сжатия зависят от таких характеристик, как размеры частиц, их форма, плотность упаковки среды, а так же сухого и вязкого трения. Всякий раз, моделируя механику какого-либо материала, необходимо знать его упругие модули. Цель работы - создание лабораторной установки, позволяющей проводить измерения упругих модулей гранулированных материалов. Устройство должно быть понятным и простым в использовании. Габариты должны быть подобраны оптимально, чтобы имелась возможность измерять как мелкодисперсные, так и крупнодисперсные среды, при этом установка должна быть не слишком большой, чтобы для исследования материала требовалось не слишком много образца. Помимо практической задачи измерения упругих модулей, установка должна будет использоваться в процессе обучения и пополнит лабораторию НОЦ "Газпромнефть-Политех". После создания прототипа необходимо оценить его эффективность. Следует протестировать устройство на разных материалах, установить границы применимости. В дальнейшем данные установки будут использоваться в ходе проведения студентами лабораторных работ в области механики сплошной среды, механики пористой среды и теории колебаний.

ГЛАВА 1. СОЗДАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТИ.

В данной главе формулируется задача определения упругих модулей. Рассказывается о всех этапах создания лабораторного стенда: создание модели, изготовление деталей, сборка конструкции. Объясняется принцип работы установки.

1.1 Постановка задачи

Имеется некоторый объем в форме параллелепипеда, заполненный сыпучим материалом (рис.1).

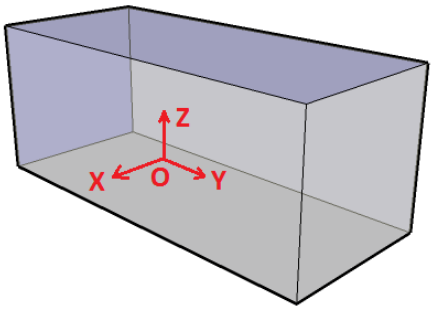

Рисунок 1. Некоторый объем пространства

Стенки параллелепипеда представляют собой твердые поверхности. Напишем граничные условия чистого сдвига. Грани, лежащие в плоскости YOZ, а так же нижняя грань, лежащая в плоскости XOY, жестко заделаны. Верхняя грань, лежащая в плоскости XOY, параллельна нижней грани, может перемещаться вдоль оси OY. Стенки, лежащие в плоскости XOZ, остаются взаимно параллельными, касаются верхней грани, связаны с нижней гранью шарнирной заделкой и могут изменять угол по отношению к плоскости XOY. Во всех сечениях объема параллелепипеда (кроме близи границ) вдоль OX деформация будет одинаковой [2]. Поставим плоско деформируемую задачу для сечения ABCD, лежащего в плоскости YOZ (рис.2).

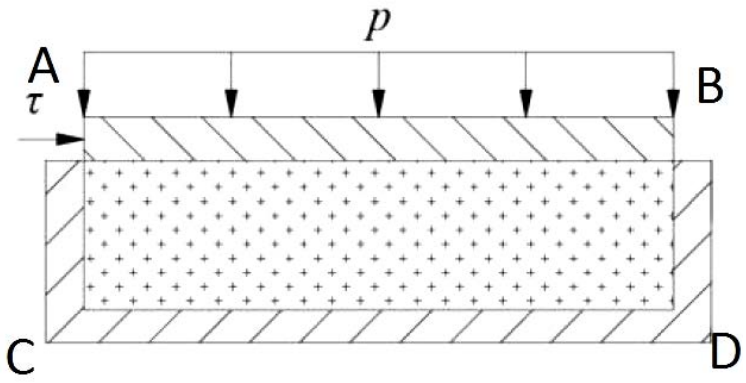

Рисунок 2. Сечение ABCD

Грань CD жестко заделана. На грань AB действует касательное напряжение τ и распределенная нагрузка p. Деформация сдвига в указанном элементе происходит путем перекашивания прямых углов прямоугольника за счет поступательного перемещения грани AB по отношению к грани CD. Деформация сдвига характеризуется углом γ, который называется углом сдвига (рис 3.).

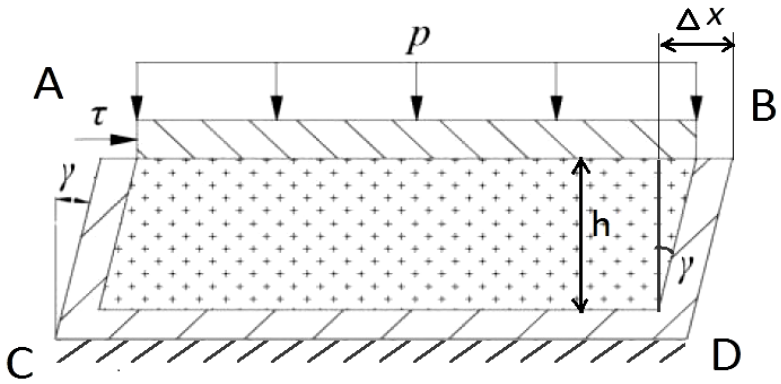

Рисунок 3. Угол сдвига

В определенных пределах нагрузки справедлив закон Гука при сдвиге, который связывает касательные напряжения и сдвиговые деформации:

$$\tau = G\,\gamma_{yz}$$

Сдвиговая деформация определяется как

$$\gamma_{yz} = \frac{\Delta x}{h} = tg\gamma.$$

Коэффициент пропорциональности G характеризует жесткость при сдвиге и называется модулем сдвига. Модуль упругости и напряжения выражаются в одинаковых единицах:

$$[G] = [\tau] / \left[\gamma_{yz}\right] = Па.$$

Перепишем касательные напряжения через силу, приложенную к верхней грани, и площадь самой грани:

$$\tau = F / A,$$

где A – площадь верхней грани (рис 4.).

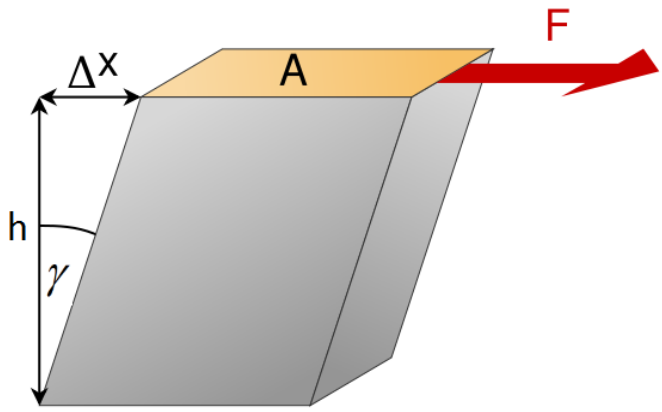

Рисунок 4. Чистый сдвиг

1.2 Создание 3D модели.

Необходимо создать устройство, осуществляющее чистый сдвиг, т.е. деформирующее материал как показано на рисунке 4. Пространство, в которое будет насыпаться сыпучий материал, должно быть ограничено твердыми

стенками. Будем называть часть конструкции, ограничивающую исследуемый материал, *рабочей камерой* (рис.5).

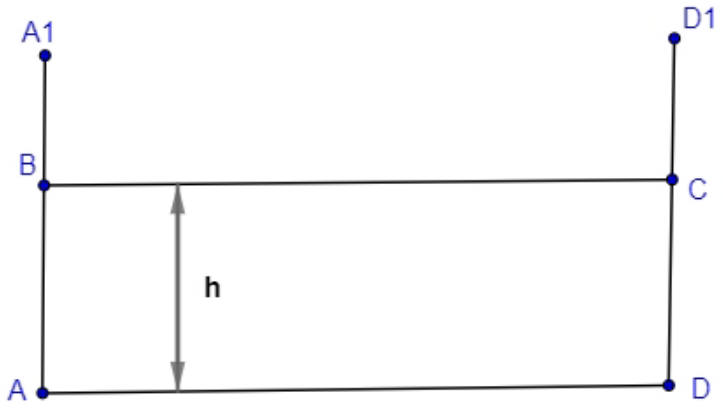

Рисунок 5. Схема рабочей камеры

При сдвиге при постоянном объеме материала высота h остается постоянной, длина отрезков AB и DC увеличивается (рис.6).

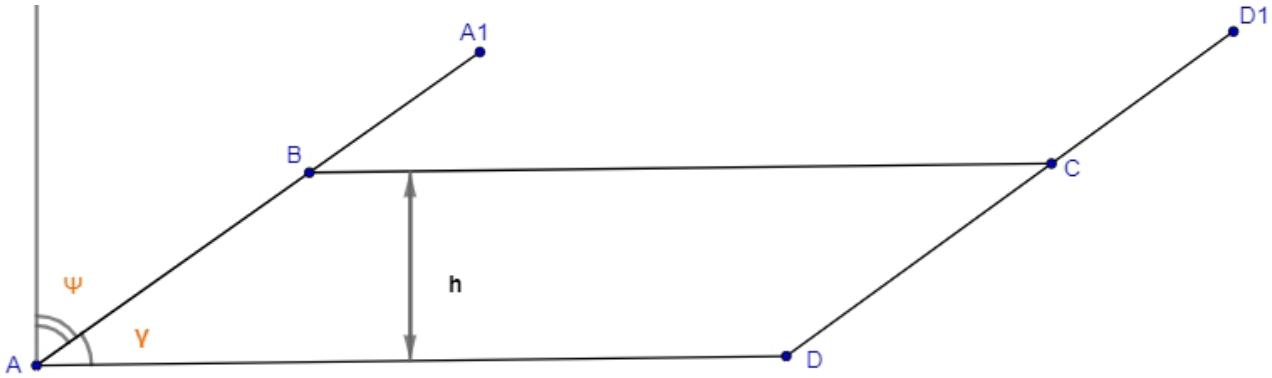

Рисунок 6. Схема рабочей камеры при сдвиге

Назовем стенки AA1 и DD1 *подвижными стенками*. По мере наклона подвижных стенок отрезки AB и DC стремятся к AA1 и DD1 соответственно. Необходимая длина подвижных стенок зависит от максимального угла отклонения ψ:

$$h/_{AB} = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = \sin\gamma\,.$$

Ограничимся максимальным углом отклонения $\psi = \frac{2\pi}{3}$. В таком случае, минимальная длина подвижных стенок составит 2h. При выборе размеров рабочей камеры, необходимо учитывать масштабный фактор для дискретных сред. Модуль упругости является континуальной характеристикой, для большей корректности его определения необходимо, чтобы размеры частиц

дискретной среды были много меньше размеров рабочей камеры. Для создания модели был использован САПР Solidworks. Данный программный комплекс отличается удобным интерфейсом и возможностью перевода моделей в формат, необходимый для дальнейшей печати на 3d принтере. Спроектированная модель рабочего объема имеет следующие составляющие: основание B, неподвижные стенки L и R, подвижные стенки F и S, крышка C (рис.7, рис.8).

