

Авторефер,
П 52

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Инженер В.С. Полтораки

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СДВИГА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
ПО ПОВЕРХНОСТЯМ

Специальность 05.175 - Машины и аппараты пищевой
промышленности

Переучет 1987

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1972

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Инженер В.С.Полторак

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СДВИГА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
ПО ПОВЕРХНОСТЯМ

Специальность 05.175 - Машины и аппараты пищевой
промышленности

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

✓ 012000

Одесский технологический
институт пищевой промышленности
Одесса - 1972
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Платонов П.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Гертинский В.В.
кандидат технических наук, доцент Лебединский В.Г.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский институт "Промэнергопроект".

Автореферат разослан "20" мая 1972 г.

Защита диссертации состоится "23" мая 1972 г.
на заседании Ученого Совета механического и инженерно-экономического факультетов Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИППЛ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим прислать в Ученый Совет института по адресу: г. Одесса, А-39, ул. Свердлова, 112, ОТИППЛ.

Ученый секретарь Совета

Л. Запорожца /Л.А.Запорожец/

В в е д е н и е

Сыпучие материалы используются в самых различных областях народного хозяйства. Наибольшее количество сыпучих материалов перерабатывается в пищевой, горнодобывающей и химической промышленности.

В ходе операций по переработке, транспортированию, хранению неизбежны контактирование и относительный сдвиг сыпучих материалов и рабочих и ограждающих поверхностей машин, аппаратов, хранилищ. Характер процесса сдвига, его особенности, силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу оказывают влияние на эффективность технологических процессов, их энергоемкость, во многом определяют конструктивные и прочностные параметры оборудования. Отсюда, естественно, вытекает необходимость точного определения сил взаимодействия между сыпучими материалами и твердыми поверхностями, знания динамики процесса сдвига, влияния режима проведения процесса сдвига на его характеристики. Количественная и качественная оценка этих явлений позволила бы максимально использовать особенности сдвиговых процессов, выбирать наиболее целесообразный режим этих процессов, правильно учитывать силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу при расчете и конструировании технологического оборудования, изменять и регулировать эти силы.

К сожалению, до настоящего времени наши знания в области сдвиговых процессов сыпучих материалов по поверхностям далеки от полноты. Такое положение отмечалось в решениях целого ряда Всесоюзных, международных конференций и симпозиумов по механике сыпучих материалов. Это вызывает необходимость постановки новых исследований процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям.

I. Состояние вопроса.

Развитие взглядов на процесс сдвига сыпучих материалов по поверхностям в значительной мере повторяет путь, пройденный наукой о трении твердых тел. Это объясняет проводимую при решении прикладных задач механики сыпучих материалов аналогию между процессами сдвига сыпучих материалов по поверхностям и относительного сдвига твердых поверхностей.

Анализ состояния изученности вопросов, связанных с процессом сдвига сыпучих материалов по поверхностям, показывает, что, несмотря на обилие экспериментальных данных, в настоящее время отсутствует какая-либо теория, объясняющая закономерности процесса сдвига. Большинство исследователей, работающих в области механики сыпучих материалов, отмечает несостоятельность законов Кулона. Многие исследователи, отмечая отдельные особенности процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям, при подходе к процессу сдвига в целом рассматривают его как относительный сдвиг двух твердых поверхностей, что находит отражение в ряде расчетных формул для решения прикладных задач механики сыпучих материалов, в методиках и конструкциях некоторых приборов для исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям.

В настоящее время отсутствует возможность определения аналитическим путем достаточно точного значения силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхности; большинство исследователей указывает на изменчивость силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхностям как от физико-механических свойств сыпучих материалов в целом, частиц сыпучих материалов и поверхностей, так и от условий проведения процесса сдвига. Характер зависимостей сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхностям от различных факторов не установлен; имеющиеся экс-

периментальные данные по этому вопросу противоречивы.

Имеющиеся экспериментальные данные о динамике процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям и явлениях, сопровождающих этот процесс так же довольно противоречивы и недостаточно полно характеризуют процесс сдвига.

Сравнение и анализ конструкций приборов, предназначенных для исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям, показал, что большинству из них присущ ряд существенных недостатков. Результаты экспериментальных исследований процесса сдвига, полученные с помощью различных приборов и установок, значительно отличаются друг от друга, что вызывает необходимость, наряду с разработкой более совершенных конструкций приборов, их стандартизации.

Приведенные соображения позволили определить направление реферируемой работы, целью которой является раскрытие механизма процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям, разработка методов и приборов для исследования этого процесса, изучение природы образования силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхностям и получение экспериментальных данных, позволяющих количественно и качественно оценить и описать этот процесс.

О этой цели в ходе исследования выполнялись следующие задачи:

- разработка конструкции экспериментальной установки для исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям, позволяющей получить достоверную информацию о процессе сдвига;
- выяснение структурных изменений, имеющих место в пристенных слоях сыпучего материала в ходе процесса сдвига;
- исследование динамики процесса сдвига сыпучего материала по поверхности под действием сдвигающего усилия при плавном и ступен-

- чатом увеличении последнего от 0 до того значения, при котором начинается безостановочное движение сыпучего материала по поверхности
- выяснение влияния условий проведения процесса сдвига на величину силы сопротивления сыпучего материала сдвигу;
 - выяснение зависимостей коэффициентов сопротивления сдвигу от условий проведения процесса сдвига;
 - определение величины относительного смещения, соответствующего максимальному значению силы сопротивления сдвигу; определение зависимостей ее от условий проведения процесса сдвига;
 - определение толщины активной зоны сдвига и ее зависимостей от условий проведения процесса сдвига;
 - изучение возможных форм движения сыпучих материалов по поверхностям и условий их образования.

