

Двтор ер.

П 12

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

ПАВЛОВСЬКИЙ Сергій Миколайович



РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЗДАТНОСТІ ДО ВИГІКАННЯ
СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Спеціальність : 05.18.12 - процеси, машини та агрегати
харчових виробництв

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеню
кандидата технічних наук

Одеса - 1994

CV

Робота виконана в Одеської Державної Академії харчових
технологій

Науковий керівник:

член кор.АНТКУ доктор технічних
наук, професор Карнаушенко Л.І.

Офіційні опоненти:
ОНАХТ 25.07.12
Розробка методів оці



v017139

доктор технічних наук,
професор Дударев І.Р.

кандидат технічних наук,
ст.н.с. Гапонюк О.І.

Провідна установа: НПО "Харчопромавтоматика"

Захист відбудеться "18" жовтня 1994 р. о ____ год.
на засіданні спеціалізованої ради К 068.35.02 при Одеської
Державної Академії харчових технологій,
270039, м.Одеса, вул. Свердлова, 112.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської
Державної Академії харчових технологій.

Автореферат розісланий "17" 06 1994 р.

v017139

ОДАХТ
Бібліотека

Вчений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук,
член кор.АНТКУ, професор

Карнаушенко Л.І.

12

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В умовах переходу до ринкової економіки підвищуються вимоги до якості перероблюваної сировини і напівфабрикатів, що в свою чергу призводить до зміни технічних вимог до устанкування та машин, які створюються та експлуатуються.

На шляху до вдосконалення теоретичного опису процесів зберігання, переміщення та витікання сипучих матеріалів СМ існують труднощі, які обумовлені неозначенністю напруженого стану і розподіленням тиску СМ після його завантаження в ємкість. Цей тиск в більшості випадків залежить від способу завантаження і тривалості перебування СМ в ємкості. За час зберігання СМ відбувається зміна їх фізико-механічних властивостей, що в свою чергу приведе до зміни їх рухливості, тобто здатності сипучих матеріалів стікати.

В результаті цього при випуску СМ із ємкості змінюється характеристика потоку всередині ємкості і на виході з неї, що призводить до порушення граничних режимів роботи дозуючих і транспортуючих приладів.

Облік величин, які визначають рухливість СМ в розрахунковій практиці при створенні апаратів, устанкування по переробці СМ, призводить до ритмічності цих процесів, безперебійності роботи апаратів і устаткування, зниженню енергомісткості. Відсутність достатньо науково обгрунтованих методів і пристосувань для визначення рухливості, теоретичних розробок, а також цілених величин рухливості з урахуванням впливу на них зовнішніх і внутрішніх параметрів, приводило до того, що створювані апарати і обладнання по переробці СМ не в повній мірі відповідали вимогам промисловості.

Метою роботи являється наукове обгрунтування і розробка методу оцінки процесу стікання сипучих матеріалів з урахуванням впливу на цей процес внутрішніх і зовнішніх параметрів СМ для використання отриманих даних в розрахунковій практиці при конструюванні та проектуванні технологічного та транспортуючого устаткування, пов'язаного з забезпеченням ритмічності технологічних процесів по переробці і акумулюванні сипучих матеріалів харчової промисловості.

В відповідності до поставленої мети необхідно вирішити
слідуючі завдання:

- теоретично отримати критерій рухливості СМ і його взаємозв'язок з другими критеріями;
- отримати аналітичний взаємозв'язок швидкості стікання з основними фізико-механічними властивостями СМ та його рухливості;
- на основі системного підходу до аналізу процесу стікання роз-

винуті теорію початку витікання СМ, виявляючи вплив на нього внутрішніх і зовнішніх параметрів СМ;

- науково обґрунтувати і розробити методики і прилади для оцінки процесу стікання СМ;

- на базі приведених досліджень, використати математичні моделі і експериментальні дані, які характеризують процес витікання СМ в розрахунковій практиці при розробці технологічних процесів, апаратів і обладнання для їх зберігання, дозування і транспортування.

Наукова новизна роботи:

- отримано критеріальне рівняння сипучого матеріалу, яке описує взаємозв'язок критерія рухливості СМ з критеріями здатності сипучого матеріалу до склепіннеутворення і тривалості зберігання СМ під заданим напруженням станом;

- теоретично обґрунтовано взаємозв'язок швидкості стікання СМ, яка характеризує здатність до стікання, з основними фізико-механічними властивостями СМ;

- використано системний підхід до аналізу процесу здатності до стікання СМ, на основі чого отримано математичні моделі цього процесу;

- запропоновано науковообґрунтовані методи і прилади для оцінки здатності СМ до стікання.

На захист виносяться такі наукові положення:

- критеріальне рівняння рухливості СМ;
- аналітичний взаємозв'язок швидкості стікання з основними фізико-механічними властивостями СМ;

- математичні моделі процесу початку рухливості СМ;

- методи для оцінки рухливості СМ.

Практичне значення:

Отримані аналітичні залежності і експериментальні дані по дрібнодисперсним сипучим матеріалам, характеризуючі процес початку стікання та рухливості СМ, дозволяють використовувати їх при оптимізації технологічних процесів, для створення апаратів і обладнання, пов'язаних зі зберіганням, транспортуванням і дозуванням сипучих матеріалів.

Метод і прилад для визначення параметрів і властивостей дрібнодисперсних СМ захищено авторським свідоцтвом: А.с. №1777038 від 22.07.92 р.