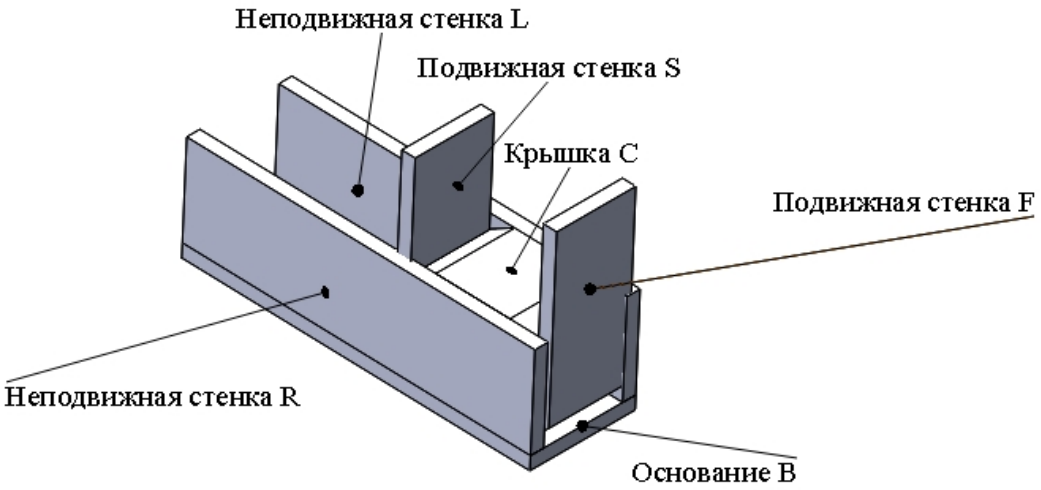

Рисунок 7. Модель рабочей камеры

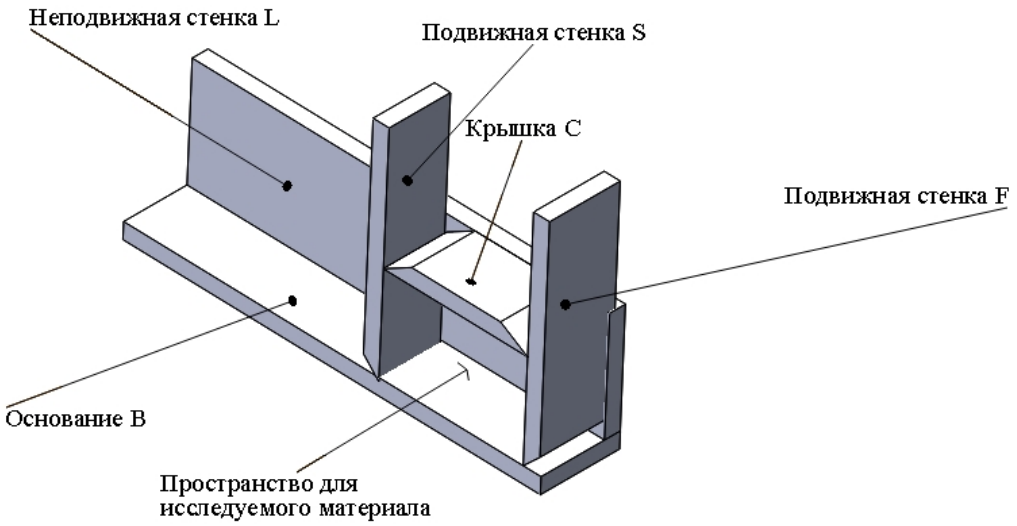

Рисунок 8. Модель рабочей камеры в разрезе

Стенки L и R соединены с основанием B заделкой. Стенки F и S соединены с основанием B шарниром. Нижняя их кромка скошена под углом $\psi = \frac{2\pi}{3}$, для возможности наклона относительно основания на угол ψ. Кромки крышки так же скошены под углом ψ. Помимо обеспечения свободы движения, острая кромка минимизирует трение между крышкой C и стенками F и S.

Выбранные размеры деталей представлены ниже:

основание B: длина = 260 мм, ширина = 80 мм, толщина = 10 мм;

стенки L и R: длина = 260 мм, ширина = 70 мм, толщина = 10 мм;

стенки F и S: длина = 260 мм, ширина = 70 мм, толщина = 10 мм;

крышка C: длина = 90 мм, ширина = 60 мм, толщина = 10 мм.

Таким образом, объем рабочей камеры составляет 324 см^3.

Выбранные габариты позволят создать компактную установку, результаты исследования мелкодисперсных сред на которой будут достаточно достоверными, что позволит оценить работоспособность модели. Время печати всех деталей предварительно оценивается в 28 часов. Для уменьшения времени печати, а так же для экономии пластика, вырежем в модели части стеночек, наличие которых не влияет на ход опыта. Так же добавим пазы в детали B и выступы в деталях L и R, для более надежной фиксации. В деталь F добавим штангу, к которой будет крепиться трос, посредством которого будет сообщаться нагрузка подвижным стенкам. Параллельность подвижных стенок будет обеспечиваться посредством фиксаторов, зацепленных за специальные уступы. В качестве шарнирной заделки будут использованы петли. Для уменьшения влияния на эксперимент, петли будут утоплены в специальные углубления. Добавим возможность фиксации подвижных стенок для определения модуля объемного сжатия. Модифицированная модель представлена на рис.9, рис.10, рис.11.

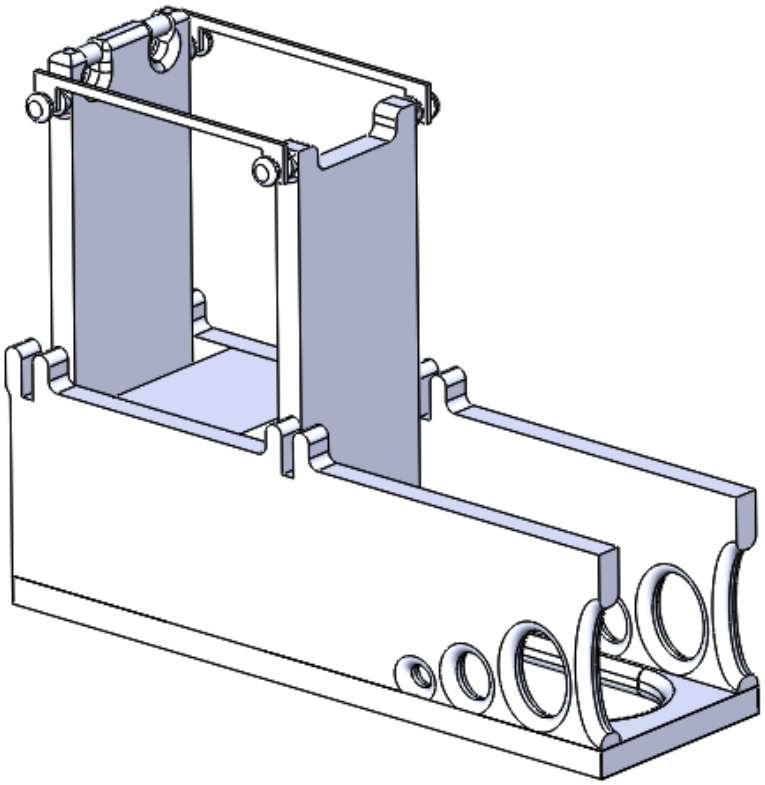

Рисунок 9. Общий план модифицированной модели

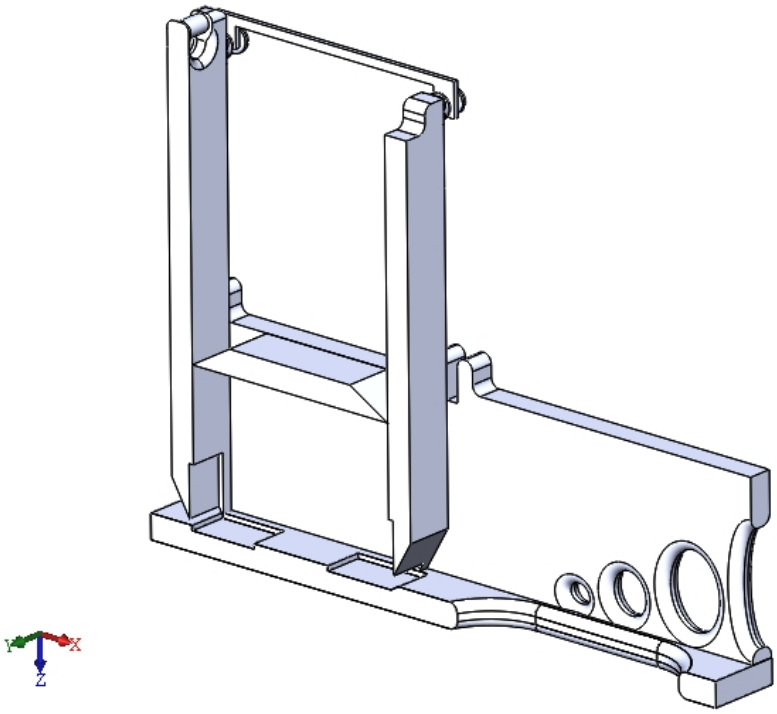

Рисунок 10. Модифицированная модель в разрезе

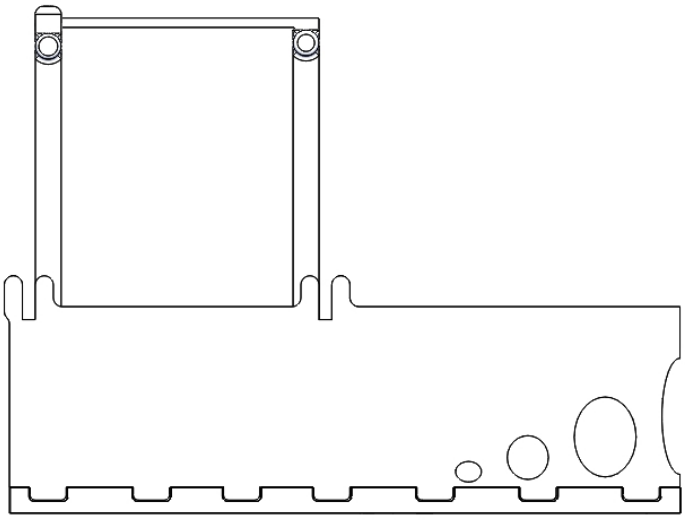

Рисунок 11. Внутреннее устройство стенок L и R. Пазы с пространством для клея в основании.