II. Теоретические предпосылки. Рабочая гипотеза.

Анализ явлений, сопровождающих процессы внешнего трения твердых тел и сдвига сыпучих материалов по поверхностям, и отдельных особенностей этих процессов показал, что эти процессы имеют ряд существенных качественных и количественных отличий, позволяющих предполагать, что и механизмы этих процессов различны. Следовательно, рассмотрение процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям по аналогии с внешним трением твердых тел не отвечает действительности.

Для приведения системы "сыпучий материал - поверхность" в безостановочное относительное движение удельное сдвигающее усилие τ должно превысить определенную величину, равную максимальной удельной силе сопротивления сыпучего материала сдвигу по поверхности $\tau_{срв}$.

В случае ступенчатого увеличения сдвигающего усилия при $\tau < \tau_{срв}$ характер изменения величины относительного смещения δ

сыпучего материала и поверхности во времени t может быть описан выражением:

$$\tau = H\delta + B\dot{\delta} \quad (1)$$

(модель упруго-вязкого тела Фойгта), где H и B - постоянные коэффициенты, характеризующие упругие и вязкие свойства сыпучего материала.

Интегрирование выражения (1) при $\tau = \text{const}$, $t = 0$, $\delta = 0$ приводит к выражению (2):

$$\delta = \frac{\tau}{H} \left[1 - \exp\left(-\frac{Ht}{B}\right) \right] \quad (2)$$

Частицы сыпучего материала в пристенных слоях составляют определенные структурные образования. Под действием внешних сил, разрушающих пристенные образования, эти частицы способны переходить в новые положения, отличающиеся более устойчивым равновесием.

Сделано предположение, что перестройка структуры в пристенной зоне под действием сдвигающего усилия связана с появлением дополнительных смещений δ^* , направление которых совпадает с направлением сдвигающего усилия τ . При разгрузке, когда $\tau \rightarrow 0$, упругость структуры сыпучего материала стремится вернуть систему в первоначальное положение, но при этом она не способна компенсировать δ^* , и деформации, вызванные перестройкой структуры, остаются в виде остаточной деформации. При увеличении τ увеличивается δ , что вызывает дальнейшую перестройку структуры и дальнейший рост δ^* . Если скорость увеличения δ меньше скорости увеличения δ^* , то в конце концов наступит момент, когда силы реакции будут не в силах компенсировать возникшие δ^* , что приведет к резкому увеличению общего смещения, т.е. переходу системы к безостановочному относительно движению при $\tau = \text{const}$.

Принятую физическую модель процесса сдвига можно представить в виде диаграммы (рис. 1), где по оси абсцисс отложено смещение сыпучего материала δ , а по оси ординат - скорости увеличения

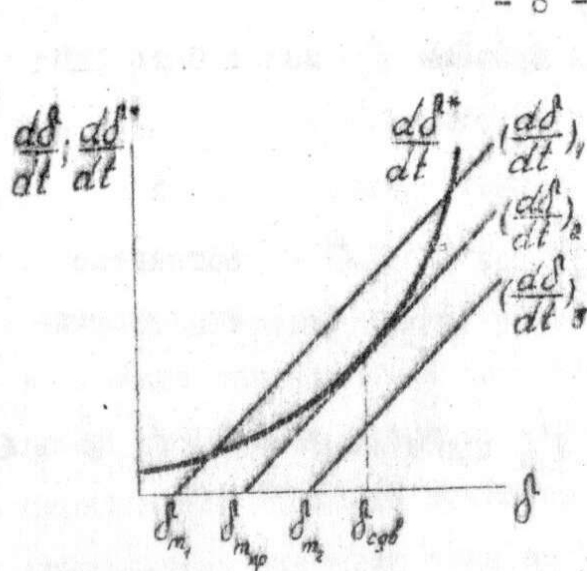


Рис. 1.

смещения $\frac{d\delta}{dt}$ и смещения $\frac{d\delta^*}{dt}$, возникающего в результате перестройки структуры.

Как видно из диаграммы, касание кривых $\frac{d\delta}{dt}(\delta)$ и $\frac{d\delta^*}{dt}(\delta)$ характеризует неустойчивое состояние системы "сыпучий материал - поверхность", соответствующее ее переходу в состояние безостановочного относительного движе-

ния. Действительно, при $\tau = \tau_{cpb}$ малейшие флуктуации в системе приведут к $\delta \rightarrow \infty$, т.е. переходу процесса сдвига из первой фазы во вторую.

