

На правах рукописи

БЛЮСС Борис Александрович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
СТРУЙНЫХ СЕПАРАТОРОВ

05.15.11 — «Физические процессы горного производства»

01.02.05 — «Механика жидкостей, газа и плазмы»

095 б?

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

ТВ 29.08

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте геотехнической механики АН Украины

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00801679 (V)

Научный консультант:

Академик АН Украины

ПОТУРАЕВ

Валентин Никитич

Официальные оппоненты:

д-р техн. наук, профессор

ШЕВЕЛЕВ

Гаррий Агапович

д-р техн. наук

КРИЛЬ

Степан Иванович

д-р техн. наук, профессор

ШУПОВ

Лернид Петрович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Донецкий государственный технический университет

Защита состоится "13" мая 1994 г. в 13 часов на заседании специализированного совета Д 016.40.01 при Институте геотехнической механики АН Украины по адресу: 320600, г. Днепропетровск, ул. Симферопольская, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "11" апреля 1994 г.

Ученый секретарь специализированного совета, канд. техн. наук

Шпакунов И.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Реальной основой перехода к ресурсосберегающим и безотходным технологиям является совершенствование технологии переработки добываемого сырья на базе прогрессивного оборудования, в котором реализуются новые принципы и эффекты: вибрационные, волновые, связанных полей, взаимно проникающих сред и т.п.

В настоящее время наибольший интерес проявляется к вовлечению в переработку техногенных месторождений, качество которых приближается к качеству природного сырья. Определяется это не только ухудшающейся в целом экологической обстановкой в зоне действия горнообогатительных и металлургических комбинатов, но и возрастанием капитальных вложений на 1 т металла в связи с изменением горно-геологических условий. Поэтому горная наука постоянно решает задачи разработки эффективных технологий (схем и оборудования) и компоновки апробированных технологических решений на основе известных и разрабатываемых технических средств и технологических аппаратов. К числу аппаратов, характеризующихся высокой эксплуатационной надежностью, относятся такие, в которых процессы происходят в тонкослойных течениях в поле гравитационных и вибрационных сил. Созданные конструкции этих аппаратов (конусных сепараторов, вибрационных и струйных концентраторов и др.) отличаются также высокой производительностью (до 80 т/ч) при содержании твердого до 60 %.

В перечисленных выше аппаратах для качественного расслоения и разделения пульпы рабочая поверхность выполнена в виде сужающегося канала или конфузора, что приводит к увеличению толщины сходящей расслоившейся струи пульпы и к раскрытию широкого веера, который натекает на отсекатели и разделяется. Одновременно с этим сужение потока пульпы приводит к ряду нежелательных снижающих эффективность ее разделения явлений, таких как заклинивание донного слоя концентрата, днообразование с движением к загрузочному сечению и высокому уровню пульпы, которые способствуют перемешиванию предельно расслоившейся пульпы.

Представленное выше противоречие при использовании струйных сепараторов требует повышения эффективности разделения тонкослойных струйных течений пульпы, в том числе для классификации и обогащения, что является актуальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

а. Цель работы - на основе экспериментальных и численно-аналитических исследований установить физические закономерности нестациона-

нарных процессов в пульпе, разработать феноменологические модели и методы инженерных расчетов, а также способы и устройства для эффективного разделения пульп.

Идея работы заключается в обеспечении устойчивости и эффективности процесса сепарации пульпы за счет струйного обтекания тонкостенных препятствий или взаимодействия со встречным течением однородной жидкости или газа, что позволяет стабилизировать разделение расслоившегося неравномерного течения пульпы.

Методы исследований. Моделирование процессов в пульпе проведено на основе аналитических методов гидродинамики и теории случайных процессов с привлечением методов планирования экспериментов и математической статистики. Детерминированные и стохастические модели реализованы в пакете прикладных программ, являющемся основой при численно-аналитических исследованиях.

Научные положения, разработанные лично диссертантом, и новизна:

1. Толщина потока пульпы определяется соотношением скатывающей и тормозящей силы и в зависимости от этого соотношения монотонно увеличивается или имеет минимум. При этом потеря импульса, отнесенная к импульсу скатывающей силы нижнего слоя, характеризуется смещением максимума к начальному сечению для трения о дно канала по сравнению с трением о верхний слой.

2. При разделении расслоившегося течения пульпы на профиле для каждой фиксированной длины профиля существует предельный угол атаки, при котором резко уменьшается выход концентрата и соответственно для заданного угла атаки с увеличением длины профиля выход концентрата возрастает, а затем становится практически неизменным.