Результати роботи запровадженні в НПО "Харчопромавтоматика".

Запроваджений метод і прилад для визначення коефіцієнтів рухливості, склепіннеутворення і деформативних характеристик, а також отримані результати, дозволяють їх використати в проектній праці при створенні технологічного, акумулюючого і транспортуючого устаткування.

Представлена робота виконана на кафедрі "Технології хлібопекар-

ських і кондитерських виробництв".

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на У Всесоюзній конференції "Механіка сипучих матеріалів" /Одеса - 91р./, Всесоюзній науково-практичній конференції "Вчені і спеціалісти - в вирішенні соціально-економічних проблем країни" /Ташкент - 90р./, III Всесоюзній науково-практичній конференції "Теоретичні і практичні аспекти застосування методів інженерної фізико-хімічної механіки з метою вдосконалення і інтенсифікації технологічних процесів харчових виробництв /Москва - 90р./, III Міждержавній нараді по приладобудівництву /Одеса - 92р./, а також на щорічних конференціях професорсько-викладацького складу і наукових співпрацівників ОТІХП ім.М.В.Ломоносова /Одеса, 1990 - 93рр./.

Публікація результатів. По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових робіт, в тому числі одне авторське свідоцтво.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна праця складається з вступу, п'яти розділів, висновків і рекомендацій, списку літератури і додатків. Праця викладена на 170 сторінках машинописного тексту і вміщує 45 малюнків, 4 таблиць, 2 додатки. Список літератури вміщує 129 назв, в тому числі 21 закордонних авторів.

ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі проводиться аналіз літературних джерел по оцінці сипучості матеріалів.

Розглядаються праці вчених: Р.Л.Зекнова, Е.В.Дженіке, П.Н.Платонова, А.Д.Зімона, Ю.А.Мачіхіна, А.А.Мачіхіна, Є.І.Шемякина, А.Ф.Ревуженко, Є.І.Андріанова, Л.І.Карнаушенко, А.В.Каталимова, Н.К.Залданішвілі, І.Р.Дударева, Є.Г.Іоргачової, О.І.Гапонюка, В.П.Архіпенко, М.Аракава, Є.В.Осташевської, Н.А.Макмак, О.Р.Квапіл, А.В.Макеєва та інших.

Приведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що до сьогоднішнього часу праці, присвячені оцінці процесу витікання СМ, особливо методи визначення рухливості, в залежності від різних напружених станів, тривалості зберігання, вологості і температурних режимів, практично відсутні.

Існуючі методи і прилади для оцінки процесу витікання СМ не дозволяють порівнювати отримані розрахункові і експериментальні дані для різних сипучих матеріалів і оцінювати процес витікання з урахуванням зовнішніх і внутрішніх параметрів, а також не використовується більшість фізичних величин, які визначають цей процес.

Відсутній також критерій рухливості СМ, який містить в собі тривалість зберігання і умови накопичення і відвантаження сипучих матеріалів.

В зв'язку з цим, обумовлена необхідність дослідження властивостей, визначаючих процес витікання СМ, з урахуванням впливу на цей процес зовнішніх і внутрішніх параметрів СМ, а також опрацювання науково-обґрунтованих методів і приладів для їх визначення.

В другому розділі виділені основні параметри, які оцінюють процес витікання: швидкість витікання і критерій рухливості m .

Сипучий матеріал являє собою дискретну статичну систему. З огляду на складність процесу витікання СМ, що залежить як від конструктивних параметрів акумулюючих приладів, зовнішнього впливу, так і параметрів СМ, які визначають здатність його до витікання, зупинимося на останніх.

Для визначення здатності СМ до початку витікання важливо значення набуває критерій рухливості, що являє собою співвідношення між розподіленням вертикальної G_1 і горизонтальної G_2 напруги в сипучому матеріалі.

Виникаюча горизонтальна напруга G_2 , яка виникає на поверхні посудини, залежить від вертикальної напруги G_1 , напруги в зведенні G_{on} , часу зберігання сипучого матеріалу B в заданному напруженому стані G_n , температури навколишнього середовища t , швидкості завантаження матеріалу U_1 , а також деформативних характеристик, зокрема коефіцієнта постелі e , який визначається як відношення вертикальної напруги G_1 , до абсолютної деформації матеріалу:

$$e = \frac{G_1}{\delta} \quad 1$$

При постійній температурі навколишнього середовища $t = \text{const}$, відносній вологості повітря і без зовнішнього впливу на СМ передача тисків в горизонтальному напрямі на боковій сходинці посудини може бути записана в вигляді:

$$G_2 = f(G_1, G_{on}, B, U_1, e) \quad 2$$

Припускаючи, що між перемінними величинами існує певний функціональний зв'язок в відомому діапазоні, рівняння прийме вигляд:

$$G_2 = A [G_1]^a [G_{on}]^z [B]^l [U_1]^b [e]^z \quad 3$$

Уявляючи розмірності співвідносних величин, отримаємо рівняння розмірностей:

$$\left[\frac{H}{M^2} \right] = \left[\frac{H}{M^2} \right]^a \left[\frac{H}{M^2} \right]^z \left[\frac{M}{C} \right]^l \left[\frac{M}{C} \right]^b \left[\frac{H}{M^3} \right]^z \quad 4$$