Детали были напечатаны на 3D из ABS пластика (рис. 12). Для лучшего качества печати на поверхность стола принтера была нанесена специальная пленка. Покрытие уменьшает вероятность не прилипания слоев создаваемой детали к столу, а так же обеспечивает более легкое отделение от поверхности после окончания печати. Особенность режима печати заключается в создании внутренней решетки. В отличие от сплошной заливки, такая решетка позволяет уменьшить вес и плотность изделия, не сильно теряя в прочности. Удаление незадействованных частей деталей позволило сократить время печати на 4 часа.

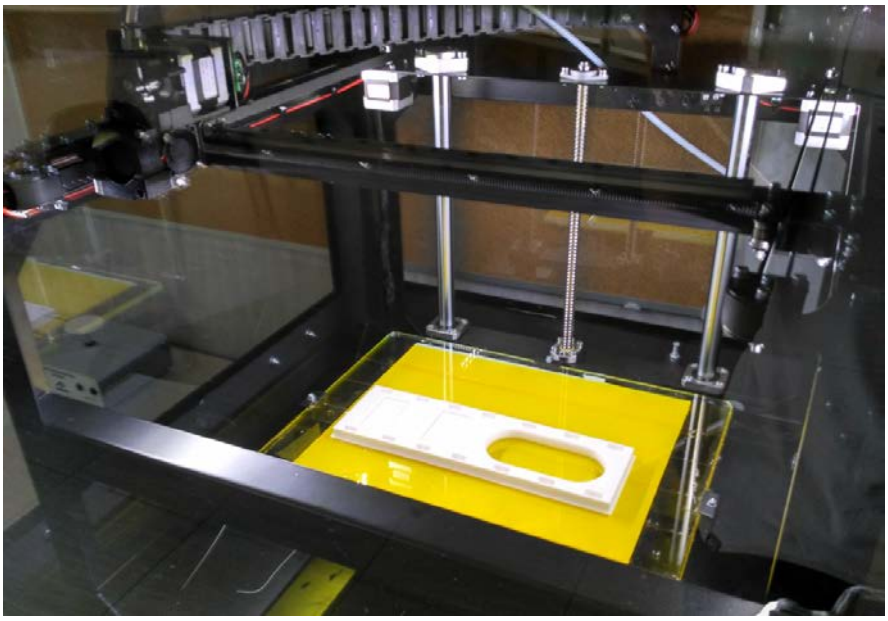

Рисунок 12. Вид 3D принтера изнутри

1.3 Сборка установки.

После печати дефекты деталей были обработаны абразивом, для придания желаемой формы. Детали L и R были скреплены с деталью B с помощью эпоксидного клея. Наличие пазов позволило без труда добиться угла $\frac{\pi}{2}$ между поверхностями, без завала стенок. В детали F и S были вставлены, а затем привинчены петли (рис. 13). Вместе с петлями детали F и S были привлечены к основанию B. Все впадины были залиты эпоксидной смолой, для создания гладкой поверхности. Общий вид собранной рабочей камеры представлен на рис. 14.

Рисунок 13. Крепление петель к деталям F и S

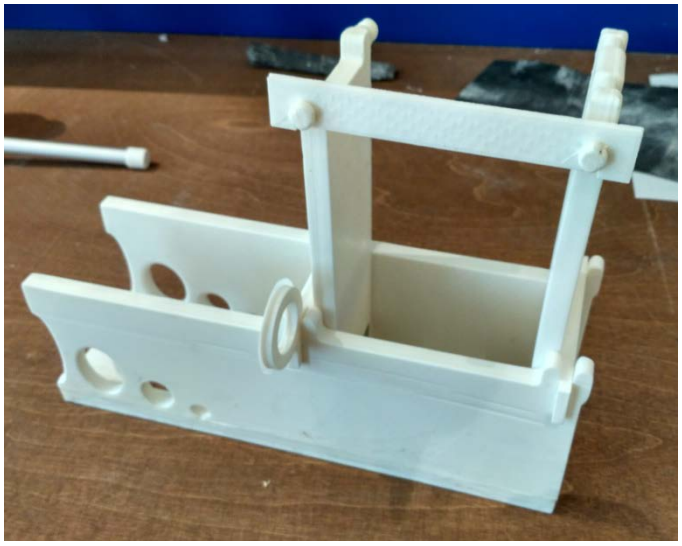

Рисунок 14. Общий вид собранной рабочей камеры

Вблизи петель в силу геометрии условие чистого сдвига не будет выполняться. Линейный размер выступающей части петель r много меньше минимального линейного размера рабочей камеры h: $r/h = 0.042 << 1$ (рис.15). Согласно принципу Сен-Венана, мы можем пренебречь неоднородностью граничных условий вблизи петель и не учитывать ее в расчетах [3].

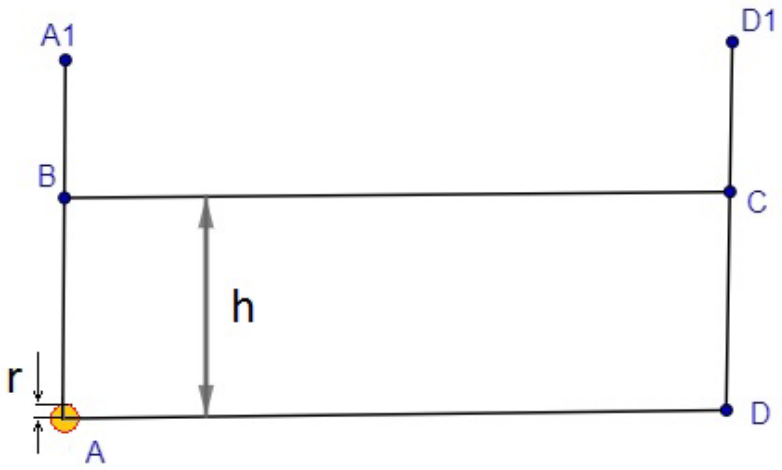

Рисунок 15. Сравнение размеров выступающей части петли и рабочей камеры

Рабочая камера была закреплена на деревянный массив с помощью 6 винтов. Детали из ABS пластика с внутренней решеткой мягче, чем древесина, поэтому было решено крепить камеру через петли лежащие на основании и само основание. Такой вариант обеспечивает более надежное крепление чем, если бы крепить отдельно петли к основанию, а основание к деревянному массиву. Крышка C должна оставаться параллельна основанию B (лежать в плоскости XY, рис.10). Для того, чтобы не допустить перекоса крышки, необходимо ограничить ее вращательные степени свободы, а так же перемещение вдоль оси Y. Для решения этой задачи были взяты направляющие рельсы, используемые также в мебельном производстве. Два рельса были проложены вдоль рабочей камеры и скреплены с деревянным массивом саморезами, оставив тем самым только поступательную степень свободы вдоль оси X. Добавим поступательную степень свободы по оси Z, перпендикулярно прикрепив еще два рельса к лежащим горизонтально. Скрепим вертикальные направляющие между собой в верхней части с помощью пластины (рис.16). В качестве вспомогательных соединительных элементов использовались метизы, крепеж осуществлялся посредством винтов.

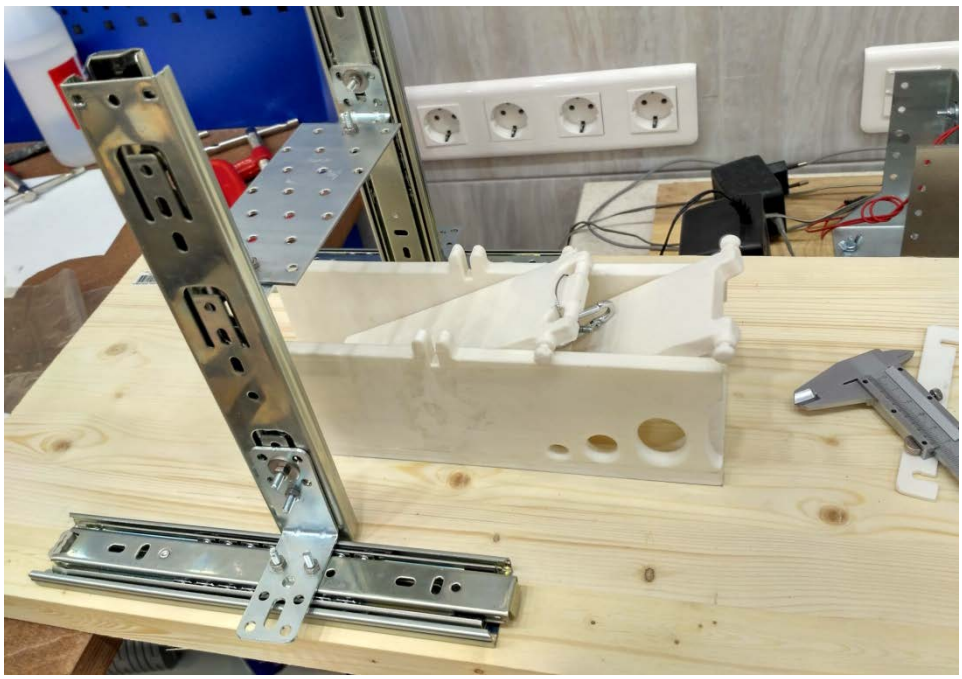

Рисунок 16. Монтаж направляющих рельсов

Далее был смоделирована и напечатана из ABS пластика деталь X, жестко соединяющая крышку C и пластину, ограничивающую степени свободы крышки (рис.17,18,19). Форма и размеры подобраны так, чтобы был осуществим наклон на большие углы, и при этом деталь X не контактировала с элементами подвижных стенок. Деталь представляет собой каркас, усиленный по всей длине ребрами жесткости толщиной 2 мм (сплошная заливка). Особое внимание уделялось усилению конструкции на внутренней части углов, т.к. они являются концентраторами напряжения.

