

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ПРИ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ В ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЕ

В.Я. Борщев, В.Н. Долгунин, О.О. Иванов

Кафедра "Технологическое оборудование и прогрессивные технологии", ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: зернистая среда; квазидиффузионное перемешивание; сдвиговые деформации.

Аннотация: Предложена сдвиговая ячейка с ленточным конвейером и разработана методика проведения исследований эффектов взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях в зернистой среде. Установлено, что в пространстве между шероховатыми поверхностями канала в ячейке наблюдается достаточно обширная область двухмерного сдвигового потока. Эффекты перемешивания и конвекционного перемещения частиц зернистой среды описаны с помощью уравнения конвективного массопереноса.

В механике сыпучих сред различают два идеализированных режима сдвиговых течений сыпучих материалов [1], принципиально отличающихся по характеру зависимости сдвиговых напряжений от скорости сдвига. В данной работе исследуется так называемый режим "медленного" сдвига. Для него характерно то, что сдвиговые деформации протекают при длительном скользящем контакте частиц друг с другом, а соответствующие напряжения не зависят от скорости сдвига.

Такого рода сдвиговые деформации зернистой среды имеют место в реакторах, сушилках, смесителях, грануляторах и другом оборудовании, и являются причиной эффектов перемешивания и сегрегации частиц обрабатываемого материала. Происходящее при этом перераспределение частиц зернистой среды оказывает значительное влияние на кинетику технологических процессов и качество готовой продукции. Однако в связи с недостаточной изученностью вышеназванных эффектов взаимодействия частиц прогнозировать это влияние, в большинстве случаев, весьма затруднительно.

Описание эффектов взаимодействия частиц сыпучего материала при медленном сдвиге сопряжено со значительными трудностями как теоретического, так и экспериментального характера. До настоящего времени отсутствуют адекватные модели описания эффектов взаимодействия частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, в слое зернистого материала при сдвиговых деформациях. Трудности экспериментального характера заключаются в сложности создания объекта, адаптированного для исследования кинетики эффектов взаимодействия частиц дисперсного материала.

Наиболее широко в практике исследования сдвиговых деформаций применяются либо кольцевая ячейка сдвига [2], либо простая сдвиговая ячейка [3]. Однако использование этих устройств не позволяет получить экспериментальные данные, необходимые для детального анализа эффектов взаимодействия частиц. Так, простая ячейка сдвига применяется, как правило, для анализа эффектов проникновения одиночной контрольной частицей сдвигового потока в режиме циклических деформаций последнего. Кроме того, значительные краевые эффекты, имеющие место в

такой ячейке, существенно ограничивают ее экспериментальные возможности в аспекте получения данных, необходимых для микроструктурного анализа эффектов взаимодействия частиц при сдвиге. В кольцевой ячейке сдвига создается сложная неординарная гидродинамическая обстановка, возникающая вследствие сдвига частиц не только в осевом, но и в радиальном направлении. Это приводит к существенному искажению получаемых экспериментальных данных. Перечисленные недостатки не позволяют получать с помощью известных сдвиговых ячеек экспериментальные данные, адаптированные для детерминированного анализа.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и аналитическому исследованию процесса взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях в зернистой среде.

В работе предлагается конструкция экспериментальной установки для исследования эффектов взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях в зернистой среде. Разработанная установка лишена недостатков, присущих простой и кольцевой сдвиговым ячейкам [2, 3], поскольку эффекты взаимодействия максимально приближены к реальным за счет обеспечения постоянного длительного скользящего контакта частиц друг с другом в широком диапазоне скорости сдвига. Это достигается за счет того, что основным элементом установки (рис. 1) является ленточный конвейер с рабочим органом из шероховатой резинотканевой ленты 6. Приводной 5 и натяжной 8 барабаны конвейера закреплены на раме, которая смонтирована на основании с возможностью изменения угла наклона к горизонту. Нижняя ветвь конвейера проходит в желобе 1 прямоугольного сечения. Желоб закреплен на раме с возможностью перемещения для регулирования зазора между его основанием и лентой конвейера. Установка снабжена бункером 4 для подачи материала в желоб под нижнюю ветвь конвейера.

Исследование эффектов взаимодействия на данной установке предполагает выделение в желобе рабочего участка сыпучего материала, характеризующегося однородной структурой. Для выделения рабочего участка служат заслонки 3, имеющие возможность вертикального перемещения вдоль стенок желоба. Над нижней лентой ветви конвейера установлены направляющие 7, изготовленные из трубок и жестко закрепленные на раме. Тем самым обеспечивается постоянный и равномерный зазор между нижней ветвью ленты конвейера и шероховатым основанием желоба. Привод ленты конвейера осуществляется от электродвигателя через редуктор и цепную передачу. С целью плавного регулирования скорости движения ленты привод снабжен вариатором.