3. Взаимодействие расслоившегося потока пульпы со встречной воздушной струей приводит к вымыванию концентрата из донного слоя, а со встречной водяной струей обеспечивает показатели разделения, близкие к разделению на профиле.

4. При разделении пульпы титан-цирконовых песков, железистых кварцитов, крупнозернистых угольных шламов имеет место экстремальные зависимости содержания ценного компонента в промпродукте от параметров подтормаживающего профиля или встречной струи.

Научная новизна состоит в разработке физических моделей осаждения и движения включений при течении пульпы по сужающейся

плоской поверхности с прямыми бортами и конфузурной поверхности, в том числе в условиях локального воздействия на свободную поверхность пульпы и регулируемого стока в донной области течения.

Получены новые результаты в задаче о струйном обтекании препятствий двухслойной жидкостью: решена задача о зависимости выхода концентрата от длины подтормаживающего профиля и угла атаки.

Разработана математическая модель неравномерного течения пульпы, учитывающая стохастический характер силовых воздействий на включения, различный характер упругих и поглощающих свойств свободной поверхности пульпы и дна канала-сепаратора.

Предложен и научно обоснован способ эффективного разделения расслоившегося неравномерного струйного течения пульпы, состоящий в стабилизации границы расслоения в области струйного обтекания препятствия. При этом способе одновременно достигается существенное улучшение эксплуатационных и технологических показателей работы конусных сепараторов.

Получены следующие новые результаты: определены зависимости усредненной по сечению слоя скорости течения на участке расслоения и неравномерного течения пульпы от концентрации осаждающихся включений, толщины слоев и скоростей в начальном сечении канала; установлены зависимости среднего времени достижения нестационарных границ марковским процессом, который моделирует случайные движения твердых частиц на участке расслоения пульпы; выявлены экстремальные закономерности выхода донного слоя при струйном обтекании препятствия и регулируемом стоке; определены зависимости технологических параметров разделения пульпы при обогащении россыпей, руд и угольных шламов.

Новизна полученных результатов подтверждена 12 авторскими свидетельствами на способы и устройства для разделения пульп в горной и других отраслях промышленности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, определяется корректностью математических постановок задач гидромеханики неоднородной жидкости, в том числе процессов массопереноса при гравитационном разделении пульпы, а также сравнением с экспериментальными данными. Использование методов планирования экспериментов, математической статистики и теории случайных процессов позволило с доверительной вероятностью 95 % получить зависимости показателей разделения от изменяемых факторов и построить доверительные интервалы для коэффициентов соответствующих регрессионных зависимостей.

Значение работы. Научное значение работы состоит в разработке численно-аналитического аппарата для анализа гидромеханических процессов в струйных течениях пульпы; разработке принципов и средств интенсификации процессов расслоения и разделения расслоившегося течения; выявлении эффективных режимов работы аэрогидродинамических струйных сепараторов и в разработке алгоритма расчета их параметров.

Практическое значение заключается в разработке принципов создания эффективных аэрогидродинамических струйных сепараторов на основе формирования потоков пульпы при струйном обтекании тонкостенных препятствий или взаимодействии со встречными однородными течениями жидкости или газа;

определении параметров полигональных препятствий с регулируемым стоком и кольцевых форсунок, при которых обеспечивается качественное разделение расслоившегося течения пульпы;

обобщении статистической линеаризации в задачах движения недеформируемых частиц в поле бегущей волны и взаимодействия технологической нагрузки с гибкими препятствиями или рабочим органом;

повышении извлечения тяжелых фракций в промпродукт на стадии получения черного концентрата при обогащении титан-цирконовых песков.

Реализация работы. Методика расчета аэрогидродинамического струйного сепаратора используется при разработке гравитационных струйных аппаратов для обогащения угольных шламов и совершенствования технологических схем в институте "УкраИИУглеобогащение". Методика и пакет прикладных программ переданы институту "Механобрчермет", где определяющие зависимости технологических показателей используются с целью построения эффективных гравитационно-магнитных схем.