Таким образом, условие перехода процесса сдвига в фазу безостановочного относительного движения сыпучего материала и поверхности записывается как условие касания кривых $\frac{d\delta}{dt}(\delta)$ и $\frac{d\delta^*}{dt}(\delta)$:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta = \delta_{cpb}} = \left. \frac{d\delta^*}{dt} \right|_{\delta = \delta_{cpb}}; \quad (3)$$

$$\left. \frac{d^2\delta}{dt^2} \right|_{\delta = \delta_{cpb}} = \left. \frac{d^2\delta^*}{dt^2} \right|_{\delta = \delta_{cpb}}. \quad (4)$$

Вид функции $\frac{d\delta}{dt}(\delta)$ определим согласно выражению (1):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{(\delta_{max} - \delta)H}{B}. \quad (5)$$

Вид функции $\frac{d\delta^*}{dt}(\delta)$ определим выражением, аналогичным распределению Гиббса, определяющему вероятность нахождения подсистемы частиц статистического ансамбля в некотором состоянии с энергией E :

$$\frac{d\delta^*}{dt} = Q \exp\left(-\frac{E}{\Pi^*}\right), \quad (6)$$

где Q - постоянная; Π^* - приведенный коэффициент плотности укладки:

$$\Pi^* = \frac{\kappa - \kappa_0}{\kappa_{кр} - \kappa}, \quad (7)$$

где $\kappa = \frac{\gamma_{ср}}{\gamma_{об}}$ - коэффициент плотности укладки ($\gamma_{ср}$ - удельный вес сыпучего материала; $\gamma_{об}$ - объемный вес сыпучего материала), κ_0 соответствует состоянию сыпучего материала в начале процесса сдвига, при $\tau = 0$; $\kappa_{кр}$ - критическая плотность укладки, устанавливающаяся в пристенной зоне к моменту перехода процесса сдвига из первой фазы во вторую.

Решение системы уравнений (3, 4) приводит к выражениям:

$$\delta_{сдв} = \frac{\tau_{сдв}}{H} + \frac{\Pi^{*2}(\delta_{сдв})}{E} \frac{d\delta}{d\Pi^*(\delta)}; \quad (8)$$

$$\frac{Q \exp\left(-\frac{EH^2}{C^2 \tau_{сдв}^2}\right)}{C \tau_{сдв}^2} BH = e, \quad (9)$$

являющимися критическими условиями сдвига.

Дальнейшие преобразования и введение безразмерных комплексов:

$$\eta = \frac{QBH}{C} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{EH^2}{C^2} \quad (10)$$

позволяют представить критические условия сдвига в виде:

$$\delta_{сдв} = \frac{\tau_{сдв}}{H} + \frac{\tau_{сдв}^2}{\nu} C; \quad (11)$$

$$\eta \exp\left(-\frac{\nu}{\tau_{сдв}^2}\right) = e \tau_{сдв}^2. \quad (12)$$

В случае плавного увеличения сдвигающего усилия τ , до тех пор, пока его величина не достигнет определенного значения, перемещения частиц, входящих в пристенные структурные образования, не произойдет. Относительное смещение δ в этот период является результатом упругих деформаций частиц сыпучего материала и, в основном, пристенных структурных образований и должно носить упругий характер.

С дальнейшим ростом τ наступает момент, когда силы тре-

ния на контактах частиц не могут противостоять переходу некоторых частиц в положения более устойчивого равновесия; происходит разрушение значительного количества пристенных структурных образований, что приводит к резкому увеличению δ - скачку смещения, который вызывает дальнейшую перестройку структуры пристенных слоев сыпучего материала в сторону увеличения плотности укладки. Смещение при скачке должно носить необратимый характер.

В результате произошедших при скачке смещения структурных перестроек сыпучий материал в пристенной зоне приобретает большую прочность по отношению к сдвигающему усилию (прочность сыпучего материала определяется, в конечном счете, плотностью укладки его частиц). Это приведет к прекращению роста относительного смещения δ при постоянном сдвигающем усилии τ .

С дальнейшим увеличением τ процесс повторяется: вначале происходит плавное увеличение δ , затем срыв и скачек δ ; такой скачкообразный характер увеличения δ будет иметь место до тех пор, пока пристенные слои сыпучего материала не приобретут свойств, при которых дальнейшее увеличение их плотности укладки при действующих условиях проведения процесса сдвига становится невозможным.

Дальнейшее увеличение τ приведет к переходу процесса сдвига во вторую фазу - фазу безостановочного относительного движения сыпучего материала и поверхности.

В момент перехода процесса сдвига из первой фазы во вторую сила сопротивления сыпучего материала сдвигу по поверхности приобретает максимальное (для данных условий проведения процесса сдвига) значение.

III. Методика экспериментальных исследований.

Основным требованием при разработке конструкции экспери-

ментальной установки для исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям было максимальное приближение экспериментального процесса к процессам, имеющим место в производственных машинах и аппаратах, и получение достоверной информации в ходе процесса сдвига.

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из измерительной ячейки I, загрузочного устройства II (I - установочный кронштейн; 2 - бункер с шибром 3 и самотеком 4); сдвигающего устройства III (5 - сменный бак для воды, подвешенный к рабочему цилиндру измерительной ячейки с помощью шарнирного узла 6; 7 - устройство, обеспечивающее постоянство расхода подаваемой в

