

Б 23  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. И. В. СТАЛИНА

---

*Инженер Е. А. БАНИТ*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ИСТЕЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ  
ИЗ ОТВЕРСТИЙ СОСУДОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

*Научный руководитель — кандидат технических наук,  
доцент П. Н. ПЛАТОНОВ*

Одесса  
1959

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. И. В. СТАЛИНА

*Инженер Е. А. БАНИТ*

v017970

**ОНАХТ  
БИБЛИОТЕКА**

С40  
Б

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ИСТЕЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ  
ИЗ ОТВЕРСТИЙ СОСУДОВ

ОНАХТ 22.03.11  
Исследование процесс



v017970

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

~~Переулет 10.07.11~~

Научный руководитель — кандидат технических наук,  
доцент П. Н. ПЛАТОНОВ

~~205582~~

~~Одесский Технологический  
Институт  
им. И. В. Сталина  
БИБЛИОТЕКА~~

~~Одесса  
1959~~

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. И. В. СТАЛИНА

Инженер А. А. ВАХИНИ

О Н А Х Т  
БИБЛИОТЕКА

*Экспериментальное исследование выполнено  
в Одесском технологическом институте  
им. И. В. Сталина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ПОЛЮЩЕНИЯ СЫПЧУХИ МАТЕРИАЛОВ  
МЕ ОДЕРЖАНИИ СОУДОВ

КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК  
ПРОФЕССОР НА СОКРАЩЕН. ИМЕНИИ  
А. В. ВАХИНИ

Первый редактор — кандидат технических наук  
доктор Л. И. ВАХИНИ

502285

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. И. В. СТАЛИНА

1950

Целью диссертационной работы является изучение процессов истечения сыпучих материалов из отверстий, расположенных в горизонтальных и наклонных днищах, а также в вертикальных стенках сосудов. В работе рассматриваются процессы свободного истечения сыпучих материалов, происходящие под действием сил тяжести.

В основу работы положена гипотеза о способности сыпучей среды образовывать в процессе истечения над выпускным отверстием динамический свод, который является основным фактором, определяющим пропускную способность отверстия.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают принятую в работе гипотезу и посвящены раскрытию природы процесса истечения сыпучего материала через выпускное отверстие.

На основе экспериментального исследования уточнена формула для определения пропускной способности выпускного отверстия, расположенного в горизонтальном или наклонном днище, а также в вертикальной стенке. Уравнение расхода при истечении сыпучих материалов распространено на отверстия, перекрытые решеткой.

В результате экспериментального исследования определены методы управления процессом истечения — методы повышения пропускной способности выпускных отверстий без увеличения размеров последних.



В контрольных цифрах развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы отмечается, что предстоящее семилетие будет ознаменовано дальнейшим техническим прогрессом во всех отраслях народного хозяйства.

Наиболее характерной чертой современного технического прогресса является переход к комплексной механизации и автоматически управляемому производству. Перед отечественным машиностроением поставлена задача создания всего комплекса машин и приборов для дальнейшей механизации тяжелых и трудоемких работ и широкого внедрения автоматизации в промышленности.

Среди разнообразного сырья и продуктов переработки значительное место занимают сыпучие грузы. Большие потоки сыпучих материалов, имеющие место в пищевой, мельнично-элеваторной, горнорудной, угольной и строительной промышлен-

ности, требуют создания комплекса наиболее эффективных машин и устройств для механизации и автоматизации операций по их хранению, перемещению и переработке.

Поскольку поток сыпучего материала часто является одним из звеньев автоматической линии технологического процесса, то возникает необходимость детального исследования процесса опорожнения емкостей — процесса истечения сыпучих материалов через выпускное отверстие этих емкостей.

Раскрытие закономерностей и физической сущности процесса истечения сыпучих материалов из выпускных отверстий необходимо для расширения наших знаний в области механики сыпучей среды.

Наличие большого разнообразия сыпучих материалов, свойства которых определяются большим количеством не всегда учтенных факторов, отличие явлений, происходящих в сыпучих смесях, от подобных явлений в сплошных средах (жидкостях и пр.) создает большие трудности для применения положений классической механики и теории сплошных сред.