Расчет ожидаемого экономического эффекта от использования аэрогидродинамического струйного сепаратора с разделением расслоившегося течения пульпы на водяной струе базируется на результатах протокола технологических испытаний способа гидромеханического разделения струйных течений пульп и аэрогидродинамического струйного сепаратора и составляет 10,1 млн.крб. в ценах 1993 г.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены и докладывались на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Машинные методы решения краевых задач" (г.Казань, 1984, г.Рига, 1985), Всесоюзной конференции по вибрационной технике (г.Кобулету, 1987), XIII, XV Всесоюзных конференциях по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем (г.Киев, 1983, г.Каменец-Подоль-

ский, 1989), Ш научно-технической конференции "Повышение надежности и долговечности машин и сооружений" (г.Запорожье, 1988), республиканской конференции "Применение магнитоактивных материалов и магнитных систем в народном хозяйстве" (г.Ивано-Франковск, 1989), Всесоюзной конференции "Смешанные задачи механики деформируемого твердого тела" (г.Одесса, 1989), У Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов" (г.Одесса, 1991), Ш Всесоюзной научной конференции "Гидромеханические процессы разделения гетерогенных систем" (г.Тамбов, 1991).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 работы, в том числе 1 монография и получено 12 авторских свидетельств.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 219 страниц машинописного текста, 55 страниц рисунков, 3 таблицы, 12 страниц литературных ссылок 132 наименований, 89 страниц приложений.

Автор выражает глубокую благодарность академику АН Украины В.Н.Потураеву за ценные советы, поддержку и участие в разработке концепций настоящей работы, а также сотрудникам отдела геодинимических систем и вибрационных технологий ИГТМ АН Украины за советы и практическую помощь в реализации результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Выбор направления исследований. Одной из основных проблем в технологиях переработки минерального сырья является доизвлечение ценных компонентов из хвостов и шламов обогатительных производств. Одновременно с этим актуальна проблема снижения циркуляционных нагрузок путем своевременного выведения из циклов качественных хвостов. Эти обстоятельства требуют развития теоретических и экспериментальных методов исследования нестационарных процессов в пульпе при обогащении россыпей, руд и углей.

Существенные результаты в этом направлении представлены в работах, посвященных использованию различных по характеру воздействий на обрабатываемую среду, в частности, для классификации и обогащения полезных ископаемых. основополагающими среди них являются труды М.Д.Барского, Н.Г.Бедраня, Р.О.Берта, И.И.Блехмана, А.Д.Богатова, Н.Н.Виноградова, И.Ф.Гончаревича, А.И.Денисенко, Ю.Г.Зубынина, А.Т.Елишевича, Б.В.Кизельватера, В.И.Классена, А.Г.Лопатина, П.В.Ляшенко, С.И.Полькина, В.Н.Потураева, Э.Рейхерта, А.М.Туркенича, Т.Ферри, В.П.Франчука, А.Г.Червоненко, В.Н.Шохина, Л.П.Шупова

и др. Уточнение модельных представлений о процессах, происходящих в неоднородной жидкости с учетом детерминированных и стохастических силовых факторов, предложено в работах Г.Л.Бабуха, В.Н.Буйвола, Л.Б.Гавина, Р.Ф.Ганиева, А.П.Жука, С.И.Криля, В.Д.Кубенко, В.М.Кузьмы, В.Д.Лакизы, В.А.Наумова, Г.Н.Пучки, Н.А.Силина, Л.Е.Украинского, А.А.Шрайбера, В.П.Яценко и др., в которых обобщен большой экспериментальный материал. Эти работы в настоящее время широко используются при создании различных технологий, в которых имеет место движение многофазной среды: гидро- и пневмотранспортирование, гидро- и пневмокласификация и обогащение и т.п.

Задачам струйного взаимодействия жидкости и газа, а также с жесткими или деформируемыми препятствиями посвящены работы П.М.Белоцерковского, Ф.С.Владимирова, М.И.Гуревича, О.М.Киселева, Н.Д.Коваленко, Л.М.Котляра, Г.А.Шевелева, А.Н.Панченкова, В.М.Сеймова, Г.Ю.Степанова, А.Г.Терентьева, М.И.Хмельчика, Д.С.Цельника и др., где всесторонне проанализированы эффекты, возникающие в потоке с учетом возможной его неоднородности, сил тяжести и поверхностного натяжения. Особое внимание уделено использованию конформных отображений для построения аналитического решения ряда задач гидромеханики.

Анализу гидродинамических эффектов в задачах управления отрывными течениями, моделированию волновых процессов в неоднородных струйных течениях уделено существенное внимание в работах Е.А.Гаева, Г.В.Логвиновича, Ю.Н.Савченко, И.Т.Селезова, В.В.Яковлева и др.