Сдвиговые деформации в слое зернистого материала создаются за счет шероховатости основания желоба 2 и ленты 6 конвейера. Величина шероховатости равна половине диаметра частиц сыпучего материала. Тем самым обеспечиваются условия прилипания частиц зернистого материала на верхней и нижней границах слоя.

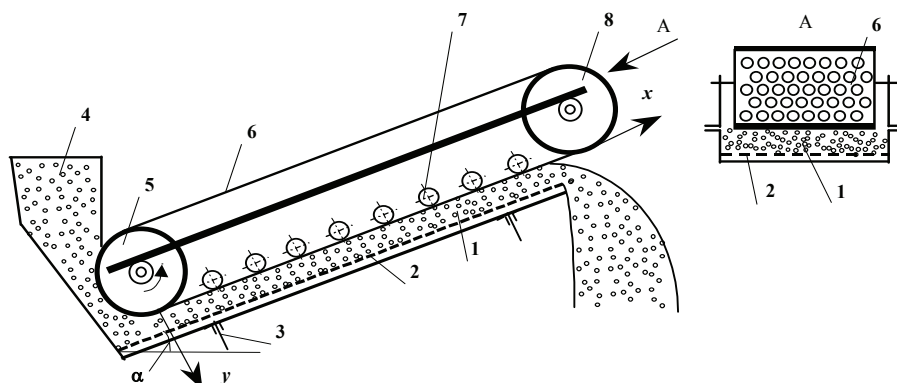


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Методика проведения экспериментального исследования эффектов взаимодействия частиц материала при медленном сдвиге реализуется с использованием индикаторного метода и заключается в следующем. Первоначально конвейер и желоб устанавливаются под определенным углом наклона α к горизонту. Затем включается привод, и с помощью вариатора задается необходимая скорость движения ленты. В зазор между нижней ветвью ленты конвейера и шероховатым основанием желоба из бункера непрерывно подается зернистый материал при работающем конвейере. Для определения профиля скорости в сдвиговом потоке после выхода установки на стационарный режим конвейер останавливается, и в начале рабочего участка желоба через боковую его стенку в слой материала с помощью специального устройства вводится индикатор в количестве, обеспечивающем его импульсный ввод полным сечением канала. В качестве индикатора используются окрашенные частицы исследуемого материала. Затем вновь включается привод конвейера. После прохода нижней ветви ленты конвейера пути, соответствующего длине рабочего участка желоба, привод выключается, с помощью торцевых заслонок в желобе выделяется рабочий участок слоя зернистого материала, и желоб с материалом отделяется от рамы. Затем материал по длине желоба делится вертикальными перегородками на n частей. Далее с помощью вакуумного пробоотборника материал выгружается из каждой i -й части послойно по высоте желоба y . В качестве исследуемого материала при проведении экспериментальных исследований эффекта взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях использованы керамические шары диаметром $6,6 \cdot 10^{-3}$ м. Выбор материала обусловлен достаточно высокой механической прочностью керамических шаров по контактным напряжениям и истиранию.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по изменению концентрации частиц индикатора по длине x и толщине слоя y в желобе. По этим данным определяется среднестатистическая координата смещения частиц индикатора в каждом i -ом элементарном подслое Δx_i за период времени деформации:

$$\Delta x_i = \frac{1}{c_i} \int_0^l c_i(x) dx,$$

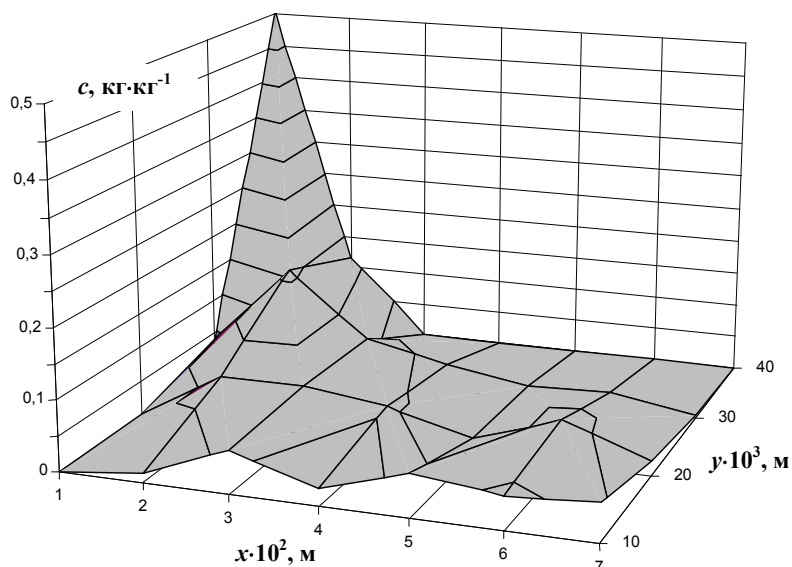


Рис. 2 Распределение частиц индикатора по длине x и толщине y слоя зернистого материала

где Δx_i – среднестатистическая координата смещения частиц индикатора; $c_i(x)$ – текущая концентрация индикатора в подслое Δy_i ; \bar{c}_i – средняя концентрация индикатора в подслое Δy_i .

По известной координате смещения частиц индикатора Δx_i в каждом элементарном подслое Δy_i и времени этого смещения τ (равного времени деформации) определяется средняя скорость движения частиц материала в каждом подслое. На рис. 3 изображен профиль скорости частиц по толщине y слоя сыпучего материала. Дифференцированием полученного профиля скорости определяется скорость сдвига частиц зернистой среды по толщине слоя зернистого материала, т.е. зависимость $du/dy = f(y)$ (рис. 4).

Анализ экспериментальных данных по взаимодействию частиц в слое зернистого материала свидетельствует о наличии достаточно обширной области двухмерного сдвигового потока в пространстве между шероховатыми поверхностями канала, образованного основанием желоба и лентой конвейера.

Проведенный анализ позволил авторам предложить использовать для математического описания эффекта перемешивания и конвекционного перемещения частиц зернистой среды при сдвиговых деформациях уравнение конвективного массопереноса в следующем виде:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\frac{\partial(uc_{cp})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_n D_{\text{диф}} \frac{\partial c}{\partial y} \right), \quad (1)$$

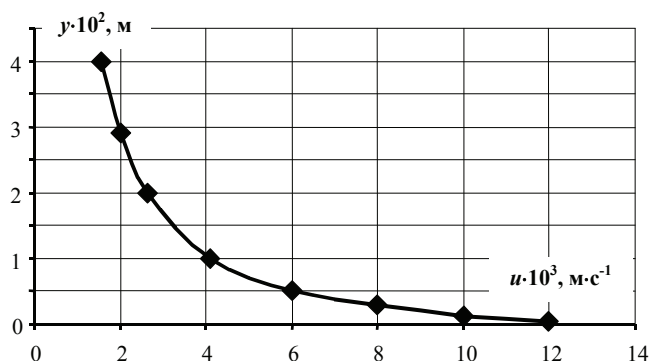


Рис. 3 Профиль скорости движения частиц индикатора по толщине слоя зернистого материала

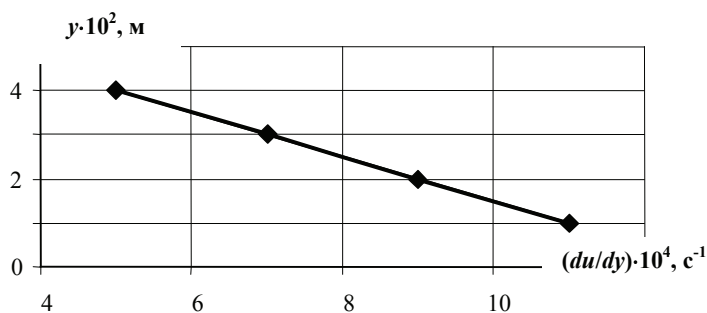


Рис. 4 Профиль скорости сдвига по толщине слоя сыпучего материала

где $D_{\text{диф}}$ – коэффициент квазидиффузионного перемешивания частиц зернистого материала; u – средняя скорость поступательного движения частиц в направлении сдвига; c – концентрация индикатора; ρ_n – насыпная плотность.

