

Автореферат  
К 24

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

КАРНАУШЕНКО ЛИДИЯ ИВАНОВНА

УДК 539.215.001.3

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СДВИГА И СЛЕЖИВАЕМОСТИ СЫПУЧИХ  
МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых  
производств

Переучет 1984

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

О д е с с а - 1985

Работа выполнена в Одесском технологическом институте  
пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Официальные опоненты:

доктор технических наук, академик АН БССР Листван И.И.  
доктор технических наук, профессор Зимон А.Д.  
доктор технических наук, профессор Костюк Г.Ф.

Ведущая организация: Всесоюзный научно-исследовательский  
и экспериментально-конструкторский  
институт продовольственного машино-  
строения ВНИЖПРОДМАШ, г. Москва

Защита состоится "10" апрель 1986 г. в 10<sup>30</sup> час.  
на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при  
Одесском технологическом институте пищевой промышленности  
им. М.В. Ломоносова, 270039, г. Одесса, ул. Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломо-  
носова.

Автореферат разослан "14" февр. 1986 г.

015324

Одесский технологический  
институт пищевой про-мыш-  
ленности им. М. В. Ломоносова

БИБЛИОТЕКА

А. Ф. ЗАГИБАЛОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сыпучие материалы широко используются во всех отраслях народного хозяйства. На их долю приходится более 60% перемещаемых грузов.

В решениях XXVI съезда КПСС, апрельского (1985г) Пленума ЦК КПСС, Продовольственной программе СССР на период до 1990 года и совещании ЦК КПСС по вопросам ускорения научно-технического прогресса ставится задача технического перевооружения производства, быстрее и повсеместного внедрения принципиально новой техники и материалов, повышения производительности и эффективности средств труда и технологических систем во всех отраслях народного хозяйства.

Для повышения производительности труда, совершенствования технологических процессов, связанных с технологией получения, хранения и транспортирования сыпучих материалов, а так же конструирования машин, аппаратов и автоматизированных систем управления технологическими процессами необходимо располагать теоретическими и экспериментальными данными об основном объекте производства - сыпучем материале (СМ) - его физико-механических свойствах в процессах сдвига и слеживаемости. Основные величины, характеризующие физико-механические свойства СМ входят в расчетные формулы, применяемые при разработке технологических процессов, конструировании машин и аппаратов.

Из анализа отечественных и зарубежных работ в области механики сыпучих материалов видно, что значения физико-механических свойств СМ в расчетной практике принимались в виде констант и не учитывали внутренние и внешние факторы, действующие на СМ, а это в свою очередь приводило к нарушению технологических процессов.

Настоящая работа направлена на решение важной народнохозяйственной задачи по обеспечению, на строго научной основе, различных отраслей народного хозяйства, в том числе и пищевой промышленности, достоверными данными об основных физико-механических свойствах сыпучих материалов, критериями, определяющими процессы сдвига и слеживаемости СМ.

Объект исследования. Для решения этой важной научной задачи, имеющей прикладное значение, исследовались сыпучие материалы органического и неорганического происхождения.

Целью работы является разработка теории и практики процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов, определяемых основными физико-механическими свойствами, обеспечивающих на их основе рациональное конструирование машин и аппаратов, оптимизацию технологических процессов по переработке, хранению и перемещению СМ.

Задачи работы. Наиболее общей задачей, связанной с решением поставленной цели является: научное обоснование применяемых решений по совершенствованию технологических процессов, связанных со сдвигом и слеживаемостью при переработке, хранении и транспортировании СМ в различных отраслях народного хозяйства и как выход - расчет и выбор оптимальных конструктивных параметров аппаратов, машин и агрегатов с учетом основных физико-механических свойств.

Из общей задачи исследования вытекают следующие конкретные задачи:

- использовать методы системного анализа к процессу сдвига СМ с выявлением внутренних и внешних параметров системы;
- предложить и обосновать рабочие гипотезы физических основ процессов сдвига СМ;
- получить критерий, оценивающий процесс сдвига СМ;
- установить взаимосвязь основных параметров СМ - его физи-

ко-механических свойств;

- разработать теорию процесса сдвига СМ - линий предела текучести;

- применить системный анализ процессов слеживаемости сыпучих материалов;

- разработать физические основы процесса слеживаемости;

- получить критерии, оценивающие процесс слеживаемости;

- разработать научно-обоснованные методы и приборы для определения основных физико-механических свойств СМ, характеризующих процессы их сдвига и слеживаемости;

- разработать систему математических моделей сдвига и слеживаемости сыпучих материалов и проверить их адекватность на основании системного анализа СМ и комплексного эксперимента;

- на основании теоретических и экспериментальных исследований наметить пути использования результатов работы в промышленности и экономически их обосновать.

Научная новизна работы состоит в создании теоретических основ процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов с экспериментальной их проверкой, разработкой методов и устройств объективной оценки, конструктивные решения которых, выполнены на уровне изобретений.

В работе защищаются следующие научные положения:

- системный подход к анализу процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов и их закономерности;

- обобщение результатов работ по исследованию физико-механических свойств сыпучих материалов, характеризующих процессы сдвига и слеживаемости;

- теория процесса сдвига - линий предела текучести сыпучих материалов;

- критерии, определяющие процессы сдвига и слеживаемости СМ,

- взаимосвязь основных физико-механических свойств СМ - параметров системы и их экспериментальное подтверждение;
- математические модели основных параметров СМ, характеризующих процессы сдвига и слеживаемости;
- научно-обоснованные методы и устройства объективной оценки опытных параметров сдвига и слеживаемости СМ с защищенным приоритетом, разработанные автором и внедренные в промышленность;
- использование теории и эксперимента по процессам сдвига и слеживаемости сыпучих материалов для научно-обоснованного выбора и расчета аппаратов, машин и агрегатов с оптимизацией технологических процессов, связанных с получением, хранением, перемещением СМ и их экономическая эффективность.

Результаты настоящей работы представляют новое научное направление в теории и практике механики сыпучих материалов, обеспечивающее оптимизацию расчета и проектирования аппаратов, агрегатов и технологических процессов.

Практическая ценность работы. В процессе выполнения НИР по тематике диссертации её основные результаты нашли практическое применение в научно-исследовательских организациях, промышленности, публиковались в отраслевых информационных и научных изданиях, а также использовались в учебном процессе.

По материалам диссертации подготовлено методическое пособие по выполнению учебно-исследовательской работы студентов, защищено более 20 дипломных проектов с использованием разработок автора.

Разработанная теория основных процессов СМ - сдвига и слеживаемости, их математические зависимости с использованием системного подхода к анализу процессов, происходящих в сыпучем материале, позволили провести научно-обоснованный расчет и проектирование технологических процессов, конструирование аппаратов, машин

и автоматизированных систем управления технологическими процессами. Созданное научное направление, методики, экспериментальные установки и приборы для определения физико-механических свойств сыпучих материалов, полученные на них экспериментальные данные для материалов органического и неорганического происхождения, использованы в пищевой промышленности, для производства минеральных удобрений, химических и микробиологических материалов.

Общий экономический эффект от внедрения в производство результатов данного исследования составил I млн. 713 тыс.руб.

Практическая ценность достигнутых результатов диссертации в целом заключается в создании нового научного направления в исследовании процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов, позволяющего решить проблему оптимизации технологических процессов с разработкой соответствующих аппаратов и оборудования.

Реализация научно-технических результатов. Реализация практических рекомендаций, вытекающих из разработанной теории процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов, осуществлялась под руководством и при непосредственном участии автора.

Результаты теоретических, аналитических, методических исследований по теории и практике процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов с разработкой и изготовлением устройств и приборов по определению физико-механических свойств сыпучих материалов, защищенных авторскими свидетельствами, внедрены в производство.

При разработке и создании Северодонецким филиалом НИИХИММАШ РТМ 26-01-66-74, а затем переутвержденных РТМ 26-01-129-80 "Машин для переработки сыпучих материалов. Метод выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей" были использованы работы ОТИПШ им. М.В.Ломоносова, выполненные для НИИХИММАШ, под руководством и при непосредственном участии автора, с использова-

нием теоретических основ процессов сдвига и слеживаемости и научно-обоснованным созданием методов и устройств для их определения, защищенных а.с. № 283659, 404001, 418759. Реальный годовой экономический эффект от внедрения разработок ОТИП, использованных при создании РТМ 26-01-66-74 составил 55,8 тыс. рублей.

Так же для Северодонецкого филиала НИИХИММАШ разработан теоретический подход к анализу процессов сыпучести и слеживаемости см с внедрением в производство устройств для их определения. Реальный годовой экономический эффект составил 70,98 тыс. рублей.