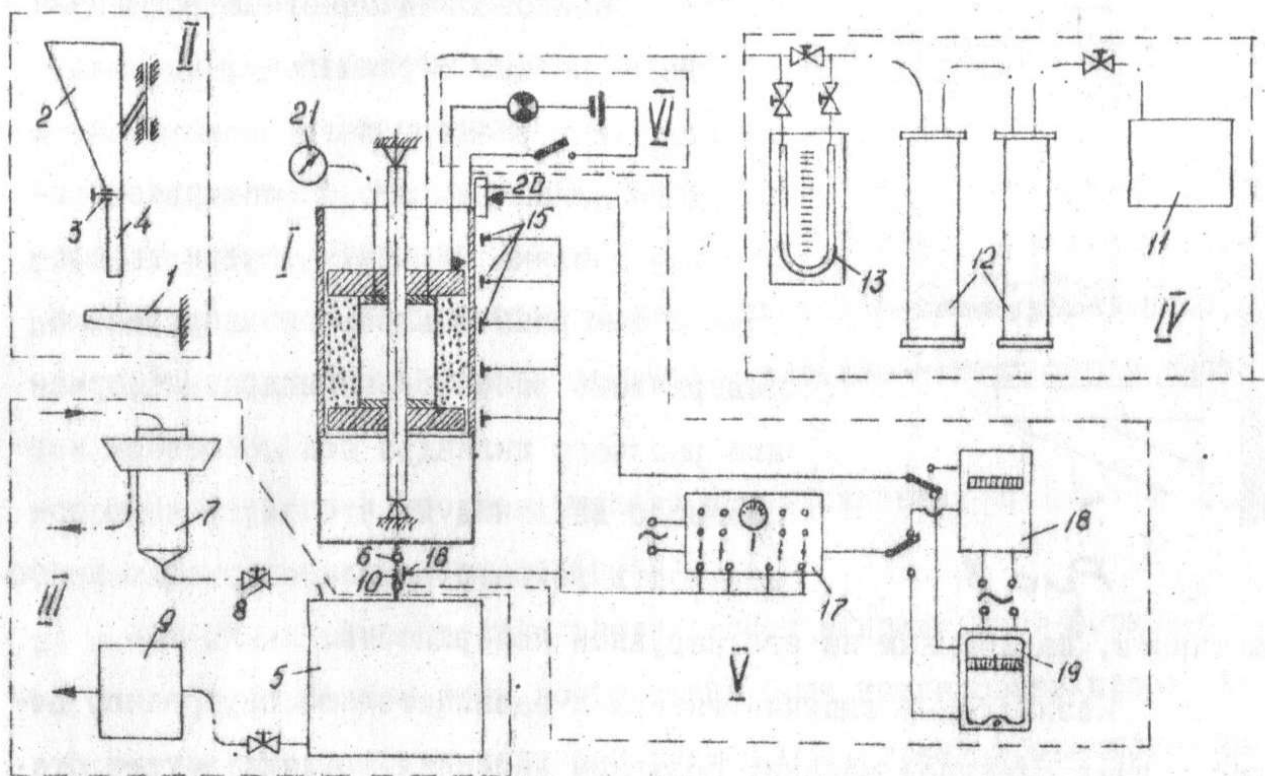


Рис. 2.

бак 5 воды; 8 - регулировочный вентиль; 9 - откачивающий насос); пневмосистемы IV для создания и поддержания неизменным в процессе сдвига равномерно распределенного нормального давления сыпучего материала на внутреннюю поверхность рабочего цилиндра измерительной ячейки (II - компрессор; 12 - демпфирующие емкости; 13 - U-об-

равный манометр); системы измерения $У$ (15, 16 - тензодатчики; 17 - тензоусилитель; 18 - шлейфный осциллограф; 19 - милливольтметр; 20 - датчик перемещения; 21 - манометр); сигнализации У1.

Измерительная ячейка (рис. 3) состоит из станины I с подвижным 2 и неподвижным 3 центрами; установочного стержня 4; ограничительных дисков 5 и 6; сменных стаканов с рабочей 8 и тарировочными мембранами и сетчатым ограничительным цилиндром 9; рабочего цилиндра 10, внутренняя поверхность которого является поверх-

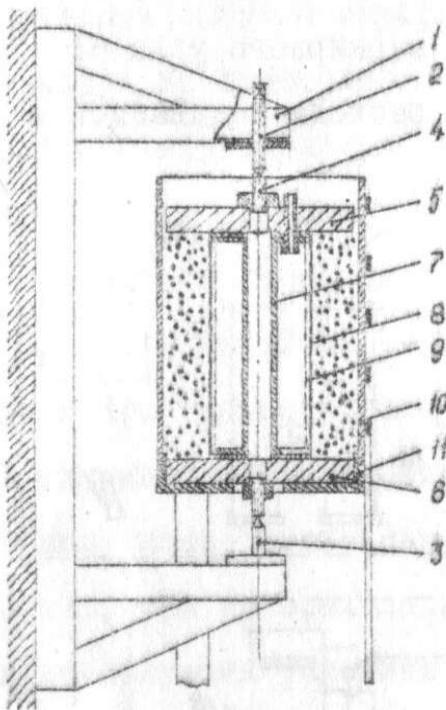


Рис. 3.

ностью сдвига; съемного установочного кольца II, крепящегося к нижнему ограничительному диску 6.