Порівнюючи показники ступенів одноіменних одиниць вимірів, отримаємо систему трьох порівнянь з п'ятьма невідомими. Приймаючи невідомими величинами Z , z виразимо через них невідомі a , l , b і підставивши їх в рівняння /3/, отримаємо:

$$\sigma_2 = [\sigma_1]^{1-z-z} [\sigma_{on}]^z [B]^z [U_1]^z [e]^z \quad 5$$

Групуючи величини рівняння з однойменними буквеними показниками, отримаємо:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = A \left[\frac{\sigma_{on}}{\sigma_1} \right]^z \left[\frac{B U_1 e}{\sigma_1} \right]^z \quad 6$$

де $\sigma_2/\sigma_1 = m$ - коефіцієнт рухливості матеріалу;
 $\sigma_{on}/\sigma_1 = x$ - коефіцієнт здатності сипучого матеріалу до склепіннеутворення;
 $\frac{B U_1 e}{\sigma_1} = \lambda$ - коефіцієнт тривалості зберігання сипучих матеріалів під заданим напруженим станом σ_1 .

Підставивши співвідносні значення в рівняння /6/, отримаємо наступне рівняння:

$$m = A x^z \lambda^z \quad 7$$

По отриманим коефіцієнтам, що входять до рівняння рухливості, можемо оцінити зміни сипучості різних дисперсних матеріалів в залежності від часу витримки СМ.

Сипучість дисперсних матеріалів визначається швидкістю їх витікання, яка в свою чергу залежить як від природи матеріалу, так і від зовнішніх та внутрішніх параметрів СМ.

Розглянемо чим обумовлюється швидкість витікання з випускних отворів бункерів, вважаючи незмінними зовнішні параметри, $t = \text{const}$, $W_i = \text{const}$, геометрія бункера не змінюється і немає зовнішніх динамічних навантажень.

Згідно праць Р.Л.Зенкова, швидкість витікання U з випускного отвору визначається рівнянням:

$$U = \sqrt{2 \frac{\sigma_{cp}}{\rho_n}} \quad 8$$

де σ_{cp} - середній тиск над випускним отвором;
 ρ_n - насипна густина.

Середній тиск, виникаючий від маси вищележачого стовпа СМ, розміщеного над випускним отвором, величина не постійна і залежить від напруги склепіннеутворення σ_{10} виникаючої в центрі випускного отвору, а також від напруги, розміщеної на межі розділу СМ з оточуючою поверхнею $\sigma_{2\delta}$, тобто:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{10} + \sigma_{2\delta}}{2} \quad 9$$

Графічно цей стан СМ інтерпритується лінією стану і колами Мора граничної напруги, представлених на мал.І.

В момент випуску СМ, що знаходиться в напруженому стані, характе-

ризується на лінії граничної рівноваги точкою Б, в ньому виникає напруга склепіннеутворення σ_{10} . Але потрібно зауважити, що ця величина залежить від того напруженого стану, в якому знаходиться СМ до моменту випуску його з акумулюючої ємкості через вихідний отвір. На межі розділу СМ з дном і боковими стінками випускного отвору буде виникати напруга $\sigma_{2\delta}$.

Шляхом геометричних перетворень отримаємо:

$$BD = \tau_{0\delta} + \sigma_{2\delta} \operatorname{tg} \varphi, \quad \text{I0}$$

де φ - кут внутрішнього тертя;

$\tau_{0\delta}$ - початковий питомий опір зрушення.

Для визначення величини DO_1 скористуємось залежністю:

$$DO_1 = (\tau_{0\delta} + \sigma_{2\delta} \operatorname{tg} \varphi) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \text{I1}$$

Значення $\sigma_{2\delta}$ по величині рівно OD і визначається із співвідношення:

$$OD = OE - 2 DO_1 \quad \text{I2}$$

Підставивши відповідні значення DO_1 в рівняння /I2/ і перетворивши його отримаємо:

$$\sigma_{2\delta} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi) = \sigma_{10} - 2 \tau_{0\delta} \operatorname{tg} \varphi \quad \text{I3}$$

Згідно праць Р.Л.Зенкова, відомо, що $m = \sigma_{2\delta} / \sigma_1$, $x = \sigma_{10} / \sigma_1$, тоді розділивши рівняння I3 на величину σ_1 отримаємо:

$$m(1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi) = x - \frac{2 \tau_{0\delta} \operatorname{tg} \varphi}{\sigma_1} \quad \text{I4}$$

Визначивши з рівняння /I4/ величину $\tau_{0\delta}$ і розділивши це рівняння на величину напруги склепіннеутворення σ_{10} , отримаємо:

$$\tau_{0\delta} = \frac{\sigma_{10} (1 - \frac{m}{x} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi))}{2 \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{I5}$$

Підставивши рівняння /I5/ в рівняння /I3/ і після відповідних перетворень отримаємо:

$$\sigma_{2\delta} = \sigma_{10} \frac{m}{x} \quad \text{I6}$$

Підставивши значення /I6/ в /9/ отримаємо середню напругу:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{10} (x + m)}{2 x} \quad \text{I7}$$

Підставивши значення I7 в рівняння /8/ отримаємо значення швидкості витікання СМ при обмежених зовнішніх параметрах системи:

$$v = \sqrt{\frac{\sigma_0 (x + m)}{\rho_n x}} \quad \text{I8}$$

Фактична швидкість витікання буде менша, ніж швидкість, що визначається по рівнянню /I8/, так як при її виведенні не рахувались втрати на внутрішній тиск і на зовнішній тиск СМ з обмеженою поверхнею. Для обліку цих втрат в рівняння /I8/ вводиться емпіричний

коефіцієнт – K , що визначається як відношення фактичної швидкості витікання до теоретичної.