Разработки по исследованию сдвиговых свойств сыпучих материалов, с созданием методов и устройств для их определения, внедрены в Ленинградском Всесоюзном научно-исследовательском институте особо чистых биопрепаратов с реальным годовым экономическим эффектом 54,2 тыс. руб. Для ВНИХСЗР наряду с теоретическими разработками в области теории процессов сдвига и слеживаемости, разработан целый ряд устройств и приборов для определения физико-механических свойств, оценивающих эти процессы, защищенных авторскими свидетельствами № 518699, 968689, 1164589, 1167476 и внедренные в производство под руководством и при непосредственном участии автора с общим реальным экономическим эффектом 1 млн. 446 тыс. рублей. Кроме того, разработанные методы и устройства для определения физико-механических свойств сыпучих материалов, а так же результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены на целом ряде других производств: ВНИИРЕАКТИВЭЛЕКТРОН, г. Донецк - реальный экономический эффект - 32,4 тыс. руб; Государственном научно-исследовательском и проектно институте основной химии г. Харьков - ожидаемый экономический эффект - 93,7 тыс. рублей.

Достигнутые результаты выполнялись по плану важнейшей тематики, включенной в координационный план Минвуза УССР, Минхимпрома СССР, Минудобрений СССР на XI пятилетку и совместного приказа от 2 января 1981 г. № 51/36/16. Отдельные разделы диссертации связаны с выполнением НИР по заказам промышленности и плана ОТИПП им. М.В. Ломоносова.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на координационных совещаниях по решению важнейших научно-технических проблем "Союзреактив" и "Союзоргсинтез" Минхимпрома на XI пятилетку (1980-1981 гг) и на XII пятилетку (1985 г) с участием представителей Академии наук и Минвузов союзных республик, научных конференциях профессорско-преподавательского состава ОТИПП им. М.В. Ломоносова (1966...1985 гг), I...IV Всесоюзных научных конференциях "Механика сыпучих материалов" (Одесса, 1967, 1971, 1975, 1980 г), Всесоюзной конференции "Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств (Москва, 1982 г), XII Всесоюзной конференции по коллоидной химии и физико-технической механике (Минск, 1977 г), научно-технических конференциях по физико-химии торфа (Минск, 1977 г, Калинин, 1981 г.), III Международном конгрессе химической техники, конструирования и механизации химического оборудования (ЧССР, Марианские Лазни, 1969 г.), III республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств (Львов, 1973 г), координационном совещании по дискретным средам в гидротехническом производстве (Ленинград, 1972 г.), II Республиканской конференции по физико-механике дисперсных систем и материалов (Одесса, 1983 г),

отраслевой научно-технической конференции "Пути дальнейшей интенсификации повышения эффективности производства калийных удобрений" (Пермь, 1985 г), III Всесоюзном симпозиуме "Теория механической переработки полимерных материалов" (Пермь, 1985 г). Экспонаты по основным разработкам демонстрировались на ВДНХ СССР в 1982 г. и отмечены дипломами.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 83 научные работы, в том числе 7 авторских свидетельств.

В публикациях, подготовленных в соавторстве, теоретические разработки принадлежат автору настоящей диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, семи глав, содержащих 233 с. учитываемого материала, 62 рисунков, 6 таблиц, а так же списка литературных источников и двух приложений. Библиографический список включает 274 наименований на русском языке и 71 на иностранных языках.

Первая глава содержит материал, характеризующий современное состояние теории и практики процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов, классификацию материалов, физико-механических свойств и методов их определения.

Показано, что существующие теории процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов и методы их оценки не в полной мере соответствуют требованиям реальных технологических процессов, связанных с получением, транспортированием и хранением сыпучих материалов. Для устранения этих недостатков необходимо разработать теории процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов с учетом основных физико-механических свойств СМ, создать соответствующие устройства для получения достаточно достоверных экспериментальных данных, используемых в расчетной и проектной практике.

Вторая глава диссертации излагает теорию процесса сдвига сыпучих материалов – линий предела текучести. Предложено уточненное определение сыпучего материала как дискретной статистической системы. Применяя системный подход к анализу процессов сдвига, выделены основные параметры системы. Установлена взаимосвязь основных физико-механических свойств сыпучих материалов и влияние на них параметров СМ, предложен критерий сыпучести, обоснована его применимость для оценки процесса сдвига.

Третья глава посвящена теории процесса слеживаемости сыпучих материалов, предложена рабочая гипотеза, объясняющая механизм его образования.

Применение системного подхода к анализу процессов слеживаемости выявило основные параметры системы, характеризующей этот процесс, и их влияние на процесс слеживаемости. Получено уравнение слеживаемости сыпучих материалов в критериальной форме.

Четвертая глава диссертации содержит характеристики объектов исследования – сыпучие материалы органического и неорганического происхождения. Разработаны научно-обоснованные методы, экспериментальные установки и приборы для определения физико-механических свойств СМ, характеризующих процессы сдвига и слеживаемости.

Пятая глава содержит результаты экспериментальных исследований процесса сдвига сыпучих материалов, апробацию теоретических выводов о взаимосвязи основных физико-механических свойств СМ, анализ критерия сыпучести для материалов органического и неорганического происхождения. На основании результатов комплексного эксперимента и системного анализа получены математические модели исследуемых материалов в зависимости от внутренних и внешних параметров системы – сыпучего материала.

В шестой главе диссертации приводится экспериментальное под-

тверждение контактного взаимодействия между частицами сыпучего материала. Получены математические модели процесса слеживаемости сыпучих материалов органического и неорганического происхождения. Экспериментально подтверждено критериальное уравнение слеживаемости.

Седьмая глава посвящена практическому применению в промышленности результатов теоретических и экспериментальных работ и их экономической эффективности.

Завершают диссертацию основные выводы по работе, список использованной литературы и приложения. В диссертации обобщены результаты исследований, выполненных соискателем в период с 1964 - 1985 г.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проблемы связанные с переработкой, транспортированием, хранением, выпуском, дозированием сыпучих материалов в большей степени зависят от природы сыпучих материалов, их физико-механических свойств. Основными свойствами являются - сдвиговые, которые определяют процессы протекающие в сыпучем материале не только в статике, но и в динамике - в момент перехода от покоя к движению.

Процессы слеживаемости сыпучих материалов в основном определяются их физико-механическими свойствами, которые зависят не только от природы сыпучего материала - внутренних параметров системы, но и от внешних параметров. Исходными параметрами при расчете технологических процессов, аппаратов, оборудования, а так же автоматизированных систем управления технологическими процессами с сыпучими материалами являются их физико-механические свойства.

Теоретической базой исследований, выполненных в диссертационной работе, явились труды советских и зарубежных ученых: Е.И.Шемякина, И.И.Литтвана, Р.Л.Зенкова, А.Д.Зимона, В.В.Соколовского,

Г.А.Гениева, И.И.Кандаурова, П.Н.Платонова, Г.Ф.Костюка, Н.К.Залдастанишвили, П.И.Дукьянова, Н.Г.Дубынина, П.А.Ребиндера, Л.В.Гячева, Д.А.Мачихина, С.А.Мачихина, Г.Дересевича, Г.М.Малахова, Ю.И.Макарова, Э.В.Дженике, Я.Новосада, П.Ф.Овчинникова, Н.К.На-ремского, Н.Б.Дежкина, И.И.Берковича, Н.Б.Урьева, А.Д.Яковлева, И.М.Кувшинникова, А.Ф.Ревуженко, Е.А.Непомнящего, А.Д.Чмыря, А.П.Ковтуна, К.В.Алферова, Б.А.Скорикова, О.Молеруса, А.Дрешера, Т.Канаока, К.Фудзии и других.

Обзор литературных источников по теории и практике исследования процессов сдвига и слеживаемости СМ показывает, что этим вопросам посвящено большое количество исследований. Однако отсутствуют системный подход к анализу процессов сдвига и слеживаемости СМ, критерии, оценивающие эти процессы, обобщенные комплексные исследования процессов и научно-обоснованные методы и приборы их определения.

Анализ существующих теорий процессов сдвига и слеживаемости сыпучих материалов и методов их определения позволил разработать теоретические основы процессов сдвига и слеживаемости, рассматривая сыпучий материал как дискретную статистическую систему.

#### СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ КАК ДИСКРЕТНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСНАЯ СИСТЕМА

При исследовании физических основ процессов сдвига и слеживаемости СМ необходимо определить место сыпучих материалов среди других веществ.

В дисперсных системах при определенных соотношениях фаз твердой (Т) и газообразной (Г), при незначительном наличии жидкой фазы (Ж) или без неё, сыпучее занимает место, которое обладает принципиально новыми свойствами и параметрами. Основным критерием, выделяющим сыпучий материал из дисперсных систем является критерий

фазы:

$$K_{\phi}^c = \frac{V_c}{V_{\phi}} \quad (I)$$

где  $V_c$  - объем среды,  $V_{\phi}$  - объем фазы.

Определим понятие сыпучего состояния.