Тарировочная мембрана выполнена из тонкой резины с размерами, несколько превышающими размеры внутренней полости рабочего цилиндра. Это обеспечивает равенство давления воздуха внутри тарировочной мембраны давлению на внутреннюю поверхность рабочего цилиндра. Деформации рабочего цилиндра под действием нормального давления на его внутреннюю поверхность регистрируются с помощью тензо-

датчиков, наклеенных на его наружной поверхности. Исследуемый сыпучий материал засыпается во внутреннюю полость измерительной ячейки; подъемом давления воздуха внутри стакана с мембраной создается определенное давление сыпучего материала на внутреннюю поверхность рабочего цилиндра, при котором необходимо провести процесс сдвига; снимается установочное кольцо. После этого рабочий цилиндр удерживается от соскальзывания вниз только за счет силы сопротивления сыпучего материала сдвигу по поверхности.

В бак сдвигающего устройства подается с заранее отрегулированным расходом вода (при ступенчатом увеличении сдвигающего усилия вместо бака к шарнирному узлу подвешивается штанга с терелкой, на которую укладываются гири). Производится регистрация показаний приборов, характеризующих количественную и качественную стороны процесса сдвига.

Отдельные особенности процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям исследовались с помощью сдвиговых приборов прямого действия и на вращающемся приборе.

Силовые характеристики процесса сдвига пшеницы по поверхности натурального силоса на Одесском портовом элеваторе определялись с помощью тензометрических датчиков, конструкция которых разработана в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова.

Для того, чтобы иметь уверенность, что исследуемые свойства сыпучего материала присущи не только данному материалу, а, по крайней мере, большинству мелкозернистых сыпучих материалов, необходимо было исследовать процесс сдвига по поверхностям сыпучих материалов:

- а) органического и неорганического происхождения;
- б) монодисперсных и полидисперсных;
- в) с частицами относительно правильной и неправильной формы.

На основании этих соображений были исследованы процессы сдвига по поверхностям железной руды ЦГОКа, гранулированного полистирола, пшеницы, прбса, стеклянных шариков.

В ходе экспериментов исследовалось влияние параметров, определяющих условия проведения процесса сдвига (нормального давления σ сыпучего материала на поверхность, геометрической площади контакта S сыпучего материала и поверхности, скорости увеличения сдвигающего усилия \dot{U} , шероховатости поверхности) на ка-

рактические характеристики процесса сдвига. Диапазоны изменения параметров в ходе экспериментов определялись, с одной стороны, их изменением в процессах сдвига, имеющих место на практике, с другой - конструктивными особенностями приборов.

При обработке экспериментальных данных использован аппарат вариационной статистики, позволяющий оценить достоверность результатов исследования.

IV. Анализ результатов экспериментального исследования.

Исследование характера увеличения смещения в ходе процесса сдвига показало, что в случае ступенчатого увеличения удельного сдвигающего усилия τ при его небольших величинах ($\tau \ll \tau_{сдв}$)

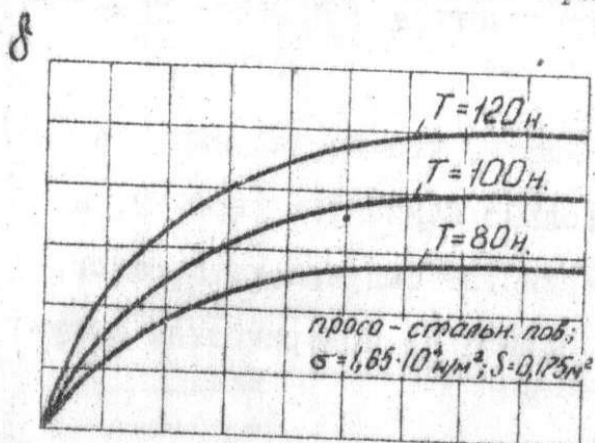


Рис. 4.

происходит относительное смещение вполне определенной величины (рис. 4). Характер зависимости $\delta(t)$ близок к экспоненциальному.

Ступенчатое уменьшение сдвигающего усилия τ приводит к экспоненциальному уменьшению δ , которое стремится к некоторому постоянному значению δ_{min} . Величина δ_{min} существенно зависит от первоначальной величины сдвигающего усилия τ . При $\tau \rightarrow 0$ $\delta_{min} \rightarrow 0$.

При большой величине τ ($\tau > \tau_{сдв}$) характер изменения δ совершенно иной. Экспоненциальный характер, наблюдающийся в первоначальный период процесса сдвига, начиная с некоторого момента времени резко изменяется и δ начинает увеличиваться до ∞ при $\tau = const$.

Результаты исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям под действием равномерно увеличивающегося

сдвигающего усилия так же подтвердили правомочность разделения процесса сдвига на две фазы, отличающиеся друг от друга как качественными, так и количественными характеристиками. Первая фаза характеризуется ростом смещения δ сыпучего материала по поверхности под действием увеличивающегося сдвигающего усилия τ . С прекращением увеличения τ рост δ так же приостанавливается. С переходом процесса сдвига во вторую фазу для увеличения смещения δ отпадает необходимость в дальнейшем увеличении сдвигающего усилия τ . Вторая фаза процесса сдвига характеризуется ростом δ под действием постоянного τ определенной величины.