Таким чином рівняння 18 приймає вигляд:

$$V = K \sqrt{\frac{G_0(x+m)}{\rho_n x}} \quad 19$$

В розділі також розглядається взаємозв'язок впливу вхідних і вихідних параметрів на швидкість витікання, використовується комплексний підхід до аналізу цього процесу.

В третьому розділі приведені описи методів і конструкцій експериментальних приладів для оцінки зміни коефіцієнту рухливості і швидкості витікання СМ в процесі їх зберігання під напруженим станом G_i .

За основу об'єктів дослідження були вибрані сипучі матеріали, які використовують в харчовій промисловості та інших галузях народного господарства, порошкоподібні: борошно пшеничне першого сорту при вологості $W = 10,1; 13,42; 15,4 \%$; крохмаль маїсовий; какао-порошок; сухе молоко; каолін; дрібнозернисті: пшеничні висівки; просо.

При дослідженні рухливості СМ вертикальний напружений стан G_i в досліджуваних сипучих матеріалах змінювався від 5 до 50 кПа, в деяких випадках збільшували до 80 кПа, час перебування матеріалу в заданих умовах змінювався від 5 хв. до 3 діб, в деяких випадках до 5 діб.

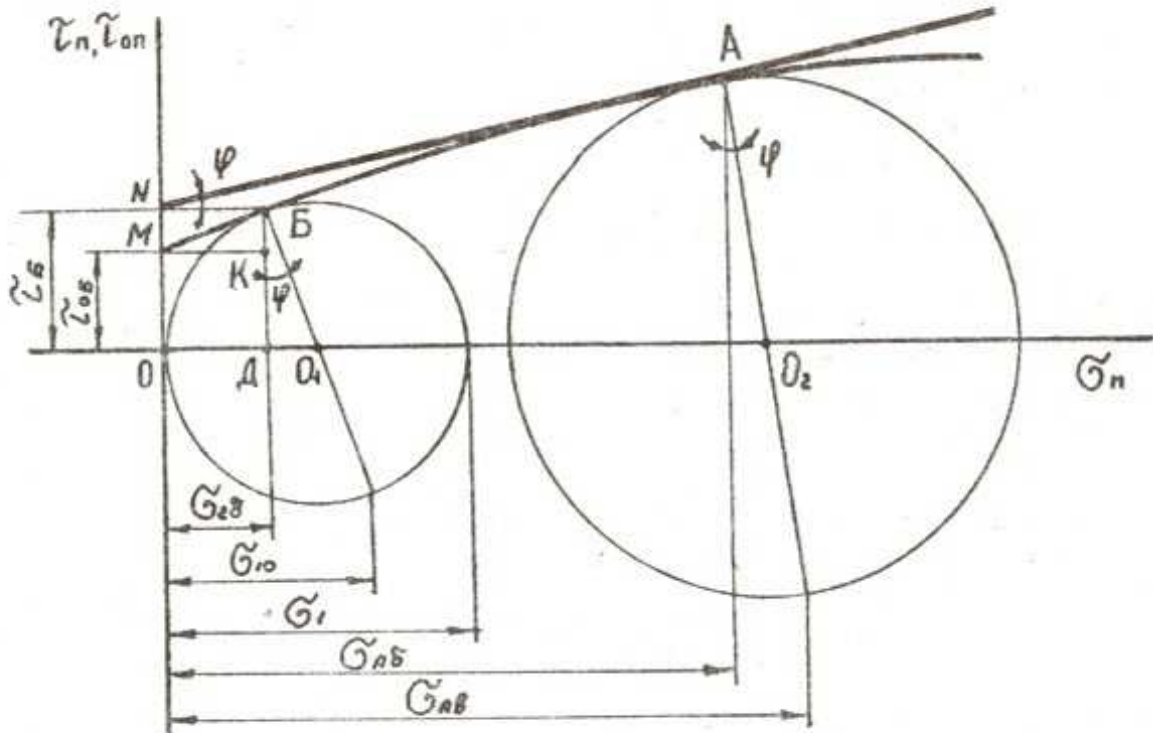
Опрацьований метод і експериментальна установка для визначення рухливості сипучих матеріалів при умові їх зберігання захищені а.с. № 1777038 від 22 липня 1992 р.

Ця установка дозволяє визначити основні коефіцієнти СМ, характеризуючі процес їх витікання: коефіцієнт рухливості матеріалу – m , коефіцієнт здатності СМ до склепіннеутворення x , величину напруги в зведенні G_0 , а також деформативні характеристики. Порядок проведення експерименту полягає в тому, що за допомогою винта 16 завантажується тензобалка 22, що притискує бічну вставку II до циліндра 2 з силою, значно перебільшуючою максимально допустиму силу бокового тиску СМ в зоні бокової вставки циліндра /мал.2/.