Указанные трудности теоретического решения вопросов, связанных с механикой сыпучих сред, определили направление настоящей работы, как *работы экспериментальной*, главные выводы которой базируются на опыте.

Основной целью данного исследования является: изучение процессов истечения сыпучих материалов из отверстий сосудов; раскрытие физической природы этих процессов; определение основных факторов, влияющих на процесс истечения и, как следствие этого, изучение методов управления такими процессами.

Диссертация состоит из четырех глав текста на 176 страницах с 56 рисунками, списка использованной литературы и приложения.

## 1.

*В первой главе* приводится обзор литературы, посвященной исследованию процесса истечения сыпучих материалов через выпускное отверстие сосуда и изучению влияния некоторых факторов на этот процесс.

Анализ приведенной литературы показал, что непосредственным изучением вопроса истечения сыпучих тел исследователи начали заниматься только в 30-х годах текущего столетия, хотя факт постоянства расхода сыпучего тела при истечении был известен с древних времен и использован Луитпрандом в VIII веке при создании песочных часов.

В указанной литературе по исследованию вопросов истечения сыпучих тел выделяются два отдельных направления, объясняющие природу процесса истечения.

Первая группа исследователей (Покровский и Арефьев, Линчевский, Фасман, Куценко, Семенов, Чесноков, Дюран и

Кондолио и др.), объединяющая все большее и большее число сторонников, исходит в своих теоретических предположениях из идей Протодяконова (1908 г.) о способности сыпучей среды образовывать своды. Гипотеза сводообразования Протодяконова предложена и проанализирована им для условий статики сыпучей среды.

Изучая вопросы истечения сыпучих материалов, Покровский и Арефьев (1937 г.) первыми использовали идею сводообразования для объяснения физической сущности процесса истечения сыпучего материала из выпускного отверстия и ввели понятие динамических сводов.

Последующие исследователи этого направления расширили теоретическое и экспериментальное изучение явления образования динамических сводов, сопутствующих процессу истечения, но полного раскрытия природы процесса и изучения влияния некоторых факторов на него ими не сделано, так как процесс истечения сыпучих материалов изучался односторонне, в основном, в связи с возникавшим каким-либо отдельным вопросом.

Полученные формулы пропускной способности выпускных отверстий не отражают физической сущности процесса истечения и часто допускают большую погрешность.

Другая группа исследователей (Зенков, Мерзляков, Карпин, Минаев и др.) признает сводообразование лишь как зависание над выпускным отверстием частиц сыпучего тела, то-есть существование статического свода.

Обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет считать установленным:

а) наличие двух форм движения потока сыпучего материала в сосуде при истечении — связанное и несвязанное движение;

б) независимость расхода сыпучего материала от высоты его слоя над выпускным отверстием;

в) зависимость величины расхода от площади выпускного отверстия и вида сыпучего материала;

г) наличие критического размера выпускного отверстия, характеризующего условия непрерывности процесса истечения.

Однако отсутствует единое мнение исследователей по следующим вопросам:

а) о природе процесса истечения сыпучих материалов из отверстий сосудов. В частности, нет единого мнения о решающем значении динамического разгружающего свода над выпускным отверстием и о его параметрах;

б) предлагаемые формулы расхода сыпучего материала через выпускное отверстие разноречивы и не поддаются обобщению.

Значительное количество вопросов, интересующих практику, осталось совершенно не выясненными и даже не затрону-

тыми исследователями в своих работах. К числу таких вопросов можно отнести:

а) влияние формы движения сыпучей среды и ее плотности на пропускную способность выпускного отверстия;

б) влияние условий входа сыпучего материала в выпускное отверстие и условий выхода из него на пропускную способность отверстия;

в) отсутствуют данные об истечении сыпучих материалов через отверстия, расположенные в наклонных днищах и вертикальных стенках сосудов.

## II.

*Вторая глава посвящена изложению теоретических предположений исследования. Формулируется принятая в работе гипотеза о наличии динамического свода над выпускным отверстием в процессе истечения, которая раскрывает физическую сущность процесса и дает основание для разработки методов управления последним.*

Механизм процесса истечения сыпучего материала из выпускного отверстия объясняется следующим образом.