Сыпучее - частный случай дисперсного состояния вещества Т - Г (Ж) - это дискретная статистическая система, контактирующих между собой частиц твердого вещества (фазы) в дисперсной газовой среде, при незначительном наличии жидкой среды, или без неё и связано соотношением  $0,78 > K_{\phi}^c \geq 0,25$ .

Частицы СМ связаны между собой в пространстве и прочность контактов между частицами определяется их природой, концентрацией и внешними факторами. Нормальная прочность на разрыв между контактами частиц значительно меньше прочности самих частиц, тангенциальная прочность контактов или прочность при сдвиге так же меньше прочности частиц, но выше либо равна прочности на разрыв между их контактами.

Определение сыпучего материала завершается рассмотрением его как дискретной статистической совокупности твердых частиц, случайная ориентация которых в пространстве, определена силами аутогезии: гравитационными, прочностными, фрикционными и другими. Статистическая система определяет то, что протекающие в ней процессы носят необратимый характер, т.е. они могут изменять занимаемый объём с соответствующим изменением прочности системы в широких пределах.

#### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СДВИГА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Определение СМ как дискретной статистической совокупности контактирующих между собой частиц твердого вещества в дисперсной газовой среде при наличии или без жидкой среды, ограниченной стен-

ками сосуда и имеющей одну свободную поверхность, предопределяет методологию исследования СМ с позиции системного подхода.

Предпочтительным представляется определение СМ как системы  $\Sigma$ , описываемой по аналогии с работами Р.Калмана, восьмью параметрами:

$$\Sigma = \langle B, X, G, S, \Omega, U, \eta, \psi \rangle \quad (2)$$

где  $B$  - время,  $X$  - входы,  $G$  - выходы,  $S$  - состояние,  $\Omega$  - класс функций на выходе,  $U$  - значение функций на выходе,  $\eta$  - связь вида  $g(B_2) = \eta(X(B_1), S(B_1), B_2)$ ,  $g \in G$ ;  $\psi$  - связь вида  $S(B_2) = \psi(X(B_1), S(B_1), B_2)$ ,  $s \in S$

Представление СМ как системы  $\Sigma$  определяется тем обстоятельством, что используемые системные понятия "вход", "выход", "время", "состояние", "класс функций", "связь" легко интерпретируются в терминах физико-механических свойств (характеристик) СМ, как материального объекта.

Под "входом" -  $X$  правомочно понимать множество характеристик  $-X_1$ , которыми описывается воздействие на СМ со стороны внешней среды, и множество характеристик  $-X_2$ , которыми описывается СМ с точки зрения присущих ему внутренних свойств:  $X = X_1 \cup X_2$

Под "выходом" -  $G$ , естественно, подразумевать множество характеристик (физико-механических свойств) прочности, сдвига и структуры СМ как каркаса арочного типа контактирующих между собой частиц вещества (включая взаимосвязь через газовую и жидкую фазы), которая является результатом аддитивного сложения сил сцепления на участках контактов, а так же между контактами частиц и ограждающей поверхностью.

Под "временем" -  $B$  понимаем обычную временную характеристику, используемую для идентификации состояния объекта в терминах "рань-

ше" и "позже":  $B_1, B_2, B_1 < B_2$

или  $B_0 - \Delta B, B_0 + \Delta B, \Delta B > 0$

Под "состоянием" -  $S$  обозначим то природное состояние вещества, как единого целого, в котором оно пребывает под действием приложенных к нему усилий (в состоянии сдвига, слеживаемости, установившегося движения и т.д.)

В качестве "класса функций" -  $\Omega$ , учитывая статистическую природу СМ, будем использовать зависимости между характеристиками системы, которые описываются многочленами, дробно-рациональными, экспоненциальными, логарифмическими соотношениями.

Задача исследования СМ с позиции методологии "черного ящика" заключается в определении связей  $\varphi \in \Omega$  и  $\psi \in \Omega$  между параметрами СМ.

Выделим следующие характеристики СМ и СМ с ограждающей поверхностью

$$X_1 = \{P, B, W_1, t\} \quad (3)$$

$$X_2 = \{W, d_i, \sigma_n, \rho_n, M\} \quad (4)$$

$$G = G_1 \cup G_2 = \{\tau_{on}, T_n, \sigma_c, f_n, T_n, \epsilon_n, \tau_{on1}, T'_n, f_{n1}, T_{n1}\} \quad (5)$$

Здесь  $P$  - внешние усилия от массы вышележащих слоев СМ на нижележащие (результат аддитивного сложения сил, приложенных к СМ),  $B$  - время,  $W_1$  - влажность окружающей среды,  $t$  - температура окружающей среды,  $W$  - влажность СМ,  $d_i$  - гранулометрический и грануломорфологический состав СМ,  $\sigma_n$  - напряженное состояние СМ,  $\rho_n$  - объемная плотность СМ,  $\tau_{on}$  - начальное удельное сопротивление сдвигу,  $f_n$  - коэффициент внутреннего трения,  $T$  - удельное сопротивление на разрыв,  $\sigma_c$  - предел прочности при сжатии,  $T_n$  - удельное сопротивление сдвигу СМ,  $\epsilon$  - коэффи-

циент пористости,  $\tau_{0n1}$  - начальное удельное сопротивление сдвигу СМ с ограждающей поверхностью,  $\tau'_n$  - удельное сопротивление на отрыв СМ от ограждающей поверхности,  $f_{n1}$  - коэффициент внешнего трения,  $\tau_{n1}$  - удельное сопротивление сдвигу СМ с ограждающей поверхностью,  $M$  - материал ограждающей поверхности и его шероховатость.

Заметим, что все перечисленные характеристики в общем случае изменяются во времени, то есть являются функциональными величинами. В этой связи особый интерес представляет анализ функций на "выходе" системы при действии на неё определенных усилий.

При  $p = \text{const}$  изменения, происходящие во внешней среде, через свойства, присущие СМ, в соответствии с энтропийной природой вещества приводит СМ к определенному устойчивому состоянию. С точки зрения происходящих в СМ процессов такое явление описывается утверждением

$$A_1 \rightarrow D_1, \quad (6)$$

где  $A_1 \triangleq (p = \text{const}, B \rightarrow \infty)$ ;  $D_1 \triangleq (\lim_{B \rightarrow \infty} \tau_{0n}(B) = \tau_{0n}$ ,

$$\lim_{B \rightarrow \infty} \tau_n(B) = \tau_n, \lim_{B \rightarrow \infty} \sigma_c(B) = \sigma_c, \lim_{B \rightarrow \infty} f_n(B) = f_n,$$

$$\lim_{B \rightarrow \infty} \tau_n(B) = \tau_n, \lim_{B \rightarrow \infty} \varepsilon_n(B) = \varepsilon_n, \lim_{B \rightarrow \infty} \tau_{0n1}(B) = \tau_{0n1},$$

$$\lim_{B \rightarrow \infty} \tau_{n1}(B) = \tau_{n1}, \lim_{B \rightarrow \infty} f_{n1}(B) = f_{n1}, \lim_{B \rightarrow \infty} \tau'_n(B) = \tau'_n)$$

Если же

$$p = \begin{cases} \alpha, & \text{если } B < B_0 \\ \beta, & \text{если } B \geq B_0 \end{cases},$$

где  $\alpha \neq \beta$ ,

то изменение внешнего усилия, являющегося результатом аддитивно-

V. 6 15324

го сложения сил, приложенных к СМ, при определенном соотношении между  $\alpha$  и  $\beta$  может вызвать необратимые изменения в структуре СМ и СМ с оградяющей поверхностью, которые проявляются через резкое изменение характеристик "выхода" системы - происходит "сдвиг" характеристик. Такое явление, происходящее в СМ, будем в дальнейшем называть процессом сдвига (ПС). Математически ПС описывается утверждением

$$A_2 \rightarrow D_2 \quad , \quad (7)$$

где предикаты  $A_2$  и  $D_2$  обозначают следующее:

$$A_2 \triangleq (\rho(B_0+0) = \rho(B_0-0) + \Delta, \text{ где } \Delta = \beta - \alpha) ,$$

$$D_2 \triangleq (\lim_{B \rightarrow B_0+0} \tau_{0n}(B) = \tau_{0n} \quad ; \quad \lim_{B \rightarrow B_0+0} T_n(B) = T_n ,$$

$$\lim_{B \rightarrow B_0+0} \sigma_c(B) = \sigma_c \quad ; \quad \lim_{B \rightarrow B_0+0} f_n(B) = f_n ,$$

$$\lim_{B \rightarrow B_0+0} \tau_n(B) = \tau_n \quad ; \quad \lim_{B \rightarrow B_0+0} \varepsilon_n(B) = \varepsilon_n ,$$

$$\lim_{B \rightarrow B_0+0} \tau_{0n_1}(B) = \tau_{0n_1} \quad \lim_{B \rightarrow B_0+0} \tau_{n_1}(B) = \tau_{n_1} ,$$

$$\lim_{B \rightarrow B_0+0} f_{n_1}(B) = f_{n_1} \quad \lim_{B \rightarrow B_0+0} T_{n_1}'(B) = T_{n_1}'$$

С позиции системного подхода как процесс сдвига, так и процесс слеживаемости могут быть описаны однотипно в следующей "системной" терминологии.