Одновременно с этим моделированию процессов в пульпе при ее неравномерном течении, струйном обтекании препятствий с регулируемым стоком, взаимодействии со встречными потоками однородной жидкости или газа уделяется недостаточное внимание, что является причиной отсутствия эффективных технологий переработки полезных ископаемых. Изучение состояния этой проблемы позволило сформулировать следующие задачи исследования:

1. Моделирование детерминированных и стохастических процессов расслоения и неравномерного течения пульпы.
2. Моделирование стохастического взаимодействия пульпы с гибкими элементами.
3. Исследование процесса разделения расслоившейся пульпы на тонкостенных препятствиях и встречных однородных струях.
4. Разработка методики расчета аэрогидродинамического струйного сепаратора и пакета прикладных программ для оценки влияния технологических и конструктивных параметров сепаратора на показатели разделения пульп.

Детерминированная модель неравномерного течения и расслоения пульпы. При моделировании процессов, происходящих в пульпе на участке ее расслоения, использовались балансовые соотношения массы и импульса для верхнего и нижнего слоев. Условное деление потока пульпы на два слоя явилось необходимой предпосылкой, позволившей построить физические модели формирования и взаимодействия между слоями.

Так как детерминированная модель построена для течения пульпы титан-цирконовых песков, то верхний слой представляет собой пром-продукт, а нижний - концентрат. Для нестационарного течения пульпы в сужающемся канале с плоским трапециевидальным дном получена следующая система дифференциальных уравнений относительно параметров верхнего и нижнего слоев по координате вдоль течения x :

$$\frac{\partial}{\partial t} (b \delta_1) + \frac{\partial}{\partial x} (b \delta_1 u_1) = -n V_0 \chi \frac{\rho_1}{\rho_p} b,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\chi b \delta_1) + \frac{\partial}{\partial x} (\chi b \delta_1 u_1) = -V_0 \chi b,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (b \delta_2) + \frac{\partial}{\partial x} (b \delta_2 u_2) = V_0 \chi \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(1 + n \frac{\rho_1}{\rho_p}\right) b,$$

$$(1 + \chi) \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) = g \sin \alpha - g \cos \alpha \cdot$$

$$\chi \left(\frac{\partial \delta_1}{\partial x} + \frac{\partial \delta_2}{\partial x} \right) - \tau_{12} / \rho_1 \delta_1 - 2 \tau_1 \delta / \rho_1 b,$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = g \sin \alpha - g \cos \alpha \left(\frac{\partial \delta_2}{\partial x} + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \delta_1}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\tau_{12}}{\rho_2 \delta_2} - \frac{\tau_2}{\rho_2 \delta_2} - \frac{\tau_2 \delta}{\rho_2 b} + \chi \rho_1 V_0 b \left(1 + n \frac{\rho_1}{\rho_p}\right) (u_1 - u_2),$$

где параметры с индексами 1 и 2 относятся соответственно к верхнему и нижнему слоям; α , b - соответственно угол наклона канала и его ширина; ρ_1 , ρ_2 , ρ_p , χ - соответственно плотность жидкой фазы, нижнего слоя, плотность твердых включений и объемная концентрация твердых включений в верхнем слое; V_0 , n - соответственно скорость оседания включений и параметр плотности упаковки нижнего

слоя; T_{10} , T_{12} , T_{20} , T_{20} - соответственно напряжение трения верхнего слоя о борта канала, между слоями, нижнего о борта и дно канала.

Представленная модель в случае стационарных процессов, в основу которой положены осредненные по сечениям слоев скорости, использовалась для расчета напряжения трения на стенках, в предположении, что касательные напряжения в данном сечении определяются параметрами течения в этом сечении. Подобная идея использовалась Л.Г. Лойцяцким для оценки касательных напряжений при равномерном течении.

В настоящей работе этот подход позволил сформулировать краевую задачу для каждого из слоев с учетом условий на границе между слоями и получить решения: распределение продольной скорости, в виде рядов по пространственным координатам. Развитием полученных результатов явилось определение локальных коэффициентов Дарси и касательных напряжений. Таким образом, детерминированная модель пульпы на участке ее расслоения и неравномерного движения включает уравнения с усредненными по сечению скоростями слоев и касательными напряжениями, которые уточняются локально, т.е. в каждом сечении.