В момент открытия выпускного отверстия в объеме сыпучей среды, расположенном над отверстием, под действием объемных и реактивных сил и при наличии предварительного смещения происходит изменение характера связей между частицами и, как следствие этого, имеет место явление сводообразования — образование сводчатой структуры.

*Граничный слой перехода от объема сыпучей среды, где частицы подвержены действию сил тяжести и реактивных сил, к объему, где частицы подвержены действию только сил тяжести, является своеобразным динамическим сводом, определяющим процесс истечения.*

Характерной особенностью такого динамического свода является его способность воспринимать давление вышележащих слоев сыпучей среды и передавать его на свои опоры, пропуская одновременно через себя частицы сыпучей среды, выпадающие из сосуда через выпускное отверстие.

Предполагается, что размеры и форма свода над отверстием должны определяться физико-механическими свойствами сыпучего материала, характером распределения вышележащей нагрузки и условиями для образования свода (условиями опирания пяты свода).

Динамический свод над выпускным отверстием, опирающийся на его края, рассматривается не как постоянный, один раз сложившийся, а как слой, в котором одновременно протекают процессы разрушения и восстановления. При этом неполные силы трения покоя в граничном слое достигают своего максимального значения — полных сил трения покоя и над выпускным отверстием образуется замкнутая кинематическая

цепь, способная воспринимать вышележащую нагрузку. Эта кинематическая цепь из отдельных частиц образует конструкцию, подобную своду. В зависимости от параметров образовавшейся кинематической цепи она может обладать различными свойствами.

В том случае, если кинематическая цепь способна воспринять на себя всю вышележащую нагрузку, то над отверстием образуется статический или, так называемый, устойчивый свод. При этом силы трения между частицами кинематической цепи, а также между частицами и днищем должны быть больше или равны сдвигающим силам от вышележащей нагрузки.

Если последнее условие не соблюдается, то такая конструкция не может выдержать вышележащей нагрузки и, как следствие этого, на смену устойчивому своду приходит неустойчивый динамический свод, который, воспринимая на себя вышележащую нагрузку, определяет этим самым постоянство условий выпуска сыпучего материала из отверстия.

Вводится понятие о критическом размере выпускного отверстия  $d_{кр}$ , с помощью которого выражаются условия истечения:

непрерывное устойчивое истечение при  $d > d_{кр}$ ,

истечение с перерывами при  $d = d_{кр}$ ,

отсутствие истечения при  $d < d_{кр}$ ,

где  $d$  — наименьший размер выпускного отверстия.

Исходя из основных положений гипотезы о динамическом своде над отверстием, в работе дается вывод уравнения расхода.

### III.

В третьей главе приведено описание экспериментальных установок и методика исследования.

Экспериментальное исследование в своей основе было проведено в лабораторных условиях на моделях. Данные лабораторных исследований были проверены в производственных условиях при истечении зерна из силосов элеваторов.

Исследование физической сущности процесса истечения сыпучих материалов производилось в условиях плоскостной и осесимметричной задачи.

Наблюдение за процессом велось через стеклянную стенку шахты визуально и фотографированием его на кинолентку при частоте съемки до 100 кадров в секунду с помощью кинокамеры. Расшифровка полученной кинограммы, а также проектирование кадров на экран с нормальной частотой проекции позволило проследить все этапы процесса истечения.

Методика исследования параметров динамического свода основывалась на предположении, что при наличии сводчатой структуры над выпускным отверстием любое внедрение инородного тела в зону сводообразования должно изменить про-

цесс истечения, так как при этом изменяются условия сводообразования. Исходя из этого положения, был разработан метод определения очертаний динамического свода, образующегося над выпускным отверстием. Для этой цели в сыпучую смесь, находящуюся над выпускным отверстием, при ее выпуске из сосуда, вводилась вертикально расположенная стальная пластина, положение которой изменялось. Пластина размещалась над отверстием так, что нижний край ее полностью охватывал предполагаемую граничную зону сводообразования. При каждом положении пластины над отверстием производилось определение пропускной способности выпускного отверстия.

Геометрическое место положений нижнего края разрушающей пластины над отверстием, при которых наблюдалось изменение расхода, принималось за возможное очертание динамического свода.