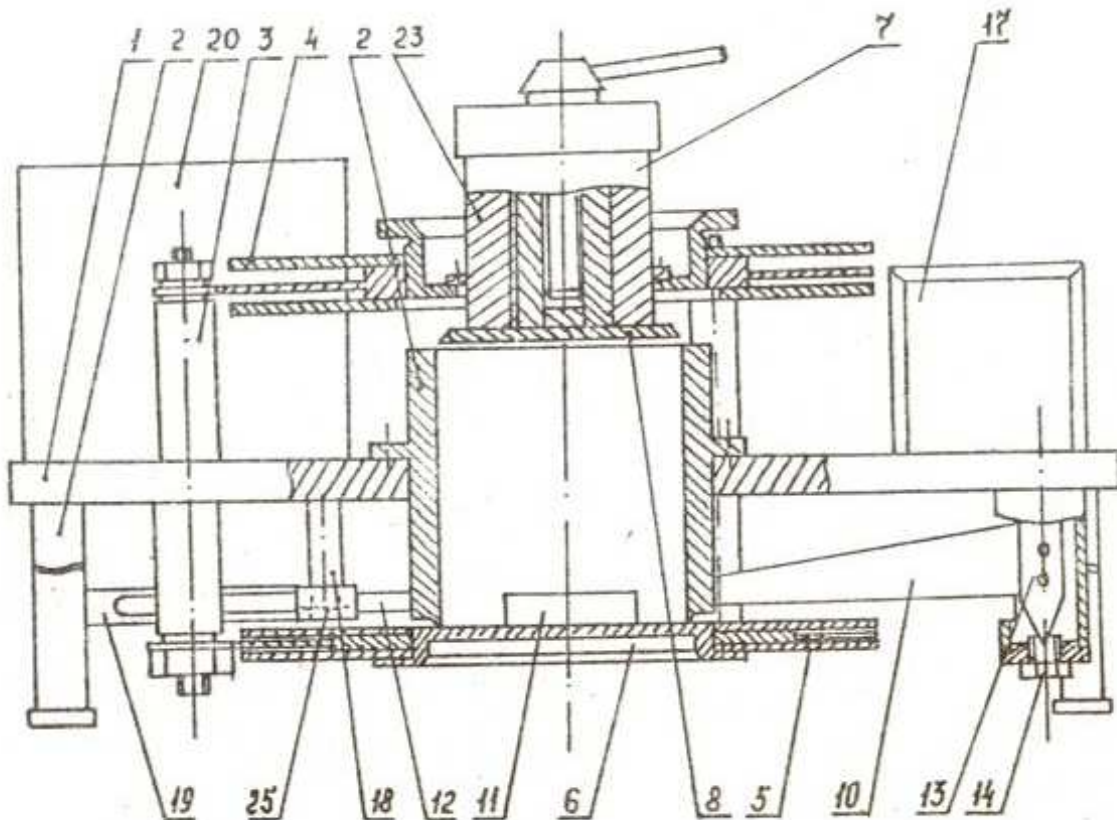
В циліндр 2 завантажується певна порція СМ і вимірюється його висота h . Обертанням рукоятки 9 опускається поршень 8 і стискує досліджуваний матеріал до заданої величини напруженого стану G_i в порожниці дна. Після стабілізації процесу навантаження, сипучий матеріал витримується заданий час.

Після цього знімається навантаження СМ, фіксується величина залишкового напруженого стану СМ на дно циліндра і вимірюється висота спресованого матеріалу.

За допомогою винта 16 ступінчато розвантажують бокову вставку II в межах 10% для необхідної точності вимірів з слідуючим навантажен-



мал.1. Розподілення напруги сипучого матеріалу в випускному отворі бункера з графічною інтерпретацією.



мал.2. Експериментальна установка для визначення рухливості сипучих матеріалів при умові їх зберігання.

ням σ_M до заданої вертикальної напруги.

Бічний тиск σ_2 визначається в момент початку відхилення стрілки реєструючого мікроамперметра, що відповідає відходу бічної вставки II від циліндру 2.

Опрацьована установка для визначення швидкості витікання являє собою циліндр і воронку, які закріплені на столі та приведені в коливальні і обертальні рухи за допомогою електродвигуна. Вона дозволяє дослідити вплив внутрішніх і зовнішніх параметрів σ_M на швидкість витікання.

В четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень впливу внутрішніх і зовнішніх параметрів на швидкість витікання сипучих матеріалів.

Експериментально підтверджено критеріальне рівняння 7.

Експериментально отримані значення коефіцієнтів m , α , λ були відпрацьовані на ЕОМ і отримані значення постійної A , а також показники степенів Z , γ рівняння 7 для досліджуваних σ_M .

По отриманим залежностям коефіцієнтів рухливості m від вертикального напруженого стану σ_1 при різному часу витримки B , представлених на мал. 3 для борошна пшеничного першого сорту при $W = 13.42\%$ і мал. 4 для проса.

Можемо прийти до висновку, що з ростом напруженого стану σ_1 сипучого матеріалу збільшується коефіцієнт рухливості m . Величина m залежить і від природи матеріалу, його фізико-механічних властивостей, і чим вона вища, тим більша здатність матеріалу до витікання.