Пусть СМ как система описывается вектором воздействий со стороны внешней среды  $X_1 = \{\rho(B), w_1(B), t(B)\}$  и вектором

$$X_2 = \{W, d_i, \sigma_n, \rho_n, M\} ,$$

а также выходом

$$G = \{\tau_{0n}(B), T_n(B), \sigma_c(B), f_n(B), \tau_n(B), \varepsilon_n(B), \tau_{n_1}(B), \tau_{0n_1}(B), f_{n_1}(B), T_{n_1}'(B)\}$$

Предположим, что

$$\rho(B_0 + \Delta B) = \rho(B_0 - \Delta B) + \beta - \alpha \quad , \quad (8)$$

где  $\rho(B_0 - \Delta B) = \alpha = \text{const}$ .

Задача заключается в определении подмножества -  $G_1$  :

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \tau_{0n}(B) &= \tau_{0n} \quad , & \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} T_n(B) &= T_n \\ \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \sigma_c(B) &= \sigma_c \quad , & \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} f_n(B) &= f_n \\ \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \tau_n(B) &= \tau_n & \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \varepsilon_n(B) &= \varepsilon_n \end{aligned} \quad (9)$$

а так же в определении подмножества  $G_2$  :

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \tau_{0n_1}(B) &= \tau_{0n_1} & \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} \tau_{n_1}(B) &= \tau_{n_1} \\ \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} f_{n_1}(B) &= f_{n_1} & \lim_{B \rightarrow B_0 + \Delta B} T'_{n_1}(B) &= T'_{n_1} \end{aligned} \quad (10)$$

В такой постановке, если  $\Delta B \rightarrow \infty$ , то рассматривается процесс слеживаемости, если  $\Delta B \rightarrow 0$ , то процесс сдвига.

Непосредственное исследование СМ, представляющего собой сложную систему, состоящую из твердой и жидкой фазы в газовой среде, взаимодействующую как между собой, так и с ограждающей поверхностью в зависимости от присущих ей внутренних свойств и внешних условий, является проблемной научной задачей. В силу недостаточной изученности внутренних свойств СМ, обусловленной сложностью полного их познания, решение задачи, направленное на опре-

деление значений:  $\tau_{on}$ ,  $\tau_n$ ,  $\sigma_c$ ,  $f_n$ ,  $\tau_n$ ,  $\epsilon_n$ ,  $\tau_{om}$ ,  $\tau_{ni}$ ,  $f_{ni}$ ,  $\tau_n'$  требует тщательного эксперимента. Лишь на основе экспериментальных данных представляется возможным установить связи  $\eta$  и  $\psi$  между "выходом" -  $G$  - СМ как системы и её "входом" -  $X$ .

Внешние условия, в которых рассматривается конкретный СМ, отличаются значительным диапазоном рассеивания, т.е.  $t$ ,  $B$ ,  $W$ ,  $\rho$  в общем случае описываются континуум - множеством значений. Естественно, что исследовать их влияние на СМ при всех допустимых значениях принципиально невозможно. Поэтому в экспериментах ограничивались лишь теми значениями параметров системы, которые представлялись наиболее типичными для всех условий, в которых исследуется СМ. Исходя из этих соображений, исследования процесса сдвига СМ осуществлялось в предположении, что  $t = const$ ,  $B = const$ ,  $W_i = const$  при фиксированном грануломорфологическом и гранулометрическом составе исследуемых материалов. Задача исследования процесса сдвига сводится к определению вида и параметров функциональной связи между "выходными" подмножествами  $G_1$  и  $G_2$  и "входными" величинами.

Таким образом, задача сводится к определению функциональной взаимосвязи входных параметров  $W$ ,  $\sigma_n$  и выходных параметров, подмножества  $G_1$  - параметров сыпучего материала и  $G_2$  - параметров сыпучего материала с ограждающей поверхностью.

Для решения этой задачи был поставлен комплексный эксперимент на ряде сыпучих материалов органического и неорганического происхождения. Обработав результаты экспериментальных данных на ЭВМ, были получены математические зависимости выходных параметров системы, характеризующие процесс сдвига СМ: начального удельного сопротивления сдвигу СМ и СМ с ограждающей поверхностью, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, удельного сопротивления на разрыв СМ и отрыв СМ от ограждающей поверхности, коэффициентов

пористости в зависимости от внутренних параметров системы - влажности материала и его напряженного состояния с достаточно высокой степенью точности.

### ТЕОРИЯ ЛИНИЙ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СМ

Геометрическое построение линий предела текучести (ЛПТ) для мелкодисперсных сыпучих материалов при постоянных внутренних и внешних параметрах системы состоит в нахождении огибающей касательных круговых диаграмм напряжений в точках наибольшего отклонения вектора сдвиговых напряжений -  $\tau_n$  от вектора полных напряжений -  $\sigma_n$  (рис. I).

Любая кривая однозначно определяется, если известен закон изменения её производной и координаты одной её точки (начальное условие). Такой точкой для ЛПТ является точка -  $D$ , соответствующая начальному удельному сопротивлению сдвига -  $\tau_n = \tau_0$  при  $\sigma_n = 0$ . Производная ЛПТ равна тангенсу угла внутреннего трения

$$\frac{d\tau_n}{d\sigma_n} = \operatorname{tg} \varphi_n = f_n \quad (II)$$

Таким образом, чтобы получить аналитическое описание ЛПТ надо решить задачу Коши, т.е. решить уравнение (II) при начальном условии

$$\tau_n(0) = \tau_0 \quad (I2)$$

Уравнение касательной к ЛПТ в любой её точке, например, в точке  $A$  (рис. I) определяется:

$$f_A = \operatorname{tg} \varphi_A = \frac{\tau_{nA} - \tau_{0A}}{\sigma_{nA}} \quad (I3)$$

На основании геометрических доказательств получена зависи-



мость удельного сопротивления на разрыв -  $T_n$  от начального удельного сопротивления сдвигу -  $\tau_{0n}$  и коэффициентов внутреннего трения -  $f_n$  вида:

$$T_n = \tau_{0n} (\sqrt{1+f_n^2} - f_n) \quad (I4)$$

Основные физико-механические свойства СМ взаимосвязаны между собой зависимостью:

$$\left( \frac{\tau_n}{\tau_{0n}} \right)^{n_s} = \frac{\zeta_n}{T_n} + 1, \quad (I5)$$

где  $n_s$  - показатель сдвига, который не зависит от напряженного состояния СМ и является постоянной величиной для данного сыпучего материала при постоянных внутренних и внешних параметрах системы - СМ.

Составив систему уравнений из (I3, I4, I5) и после соответствующих преобразований, получим уравнение вида:

$$\tau_n^{n_s} = (\tau_n - f_n \zeta_n)^{n_s} + \frac{\zeta_n (\tau_n - f_n \zeta_n)^{n_s-1}}{\sqrt{1+f_n^2} - f_n} \quad (I6)$$

Подставляя (II) в (I6) и решая задачу Коши при начальном условии (I2), получим ЛПГ:

$$\tau(\zeta_n) = \tau_0 + \frac{f_0}{1!} \zeta_n + \frac{\tau_n''(0)}{2!} \zeta_n^2 + \frac{\tau_n'''(0)}{3!} \zeta_n^3 + \dots \quad (I7)$$

Из (I7) видно, что ЛПГ определяется значениями -  $\tau_0$  и  $f_0$  при  $\zeta_n = 0$  и показателем сдвига -  $n_s$ , так как вычисление производных  $\tau_n^{(i)}(0)$  производится на основании уравнения (I6), куда входит  $n_s$ .

Экспериментально доказано, что величина  $b > n > 1$  что служит доказательством нелинейности ЛПТ.

### ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЦЕСС СДВИГА

Уплотнение СМ зависит от величины нормального напряжения. При условии, когда нормальное напряжение в СМ равно его предельному значению —  $\sigma_n$  происходит разрушение образца — сдвиг, СМ начнет течь.

Довольно большие деформации СМ происходят вблизи предельных значений —  $\sigma_n$  и в этот момент под действием ничтожных сил — наступает процесс сдвига. Этот процесс можно выразить зависимостью между тангенциальным напряжением —  $\tau_n$  и нормальным —  $\sigma_n$  в плоскости сдвига (рис. I). Наибольший интерес представляет не начальная фаза приложения нагрузки, а момент угасания предельного напряжения, при котором происходят значительные деформации СМ — линия предела текучести.

Так, для точки А находящейся на ЛПТ, соответствует нормальное напряжение —  $\sigma_{nA}$  и тангенциальное сопротивление  $\tau_{nA}$ .