Для исследования процесса сводообразования в момент открытия выпускного отверстия применялся метод, основанный на измерении величины давления сыпучей среды на подвижную площадку, расположенную в выпускном отверстии. Определение давления на подвижную площадку производилось датчиком сопротивления, показания которого регистрировались шлейфным осциллографом. При исследовании изменялись: размеры измерительной площадки, скорость ее движения, плотность удладки сыпучей среды в сосуде.

Учитывая, что динамический свод над отверстием в процессе истечения все время претерпевает свое разрушение и восстановление, было проведено специальное исследование степени постоянства расхода сыпучего материала во времени. Для этой цели производился отбор ряда последовательных навесок из выходящей струи сыпучего материала за промежутки времени от 0,06 до 0,2 сек.

В лабораторных исследованиях эксперименты проводились в шахтах-моделях, размеры которых выбирались исходя из геометрического подобия производственным сосудам.

Для изучения влияния формы и размеров выпускного отверстия на расход использовались выпускные отверстия размером от 5 до 60 мм круглой, квадратной, треугольной и прямоугольной формы в лабораторных условиях и от 4×30 до 16×48 см — в производственных.

С целью активного вмешательства в процесс сводообразования в зоне над выпускным отверстием, т. е. для изменения условий входа сыпучего материала в отверстие, применялись различные насадки — плоские и конические с переменными геометрическими параметрами, а также решетки.

Процесс истечения исследовался как при расположении выпускного отверстия в горизонтальном днище, так и в наклонном.

В исследовании были использованы следующие сыпучие материалы: вольский песок ГОСТ 6132-52 с размером частиц

0,7 ÷ 0,9 мм, пшено, просо, крупа чумизы, пшеница, гречиха, горох, соя, стальные шары диаметром 8 мм.

Для получения вероятных значений ряда опытных коэффициентов использовался метод наименьших квадратов.

#### IV.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментального исследования.

Экспериментальные исследования подтвердили справедливость принятой в работе гипотезы о динамическом своде над выпускным отверстием в процессе истечения сыпучего материала.

В результате большого количества экспериментов с различными сыпучими материалами и различными размерами и формой выпускных отверстий подтвержден факт независимости расхода от высоты слоя сыпучего материала над отверстием.

Исследования показали, что на величину расхода не оказывают заметного влияния ни форма движения сыпучей среды, ни плотность ее укладки. Величина расхода зависит только от физических свойств сыпучей среды и параметров выпускных отверстий; понимая под последними форму, размеры, расположение и другие показатели, отличающие одно выпускное отверстие от другого.

Постоянство расхода сыпучего материала через выпускное отверстие данных параметров является одним из свойств сыпучей среды, определяемым параметрами сводчатой структуры, образующейся над выпускным отверстием.

Экспериментальное подтверждение принятой гипотезы о наличии над выпускным отверстием динамического свода и процесс его образования исследовались путем измерения величины давления сыпучей среды на площадку, перекрывающую выпускное отверстие.

Экспериментальное исследование показало следующий характер изменения давления на площадку. По мере засыпки сыпучего материала в сосуд, давление на площадку возрастает. При высоте слоя  $h_n^1$  рост давления на неподвижную площадку, достигнув своего максимального значения  $P_1$ , прекращается, в связи с завершением процесса сводообразования в слое.

С момента начала движения площадки до некоторого ее положения, соответствующего перемещению  $\lambda_0$ , давление на площадку резко падает, достигая некоторого постоянного конечного значения  $P_2$ . Дальнейшее перемещение измерительной площадки не оказывало заметного влияния на давление, и

$$^1 h_n = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \varphi_{пп},$$

где  $a$  — наибольший размер поперечного сечения сосуда при центральном отверстии.

$\varphi_{пп}$  — угол обрушения.

практически его величина оставалась постоянной. Характер изменения давления на подвижную площадку можно объяснить следующим образом.

С началом движения площадки вниз в некотором объеме над отверстием начинается перемещение частиц сыпучей среды, сопровождающееся образованием над отверстием новой сводчатой структуры, способной воспринять на себя вышележащую нагрузку. На измерительную площадку в этом случае оказывают давление частицы сыпучей среды, находящиеся внутри вновь образовавшегося свода и получившие возможность свободно двигаться вниз.