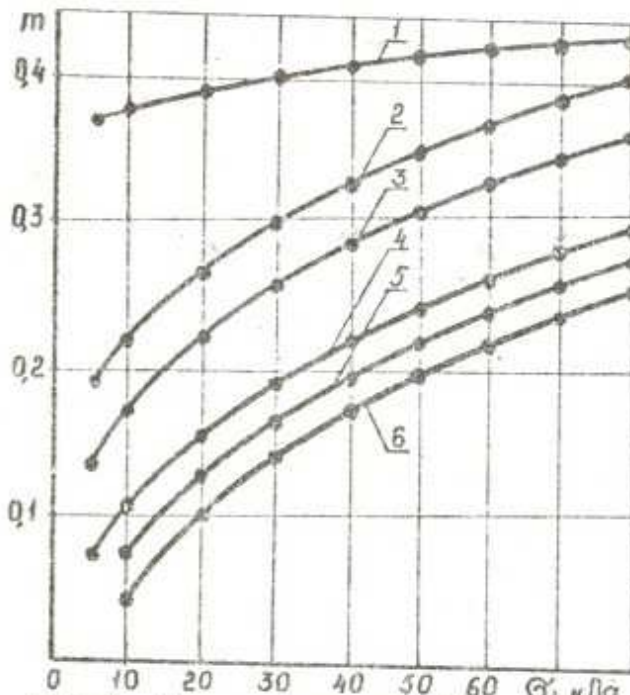
При цьому зі збільшенням часу зберігання сипучого матеріалу спостерігається значна зміна коефіцієнту рухливості, особливо в перші 5 - 60 хв., що пов'язане з структурною перебудовою σ_M .

Коефіцієнт рухливості визначається коефіцієнтом склепіннеутворення і тривалістю зберігання. Залежність $\alpha = f(\sigma_1)$ представлені на мал. 5; 6 для борошна пшеничного I сорту при $W = 13.42\%$ і проса відповідно.

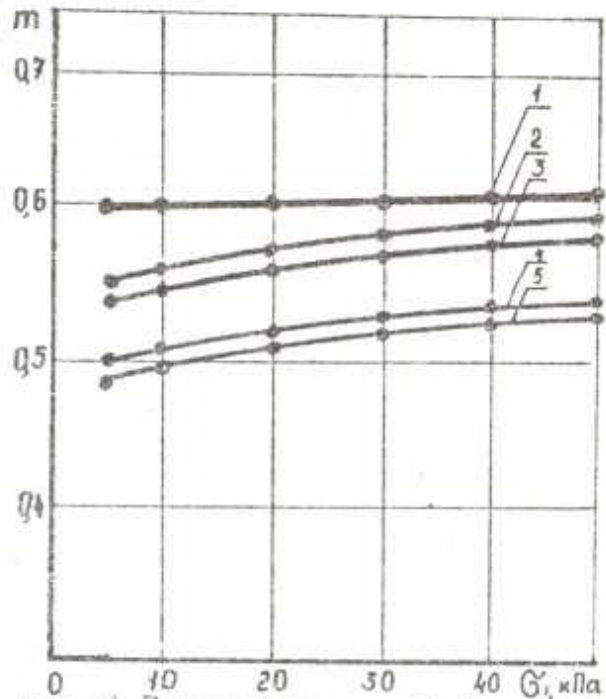
Як видно з представлених даних з ростом напруженого стану σ_1 і часу зберігання B сипучого матеріалу, величина коефіцієнту склепіннеутворення зростає, тобто спостерігається підвищення напруги в зведенні.

Згідно експериментальним даним, величина коефіцієнту тривалості зберігання λ досягає більших значень за рахунок параметру часу зберігання B .

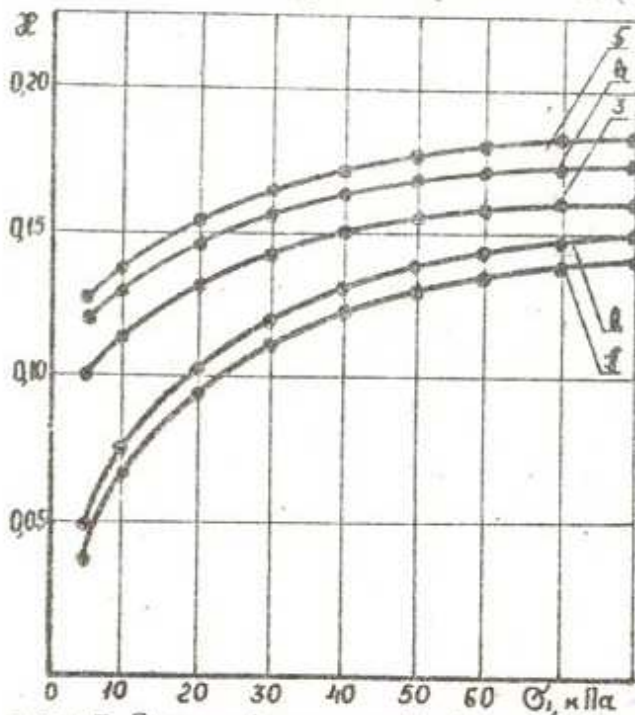
В результаті цього була побудована залежність $\lg \lambda = f(\sigma_1)$, з якої можемо зробити висновок, що з збільшенням тривалості зберігання відбувається збільшення цього коефіцієнту. При збільшенні напруженого



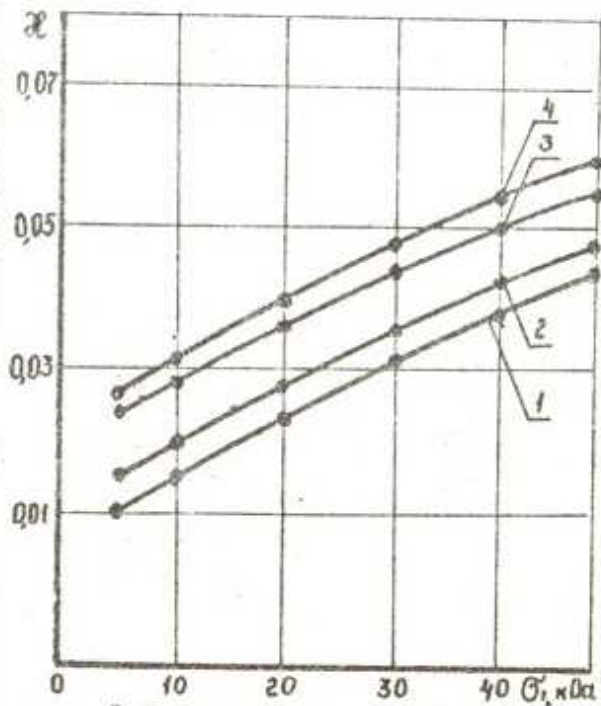
мал.3. Залежність коефіцієнту рухливості m від напруженого стану σ , при часі зберігання B : 1 - 0 хв.; 2 - 5 хв.; 3 - 60 хв.; 4 - 1 д.; 5 - 3 д.; 6 - 5 д., для борошна I сорту