Если СМ находится в предварительно-напряженном состоянии  $\sigma_{уппA}$ , по величине равному  $\sigma_{nA}$ , то ему соответствует начальное удельное сопротивление сдвигу —  $\tau_{0A}$  при  $\sigma_n = 0$ . Эта величина получается пересечением касательной, проведенной к точке А круга Мора до пересечения с осью  $\tau_n$  при  $\sigma_n = 0$ . Угол наклона этой касательной к оси  $\sigma_n$  образует угол внутреннего трения —

$\varphi_A$ . Каждому предварительно-напряженному состоянию —  $\sigma_{упп}$  соответствуют свои значения: начального удельного сопротивления сдвигу —

$\tau_{0n} = f_1(\sigma_{упп})$ , удельного сопротивления на разрыв —

$\tau_n = f_2(\sigma_{упп})$ , а так же коэффициента внутреннего трения —

$f_n = f_3(\sigma_n)$ .

Сыпучие материалы обладают "памятью" предварительного его уплотнения -  $\sigma_{упл}$ , от величины которого зависит плотность укладки -  $K$ .

Для наглядности связи между  $\tau_n$  и  $\sigma_n$ ,  $\tau_{оп}$ ,  $T_n$  и  $\sigma_{упл}$  предлагается эти зависимости представить в изометрии - в системе координат  $\tau_n (\tau_{оп}); \sigma_n; T_n; \sigma_{упл}$  - рис. 2.

Сыпучий материал, находящийся в напряженном состоянии и испытывающий ту же величину уплотнения -  $\sigma_{упл}$ , что соответствует определенному коэффициенту плотности укладки -  $K$ , характеризуется основными физико-механическими свойствами, величины которых соответственно равны  $\tau_{нл1}$ ,  $\tau_{оя}$ ,  $T_{нл1}$  и находятся на одной плоскости -  $A_1$ . Такая графическая интерпретация основных физико-механических свойств СМ, при одинаковом его напряженном или предварительно-напряженном состоянии, подтверждает их взаимосвязь (I5).

Можно утверждать, что в реальных сыпучих материалах существует определенная взаимосвязь между отношением логарифмов прочности на сжатие материала  $(\sigma_n + T_n)$  к прочности на разрыв СМ -  $T_n$  и сопротивления сдвигу  $\tau_n$  к  $\tau_{оп}$  при  $\sigma_{упл} = \sigma_n$ , которое оценивается показателем сдвига -  $n_s$  и характеризует аутогезию и трение между частицами СМ. Чем отношение  $\tau_n$  к  $\tau_{оп}$  будет ниже, тем материал будет более когезионным, способным образовывать сваи, зависать и плохо течь.

Величина показателя сдвига определяется:

$$n_s = \lg \frac{\sigma_n + T_n}{T_n} / \lg \frac{\tau_n}{\tau_{оп}} \quad (I8)$$

Комплексным экспериментом, проведенным более чем на 20 образцах СМ органического и неорганического происхождения, подтверждено, что показатель сдвига -  $n_s$  не зависит от величины напряженного и предварительно-напряженного состояния СМ и является вели-

чиной постоянной для данного материала при заданной его влажности, грануломорфологическом составе и внешних параметрах системы - СМ и по величине больше единицы, но меньше 6. Чем величина - больше, тем материал обладает лучшей способностью к истечению. Однако, как показано экспериментально, величина  $\eta_s$  зависит в свою очередь от влажности материала, что подтверждено экспериментально.

### КРИТЕРИЙ СЫПУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ

Состояние -  $S$  сыпучего материала - системы, характеризует СМ как единое целое, в котором находится он под действием приложенных к нему усилий. При постоянных внутренних и внешних параметрах СМ, переход его из допредельного состояния в предельное, когда происходит сдвиг, характеризуется определенным соотношением между вертикальным и горизонтальным напряжениями и определяется критерием сыпучести:

$$K_c = \frac{1}{m} \quad (19)$$

где  $m$  - коэффициент подвижности СМ.

Теоретически получена зависимость -  $K_c$  как функция величин основных физико-механических свойств СМ - выходных параметров системы и внутреннего параметра - нормального напряженного состояния -  $\sigma_n$  :

$$K_c = \frac{\sigma_n + \tau_{on} \left( \frac{\sigma_n}{\tau_n} + 1 \right)^{1/\eta_s} [f_n + (1 + f_n^2)^{1/2}]}{\sigma_n + \tau_{on} \left( \frac{\sigma_n}{\tau_n} + 1 \right)^{1/\eta_s} [f_n - (1 + f_n^2)^{1/2}]} \quad (20)$$

Анализ критерия сыпучести -  $K_c$  для реальных сыпучих материалов органического и неорганического происхождения показывает, что с ростом нормального напряженного состояния -  $\sigma_n$ ,  $K_s$  уменьшается, т.е. способность СМ к истечению снижается.

Сыпучий материал, обладающий большей величиной  $K_c$ , склонен к лучшему истечению. Однако, при этом необходимо учитывать не только величину  $K_c$ , но так же и показатель сдвига -  $n_s$ . Чем аутогезия в СМ выше, а величины  $\tau_{on}$  и  $T_n$  больше, тем отношение  $\tau_n / \tau_{on}$  и  $(\sigma_n + T_n) / T_n$  будет уменьшаться, а следовательно  $n_s$  будет ниже. Поэтому при одинаковых  $K_c$  необходимо учитывать так же и показатель сдвига -  $n_s$ . Получены значения  $K_c = f(\sigma_n, W)$  для ряда сыпучих материалов. Аналогичные зависимости приводятся по исследованию критерия сыпучести СМ вдоль ограждающей поверхности -  $K'_c$ . Однако, величина  $K'_c$  несколько ниже  $K_c$ .

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СЛЕЖИВАЕМОСТИ СМ И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исходя из системного подхода к исследованию СМ как системы -  $\Sigma$ , когда один из важнейших внешних параметров системы СМ - время  $B \rightarrow B_0 + \Delta B$ , где  $\Delta B \rightarrow \infty$ , наблюдается процесс слеживаемости. При этом в процессе слеживаемости состояние сыпучего материала -  $S$  определяется выходными параметрами системы -  $G$ .

Учитывая, что выходные параметры системы -  $G$  взаимосвязаны между собой (15), а на систему -  $\Sigma$  в целом оказывают влияние как внутренние параметры -  $X_2$ , так и параметры внешнего воздействия окружающей среды -  $X_1$ , поэтому при исследовании процесса слеживаемости СМ целесообразно ограничиться анализом влияния входных параметров  $X = X_1 \cup X_2$  на наиболее важный выходной параметр СМ - начальное удельное сопротивление сдвигу -  $\tau_{on}$ .

При таком подходе задача исследования процесса слеживаемости СМ сформулированная ранее, несколько упрощается.

В таком случае процесс слеживаемости СМ, как системы с пос-

тоянным грануломорфологическим составом  $d_i = \text{const}$   
описывается:

вектором внутренних параметров СМ

$$X_2 = \{W, \sigma_{\text{упп}}\}, \quad (21)$$

вектором внешних воздействий

$$X_1 = \{p(B), w_1(B), t(B)\}, \quad (22)$$

выходным параметром  $\tau_{on}$  множества

$$G = \{\tau_{on}\} \quad (23)$$

Необходимо отметить, что "вход" -  $X$  системы -  $\Sigma$  отличается значительным диапазоном рассеивания: в общем случае параметры  $B$ ,  $w_1$ ,  $p$ ,  $t$ ,  $\sigma_n$ ,  $W$  принимают континуум - множество значений. В связи с этим возникает проблема достоверной оценки параметров. Учитывая её методологическую сложность, эксперимент был поставлен по наиболее типичным для исследуемого СМ условиям.

Одним из них является постоянная влажность окружающей среды  $w_1 = \text{const}$ . В таком случае, учитывая, что  $\sigma_{\text{упп}} = \Phi(p_n)$  исследование процесса слеживаемости сводится к определению:

$$\tau_{on} = \omega(W, \sigma_{\text{упп}}, B, t) \quad (24)$$

Для получения достоверных математических моделей процесса слеживаемости для сыпучих материалов органического и неорганического

кого происхождения был поставлен комплексный эксперимент.

В дальнейшем по полученным экспериментальным данным были получены математические модели процесса слеживаемости для реальных сыпучих материалов с достаточно высокой точностью, в зависимости от предварительно-напряженного состояния -  $\sigma_{ypp}$ , сроков хранения -  $B$ , температуры -  $t$ , влажности материала -  $W$ .

В работе рассмотрен механизм контактного взаимодействия между частицами СМ - физические основы процесса слеживаемости.