Произведенное сравнительное определение веса сыпучего материала в подсводном объеме динамического свода над отверстием и его сопоставление с давлением на подвижную измерительную площадку  $P_2$  показало, что высота динамического свода над отверстием не превышает характерного размера отверстия.

Опыты с переменной величиной измерительной площадки показали влияние размера измерительной площадки на продолжительность формирования свода над отверстием. При этом установлено, что перемещение измерительной площадки  $\lambda_0$ , соответствующее периоду формирования свода (участку падения давления), находится в прямой зависимости от ее диаметра  $D$ . Диаметр измерительной площадки равен диаметру выпускного отверстия.

Сравнение величины давлений  $P_2$  на подвижную площадку при различных скоростях ее движения показывает, что скорость движения измерительной площадки не влияет на величину давления  $P_2$  при изменении скорости от 0,025 до 2,5 мм/сек.

Исследование влияния условий входа сыпучего материала в выпускное отверстие на величину давления, воспринимаемого подвижной площадкой, показало, что они вызывают заметные изменения давления на подвижную площадку.

Наибольшее повышение давления на подвижную измерительную площадку наблюдается при расположении над отверстием трехсторонней насадки, которая существенно изменяет условия опирания динамического свода над отверстием и, как следствие этого, увеличивает величину подсводного объема.

Условия непрерывности процесса истечения сыпучего материала из выпускного отверстия характеризуются критическим размером последнего  $d_{кр}$ . Величина  $d_{кр}$  выражается в зависимости от гранулометрического состава сыпучей среды эмпирическим уравнением вида.

$$d_{кр} = A e^{b\delta} \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты ( $A=4,83$ ;  $b=0,224$ );  
 $\delta$  — наибольший размер средней частицы сыпучей среды в мм;  
 $e$  — основание натуральных логарифмов.

Полученная эмпирическая формула справедлива для величин  $\delta$ , колеблющихся в пределах от 0,5 до 10 мм.

Результаты исследования изменения расхода во времени показали, что величина расхода сыпучего материала через выпускное отверстие с течением времени остается практически постоянной.

В результате экспериментального исследования установлено, что положение нижней кромки рассекающей пластины относительно выпускного отверстия оказывает заметное влияние на величину расхода только в определенной зоне над отверстием. Геометрическое место точек, определяющих крайние положения пластины над отверстием, при которых она не оказывает влияния на расход, располагается на поверхности, весьма близкой к параболоиду вращения, ось которого совпадает с осью выпускного отверстия. При этом максимальная высота динамического свода над отверстием близка к наименьшему поперечному размеру выпускного отверстия.

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложена следующая формула для определения пропускной способности выпускных отверстий при истечении сыпучих материалов:

$$Q = 3600 \cdot \gamma \cdot F [v_{кр} + k(R_z - R_{zкр})] \frac{m}{час}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — объемный вес сыпучего материала  $m/m^3$ ;

$F$  — площадь выпускного отверстия,  $m^2$ ;

$v_{кр}$  — критическая скорость для данного сыпучего материала, т. е. скорость истечения через отверстие размером  $d_{кр}$ ,  $m/сек$  (табл. 1);

$k$  — размерный коэффициент,  $1/сек$  (табл. 1);

$R_z$  — гидравлический радиус выпускного отверстия,  $m$ ;

$R_{zкр}$  — гидравлический радиус выпускного отверстия критического размера,  $m$ .

Экспериментами найдены следующие величины  $v_{кр}$  и коэффициента  $k$ :

Сыпучий материал	$v_{кр}, \frac{m}{сек}$	$k, \frac{1}{сек}$	$C_p, \frac{1}{сек}$
Песок . . . . .	0,160	36,8	72
Крупа чумизы . . . . .	0,125	38,5	58
Пшеница . . . . .	0,193	20,4	32
Гречиха . . . . .	0,114	42,0	47

Для отверстия, разделенного стержнями на  $n$  одинаковых ячеек, величина пропускной способности  $Q_p$  определяется уравнением:

$$Q_p = 3600 \cdot C_p \cdot \gamma \cdot R_{zi} \sum_{i=1}^n F_i \frac{m}{\text{час}}, \quad (3)$$

где  $C_p$  — постоянная величина для данного сыпучего материала, 1/сек (табл. 1);

$R_{zi}$  — гидравлический радиус одной ячейки, м;

$F_i$  — площадь отверстия одной ячейки, м<sup>2</sup>.