Результаты тестовых решений уравнений детерминированной модели совместно с краевой задачей представлены на рис.1 при $\nu_1 = \nu_2 = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $V_0 = 0,69 \text{ м/с}$; $l = 1,3 \text{ м}$; $H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b = 0,155 \text{ м}$, где ν_1 , ν_2 , l , H , b - соответственно кинематическая вязкость i -го слоя, гидравлическая крупность оседающих частиц, длина канала-сепаратора, толщина потока и ширина канала в начальном сечении. Соответственно на Рис.1 - $(I+5)$ - средняя скорость нижнего слоя; $(I'+5')$ - толщина нижнего слоя; $(I''+5'')$ - средняя скорость верхнего слоя. Соответствие с начальной глубиной нижнего слоя: $(I+I'')$ - 1,0 Н; $(2+2'')$ - 0,5 Н; $(3+3'')$ - 0,25 Н; 4 - 0,2 Н; $(5+5'')$ - 0,1 Н. Анализ результатов расчета показал, что толщина потока пульпы определяется соотношением скатывающей и тормозящей силы и в зависимости от этого соотношения монотонно увеличивается или имеет минимум.

Для оценки влияния на толщины слоев соотношения между скатывающей и тормозящей силой рассчитаны распределения по длине канала потери импульса, отнесенного к импульсу скатывающей силы для нижнего слоя Рис.2, где $(I+3)$ - трение о верхний слой соответственно при $\theta_{20}^0 = \text{Н}$; $\theta_{20}^1 = 0,5 \text{ Н}$; $\theta_{20}^2 = 0,25 \text{ Н}$; $(I+3')$ - трение о дно при тех же θ_{20}^0 ; 5 - трение о дно при $\theta_{20}^0 = 0,1 \text{ Н}$. Анализ этих зависимостей показал, что потеря импульса, отнесенная к импульсу скатывающей силы, для нижнего слоя характеризуется смещением максимума к начальному сечению для трения о дно канала по сравнению с трением о верхний слой.