мал.4. Залежність коефіцієнту рухливості m від напруженого стану σ , для проса при часі зберігання B : 1 - 0 хв.; 2 - 5 хв.; 3 - 60 хв.; 4 - 1 д.; 5 - 3 д.



мал.5. Залежність коефіцієнту склепіннеутворення x від σ , для борошна першого сорту при B : 1 - 5 хв.; 2 - 60 хв.; 3 - 1 д.; 4 - 3 д.; 5 - 5 д.



мал.6. Залежність коефіцієнту склепіннеутворення x від σ , для проса при B : 1 - 5 хв.; 2 - 60 хв.; 3 - 1 д.; 4 - 3 д.

стану σ , коефіцієнт λ зменшується через збільшення абсолютної деформації δ , яка також включена до цього коефіцієнту. Опрацювавши експериментальні дані були отримані залежності $m = f(\sigma, B)$, $\varepsilon = f(\sigma, B)$, $\lambda = f(\sigma, B)$, що описуються рівнянням:

$$m, \varepsilon, \lambda = \exp(A + B \cdot \sigma + C \cdot B)$$

де A, B, C – цифрові значення коефіцієнтів.

Ці математичні залежності дозволяють з достатнім ступенем точності вирахувати коефіцієнти m, ε, λ необхідні для використання в розрахунковій практиці.

Для визначення впливу вологості W сипучого матеріалу на коефіцієнти m, ε, λ при напруженому стані σ були поставлені експерименти на боршні пшеничному I сорту з вологістю $W = 10,1; 13,4; 15,4 \%$. Експериментально доведено, що збільшення вологості приводить до зменшення коефіцієнту рухливості, а коефіцієнти склепіннеутворення і тривалості зберігання збільшуються, що приводить до погіршення процесу витікання СМ.

В цьому розділі також експериментально підтверджується взаємозв'язок швидкості витікання СМ з його основними фізико-механічними властивостями.

Для оцінки швидкості витікання U в залежності від впливу внутрішніх і зовнішніх параметрів СМ були поставлені експерименти по визначенню фізико-механічних властивостей борошна пшеничного I сорту при $W = 13,45 \%$ і пшеничних висівок при $W = 10,2 \%$ із зміною часу зберігання матеріалу від 0 до 60 хв. і напруги σ від 5 до 20 кПа. Отримані розрахункові і фактичні швидкості витікання представлені в табл. I і обчислені значення коефіцієнту K , який враховує втрати на внутрішнє тертя і зовнішнє тертя СМ з обмежуючою поверхнею.

Згідно цим даним можемо зробити висновок, що із збільшенням напруги σ збільшується як фактична, так і розрахункова швидкості витікання, а зі збільшенням часу зберігання СМ відбувається зменшення швидкості витікання.

Для визначення швидкості витікання в залежності від вологості матеріалу були поставлені експерименти на борошні першого сорту з вологістю $W = 10,1\%; 13,45\%; 15,4\%$. Згідно експериментальних даних, представлених в табл. I можемо зробити висновок про зменшення як розрахункової так і фактичної швидкості витікання.

Крім того вивчено поведінку СМ при вібрації від 591,7 до 1775 s^{-1} і амплитуді коливання циліндру і випускної воронки $\pm 1 \div 4^\circ$.

В п'ятому розділі приведені приклади практичного використання

Фактичні і розрахункові значення швидкості витікання від напруженого стану і часу зберігання

Об'єкт дослідження	Час зберігання B, min	Напружений стан $\sigma_1, \text{кПа}$	Насип- на щільність $\rho_n, \text{кг/м}^3$	Основні фізико-механічні властивості			Розрахункова швидкість витікання $U \cdot 10^{-2}, \text{м/с}$	Фактична швидкість витікання $U_f \cdot 10^{-2}, \text{м/с}$	Значення коефіцієнта витікання K
				$\sigma_0, \text{кПа}$	m	α			
Борошно пшеничне I сорту при $W=10,1\%$	0	5	500	0,200	0,380	0,040	6,48	2,10	0,324
Борошно пшеничне I сорту при $W=13,45\%$	0	5	"	0,225	0,350	0,045	6,29	1,90	0,302
	5	5	"	0,400	0,160	0,050	5,80	1,80	0,310
		10	"	1,100	0,230	0,110	8,25	2,56	0,310
		20	"	2,540	0,280	0,127	12,76	4,00	0,313
	60	5	"	0,500	0,100	0,100	4,47	1,26	0,282
		10	"	1,600	0,160	0,115	8,75	2,50	0,286
		20	"	4,800	0,240	0,131	16,49	3,85	0,233
Борошно пшеничне I сорту при $W=15,4\%$	0	5	"	0,500	0,280	0,100	6,16	1,85	0,300
Пшеничні висівки при $W=10,2\%$	0	5	441	0,225	0,480	0,045	7,72	4,30	0,560
	5	5	"	0,250	0,350	0,050	6,73	3,82	0,556
		10	"	0,530	0,375	0,053	9,85	5,20	0,528
	60	20	"	1,200	0,420	0,060	14,75	8,25	0,560
		5	"	0,265	0,300	0,053	6,33	3,00	0,474
		10	"	0,580	0,340	0,058	9,50	4,51	0,474
		20	"	1,280	0,380	0,064	14,19	6,20	0,438
Какао-порошок Хрохмаль майсовий	0	5	481	0,650	0,300	0,130	6,69	2,08	0,311
	0	5	605	0,850	0,190	0,170	5,46	3,00	0,55