Процесс сдвига для всех исследованных сыпучих материалов носит ярко выраженный скачкообразный характер (рис. 5). Период

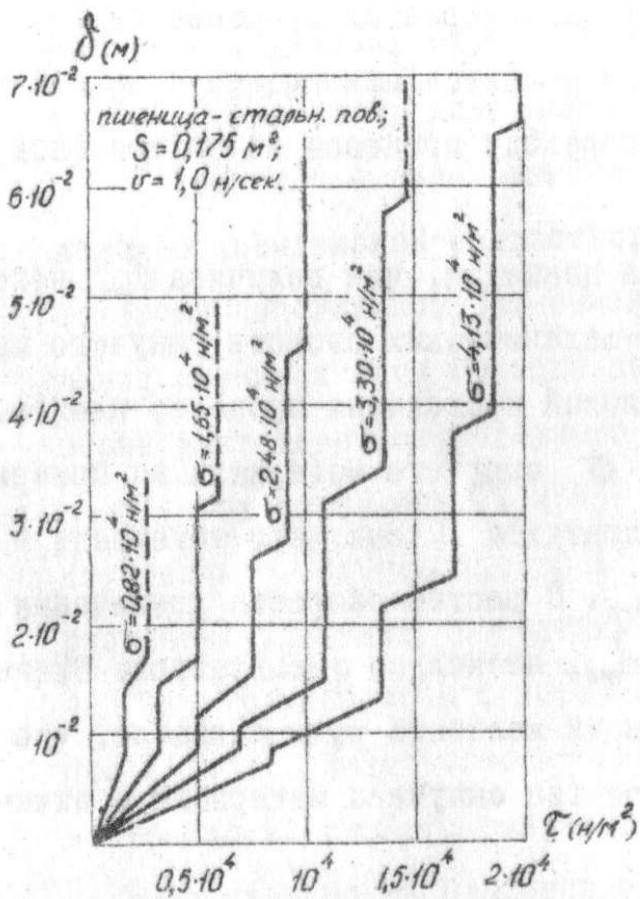


Рис. 5.

плавного увеличения δ сменяется его скачком, затем снова наступает период плавного увеличения δ и т.д., пока не наступит переход процесса во вторую фазу.

Скачкообразный характер увеличения смещения в первой фазе подтверждает предположение о структурных перестройках в пристенных слоях сыпучего материала в первой фазе процесса сдвига, приводящих к увеличению плотности укладки частиц сыпучего материала в пристенных слоях.

Экспериментально увеличение плотности укладки при структурных перестройках подтверждается тем, что во время скачка смещения давление воздуха в стакане с рабочей мембраной резко падает,

тогда как при плавном увеличении смещения оно практически остается постоянным. Падение давления во время скачка смещения обнаруживается по U -образному манометру в результате саморегулирования постоянства давления воздуха в стакане.

В общем случае, с каждым новым циклом увеличения смещения абсолютная величина скачка смещения растет, а величина участка плавного увеличения смещения уменьшается.

Увеличение нормального давления σ сыпучего материала на поверхность, скорости увеличения сдвигающего усилия U и шероховатости поверхности приводит к росту общего количества циклов увеличения смещения в первой фазе процесса сдвига. При этом возрастают скачки смещения.

Одной из наиболее важных характеристик процесса сдвига сыпучего материала по поверхности является максимальная величина смещения δ_{max} , соответствующая переходу процесса из первой фазы во вторую.

Результаты экспериментов показали, что величина δ_{max} постоянна и зависит как от физико-механических свойств сыпучего материала и поверхности, так и условий проведения процесса сдвига. Увеличение нормального давления σ сыпучего материала на поверхность и геометрической площади контакта S сыпучего материала и поверхности приводит к росту δ_{max} . С ростом скорости увеличения сдвигающего усилия U величина δ_{max} несколько уменьшается. Эксперименты по сдвигу различных фракций железной руды показали, что с увеличением среднего размера частиц сыпучего материала величина δ_{max} так же увеличивается.

После перехода процесса сдвига сыпучего материала во вторую фазу скачкообразный характер увеличения δ сменяется плавным. Несмотря на относительное перемещение частиц, изменений плотности укладки в пристенных слоях сыпучих материалов во второй фазе про-

цесса сдвига не наблюдалось.

Результаты экспериментов показали возможность образования во второй фазе процесса сдвига трех видов относительного движения сыпучих материалов и поверхностей:

1. движение без каких-либо (по крайней мере визуально наблюдаемых) изменений образовавшейся в первой фазе процесса сдвига структуры пристенных слоев. Этот вид движения возникает при малой шероховатости поверхности и большом нормальном давлении сыпучего материала на поверхность;

2. движение с образованием пристенного слоя сыпучего материала с переменным градиентом относительной скорости по глубине и отличной от 0 относительной скоростью контактирующих с поверхностью частиц сыпучего материала. Наиболее распространенный вид относительного движения; возникает при нормальном давлении и шероховатости поверхности, колеблющихся в широком диапазоне;

3. движение с образованием у поверхности слоя материала с нулевой относительной скоростью; сдвиг остальных слоев происходит по этому неподвижному относительно поверхности слою. Этот вид движения возникает при большой шероховатости поверхности и небольших нормальных давлениях сыпучего материала на поверхность.

Существование I и III видов относительного движения очень неустойчиво. Их переход во II вид движения происходит при самых различных условиях проведения процесса сдвига.

Толщина зоны с переменной структурой сыпучего материала при II и III видах относительного движения непостоянна и зависит не только от свойств сыпучего материала и поверхности, но и от условий проведения процесса сдвига; так, например, с увеличением нормального давления σ сыпучего материала на поверхность толщина h зоны с переменной структурой уменьшается.

Для практики наиболее важны силовые характеристики процес-

са сдвига сыпучих материалов по поверхностям.