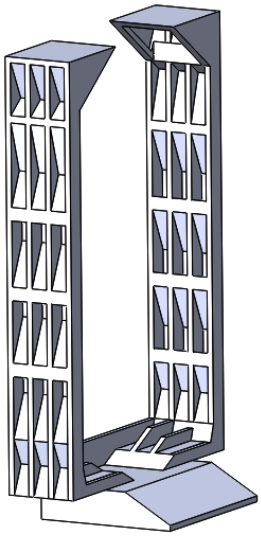

Рисунок 17. Модель детали X

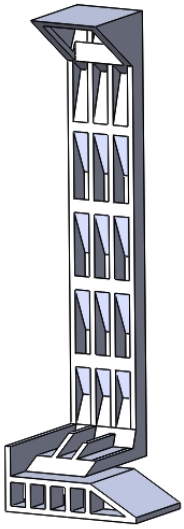

Рисунок 18. Сечение детали X

Как видно на рисунке 18, внутри платформы так же находятся ребра жесткости, для усиления конструкции.

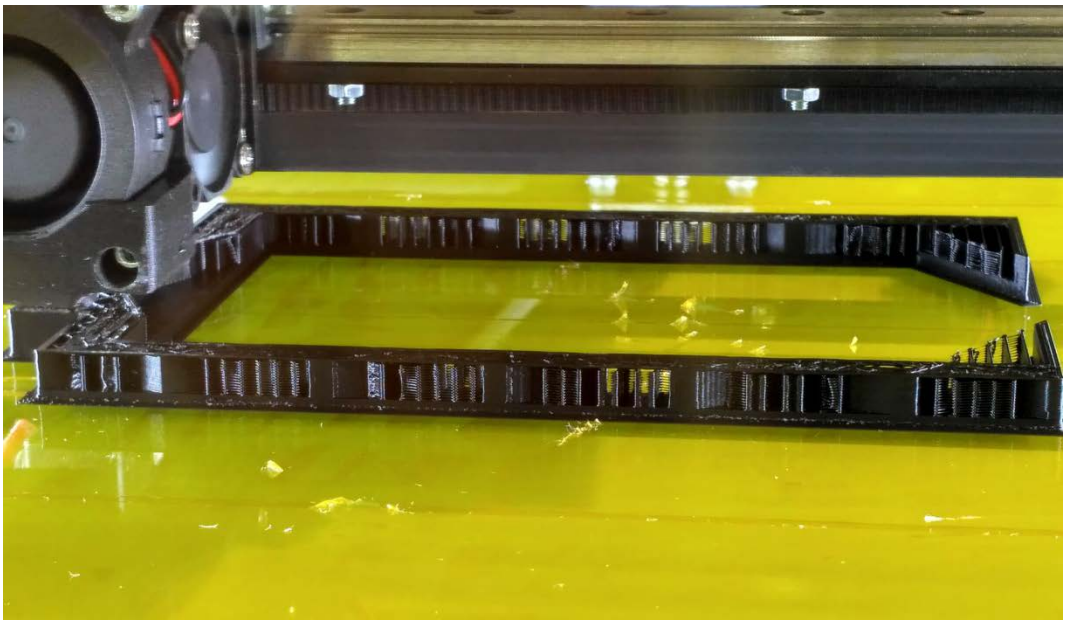

Рисунок 19. Печать детали X.

Для увеличения максимально возможного перемещения крышки вдоль оси Z, был добавлен удлиняющий элемент. Тройка крышка - удлиняющий элемент - соединительная деталь была соединена тремя винтами (рис.20). Для предотвращения продавливания пластика, под гайки подложены шайбы.

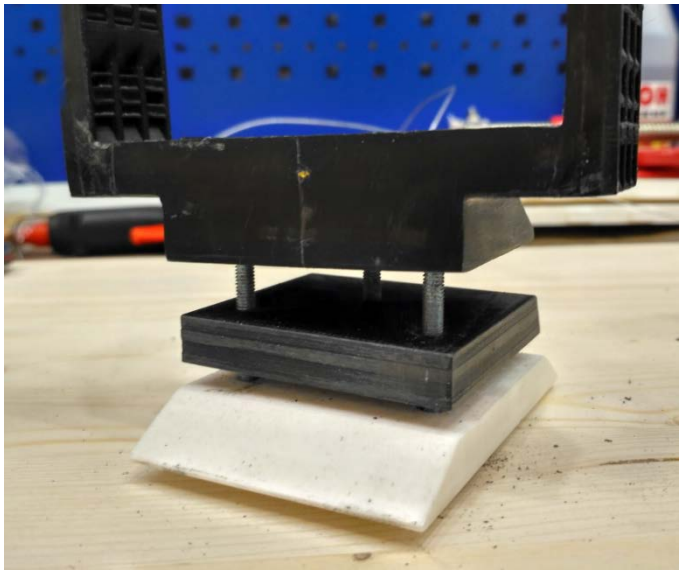

Рисунок 20. Соединение крышки и детали X.

Для более надежного крепления детали X к пластине, соединяющей вертикальные направляющие, в пазы на верхней части детали X были вставлены стальные пластинки, вырезанные из стального листа. Пластинки значительно увеличивает площадь контакта крепежа, по сравнению с обычной шайбой (рис.21).

Рисунок 21. Крепление детали X к пластине

Вид собранной установки сверху показан на рис.22.

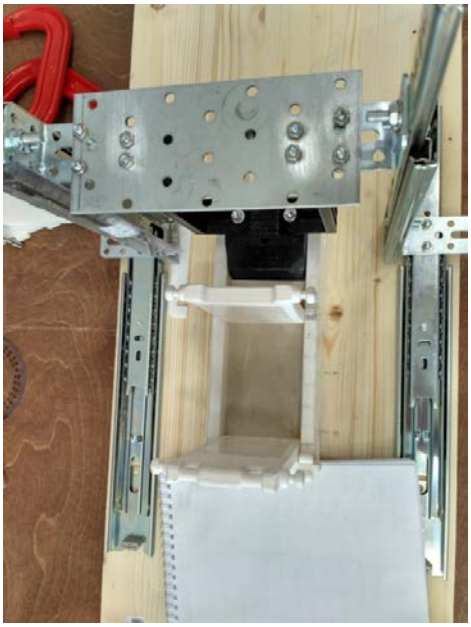

Рисунок 22. Вид собранной установки сверху

1.4 Снятие измерений.

Сдвиговая сила сообщается подвижным стенкам посредством троса, прикрепленного к стенке F (рис.23). Наличие нескольких карабинов на другом конце троса позволяет подвешивать сразу несколько предметов (рис.24). Сила натяжения троса зависит от массы подвешенного груза.

Рисунок 23. Крепление троса к стенке F

Рисунок 24. Место крепления подвеса

На рис. 25 изображена установка в процессе работы. В качестве подвеса используются емкости с водой.

Рисунок 25. Вид установки в процессе опытов.

Величина угла сдвига определяется по отложенной шкале в градусах (рис.26). Значение мгновенной высоты исследуемого материала можно определить с помощью уровня пластины (рис.27).

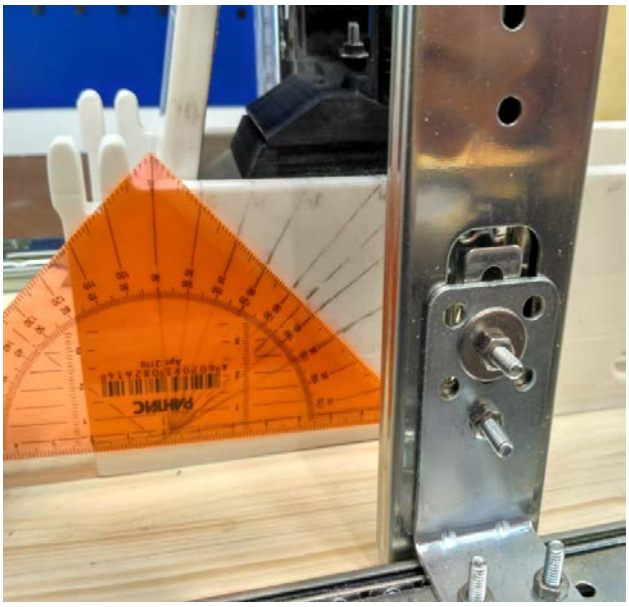

Рисунок 26. Определение угла сдвига

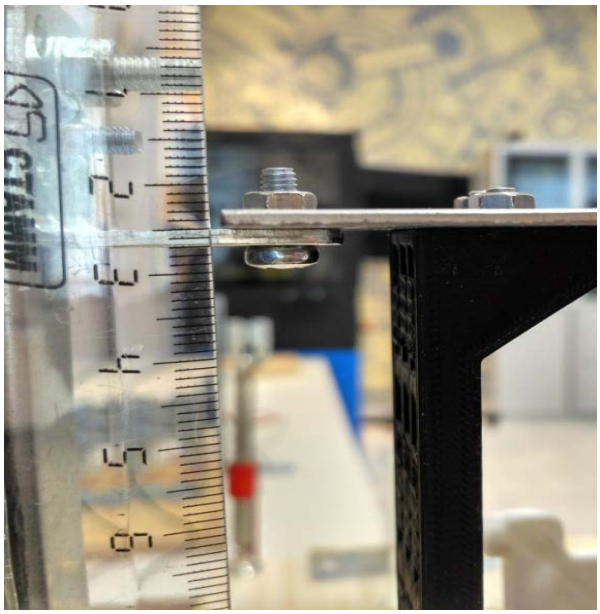

Рисунок 27. Определение высоты исследуемого материала

Созданная установка в нерабочем состоянии имеет габариты 0.7 х 0.4 х 0. 3 м. В рабочем состоянии необходимо использовать стол высотой не менее 1.0 м. в качестве подставки.

Исследуемый материал насыпается в рабочую камеру. Сверху опускается крышка. Часть конструкции (крышка, соединительная часть, вертикальные направляющие), имеет массу m = 0.54 кг, опирается крышкой на исследуемый материал и создает сжимающее давление $P0 = {}^{m}/_{A}$ = 150 Pa, где A = 36 $см^2$ – площадь горизонтальной поверхности объема исследуемого материала.

В емкость, выполняющую функцию подвеса массой М (рис.25), постепенно наливается вода. Для упрощения расчетов будем считать плотность воды ρ = 1000 ${}^{г}/_{см^3}$. Напряжение, сообщаемое подвижным стенкам рабочей камеры, постепенно увеличивается. Принимая во внимание наличия вязкого трения в

системе, уменьшением скорости увеличения нагрузки, приближаем проводимый эксперимент к квазистатическому.