Если отверстие разделено на  $n$  ячеек одного размера,  $m$  ячеек другого размера и т. д., то, как показали опыты, пропускная способность выпускного отверстия с решеткой определяется уравнением:

$$Q_p = 3600 \cdot C_p \cdot \gamma (R_{zi} \sum_{i=1}^n F_i + R_{zj} \sum_{j=1}^m F_j + \dots) \frac{m}{\text{час}}. \quad (4)$$

В процессе исследования изучалось влияние на расход различных условий входа сыпучего материала в выпускное отверстие: места расположения выпускного отверстия в днище, расположения над отверстием плоских, конических и цилиндрических насадок, а также насадок с закругленным входом.

По мере приближения стороны выпускного отверстия (прямоугольного или квадратного) к вертикальной стенке сосуда, расход заметно увеличивается, достигая наибольшего значения при совпадении плоскости стенки сосуда с одной из сторон выпускного отверстия. Еще большее повышение расхода достигается расположением выпускного отверстия в углу днища.

Аналогичные условия входа можно воспроизвести при центральном расположении отверстия и установке над ним плоской односторонней или двусторонней угловой насадки.

Если изменять активную<sup>1</sup> высоту насадки, то, как показывает исследование, расход возрастает только до определенной оптимальной высоты насадки, достигая при этом своего максимума.

Оптимальная высота односторонней насадки соответствует соотношению

$$\frac{h}{a} = 0,6 \div 0,7.$$

для двусторонней

$$\frac{h}{a} = 1.$$

где  $h$  — высота насадки,

$a$  — сторона квадратного отверстия.

Установка над отверстием трехсторонней насадки оптимальной высоты вызывает увеличение расхода в 3,5 ÷ 4 раза.

<sup>1</sup> Под активной высотой насадки понимаем ее высоту, оказывающую влияние на величину расхода сыпучего материала.

Оптимальная высота трехсторонней насадки колеблется в пределах

$$h = (2,5 \div 3,5) a.$$

Увеличение пропускной способности при наличии плоских насадок над выпускным отверстием объясняется изменением условий опирания динамического свода и повышением высоты подсводного объема над отверстием.

Для отверстий круглой формы условия входа изменялись путем расположения над ними конических насадок.

При изменении угла раскрытия конуса  $\beta$  в пределах от  $180^\circ$  до  $50^\circ$  величина расхода сыпучего материала через выпускное отверстие изменяется незначительно. Дальнейшее уменьшение угла  $\beta$  для всех исследуемых материалов вызывает существенный (в  $2 \div 2,5$  раза) рост величины расхода, который достигает своего максимального значения при оптимальном значении угла раскрытия конуса  $\beta = 8 \div 12^\circ$ . При уменьшении угла  $\beta$  от  $8^\circ$  до  $0$  величина расхода падает до значения, соответствующего величине расхода для отверстия того же размера, но без насадки, так как при  $\beta = 0$  коническая насадка становится цилиндрической, для которой расход сыпучего материала не зависит от ее высоты.

Высота конической насадки оказывает основное влияние на величину расхода только при оптимальном значении угла  $\beta$ . Оптимальная высота конической насадки определяется соотношением:

$$h = (2,5 \div 4,0) d,$$

где  $d$  — диаметр выпускного отверстия.

Условия выхода сыпучего материала из выпускного отверстия не оказывают влияния на его расход.

Наблюдения за процессом истечения через отверстия, в днищах, расположенных под углом к горизонту, показывают, что природа процесса в этом случае является такой же, как и при истечении из отверстия в горизонтальном днище. Тождественность природы процесса позволяет выразить величину расхода сыпучего материала через выпускное отверстие, расположенное в наклонном днище, при помощи расхода через отверстие, расположенное в горизонтальном днище:

$$Q_n = k \cdot Q, \quad (5)$$

где  $Q_n$  — расход через отверстие, расположенное в наклонном днище;

$Q$  — расход через отверстие, расположенное в горизонтальном днище;

$k$  — коэффициент бокового расхода.