Коэффициент квазидиффузии рассчитан аналитически с учетом структурных и кинематических характеристик (порозности ε и скорости сдвига du/dy) движущегося слоя зернистого материала по формуле

$$D_{\text{диф}} = \frac{1}{2} V' s = \frac{1}{2} \frac{du}{dy} \cdot bd \cdot s, \quad (2)$$

где $V' = \left(\frac{du}{dy}\right) \cdot bd$ – осредненная скорость хаотических перемещений частиц;

$b = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6(1-\varepsilon)}}$ – геометрический параметр; $s = \left(\frac{b}{b_0} - 1\right) d$ – среднее расстояние между частицами; b_0 – значение геометрического параметра b при минимально возможной порозности слоя $\varepsilon_0 = 0,2595$.

Уравнение (1) решено при начальных условиях

$$c(0, x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 0,04 \\ 0, & x < 0, x > 0,04 \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия сформулированы, исходя из отсутствия материальных потоков через границы слоя сыпучего материала (основание желоба и ветвь конвейерной ленты).

Средняя скорость $u(y)$ поступательного движения частиц в направлении сдвига определена на основе экспериментально полученного профиля скорости.

В результате решения уравнения (1) получены профили концентрации частиц индикатора по толщине слоя для различных поперечных сечений установившегося сдвигового потока.

Сравнение экспериментальных и расчетных профилей (рис. 5) свидетельствует о возможности аналитического прогнозирования эффекта перемешивания при сдвиге зернистой среды в условиях относительно длительных скользящих контактов между частицами.

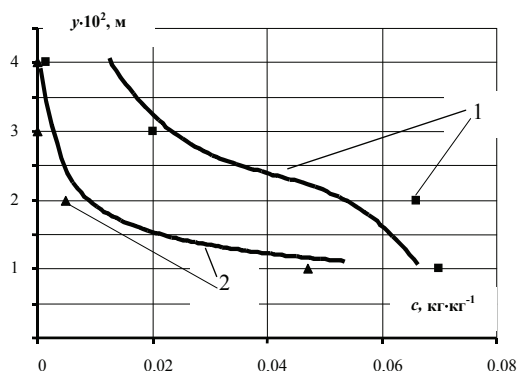


Рис. 5 Профили концентрации частиц индикатора по толщине слоя зернистого материала для поперечных сечений потока (1 – 0,3 м, 2 – 0,6 м) при осредненной скорости сдвига $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$: точка – эксперимент, сплошная линия – расчет

Список литературы

1. Ю.В. Голованов, И.В. Ширко. Обзор современного состояния механики быстрых движений гранулированных материалов / В кн. Механика гранулированных сред. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
2. Stephens D.J. and Bridgwater J., Powder Technology 21, P. 29, 1978.
3. Bridgwater J., Cooke M.N. and Scott A.M. Trans. Ichem. E., 56, P. 157, 1978.

Investigation of Particles Interaction Effects under Shear Deformation in Granular Medium

V.Ya. Borschov, V.N. Dolgunin, O.O. Ivanov

Department "Technological Equipment and Progressive Technologies", TSTU

Key words and phrases: granular medium; shear deformation; quasi-diffusion mixing.

Abstract: The shear cell with tape conveyor is offered and the procedure of examination of particles interaction effects under shear deformation in granular medium is developed. It is found out that in the space between rough surfaces of the canal in a cell quite extensive range of bi-dimensional shear stream is observed. The effects of mixing and conventional movement of particles in granular medium are described with the help of convective mass transfer equation.

Untersuchung der Effekte der Zusammenarbeit der Teilchen bei den Schiebedeformationen in der körnigen Umgebung

Zusammenfassung: Es ist die Schiebezelle mit dem Bandfließband angeboten und es ist die Methodik der Durchführung der Forschungen der Effekte der Zusammenarbeit der Teilchen bei den Schiebedeformationen in der körnigen Umgebung entwickelt. Es ist festgestellt, daß im Raum zwischen den unebenen Oberflächen des Kanales in der Zelle das genügend umfangreiche Gebiet des zweidimensionalen Schiebestroms beobachtet wird. Die Effekte der Vermischung und der konvektiven Umstellung der Teilchen des körnigen Umgebung sind mit Hilfe der Gleichung der konvektiven Massenübertragung beschrieben.

Etude des effets de l'interaction des particules avec les déformations de cisaillement dans le milieu granulé

Résumé: On a proposé une cellule de cisaillement avec une chaîne à ruban et l'on a élaboré la méthode des études des effets de l'interaction des particules avec les déformations de cisaillement dans le milieu granulé. On a constaté que dans l'espace formé par les surfaces raboteuses du canal on observe un domaine assez grand du flux de cisaillement à deux dimensions. Les effets du mélange et du transfert de convection des particules du milieu granulé sont décrits à l'aide de l'équation de convection du transfert de masse.