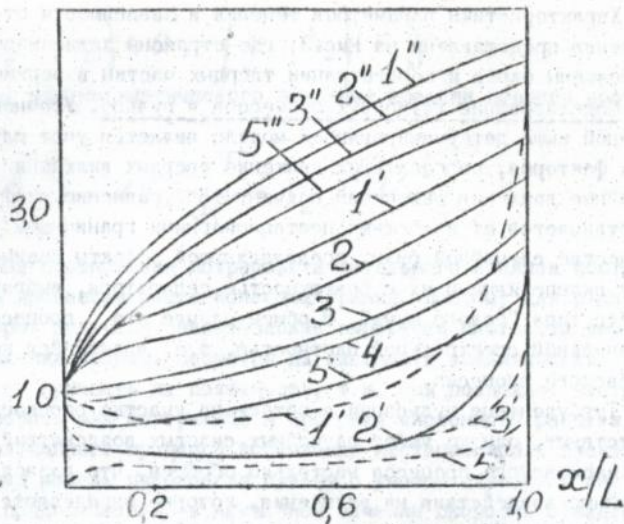


Рис. I

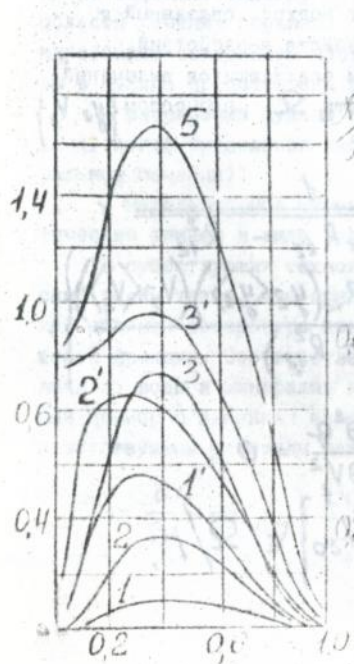


Рис. 2

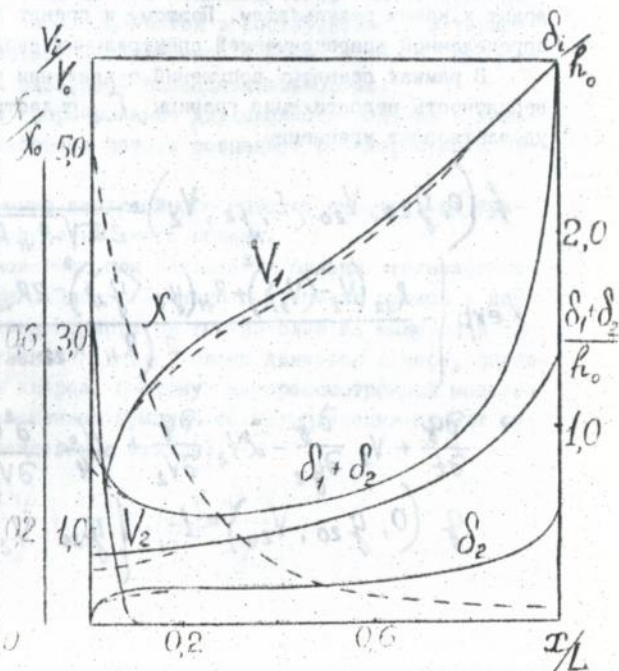


Рис. 3

Характеристики параметров течения в зависимости от скорости осаждения представлены на Рис.3, где отражены зависимости изменения толщины слоев и концентрации твердых частиц в верхнем слое.

Моделирование случайных процессов в пульсе. Уточнением разработанной выше детерминированной модели является учет случайных силовых факторов, определяющих движение твердых включений в пульсе. Случайные движения включений подчиняются уравнению диффузии, которое отличается от известных нестационарными граничными условиями. В качестве случайной силы, представляющей эффекты взаимодействия между включениями и их с поверхностью сепаратора, выбран случайный процесс типа "белого шума". В общем случае это процесс с дробно-рациональной спектральной плотностью, т.е. являющийся компонентой марковского процесса.

Турбулентные пульсации в потоке на участке расслоения пульпы отсутствуют, однако выбор случайных силовых воздействий со свойствами марковского процесса настолько обобщен, что позволяет учесть случайные воздействия на включения, которые определяются различными причинами. Уточнение спектральных свойств силового воздействия на основе учета кинетики, в частности, теории плотных газов, не приводит к новым результатам. Поэтому и принят подход, связанный с определенной аппроксимацией спектральных свойств воздействий.

В рамках принятых допущений о движении осаждающихся включений вероятность недостижения границы Γ области Ω процессом $\{y_2, V_2\}$ удовлетворяет уравнению

$$f(0, y_{20}, V_{20}; t, y_2, V_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}} \times \exp\left\{-\frac{R_{22}(V_2 - \langle V_2 \rangle)^2 + R_{11}(y_2 - \langle y_2 \rangle)^2 - 2R_{12}(y_2 - \langle y_2 \rangle)(V_2 - \langle V_2 \rangle)}{2(R_{11}R_{22} - R_{12}^2)}\right\}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V_2 \frac{\partial f}{\partial y_2} - \alpha V_2 \frac{\partial f}{\partial V_2} + \frac{N_0}{4} \frac{\partial^2 f}{\partial V_2^2} = 0,$$

$$f(0, y_{20}, V_{20}) = 1, \quad \{y_{20}, V_{20}\} \in \Omega/\Gamma,$$

$$q(t, y_2, V_2) = 0, \quad \{y_2, V_2\} \in \mathcal{J}$$

Соответственно для математического ожидания времени первого достижения границ

$$\frac{\lambda}{4} \frac{\partial^2 T_1}{\partial V_2^2} - \alpha V_2 \frac{\partial T_1}{\partial V_2} + V_2 \frac{\partial T_1}{\partial y_2} = -1$$

Полученные соотношения потребовали детального анализа достижения случайным процессом нестационарных границ. Поэтому для ряда модельных примеров получены аналитические выражения плотности вероятности недостижения границ. Несмотря на сложность аналитических выражений, следует признать их полезность, т.к. они позволяют построить и адаптировать ряд алгоритмов и программ численного расчета характеристик случайного процесса достижения нестационарных границ.

Физическая модель расслоения пульпы с учетом случайных сил включала ряд предположений: в начальном сечении скорость осаждения частиц равна нулю; осевшие на участке расслоения частицы существенно не изменяют толщину потока донной квазижидкости; нижняя граница области течения верхнего слоя изменяется в соответствии с детерминированным осаждением частиц. Одновременно с этим условно процессы в пульпе представлены следующей последовательностью:

- расслоение пульпы (формирование двухслойного течения в условиях, когда продольная скорость потока совпадает со скоростью в начальном сечении);
- неравномерное течение двухслойного потока; отсутствуют критические режимы в виде гидравлического прыжка.