Результаты исследования сдвига стальной пластины по связанным частицам сыпучих материалов показали, что между силами трения покоя T_0 и нагрузкой N для одной и той же пары материалов сохраняется довольно строгая прямая пропорциональность, а коэффициенты трения покоя μ при различных нагрузках остаются постоянными.

Силы трения скольжения T_0' для частиц каждого сыпучего материала меньше сил трения покоя T_0 , а коэффициенты трения скольжения меньше коэффициентов трения покоя на $8 + 12\%$. Эффект предвзательного смещения, ввиду малости его величины, не наблюдался.

Экспериментальное исследование удельного сопротивления τ пшеницы сдвигу по стальной пластине в условиях натурального элеваторного силоса, проведенное с помощью настенных тензометрических датчиков, показало, что между нормальным давлением σ на поверхность силоса, увеличивающимся с ростом высоты слоя пшеницы над датчиком, и удельным сопротивлением сдвигу τ на участке, где движение пшеницы при выпуске происходит всем столбом, прямая пропорциональность отсутствует.

Коэффициент сопротивления сдвигу f с ростом высоты слоя пшеницы над датчиком и, как следствие, увеличением нормального давления σ на поверхность сдвига, увеличивается.

Результаты исследования сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхностям и их зависимостей от условий проведения процесса сдвига и свойств материалов показали, что для всех исследуемых сыпучих материалов между максимальной удельной силой сопротивления сдвигу τ и нормальным давлением σ сыпучего материала на поверхность в исследованном диапазоне изменения последнего прямая пропорциональность отсутствует.

Коэффициенты сопротивления сдвигу f сыпучих материалов по поверхностям с ростом нормального давления σ сыпучих мате-

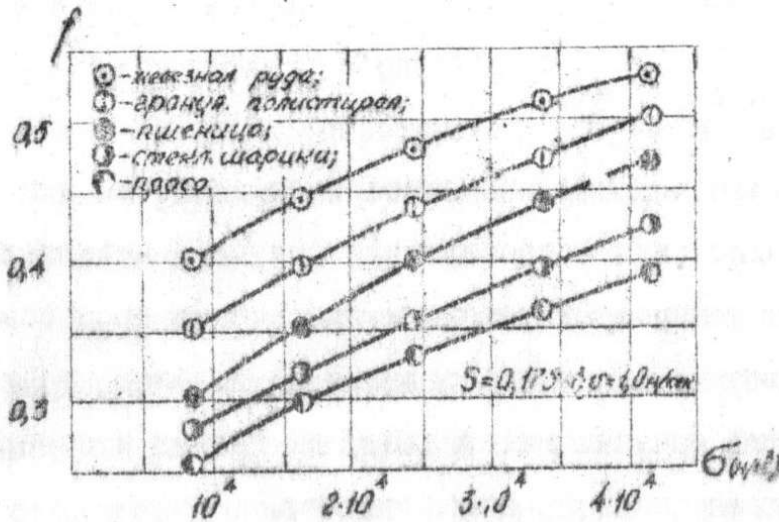


Рис. 6.

риалов на поверхности увеличиваются, оставаясь при этом меньше коэффициентов трения покоя μ частиц этих материалов в связанном состоянии (рис. 6).

Характер зависимости удельных сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхности

от нормального давления на поверхность в значительной мере зависит от остальных условий проведения процесса сдвига. Так, рост скорости увеличения сдвигающего усилия U приводит к уменьшению сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу при одинаковых прочих условиях проведения процесса сдвига. Коэффициенты сопротивления сыпучих материалов сдвигу с ростом скорости увеличения сдвигающего усилия уменьшаются.

С уменьшением геометрической площади контакта S сыпучих материалов и поверхностей удельные силы сопротивления τ сыпучих материалов сдвигу несколько увеличиваются. Коэффициенты сопротивления f сыпучих материалов сдвигу так же увеличиваются.

Эксперименты, проведенные с различными фракциями железной руды, показали, что с увеличением среднего размера частиц сыпучего материала удельные силы сопротивления сыпучих материалов сдвигу τ и их коэффициенты сопротивления сдвигу f увеличиваются.

Результаты исследования второй фазы процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям показали, что для всех исследованных материалов удельные силы сопротивления движению по поверхности и коэффициенты сопротивления движению меньше, чем удельные силы сопротивления сдвигу и коэффициенты сопротивления сдвигу при оди-

наковых условиях проведения процесса сдвига на $5 \pm 27\%$.

В ы в о д ы

1. Отсутствие в настоящее время возможности определения аналитическим путем величины силы сопротивления сыпучего материала сдвигу по поверхности в конкретных условиях проведения процесса сдвига вызвано изменчивостью сил сопротивления сдвигу как от физико-механических свойств сыпучих материалов, их частиц и поверхностей, так и условий проведения процесса сдвига.

2. Проведенный сравнительный анализ явлений, сопровождающих процесс сдвига сыпучих материалов по поверхностям и процесс относительного сдвига двух твердых поверхностей, показал, что между этими процессами имеется ряд существенных отличий, позволяющий предполагать, что и механизмы этих процессов различны. Это говорит о неправомерности практики рассмотрения процесса сдвига сыпучих материалов по поверхности по аналогии с процессом относительного сдвига твердых поверхностей.