Сдвиговые деформации сыпучего материала происходят рывками [7]. При сдвиге деформируются слои относительно друг друга, толщина слоя зависит от материала. Фиксируются значения нагрузки M (кг), угла сдвига γ (градусы), положения пластины L (мм).

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

В данной главе происходит исследование разных сыпучих сред. Приводится математический аппарат выполненных расчетов, описываются результаты экспериментов, анализируются наблюдаемые эффекты.

2.1 Определение сдвигового напряжения.

Мы можем измерить приложенную нагрузку на трос, но мы не можем напрямую измерить сдвиговое напряжение. Рассмотрим задачу в двумерной постановке (рис.28).

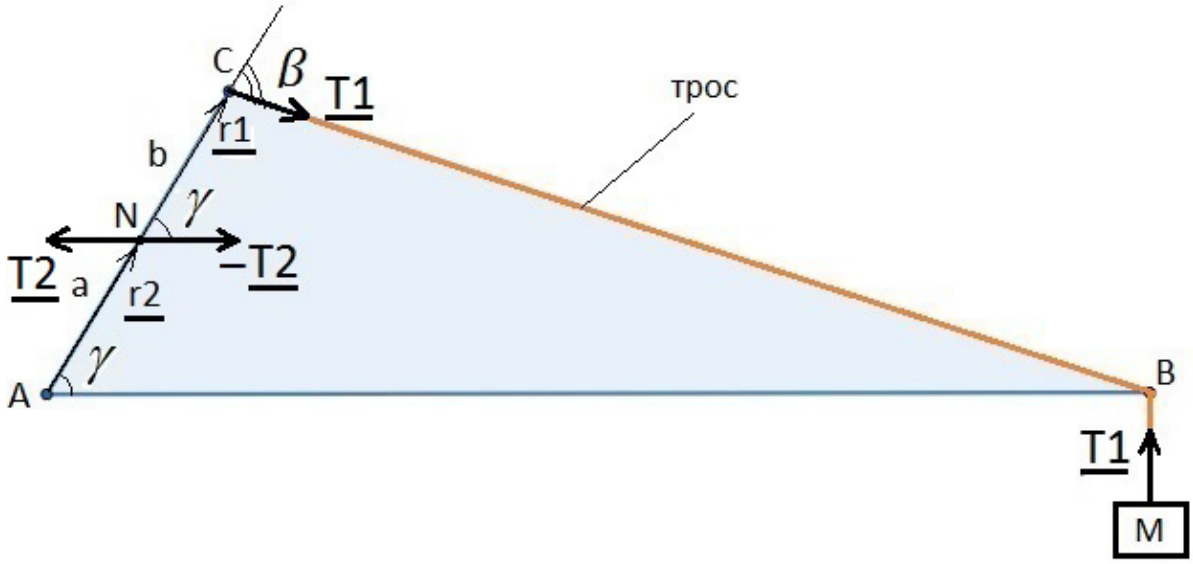

Рисунок 28. Определение сдвигового напряжения

Подвижную стенку F будет описывать стержень AC. Точка B выполняет функции блока. CB – длина троса от подвижной стенки F до блока B. Нагрузка M сообщает силу натяжения T1 тросу: $T1 = Mg$. Трос, в свою очередь, сообщает стержню AC момент M1. В точке A находится шарнир. Момент M1 уравновешивается моментом M2, возникающим вследствие приложенной в точке N горизонтальной силы T2. Найдя силу T2 как функцию угла γ, мы сможем определить сдвиговое напряжение, как $\tau = \tau(\gamma)$. Перепишем задачу в формульном виде. $|\underline{r}1| = a + b$, $|\underline{r}2| = a$,

$$\underline{M}1 = \underline{r}1 \times \underline{T}1$$

$$\underline{M}2 = \underline{r}2 \times \underline{T}2$$

$$\underline{M}1 + \underline{M}2 = 0$$

$$r1 * T1 * \sin(\alpha) * \underline{k} = r2 * T2 * \sin(\gamma) * \underline{k}$$

$$T2 = \frac{a+b}{a} * \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} * T1 \qquad (2)$$

Угол α определяем как

$$\alpha = arccos \frac{r1 \cdot l}{|r1| \cdot |l|},$$

где l – вектор, направленный из C в B.

Для оптимизации процесса преобразования снимаемых измерений в интересующие нас величины, была написана программа в Matlab.

На вход программы подается текстовый файл с массивом данных измерений для разных положений подвижных стенок. Для каждого положения снимаются три параметра: масса подвешенного груза M, угол сдвига γ и положение пластины L (рис.26). Высота объема исследуемого материала рассчитывается как h = L + Δ, где Δ = 39 – поправочная константа. На выходе программы получаем значение сдвигового напряжения τ для каждого из измеренных углов сдвига γ и сдвиговую деформацию γ_{xy}.

2.2 Испытание гранулированного материала, представленного эллипсоидами.

Рассмотрим ряд макродисперсных сред с максимальным определяющим диаметром частиц = 6мм.

Рассматривается гранулированная среда, представленная эллипсоидами с характерными параметрами a = 1 мм, b = 2.5 мм, c =1.5 мм (круглый рис). 3Д

модель гранулы создана с помощью программного пакета Mathematica и представлена на рис.29.

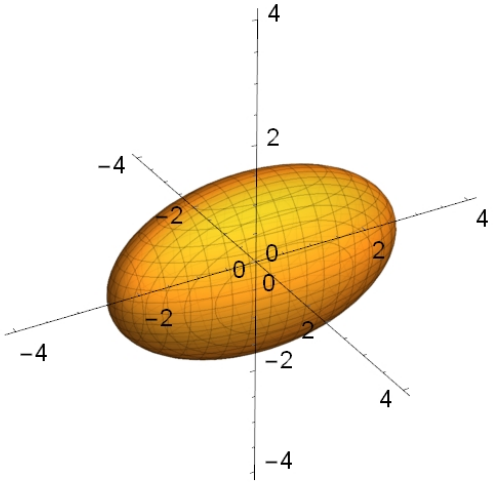

Рисунок 29. Модель гранулы риса; размеры представлены в мм. Объем исследуемого материала V = 290 $см^3$.

Построим график зависимости касательного напряжения от угловой деформации (рис.30). Каждая точка соответствует снятым данным.

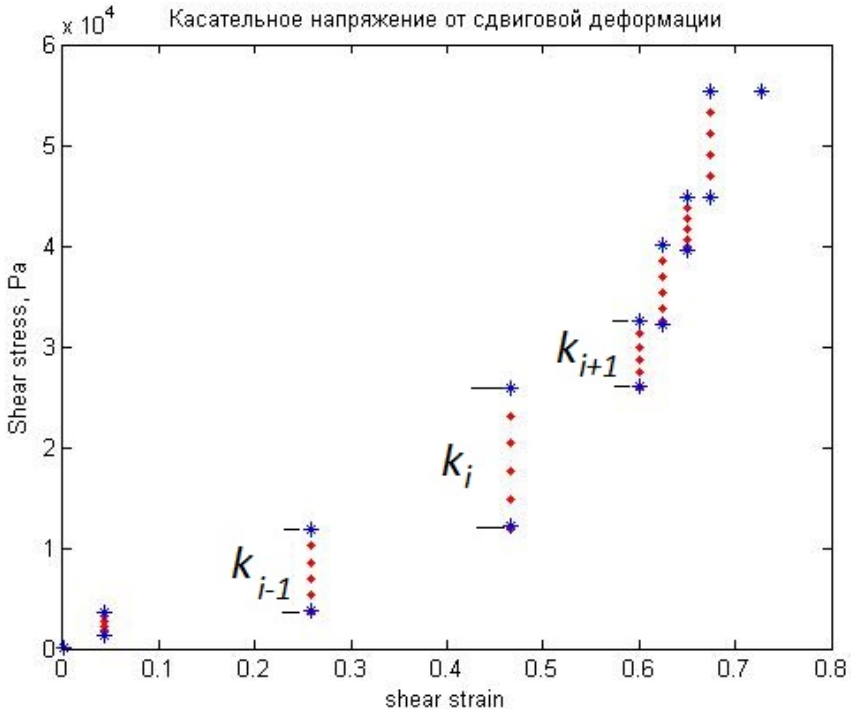

Рисунок 30. Сухой рис P = 140 Па

На каждом отрезке k_n мы можем отметить сколь угодно много точек (красные), так как сдвига не происходит на протяжении всего отрезка. При расчетах ограничимся только крайними точками (синие), соответствующими положениям за мгновение до и сразу после каждого локального сдвига.

Среда деформируется скачками, что обусловлено силами сухого трения. Самый первый сдвиг и сдвиги, начиная с 5-го меньше, чем 2-4-е. Это говорит нам о том, что при первом сдвиге происходит переупаковка в конфигурацию, при которой слои материала лучше цепляются друг за друга. Начиная с деформации в 0.6 радиан, силы сдвига в системе оказываются достаточно велики, чтобы уменьшить эффект продолжительного накопления энергии в сыпучей среде.