В существующих технологиях при разделении пульпы технологический режим таков, что при разделении титан-циркононовых песков в донной области сепаратора концентрируется тонкий слой из минералов тяжелой фракции. Соответственно над этим слоем движется взвесь, состоящая из воды и минералов кварца. Поэтому ниже рассмотренный модельный пример с линейным изменением границы области течения принят соответствующим условиям разделения пульпы:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_1(y) \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{1}{2} K_2(y) \frac{\partial^2 q}{\partial y^2},$$

$$q(0, y) = 1, \quad B < y < D,$$

$$q(t, y_r^-) = q(t, y_r^+) = 0,$$

$$y_r^+ = At + B, \quad y_r^- = ct + D,$$

$$y^* = \frac{y}{y_r^+ - y_r^-} - \frac{1}{2},$$

$$\frac{\partial q}{\partial t_1} - \frac{y_1 + 1/2}{t_1 + H} \frac{\partial q}{\partial y_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial y_1^2} = 0,$$

$$q(0, y_1) = 1, \quad -1/2 < y_1 < 1/2,$$

$$q(t_1, -1/2) = q(t_1, 1/2) = 0,$$

$$q_{\infty}(t_1, y_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(t_1^2 + 2Ht_1)} \exp \left\{ - \frac{\left(y_1 \frac{H}{t_1 + H} + \frac{H}{2(t_1 + H)} - \frac{1}{2} \right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{H}{t_1 + H} \right)^2 \right]} \right\}$$

В настоящем модельном примере отражены характерные элементы процесса расслоения пульпы, учитывающие случайные воздействия.

В технологиях переработки россыпей и руд технологический режим обеспечивает минимальную продольную скорость пульпы в начальном сечении, что позволяет добиться качественного расслоения. Угол сужения желоба при этом выбирается из условия, что в разгрузочном сечении толщина потока максимальна и отсутствует гидравлический прыжок. Таким образом, предположения, которые учтены в физической модели расслоения пульпы, соответствуют реальным условиям ее разделения на слои.

Следует отметить, что двухслойная модель течения пульпы является идеальным объектом, т.к. позволяет в численно-аналитических экспериментах оценить влияние различных параметров желоба и пульпы на гидромеханические параметры ее расслоения и течения. При этом анализ процесса расслоения пульпы с учетом случайных силовых факторов проведен на основе рассчитанной плотности вероятности распределения твердых частиц, определение которой предполагает:

- однородное изменение толщины пульпы вдоль продольной координаты, т.е. плотность распределения твердых включений от некоторого сечения изменяется лишь из-за изменения толщины потока;

- перераспределение твердых частиц по сечению потока имеет место на участке с практически неизменной толщиной, где интенсивность случайного процесса, определяющего силовые факторы, практически постоянна;

- интенсивность случайного процесса изменяется лишь с изменением скорости пульпы в начальном сечении.

Полученные на основе приведенных предположений аналитические зависимости плотности распределения близки к экспериментальным, что обосновывает их использование. В качестве критерия выбрано выражение

$$\Delta = \int \left[P_p(y_2) - P_3(y_2) \right]^2 dy_2,$$

где

$$P_p = \iiint f(0, y_{20}, v_{20}; t, y_2, v_2) \rho(y_{20}) dy_{20} dv_{20} dt.$$

Минимум Δ соответствует интенсивности аппроксимирующего случайное поле воздействий на частицы "белого шума".

Стохастическое взаимодействие гибких элементов с потоком пульпы. Разнообразие методов анализа случайных колебаний в физических системах позволяет с учетом специфики конкретной задачи выбирать наиболее предпочтительный из них. При этом, конечно, приходится согласовывать точность и простоту используемого метода с тем, чтобы решение задачи полно представляло ее характерные свойства и обеспечивало их оценку.

Среди методов решения задач о стохастических колебаниях широкое использование приобрел метод статистической линеаризации, несмотря на его известные ограничения. С целью расширения возможностей этого метода в работе предлагается восстанавливать корреляцион-

ную функцию решения укороченных систем, а в дальнейшем, получив корреляционную функцию решения исходной системы (с наперед заданной точностью), использовать метод корреляционной идентификации. В частности для дискретной системы

$$\dot{x} + \lambda x + \varepsilon x^3 = n(t), \quad \langle n(t) \rangle = 0, \quad \langle n(t) n(t+\tau) \rangle = N \delta(\tau)$$

с точностью до ε получена корреляционная функция

$$K(\tau) = \frac{N}{2\lambda} \exp(-\lambda|\tau|) \left\{ 1 - 3\varepsilon \frac{N}{2\lambda} \left(|\tau| + \frac{1}{\lambda} \right) \right\}$$

и соответствующее линеаризованное уравнение

$$\dot{x} + \lambda x + \frac{\beta}{2 - \beta \left(t + \frac{1}{\lambda} \right)} x = n(t), \quad \beta = 3 \frac{\varepsilon N}{\lambda},$$

$$t \leq t_K < \frac{2}{3} \frac{\lambda}{\varepsilon N} - \frac{1}{\lambda}, \quad \varepsilon \ll 1$$

Ограничение по t связано с формальными операциями ограничения числа членов, приближающих решение исходного уравнения, и с учетом малого параметра ε может быть столь большим (t_K), что позволит использовать линеаризованное уравнение в необходимом временном интервале.