### КРИТЕРИЙ СЛЕЖИВАЕМОСТИ СМ

Для характеристики процесса слеживаемости СМ, используя методы теории размерностей, аналитически было получено критериальное уравнение:

$$K_{\tau_{on}} = (K_{\sigma})^c \cdot (K_B)^{\ell}, \quad (25)$$

где  $K_{\tau_{on}} = \tau_{on} / T_n$  - критерий сдвиговых и прочностных свойств СМ;

$K_B = B \cdot v / d_1$  - критерий времени хранения, гранулометрии;

$v$  - скорость сдвига СМ;

$K_{\sigma} = \sigma_{ypp} / T_n$  - критерий предварительно-напряженного состояния СМ и прочностных его свойств;

$c, \ell$  - показатели степеней, указывающие взаимосвязь критериев.

Как показано экспериментально, критерий сдвиговых и прочностных свойств -  $K_{\tau_{on}}$  при одном и том же сроке хранения для одного и того же СМ в зависимости от  $\sigma_{ypp}$ , изменяется незначительно. Для разных сыпучих материалов  $K_{\tau_{on}}$  колеблется в значительных пределах и является мерой соотношения между  $\tau_{on}$  и  $T_n$ . Чем величина критерия  $K_{\tau_{on}}$  ниже, тем материал более когезионный. Однако, судить о способности СМ к слеживанию необходимо не только по вели-

чине  $K_{\text{гн}}$ , но так же по величинам критерия времени хранения, грануломорфологии -  $K_g$  и критерия предварительно-напряженного состояния СМ -  $K_{\sigma}$ . Чем величина  $K_{\sigma}$  выше, тем СМ способен лучше течь.

С увеличением сроков хранения СМ, способности их к истечению снижается и величина  $K_g$  возрастает, а рост размера частиц СМ приводит к улучшению сыпучести - величина  $K_g$  падает.

### МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМ

Для подтверждения теоретических положений процессов сдвига и слеживаемости СМ были разработаны научно-обоснованные методы и устройства для их определения, защищенные авторскими свидетельствами.

В основу разработанных методов и устройств положены:

измерение нормальных и тангенциальных напряжений непосредственно в плоскостях сдвига, разрыва СМ;

одновременность фиксации напряжений и деформаций, с записью на быстродействующих измерительных приборах, учет предварительно-напряженного состояния СМ перед началом эксперимента.

### ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

| № пп | Наименование работ | Место внедрения<br>годы | Реальный экономический эффект в тыс руб. |
|------|--------------------|-------------------------|------------------------------------------|
| 1    | 2                  | 3                       | 4                                        |

|   |                                                                                                   |                                 |      |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|
| I | Долевое участие в разработке РТМ 26-01-66-74, РТМ 26-01-129-80                                    | Северодонецкий филиал НИИХИММАШ | 55,8 |
|   | "Машины для переработки СМ. Метод выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей" | 1977...80                       |      |

| 1     | 2                                                                                                                            | 3                                                                               | 4                |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 2     | Теоретические разработки процессов сдвига и слеживаемости СМ, исследования, создание методов и устройств для их определения: | Северодонецкий филиал НИИХИММАШ, г. Северодонецк, 1978 г.                       | 70,98            |
|       | а) универсальная сдвиговая установка для определения $T_0, T_{01}, f, f_1$ по а.с. 418759, 518699, 968689;                   | ВНИИбиопрепаратов, г. Ленинград 1979... 1980<br>ВНИИХСЗР г. Москва 1979... 1984 | 107,4<br>1446,45 |
|       | б) устройство для определения удельного сопротивления на разрыв и отрыв СМ по а.с. 283659, 404001, 1164589;                  | ВНИИРЕАКТИВЭЛЕКТРОН г. Донецк 1980                                              | 32,4             |
|       | в) установка для определения слеживаемости СМ;                                                                               |                                                                                 |                  |
|       | г) устройство для определения коэффициентов бокового давления, по а.с. 1167476 и т.д.                                        |                                                                                 |                  |
| Итого |                                                                                                                              |                                                                                 | 1713,03          |

### ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ литературных источников, патентных материалов, опыт разработки технологических процессов, конструирования аппаратов и оборудования для сыпучих материалов показал, что вопросам теории процессов сдвига к слеживаемости сыпучих материалов уделено недостаточно внимания, несмотря на то, что только на основе

использования этой теории могут быть созданы современные высокопроизводительные автоматизированные системы управления технологическими процессами, аппараты, оборудование, обеспечивающие ритмичность производства, высокую производительность труда, качество готовой продукции и экологические условия для обслуживающего персонала.

2. Разработаны теоретические основы процессов сдвига и слеживаемости с использованием системного подхода к анализу этих процессов и выделены основные входные и выходные параметры системы.

3. Теоретически получена аналитическая зависимость линий предела текучести СМ. Доказано, что для реальных СМ она представляет собой выпуклую кривую, определяемую его основными физико-механическими свойствами, являющиеся функциями напряженного и предварительно-напряженного состояния материала.

4. Получена теоретическая зависимость взаимосвязи основных величин физико-механических свойств СМ - выходных параметров системы, исходя из системного подхода к анализу процессов сдвига в СМ, которая экспериментально подтверждена на ряде сыпучих материалов.

5. Разработана графическая интерпретация основных выходных параметров системы - физико-механических свойств СМ, использующая теорию процесса сдвига, при одинаковом напряженном и предварительно-напряженном состоянии СМ.

6. Экспериментально подтверждено, что показатель сдвига  $\eta_s$ , характеризующий процесс сдвига СМ, не зависит от напряженного состояния материала, а определяется его физико-механическими свойствами; получена зависимость показателя сдвига от влажности для ряда сыпучих материалов.

7. Теоретически получен критерий сыпучести материалов  $K_c$ ,

характеризующий способность СМ к истечению, зависящий от его основных физико-механических свойств и напряженного состояния материала; установлены качественные и количественные зависимости этого критерия для разных СМ.

8. Теоретически получена величина коэффициента подвижности сыпучих материалов, зависящая от его основных физико-механических свойств, и характеризующая распределение давлений в сыпучем материале в горизонтальном и вертикальном направлении.

9. Экспериментально доказано, что величина коэффициента бокового давления, характеризующая механизм передачи давления в сыпучем материале в горизонтальном направлении на боковые стенки сосуда, зависит от основных физико-механических свойств сыпучего материала, давления вышележащих слоев материала, а так же от материала ограждающей поверхности и её шероховатости.

10. Выделен, из основных параметров СМ определяющий выходной параметр – начальное удельное сопротивление сдвигу, влияющий на процесс слеживаемости, по которому предложено оценивать слеживаемость СМ.

11. Теоретически и экспериментально получен безразмерный критерий слеживаемости СМ –  $K_{\tau_{0n}}$ , характеризующий отношение начального удельного сопротивления сдвигу к удельному сопротивлению на разрыв СМ и определяемый критериями предварительно-напряженного состояния и прочностных его свойств –  $K_{\sigma}$ , критерием времени хранения и грануломорфологии –  $K_B$ .

12. Получена система математических моделей выходных параметров – основных физико-механических свойств СМ, характеризующих процесс сдвига в зависимости от его внутренних параметров.

13. Получены математические модели, характеризующие процесс слеживаемости в зависимости как от внутренних так и внешних параметров системы – СМ.

14. Применение системы математических моделей, характеризующих процесс сдвига и слеживаемости СМ, позволило решить ряд практических задач по обеспечению разработки оптимальных технологических процессов, аппаратов и оборудования для переработки, хранения и получения сыпучих материалов.

15. Научно-обоснованы и разработаны методы и приборы для определения физико-механических свойств сыпучих материалов, принцип работы и конструкции которых защищены авторскими свидетельствами и внедрены в производство.

16. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования были использованы при расчетах ряда технологических процессов, аппаратов и оборудования для переработки, транспортирования и хранения СМ, внедрение которых в производство обеспечивает ритмичность работы технологических процессов, оборудования и аппаратов, повышает их производительность и производительность труда, улучшает качество готовой продукции и экологические условия для обслуживающего персонала, что позволило получить в народном хозяйстве реальный экономический эффект от их внедрения – 1 млн. 713 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Карнаушенко Л.И. Критерий сыпучести порошкообразных материалов. – Изв. вузов, Пищ. техн., 1984, № 2, с. 97–100.
2. Карнаушенко Л.И. Влияние внешних факторов на упрочнение контактов между частицами мелкодисперсных сыпучих материалов. – В кн.: "Фрикционный контакт деталей машин". Калинин, КГУ, 1984, с. 70–74.
3. Карнаушенко Л.И. О взаимодействии основных физико-механических свойств сыпучих материалов. – В кн.: Тез. докл. конф. Физ.–

мех. процессы в зоне контакта деталей машин. Калинин, 1983, с. 126-132.