3. Выдвинута рабочая гипотеза о двухфазном характере процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям под действием сдвигающего усилия, обусловленном структурными перестройками в пристенных слоях сыпучих материалов в результате проявления сил трения между поверхностью и прилегающими к ней частицами.

4. Экспериментальные данные, полученные с помощью разработанной установки для исследования процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям, подтверждают положения предложенной гипотезы. Процесс сдвига развивается по двум фазам, качественно и количественно отличающимся друг от друга: первая фаза характеризуется ростом относительного смещения сыпучего материала и поверхности под действием увеличивающегося сдвигающего усилия; во вто-

рой фазе увеличение относительного смещения происходит под действием постоянного сдвигающего усилия определенной величины. Максимальная сила сопротивления сыпучего материала сдвигу по поверхности наблюдается в момент перехода процесса сдвига из первой фазы во вторую.

5. Величина относительного смещения сыпучего материала и по поверхности, соответствующего моменту перехода процесса сдвига из первой фазы во вторую, и соотношение его упругой и остаточной составляющих непостоянны для данной пары сыпучего материала и поверхности и в значительной мере зависят от условий проведения процесса сдвига, что показывает невозможность использования для характеристики процесса сдвига модулей трения постоянной величины, связывающих величину относительного смещения с удельным сдвигающим усилием.

6. При переходе процесса сдвига сыпучего материала по поверхности во вторую фазу возможно образование трех видов их относительного движения:

а) движение без каких-либо изменений образовавшейся в первой фазе процесса сдвига структуры пристенных слоев;

б) движение с образованием пристенного слоя сыпучего материала с переменным градиентом относительной скорости по глубине и отличной от 0 скоростью контактирующих с поверхностью частиц;

в) движение с образованием у поверхности слоя сыпучего материала с нулевой относительной скоростью.

Существование первого и третьего видов движения очень неустойчиво.

7. Коэффициенты сопротивления сыпучих материалов сдвигу по поверхностям переменны и зависят как от физико-механических свойств сыпучих материалов и поверхностей, так и условий проведения процесса сдвига в исследованном диапазоне изменения последних.

8. Коэффициенты сопротивления сыпучих материалов движению по поверхностям так же непостоянны и зависят как от физико-механических свойств сыпучих материалов и поверхностей, так и условий проведения процесса сдвига. При этом их величина меньше коэффициентов сопротивления сдвигу для тех же условий проведения процесса сдвига.

9. Применение для характеристики сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу и движению по поверхностям коэффициентов внешнего трения покоя и движения, величины которых постоянны для определенных пар материалов, неправомерно. Отсутствие в настоящее время возможности определения достаточно точного значения сил сопротивления сыпучих материалов сдвигу и движению по поверхностям аналитическим путем для определенных условий проведения процесса сдвига вызывает необходимость их экспериментального определения. При этом условия проведения процесса сдвига в ходе экспериментов должны соответствовать условиям процесса, имеющего место на практике.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Платонов П.Н., Полторак В.С., Иванов Б.М. Давление зерна в силосах. Сб. "Современные проблемы механики сыпучих материалов", ЦИНТИ Госкомзата, М., 1969.

2. Платонов П.Н., Полторак В.С., Иванов Б.М. Результаты измерений давления зерна в силосах. Сб. "Материалы Всесоюзной межвузовской научной конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках", Одесса, 1967.

3. Платонов П.Н., Полторак В.С. О процессе сдвига сыпучих материалов по поверхностям. ИФЖ, №5, 1971.

4. Платонов П.Н., Полторак В.С. Исследование процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям. Сб. "Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Пищевая промышленность", вып. 7, 1971.

5. Платонов П.Н., Полторак В.С., Глушков В.Е. О механизме процесса сдвига мелкозернистых сыпучих материалов по поверхностям. Сб. "Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971.

6. Платонов П.Н., Полторак В.С., Глушков В.Е. О влиянии режима процесса сдвига сыпучих материалов по ограждающей поверхности на величину силы сопротивления сдвигу. Сб. "Физика аэродисперсных систем", вып. 4, изд. Киевского университета, 1971.

7. Платонов П.Н., Полторак В.С., Глушков В.Е. О некоторых закономерностях процесса сдвига сыпучих материалов по поверхностям. Сб. "Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971.

8. *Platonov P.N., Poltorak V.S. Investigation of Shear of a Granular Material along a Bordering Surface, Powder Technology, 3, 1969/1970.*

9. *Platonov P.N., Poltorak V.S. Investigation of shear of a granular material along a guarding surface, III International Congress of Chemical Engineering Chemical Equipment Construction and Automation CHTSCA, 1969, at Magianske Lazne, Czechoslovakia.*

Основное содержание работы сообщалось в докладах:

1. На XXIX, XXX, XXXI, XXXII научных конференциях ОТИПЛ, Одесса, 1967, 1969, 1970, 1971 гг.
2. На Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках, Одесса, 1967 г.

3. На III международном конгрессе ХИСА - Симпозиум по механике сыпучих материалов, ЧССР, Марианске Лазне, 1969 г.
4. На всесоюзной конференции "Механика дискретных сред (трещиноватых скальных массивов и зернистых грунтов)", Ленинград, 1971 г.
5. На расширенных конференциях Всесоюзного научно-исследовательского ин-та источников тока, Одесса, 1970, Калинин, 1971 гг.
6. На II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971 г.