Добавим жидкости (20мл), чтобы уменьшить сухое трение и аналогичный график (рис.31)

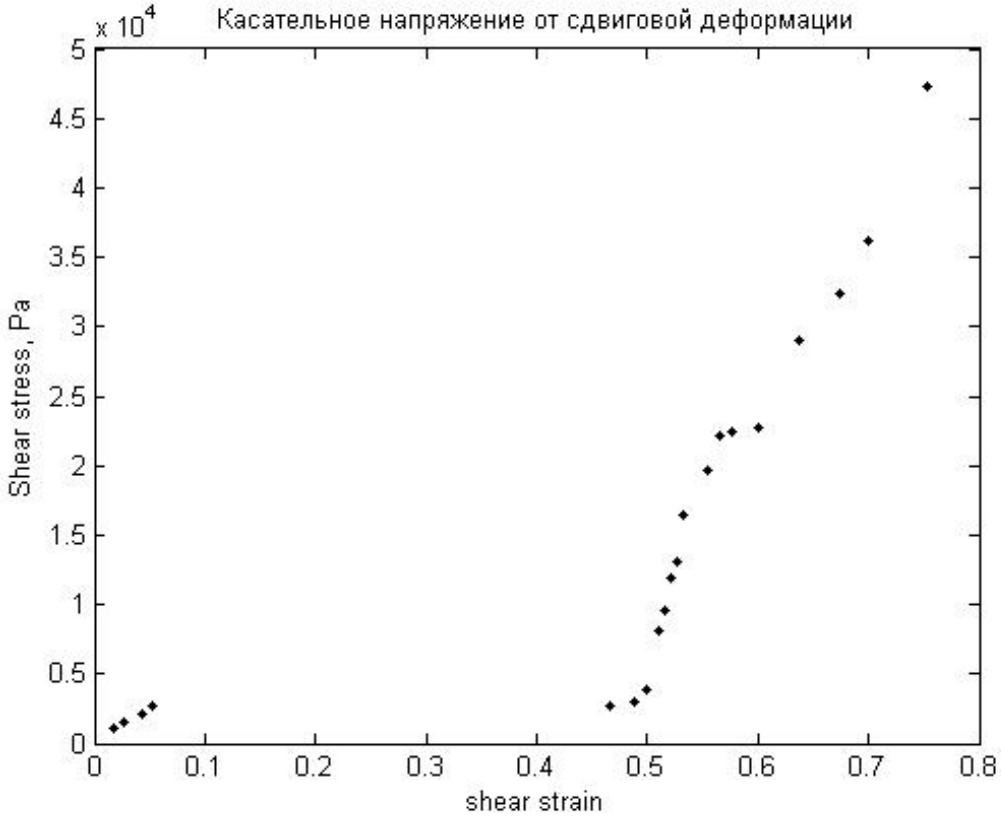

Рисунок 31. Смоченный рис, 20 мл воды. P=P0

В начале процесса заметен участок, на котором деформации происходят практически линейно. При касательном напряжении $2.5*10^3$ Па наблюдается течение. Течение происходит до 0.47 рад., после чего процесс переходит нелинейную деформацию. Локальный участок от 0.5 до 0.55 рад. с некоторой степенью приближения можно выделить, как линейный.

Для определения модуля сдвига на этом участке, используем метод наименьших квадратов.

Модуль сдвига для данного материала G = 5.75 кПа.

Сравним графики для разных смесей риса с жидкостью (рис.32). Для более удобного восприятия для каждого угла будем отмечать одну точку (среднюю на отрезке k_n, рис.30).

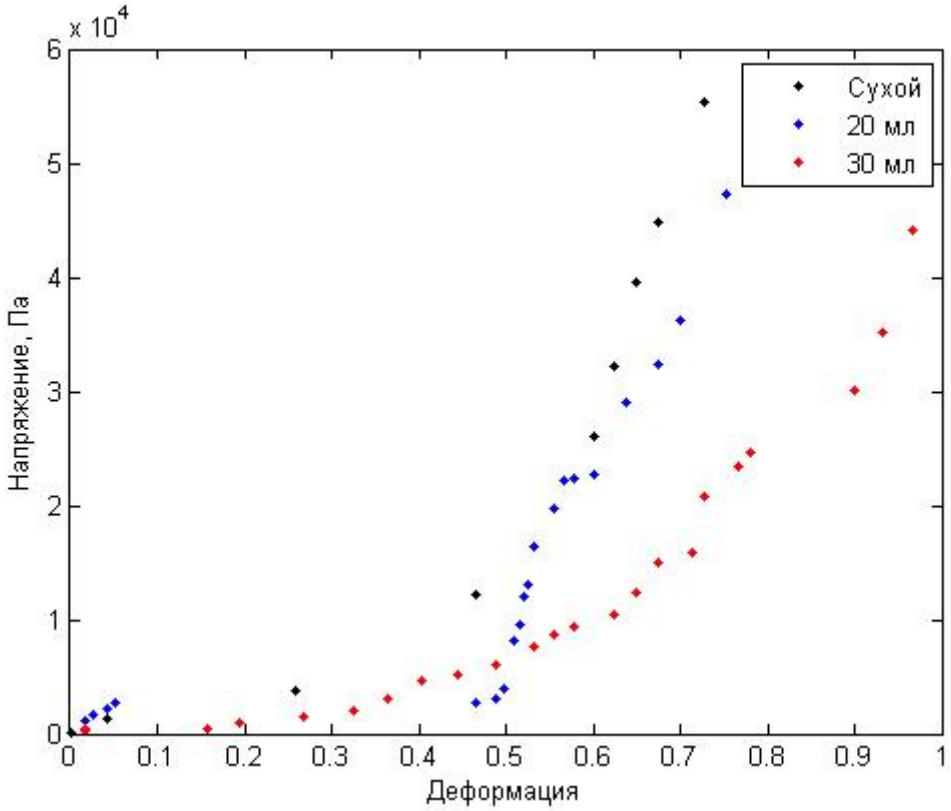

Рисунок 31. Сравнение риса при разном количестве жидкости

Из графика видно, что при большем количестве жидкости материал ведет себя более податливо.

Считаем участок графика 0.20 - 0.64 радиан линейным.

Тогда на нем G = 1.9 кПа.

Исследуем гранулированную среду, представленную эллипсоидами со характерными параметрами a = 3мм, b = 3мм, c =1мм (чечевица). 3Д модель гранулы создана с помощью программного пакета Mathematica и представлена на рис.32.

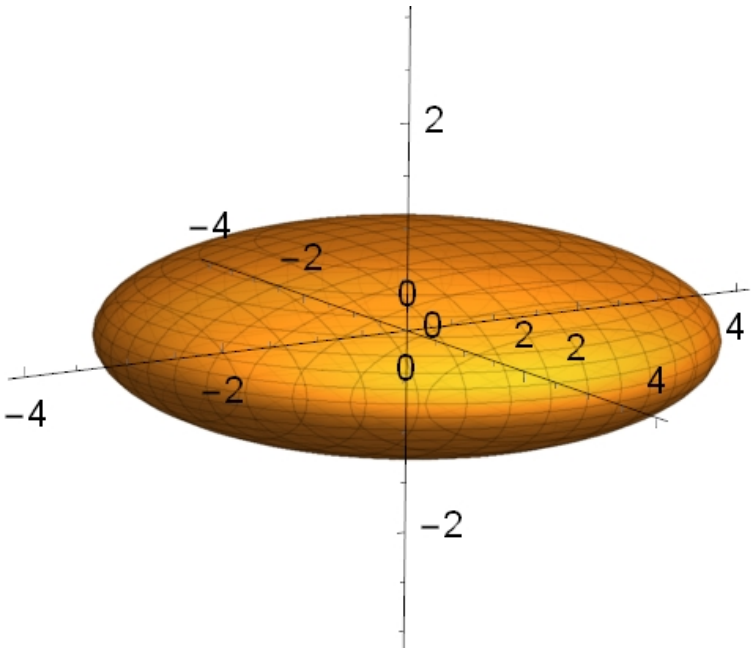

Рисунок 32. 3Д модель гранулы чечевицы; размеры представлены в мм.

Объем исследуемого материала = 260 $см^3$

Сравним поведение материала при сдвиге при разном сжимающем давлении (рис. 33).

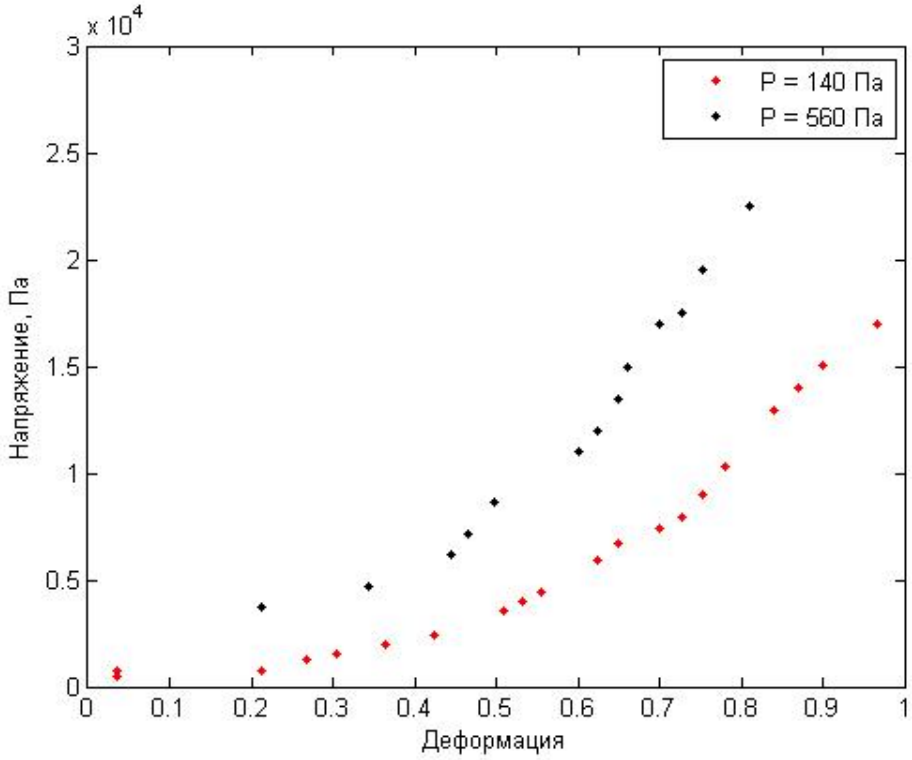

Рисунок 33. Сдвиг материала при разном сжимающем напряжении.

В начале процесса в обоих опытах наблюдается течение, до 0.22 рад. При большем сжимающем давлении напряжение в материале выше, что видно из графика. Для чечевицы на промежутке от 0.45 до 0.95 рад. модуль сдвига будет иметь следующий вид:

для P = 140Па, G = 3.1 кПа;

для P = 560Па, G = 4.7 кПа.

Исследуем гранулированную среду, представленную эллипсоидами со характерными параметрами a = 3мм, b = 3мм, c =3мм (пластиковые шары). 3Д модель гранулы создана с помощью программного пакета Mathematica и представлена на рис.34.

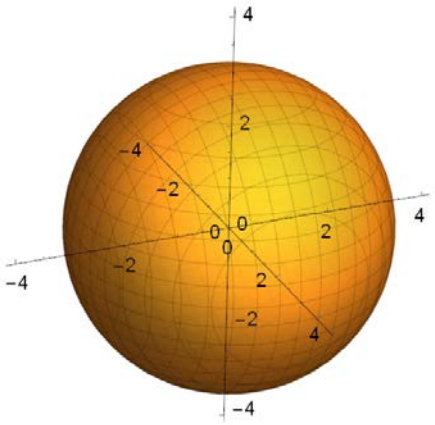

Рисунок 34. 3Д модель пластикового шара; размеры представлены в мм. Количество исследуемых элементов = 1200 шт.