4. Карнаушенко Л.И. Сыпучесть порошкообразных материалов. - В кн.: Тезисы теорет. и практич. аспектов применения методов инж. физ.-хим. механики. М.: 1982, с.73.
5. Карнаушенко Л.И. Коэффициенты сопротивления сдвигу сыпучих материалов. - В кн.: Механика и физика контактного взаимодействия. Киев, 1978, с. 109-113.
6. Карнаушенко Л.И. Подвижность сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. II Всесоюз. конф. по коллоидной химии и физ.-хим. механике, Минск, 1977, с. 269-270.
7. Карнаушенко Л.И. Процесс сдвига мелкодисперсных сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. "Теория механической переработки полимерных материалов" (25-27 июня 1985 г), Пермь, Б.И., 1985, с. 83.
8. Карнаушенко Л.И. Методы и приборы для определения физико-механических свойств сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. У научно-технич. конф. по физ.-хим. торфа. Калинин, 1981, с.16.
9. Карнаушенко Л.И. Взаимная связь основных физико-механических свойств сыпучих материалов с подвижностью. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов", (17-18 сентября 1980 г.), Одесса, 1980, с.41-42.
10. Карнаушенко Л.И. Исследование и разработка методик для определения механических свойств сыпучих материалов: Автореф. дис...канд. техн. наук. - Кривой Рог, 1970 - 22 с.
11. Карнаушенко Л.И. Контактное взаимодействие между частицами твердой фазы дисперсных структур - В кн.: "Физико-химическая механика дисперсных систем и материалов" (октябрь 1983): Тез. II Республ. конф. - Киев, Наукова думка, 1983, с.11.
12. Карнаушенко Л.И. К вопросу создания нормативных методов опре-

- деления физико-механических свойств сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. II Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 ноября 1971г), Одесса, 1971, с.52.
13. Карнаушенко Л.И., Иоргачева Е.Г., Осташевская Е.В. Влияние внешних факторов на процесс сдвига сыпучих материалов. - Хлебопек. и конд. пр-ть, 1984, № 3, с.27-29.
14. Карнаушенко Л.И., Иоргачева Е.Г. Сдвиговые свойства мелкодисперсных сыпучих материалов химической промышленности. - Изв. вузов, Хим. и хим. технол., 1985, т.28, вып. 4, с.99-102.
15. Карнаушенко Л.И., Донской Д.М. Критериальное уравнение слеживаемости мелкодисперсных сыпучих материалов. - Инж.-физ. журн., 1983, т.15, № 4, с. 667-668 - (Рук. деп. в ВИНТИ 05.05.83 рег. 2482-83, 12с ).
16. Карнаушенко Л.И., Новичкова Т.П. Экспериментальное исследование процесса слеживаемости мелкодисперсных сыпучих материалов. - Инж:физ. журн. 1984, т.7, № 3, с.484-485 - (Рук. деп. в ВИНТИ 12.04.84 рег. № 2229-84, - 9 с)
17. Карнаушенко Л.И., Иоргачева Е.Г. Физико-механические показатели сухих молочных продуктов. - Молоч. промышл., 1985, № 7, с. 18-19.
18. Карнаушенко Л.И., Новичкова Т.П., Яковенко А.И. Математические модели слеживаемости для муки и какао-порошка. - Изв.вузов, Пищ.технол., 1984, № 6, с. 72-74.
19. Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т., Корнев Н.К. Исследование слеживаемости некоторых сыпучих материалов химической промышленности. - Изв. вузов. Хим. и хим. технол., 1979, вып. 3, с. 377-380.
20. Карнаушенко Л.И., Донской Д.М., Яценко С.Ф. Грануломорфологический состав мелкодисперсных сыпучих материалов. - Изв. вузов, Пищ. технол., 1985, № 1, с. 79-81.

21. Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т., Новичкова Т.П. Исследование слеживаемости сыпучих материалов пищевой промышленности. – В кн.: Тез.теорет. и практич. аспектов применения методов инж.физ.-хим. механики. – М.: 1982, с.74.
22. Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н. К вопросу исследования сдвиговых процессов в сыпучих средах. – В кн.: Физика аэродисперсных систем, Киев, 1972, вып. 7, с.127-131.
23. Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н., Ковтун А.П. Коэффициенты внутреннего трения сыпучих сред. – Изв. вузов, Пищ. технол. 1968, № 5, с. 154-156.
24. Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н., Ковтун А.Н. Влияние размера частиц на коэффициент внутреннего трения в сыпучих средах. – Изв. вузов, Пищ. технол., 1968, № 2, с. 114-116.
25. Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н. Исследование влияния некоторых параметров сыпучих материалов на их физико-механические свойства: – В кн.: Тез.докл. II Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 ноября 1971)Одесса, 1971, с.39-40.
26. Карнаушенко Л.И., Науменко В.И. Физико-механические свойства сыпучих материалов. – В кн.: Тез.совещ. по физ.-хим. торфа, Минск, 1979, с.46-47.
27. Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т., Корнев Н.К. Модули деформации пшеницы. – Изв. вузов. Пищ. технол., 1979, № 6, с.101-103.
28. Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т., Осадчий К.Т. Исследование физико-механических свойств пшеничной муки. – В кн.: Тез.докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 ноября 1975 г), Одесса, 1976, с. 53-54.
29. Карнаушенко Л.И., Чмырь А.Д., Тепляк Э.Б. К вопросу определения твердости частиц и гранул. – В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 сентября 1975 г),

Одесса, 1976, с. 55-56.

30. Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т. Исследование влияния внешних факторов на величину начального удельного сопротивления сдвигу и коэффициентов внутреннего трения плохосыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г), Одесса, 1980, с. 50.
31. Карнаушенко Л.И., Корнев Н.К., Цыналевский В.Т. Исследование слеживаемости дробленых руд. - Изв. вузов, Горн. журн., 1978, № 1, с. 7-10.
32. Карнаушенко Л.И., Бондаренко М.В., Глушков В.Е. Исследование сцепления в железных рудах. - В кн.: Разработка рудных месторождений. Киев, Техника, 1970, 10, с. 32-35.
33. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И. Слеживаемость мелкодробленых железных руд. - Изв. вузов. Горн. журн., 1971, № 4, с. 75-76.
34. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И. Трение в мелкодробленых железных рудах. - Изв. вузов, Горн. журн., 1970, № 3, с. 71-72.
35. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И. Физико-механические свойства сыпучих материалов. - В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов (16-18 сент бря 1975 г.), Одесса, 1976, с. 37-38.
36. Платонов П.Н., Глушков Е.В., Карнаушенко Л.И. Некоторые физико-механические свойства сыпучих материалов. - В кн.: Физика аэродисперсных систем. Киев, Б.И., 1970, вып. 3, с. 142-147.
37. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И. Исследование параметров и механических свойств мелкодробленых железных руд. - Изв. вузов. Горн. журн., 1972, № 3, с. 169-172.
38. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Осадчий С.А. К вопросу определения плотности укладки сыпучих сред. - В кн.: Материалы

всесоюз. межвуз. науч. конф. по процессам в дисперсных сквозных потоках. Одесса, Б.И., 1967, с. 10-11.

39. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Глушков В.Е. О внутреннем трении в железных рудах. - Изв. вузов, Горн. журн., 1969, № 8, с. 23-25.
40. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Глушков В.Е. Физико-механические свойства сыпучих материалов. - Реф. информ. О Законч. научно-исследоват. работах в вузах УССР, - Пищ. пр-ть, 1970, вып. 4, с. 24-25.
41. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Глушков В.Е. Влияние влажности на коэффициент внутреннего трения сыпучих материалов. - Пищ. пр-ть, 1970, № 1, с. 17.
42. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Панин Г.А. Исследование физико-механических свойств некоторых сыпучих материалов химической промышленности. - В кн.: III Республ. конф. "Повышение эффект. и совершенств. процесс. и аппарат. хим. производств", Львов, 1973, с. 237.
43. Платонов П.Н., Карнаушенко Л.И., Глушков В.Е. О коэффициенте внутреннего трения зерна. - Мук.-элеват. пром., 1969, № 8, с. 23.
44. Бондаренко М.В., Кивенко Ф.И., Карнаушенко Л.И. О выборе рациональных параметров бункеров для сыпучих материалов. - Конструир. и технол. произв. сельск. машин. 1979, вып. 9, с. 29-30.
45. Глушков В.Е., Карнаушенко Л.И. Физические основы и перспективы развития методов измерения физико-механических свойств сыпучих материалов. - В кн.: II Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов", (16-18 ноября 1971), Одесса, 1971, с. 53-54.
46. Глушков В.Е., Карнаушенко Л.И., Платонов П.Н. Физико-механи-