Величина коэффициента бокового расхода зависит, в основном, от угла наклона днища и может быть с достаточной точностью выражена эмпирической формулой:

$$k = a \cdot \cos^3 \frac{\alpha}{2},$$

где  $a$  — постоянный коэффициент (для пшеницы  $a = 1,05$ , для песка  $a = 1,00$ );  
 $\alpha$  — угол наклона днища к горизонту.

## ВЫВОДЫ

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Справедливость принятой рабочей гипотезы о способности сыпучей среды образовывать над выпускным отверстием динамический свод подтверждается характером распределения давления на подвижную площадку, расположенную в выпускном отверстии.

2. Высота динамического свода над отверстием, определенная по величине давления сыпучей среды на подвижную площадку и методом разрушающей пластины, не превышает характерного размера выпускного отверстия.

3. Основным фактором, определяющим процесс истечения сыпучего материала из выпускного отверстия, является динамический свод над отверстием. Характерной особенностью динамического свода является постоянство его параметров при данных условиях истечения, что дает объяснение таким фактам, как постоянство расхода во времени, независимость расхода от высоты слоя засыпки сыпучего материала, от формы движения потока и плотности укладки частиц сыпучей среды в сосуде.

4. Перемещение измерительной площадки  $\lambda_0$ , соответствующее периоду формирования динамического свода над отверстием (участку падения давления), находится в линейной зависимости от величины ее диаметра.

5. Критический размер выпускного отверстия —  $d_{кр}$ , определяющий характер процесса истечения сыпучего материала, выражается формулой (1):

$$d_{кр} = 4,83 e^{0.224\delta}.$$

6. При установившемся движении величина расхода сыпучего материала через выпускное отверстие с течением времени остается практически постоянной.

7. Пропускную способность отверстия, расположенного в горизонтальном днище, можно определять по формуле (2):

$$Q = 3600 \cdot \gamma \cdot F [v_{кр} + k (R_2 - R_{2кр})].$$

Пропускная способность выпускного отверстия определяется условиями входа сыпучего материала в отверстие. Изменение условий входа нарушает структуру динамического свода над отверстием и способствует изменению пропускной способности в довольно широких пределах.

Для отверстия прямоугольной формы расход можно увеличить на 350÷400% установкой над ним трехсторонней насадки высотой, равной трем размерам отверстия в свету.

Для выпускного отверстия круглой формы расход можно увеличить на 250÷300% установкой над ним конической насадки с углом раскрытия конуса, равным 8÷10°, и высотой, равной трем диаметрам отверстия.

9. Условия выхода сыпучего материала из выпускного отверстия, как не нарушающие условий сводообразования, не оказывают влияния на его пропускную способность.

10. Пропускная способность отверстия, разделенного решеткой, определяется формулой (4):

$$Q_p = 3600 \cdot C_p \cdot \gamma (R_{2i} \sum_{i=1}^n F_i + R_{2j} \sum_{j=1}^m F_j + \dots) = 3600 \cdot C_p \cdot \gamma \cdot \Omega,$$

где

$$\Omega = R_{2i} \sum_{i=1}^n F_i + R_{2j} \sum_{j=1}^m F_j + \dots$$

11. Пропускная способность выпускного отверстия, расположенного в наклонном днище, определяется формулой (5):

$$Q_k = k \cdot Q,$$

где

$$k = a \cdot \cos^3 \frac{\alpha}{2}.$$

Материалы диссертационной работы опубликованы в следующих статьях:

1. Давление сыпучей среды при переходе ее из предельного равновесия в движение. Известия вузов МВО СССР, Пищевая технология, № 1, 1958.

2. Расход сыпучих тел при истечении их из отверстий. Известия вузов МВО СССР, Пищевая технология, № 5, 1958.

3. Пропускная способность выпускных отверстий силосов и бункеров. Мукомольно-элеваторная промышленность, № 8, 1958.