Построим график зависимости сдвигового напряжения от деформации (рис.35).

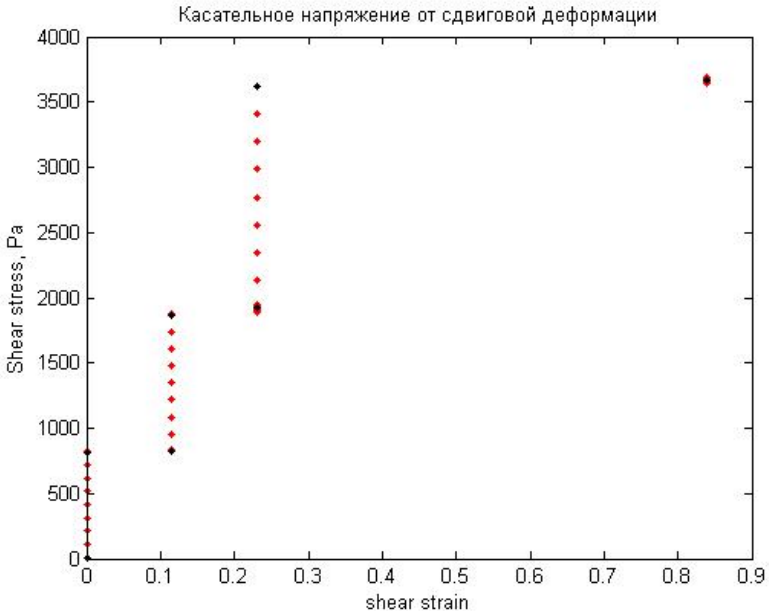

Рисунок 35. Пластиковые шары, сухие.

В материале присутствует достаточно большое сухое трение. За весь опыт было три перекомпоновки. Данных недостаточно для определения характера процесса. Происходит длительно накопление энергии, необходимой для преодоления сдерживающего сухого трения, после срыва, оставшейся энергии в системе достаточно, чтобы существенно деформировать материал.

Добавим жидкость (10 мл. воды) и сравним поведение под разным сжимающим давлением (рис.36). Так как точки находятся достаточно далеко друг от друга, соединим их пунктирной линией.

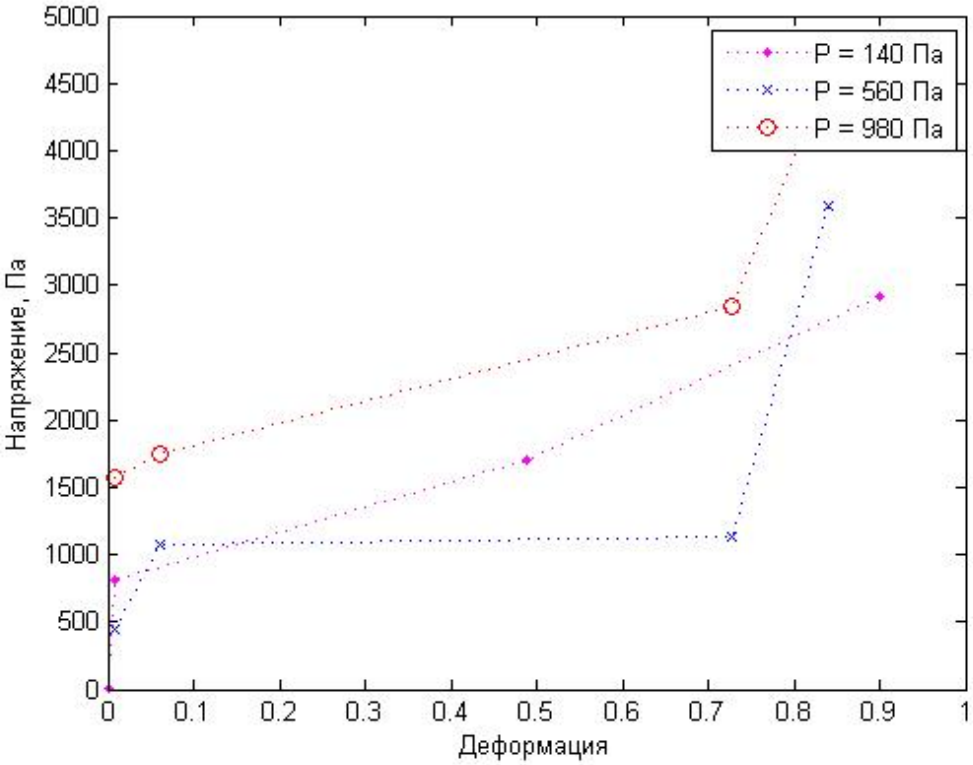

Рисунок 36. Сравнение поведения смоченных пластиковых шаров при разных сжимающих давлениях.

При большем сжимающем давлении происходит большее накопление напряжения в материале, что счет увеличения влияния сухого трения.

Большой период скачков, малое количество снимаемых данных за весь ход эксперимента говорит о том, что данный материал не подходит для созданной установки.

Сравним поведение всех трех сухих материалов с максимальным характерным диаметром частиц = 6мм (рис.37).

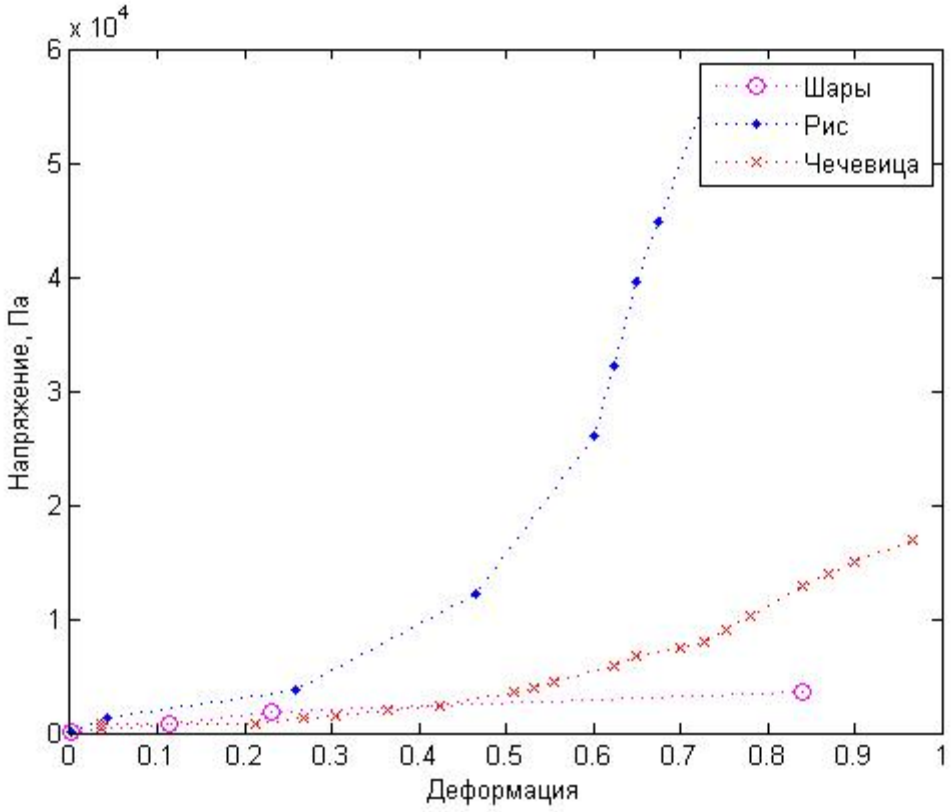

Рисунок 37. Сравнение поведения трех сухих материалов.

Закон, по которому происходит деформация, для шаров, в сравнении с другими средами, выглядит линейным. Рис ведет себя более нелинейно, чем чечевица. Этот эффект обусловлен переупаковкой частиц в объеме материала [8],[9]. При сдвиге слоев материала, вытянутые гранулы риса (рис. 29), находящиеся в слое, начинают цепляться за гранулы, находящиеся в соседних слоях, тем самым увеличивая внутреннее напряжение. При сдвиге материала, представленного

плоскими гранулами чечевицы (рис.32), слои при сдвиге скользят друг по другу, без залипания и накопления энергии. Второе объяснение эффекта более нелинейного поведения риса в отличии от других материалов, заключается в зависимости влияния сухого трения от сжимающей нагрузки. Необходимо сравнить 2 материала, имеющих одинаковое значение поверхностного трения и разную форму: вытянутые и сплюснутые эллипсоиды соответственно. Если подтвердиться корелляция эффекта, описанного выше и геометрической формы гранул, эффект может быть использован для выбора формы пропанта для ГРП.

2.3 Испытание гранулированного материала, представленного мелкодисперсными средами.

В качестве мелкодисперсной сыпучей среды возьмем 250 $см^3$ мелкой соли.

Проведем аналогичный эксперимент, описанный ранее. Построим график напряжений при разных давлениях (рис.38).

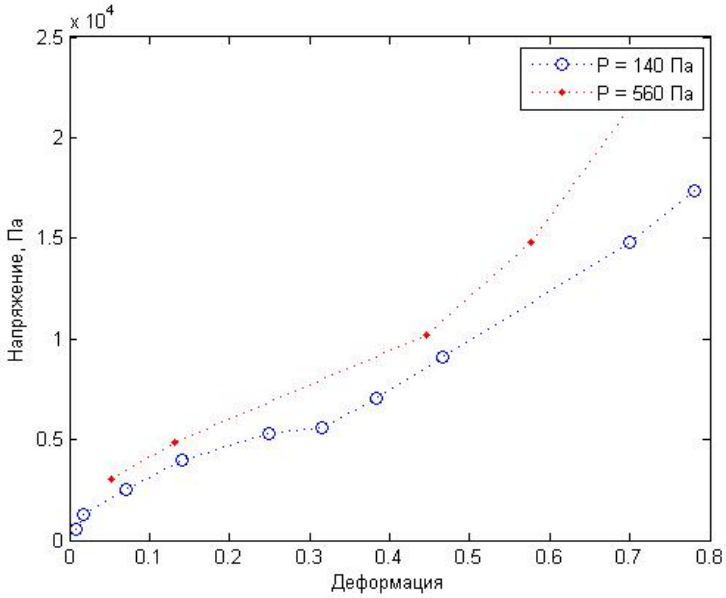

Рисунок 38. Сравнение напряжений при сдвиге в соли при разных сжимающих давлениях.