- ческие свойства сыпучих материалов: - В кн.: Дисперсные среды в гидротехническом строительстве. Л.: Энергия, 1972, с. 67-70.
47. Исследование физико-механических свойств сыпучих материалов. /Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов, Н.К.Корнев и др.- Изв. вузов, Хим. и химич. технолог., 1974, т. 17, вып. 2, с. 1721-1724.
  48. Исследование сдвиговых характеристик гидролизных дрожжей. /Л.И.Карнаушенко, А.Д.Чмырь, П.Н.Платонов и др. - Гидролиз. пр-во, 1973, вып. 8, с. 14-16.
  49. Исследование органоминеральных удобрений /Л.И.Карнаушенко, А.Д.Чмырь, Н.К.Корнев и др. - Гидролиз. пр-во, 1974, № 2, (56), с. 6-8.
  50. Исследование модулей деформации зерна пшеницы. /Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, В.Т.Цыналевский и др. - В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов (16-18 сентября 1980 г)", Одесса, 1976, с. 38-40.
  51. Исследование сдвиговых характеристик смеси гидролизных дрожжей с активным илом. /А.Д.Чмырь, Л.И.Карнаушенко, Э.Б.Геплюк и др. - В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 сентября 1975 г), Одесса, 1976, с. 44-45.
  52. Исследование физико-механических свойств гранулированной люцерны. /В.И.Науменко, Л.И.Карнаушенко, А.Т.Безусов и др. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г), Одесса, 1980, с. 72.
  53. Исследование физико-механических свойств и слеживаемости мелкодробленых медно-молибденовых руд. /П.Н.Платонов, Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев и др. - В кн.: Тез. докл. II Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (16-18 ноября 1971г), Одесса, 1971, с. 40-41.
  54. Изучение влияния вибрации на состояние сухих товарных дрожжей

- /В.Е.Глушков, Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов и др. - В кн.: **Транспортировка и хранение кормовых дрожжей.** М., 1970; с. 41-43.
55. К вопросу исследования сдвиговых процессов в мелкодробленых железных рудах ЦТОК'а. /В.Е.Глушков, Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов и др. - Изв. вузов. Горн. журн., 1970, № 9, с.28-32.
  56. К вопросу исследования физико-механических свойств сыпучих материалов. /П.Н.Платонов, В.Е.Глушков, Л.И.Карнаушенко и др. - Инж. физ. журн., 1970, т.18, № 4, с.702-707.
  57. Кудрявцев М.С., Кузмич С.Н., Карнаушенко Л.И. К вопросу о выпуске руды из бункеров Криворожского ЦТОК. Разработка рудных месторождений. 1971, № 11, с. 120-121.
  58. Осташевская Е.В., Карнаушенко Л.И., Корнев Н.К. Поверхностные свойства сыпучих материалов на границе с твердыми телами. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г). Одесса, 1980, с.42..
  59. Определение удельного сопротивления на разрыв мелкодисперсных сыпучих материалов. / П.Н.Платонов, Л.И.Карнаушенко, В.Е.Глушков и др. - В кн.: **Транспортировка и хранение кормовых дрожжей.** М.; 1970, с. 37-40.
  60. О физико-механических свойствах дрожжей гидролизного производства. /П.Н.Платонов, Л.И.Карнаушенко, А.Д.Чмырь и др. - Изв. вузов, Пищ. технол., 1972, № 1, с. 99-102.
  61. Прочностные характеристики сыпучих материалов, используемых в химической промышленности. / Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, В.Т.Цыналевский и др. - Изв. вузов. Хим. и химич. технолог., 1985, т.28, вып. 3, с. 106-108.
  62. Прочность мелкодисперсных сыпучих материалов. /Л.И.Карнаушенко, Е.Г.Иоргачева, С.В.Гедзира и др. - В кн.: "Физико-химическая механика дисперсных систем и материалов" (октябрь 1983);

Тез. докл. II Республ. конф., Киев, 1983, с. 12.

63. Прибор для определения сил адгезии мелкодисперсных сыпучих материалов. / Л.И.Карнаушенко, В.Т.Цыналевский, Н.К.Корнев и др. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980г), 1980, с.284.
64. Прибор для определения удельной силы разрыва мелкодисперсных сыпучих материалов. /В.Т.Цыналевский, Л.И.Карнаушенко, Е.В. Осташевская и др. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г), Одесса, 1980, с. 285.
65. Прибор для определения коэффициентов внутреннего трения в движении и начального удельного сопротивления сдвигу мелкодисперсных сыпучих материалов. / Н.К.Корнев, Л.И.Карнаушенко, В.Т.Цыналевский и др. - В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980г), Одесса 1980, с. 285.
66. Свойства гранулированной травяной муки из люцерны. /В.И.Науменко, С.М.Дудкин, Л.И.Карнаушенко и др.- Мукомольно-элеват. и комбикор. пр-ть, 1981, № 7, с.41-42.
67. Сухие дрожжи из парафинов нефти и их изменение в процессе хранения. /В.Е.Глушков, Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов и др. - Мукомольно-элеват. пром., 1969, № 5, с.19.
68. Улучшение сыпучести компонентов за счет ввода в них структурообразователя. /Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов, Г.Я.Негребов и др. - В сб. Хранен. и перераб. зерна. М.: 1972, с.11-16.
69. Физико-механические свойства порошкообразных сухих товарных дрожжей. /В.Е.Глушков, Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов и др. - В кн.: Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. М.: 1970, с. 34-37.
70. Физико-механические свойства пшеничной муки. /Л.И.Карнаушенко,

А.Д.Чмырь, В.И.Науменко и др. – Хлебопек. и конд. пр-ть, 1977, № 8, с. 22-23.

71. Физико-механические свойства дробленых гранул БВК, полученных из парафинов нефти. /А.Д.Чмырь, Л.И.Карнаушенко, О.В.Кузьмина и др. – В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г), Одесса, Б.И., 1980, с. 58-59.
72. Физико-механические свойства гранул сухих товарных дрожжей. /П.Н.Платонов, Л.И.Карнаушенко, В.Е.Глушков и др. – В кн.: Транспортировка и хранение кормовых дрожжей. М., 1970, с.94-95.
73. Чмырь А.Д., Карнаушенко Л.И., Цыналевский В.Т. Прибор для определения сопротивления сдвигу мелкодисперсных сыпучих материалов. – Заводская лаборатория, 1978, № 8, с.1022-1023.
74. Чмырь А.Д., Карнаушенко Л.И., Шатунова А.С. Исследование влияния внешних факторов на слеживаемость мелкодисперсных сыпучих материалов. – В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов" (17-18 сентября 1980 г), Одесса, 1980, с. 55-56.
75. Glushkov V.E., Karnaushenko L.I., Platonov P.N. Internal Friction of Granular Materials. – Lecture Summaries. Mechanics of Granular Materials and Powders, III International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Construction and Automation, 1969, Marianske Lazne, Czechoslovakia, p. 34-35.
76. Platonov P.N., Glushkov V.E., Karnaushenko L.I. Physical model of granular state of solids. – Lecture Summaries. Mechanics of Granular Materials and Powders. III International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Construction and Automation, 1969, Marianske Lazne, Czechoslovakia, p. 6-7.

77. А.с. 283659 (СССР) Прибор для определения силы сцепления на разрыв мелкодисперсного сыпучего материала. /Одес. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт. изобрет. Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов, В.Т.Цыналевский и др. - Заявл. 10.04.69 № 1320903/29-33; Оpubл. в Б.И., 1970, № 31.
78. А.с. № 4040(I) (СССР) Прибор для определения силы сцепления на разрыв мелкодисперсного сыпучего материала. /Одес. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт. изобрет. Л.И.Карнаушенко, П.Н.Платонов, Н.К.Корнев и др. - Заявл. 12.04.71 № 1645617/25; Оpubл. в Б.И., 1973, № 43.
79. А.с. № 418759 (СССР) Устройство для определения сопротивления сдвигу мелкодисперсных сыпучих материалов в покое и движении. /Одес. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт. изобрет. П.Н.Платонов, Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев и др. - Заявл. 20.10.71 № 1708566/29-33; Оpubл. в Б.И., 1974, № 9.
80. А.с. 518699 (СССР) Прибор для определения трения дисперсной сыпучей среды о твердую поверхность образца. / Одес. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт. изобрет. Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Г.А.Панин и др. - Заявл. 17.07.73 № 1945076/25-28; Оpubл. в Б.И., 1975, № 23.
81. А.с. 968689 (СССР) Устройство для определения сопротивления сдвигу сыпучих материалов. /Одесс. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт.изобрет. Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, В.Т.Цыналевский. - Заявл. 29.05.82 № 3297369/33; Оpubл. в Б.И., 1982, № 39.
82. А.с. 1164589 (СССР) Прибор для определения силы сцепления на разрыв мелкодисперсных сыпучих материалов /Одес. технол. ин-т пищ. промышл. им. М.В.Ломоносова; авт. изобрет. Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, В.Т.Цыналевский и др. - Заявл. 30.03.84 № 3720597/03; Оpubл. в Б.И., 1985, № 24.

83. А.с. II67476 (СССР) Устройство для определения коэффициента бокового давления мелкодисперсных сыпучих материалов. /Одобрено технол. ин-т пищ. промыш. им. М.В.Ломоносова; авт. изобретения Л.И.Карнаушенко, В.Т.Цыналевский, Е.В.Осташевская и др. - Заявл. 23.02.84 № 3703911/22-03; Оpubл. в О.И., 1985, № 26

*Карнаушенко*