результатів і технологічного обладнання по переробці, транспортуванню і зберіганню сипучих матеріалів.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано процес витікання сипучих матеріалів оцінювати за допомогою критерію рухливості і швидкості витікання.
2. Отримано рівняння рухливості СМ, яке відображає взаємозв'язок коефіцієнта рухливості з коефіцієнтом здатності сипучого матеріалу до склепіннеутворення і тривалості зберігання СМ під напруженим станом, яке підтверджено експериментально.
3. Отримано рівняння взаємозв'язку швидкості витікання з основними параметрами системи сипучого матеріалу.
4. Експериментально підтверджено взаємозв'язок критеріїв рухливості, здатності СМ до склепіннеутворення і тривалості зберігання з його внутрішніми і зовнішніми параметрами, і отримані їх математичні моделі.
5. Експериментально підтверджено вплив внутрішніх СМ: вологості, напруженого стану і зовнішніх факторів: часу зберігання, частоти коливань і їх загальний вплив на швидкість витікання СМ.
6. Опрацьовано метод і універсальний прилад для визначення коефіцієнтів рухливості, напруги склепіннеутворення і компресійних характеристик сипучих матеріалів, захищений авторським свідоцтвом.
7. Теоретичні, методичні і експериментальні дані упроваджено в виробництво, що дозволяє їх використовувати при розрахунках технологічних процесів і апаратів, пов'язаних із зберіганням, дозуванням і транспортуванням сипучих матеріалів.

Загальний зміст дисертації опублікований у роботах:

1. Карнаушенко Л.И., Павловский С.Н. Критерий подвижности сыпучих материалов//Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования технологических процессов: Тез. докл. III Всесоюз. науч. конф. - Москва, 1990. - С. 134.
2. Карнаушенко Л.И., Осташевская Е.В., Павловский С.Н. Истечение сыпучих материалов пищевой промышленности//Научно-технические проблемы развития агропром. комплекса: Тез. докл. Юбил. 50-й науч.-практ. конф. ОТИПП им. М.В. Ломоносова. 15-19 мая 1990г. - Одесса, 1990. - С. 52.
3. Карнаушенко Л.И., Павловский С.Н. Влияние внешних факторов на подвижность сыпучих материалов//Тез. докл. 5 Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов". 17-19 сент. 1991. - С. 26-27.
4. Карнаушенко Л.И., Павловский С.Н. Экспериментальные установки для

определения скорости истечения и бокового давления на стенки сосудов сыпучим материалом//Тез.докл. 3-го Межгосудар. сов. по приборостроению в области физ.-хим.механики.18-21 мая 1992 г.-

Одесса,1992.-С.12.

5. Карнаушенко Л.И.,Павловский С.Н. Влияние внешних параметров на скорость истечения сыпучих материалов пищевых производств//52-я науч.конф.посвящ.90-летию ОТИПП им.М.В.Ломоносова:Тез.докл.науч.конф.22-25 апр.1992г. - Одесса, 1992.-С.99.
6. Карнаушенко Л.И.,Осташевская Е.В.,Павловский С.Н. Оптимизация процесса истечения сыпучих материалов в пищевой промышленности//Тез.докл.Всесоюзн.науч.-практ.конф."Ученые и специалисты в решении социально-экономических проблем страны",-Ташкент.- 1990г.- С.208.
7. Платонов П.Н.,Новичкова Т.П.,Павловский С.Н. Слеживаемость продуктов переработки пшеницы в процессе хранения//Тез.докл.У Всесоюзн.конф."Механика сыпучих материалов".17-19 сент. 1991г.-Одесса, 1991.-С.63.
8. Иоргачева Е.Г.,Павловский С.Н.,Капрельянц Л.И. Физико-механические свойства глюмадина//Тез.докл.У Всесоюзн.конф."Механика сыпучих материалов",17-19 сент. 1991г.- Одесса,1991.-С.28.
9. Иоргачева Е.Г.,Павловский С.Н.,Цыналевский В.Т. Классификация сыпучих материалов по их способности к сводообразованию//Научно-техн.проблемы развития агропром.компл.:Тез.докл.Юбил.50-й научн.-практ.конф.ОТИПП им.М.В.Ломоносова.15-19 мая 1990г.-Одесса,1990.-С.51.
- 10.А.с.№ 1777038 СССР МКИ ОI 3/24 Способ определения коэффициента бокового давления сыпучих материалов/Л.И.Карнаушенко,С.Н.Павловский Н.К.Корнев,В.Т.Цыналевский,опубл.22.07.92г.в Б.И.1987,№3.