При большем давлении в материале наблюдаются большие напряжения. На обоих графиках можно заметить участок, на котором рост напряжения падает. Для P = 140 Па это промежуток от 0.13 до 0.3 радиан, для P = 560 Па – от 0.12 до 0.45 радиан. В крайней точке промежутка, график становится более крутой. Это объясняется переупаковкой частиц. На промежутке конфигурация стремиться к наиболее плотной, материал более податлив. В момент окончания переупаковки (в конце промежутка), конфигурация материала становится наиболее оптимальной. При следующем сдвиге в некотором приближении наблюдается линейность.

Для P = 140 Па, G = 3.3 кПа;

Для P = 560 Па, G = 4.1 кПа.

Для следующих экспериментов использовался кварцевый песок, 260 $см^3$. Аналогичный песок используется в качестве пропанта [6].

Построим графики при разных сжимающих давлениях (рис.39).

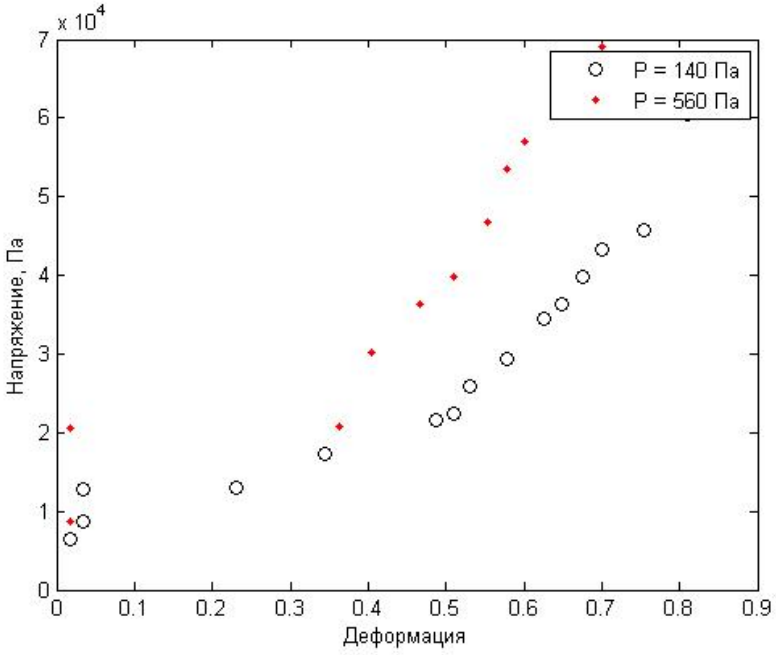

Рисунок 39. Сравнение напряжений при сдвиге песка при разных сжимающих давлениях.

Наблюдается аналогичное поведение, как и в предыдущем эксперименте.

Основное отличие от эксперимента с солью – появление продолжительного течения в начале опытов. В случае с более высокой сжимающей нагрузкой, скачек шире.

При P = 140 Па, G = 8.9 кПа;

При P = 560 Па, G = 12.5 кПа.

Добавим 70 мл воды в наш материал, повторим предыдущий эксперимент, построим график (рис.40).

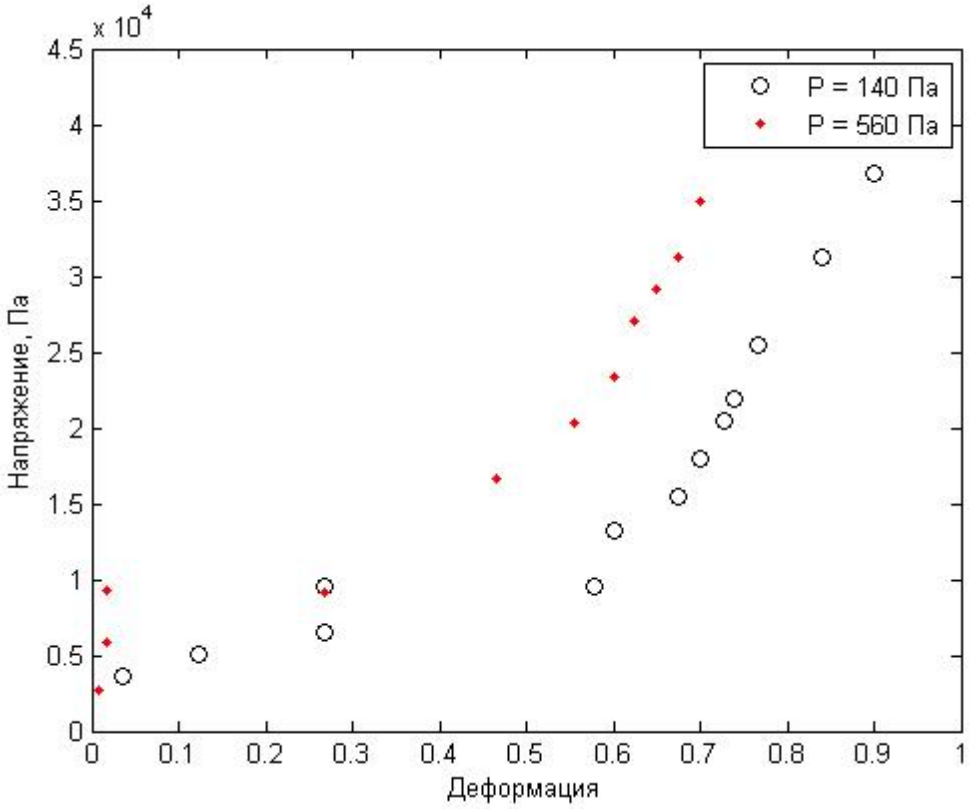

Рисунок 40. Сравнение напряжений при сдвиге влажного песка при разных сжимающих давлениях.

При смачивании песка, течение в начале опытов начинается при меньших напряжениях. При этом, в случае с меньшей нагрузкой течение начинается

только с 0.27 радиан, так как в сила трения покоя уменьшается водяной пленкой. В случае с большим давлением, такого количества жидкости недостаточно для устранения залипания в начале опыта. Для смоченного песка:

при P = 140 Па, G = 7.4 кПа;

при P = 560 Па, G = 10.1 кПа.

При смачивании, модуль сдвига гранулированного материала уменьшается.

При смачивании данного объема песка количеством жидкости, превышающим 80 мл, происходит вытеснение воды из рабочей камеры под действием давления.

Наблюдаемые эффекты в экспериментах зависят как от формы частиц среды, так и от размеров, поверхностного трения и сжимающей нагрузки, действующей на исследуемую среду. В ходе опытов наблюдался эффект дилатансии – изменения объема сыпучей среды при сдвиговой деформации [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана лабораторная установка, позволяющая определять упругие модули сыпучих сред. Особенностью данной установки, является простота ее воспроизведения в любой лаборатории при наличии 3Д принтера. Установка показала себя надежной и понятной для пользователя в эксплуатации.

Сыпучий материал деформировался рывками, за счет сухого трения. Согласно полученным результатам исследования, участок линейной зависимости сдвигового напряжения от деформации нельзя определять однозначно. Вследствие деформации среды рывками, мы можем фиксировать лишь дискретный ряд значений угла деформации. Выбор участка графика, на котором происходит линеаризация, зависит от конкретных целей задачи.

В гранулированных средах наблюдается фазовый переход от менее плотной конфигурации к более плотной. При увеличении сжимающей нагрузки, модуль сдвига сыпучей среды увеличивался. Во всех экспериментах со смачиванием сыпучей среды наблюдается уменьшение модуля сдвига. Исследуемые мелкодисперсные среды оказались менее податливыми, чем крупнодисперсные.

Нельзя однозначно связать размер частиц материала с его поведением при деформации. Для того чтобы подтвердить или опровергнуть корелляцию, необходимо сравнить два разных материала с частицами, имеющих разную форму и одинаковую поверхность.

В ходе опытов были обнаружены технические ограничения использования лабораторной установки. При смачивании материала необходимо ограничиваться таким количеством жидкости, чтобы под действием давления, создаваемым в процессе опыта в материале, жидкость не вытеснялась из общего объема исследуемой среды. При большем количестве влаги, жидкость будет проступать сквозь щели между подвижными и неподвижными стенками рабочей камеры, так как она не является герметичной. При массе подвеса M > 8 кг наблюдается выгибание подвижной стенки, что приводит к неравномерному

распределению давления в слоях материала и необъективности результатов. Установка имеет так же нижний предел чувствительности, обусловленным наличием трения в самой конструкции. При массе подвеса M > 0.1кг данные эффекты становятся пренебрежительно малыми. Среда, представленная сферами диаметром = 6мм, не подходит для исследования на данной установке. Скачки напряжения в среде оказались слишком большими для информативного анализа результатов опыта. Средние скачки напряжения должны быть меньше 700 Pa, чтобы в разрешенном диапазоне нагрузок было достаточно точек для объективного анализа результатов.

Дальнейшие цели разработки установки:

1. Увеличение диапазона допустимых нагрузок;
2. Увеличение чувствительности;
3. Увеличение точности;
4. Модернизация механизма приложения нагрузок;
5. Обеспечение защиты механических частей направляющих от попадания в них сыпучего материала;
6. Реализация установки с рабочей камерой с соответствующими характеристиками для исследования более крупнодисперсных сред;
7. Реализация герметичной камеры, позволяющей исследовать взесь сыпучего материала и жидкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арбузов В. Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин //Томск: Издательство Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 200.
2. Лурье А. И. Теория упругости. – 1970.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
4. Eshuis P. et al. Granular leidenfrost effect: Experiment and theory of floating particle clusters //Physical review letters. – 2005. – Т. 95. – №. 25. – С. 258001.
5. Clément E. et al. Pattern formation in a vibrated two-dimensional granular layer //Physical Review E. – 1996. – Т. 53. – №. 3. – С. 2972.
6. Richard P. et al. Slow relaxation and compaction of granular systems //Nature materials. – 2005. – Т. 4. – №. 2. – С. 121.
7. Nedderman R. M. Statics and kinematics of granular materials. – Cambridge University Press, 2005.
8. Métayer J. F. et al. Shearing of frictional sphere packings //EPL (Europhysics Letters). – 2011. – Т. 93. – №. 6. – С. 64003.
9. Schröter M. et al. Phase transition in a static granular system //EPL (Europhysics Letters). – 2007. – Т. 78. – №. 4. – С. 44004.
10. Andreotti B., Forterre Y., Pouliquen O. Granular media: between fluid and solid. – Cambridge University Press, 2013.