Предложенное обобщение метода статистической линеаризации также дает преимущества при оценке решения уравнений более сложных систем, которые рассмотрены в настоящей работе: изгибные колебания гибкой цилиндрической оболочки из вязкоупругого материала и гибкой прямоугольной пластинки. Такими механическими системами моделируются эластичные рабочие органы вибрационных транспортно-технологических машин, поэтому при их конструировании важна разработка общих принципов построения решений соответствующих уравнений. В работе, используя метод моментов, получена система дифференциальных уравнений, которая позволяет оценить искомые параметры колебаний.

Обобщение метода статистической линеаризации отличает его от известных методов тем, что корреляционная идентификация обеспечивает замену исходного нелинейного дифференциального оператора на линейный. При этом удовлетворяется наперед заданное приближение к спектральным характеристикам исходной системы и линеаризованное уравнение строится из условия приближения не моментов нелинейной

функции, а статистических свойств решения исходного уравнения. В процессе линеаризации не предполагается нормальный закон распределения решения, а структура и параметры линеаризованной системы идентифицируются при действии на систему "белого шума" и инвариантны к свойствам стохастического возбуждения.

Отметим, что для приведенного выше уравнения построена плотность распределения вероятности:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\alpha x + \frac{\beta x}{2 - \beta \left(t + \frac{1}{\alpha} \right)} \right) P \right] + \frac{N}{2} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$P(x, t) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} U(t)} \exp \left[-\frac{V(x, x_0, t)}{2U(t)} \right] \right\} \left| \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right|,$$

$$U(t) = \frac{N \left(2 - \frac{\beta}{\alpha} \right)^2}{2} \int_0^t \frac{\exp(2\alpha t_2) dt_2}{\left[2 - \beta \left(t_2 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^2},$$

$$V(x, x_0, t) = \left[x \frac{2 - \beta/\alpha}{2 - \beta \left(t + \frac{1}{\alpha} \right)} \exp(\alpha t) - x_0 \right]^2$$

Анализ решений стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений с гладкой нелинейностью проведен на основе использования функции Грина.

Существенным развитием полученных результатов явился анализ волн в среде со случайными свойствами и кинематическим возбуждением. В качестве объекта исследований рассмотрен вертикальный цилиндр с кинематическим возбуждением на торце. На основе полученных оценок спектральных свойств продольной волны рассчитан импульс, передаваемый включению, и построено представленное в работе решение задачи о перемещении недеформируемых частиц волной со случайными свойствами.

При моделировании перемещения частиц учтены силы вязкого, нелинейно-вязкого и сухого трения, а расчетная зависимость для скорости перемещения частиц получена усреднением силовых факторов

вдоль линии контакта частицы с поверхностью, вдоль которой распространяется волна.

Разделение потока неоднородной жидкости на тонкостенном профиле и струе. Изучению закономерностей разделения расслоившегося течения пульпы предшествует анализ струйной модели разделения потока идеальной несжимаемой жидкости. Схема такого течения показана на рис.4. Постановка задачи приведена ниже.

Слой жидкости толщиной h_0 со скоростью v_0 , расходом на единицу ширины $q_0 = v_0 h_0$ течет вдоль прямолинейной стенки из бесконечно далекой точки F . В стенке имеется разгрузочное отверстие шириной L_2 с уступом высотой h_2 . За уступом есть прямолинейный участок BK длиной L_1 , который заканчивается пластинкой KS длиной L_0 . Набегающий поток разделяется на две части: выше разделительной линии FC с расходом q_1 в виде струи обтекает верхний край пластинки, ниже линии FC с расходом q_2 разгружается через EB .

Решение задачи на основе использования комплексного потенциала и функции Жуковского

$$w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y), \quad \Omega = \ln \frac{v_0}{v} + i\theta$$

состоит в конформном отображении областей w и Ω на вспомогательную область плоскости переменного t , чем устанавливается опосредованная связь между w и Ω , которая позволяет рассчитать все кинематические и динамические характеристики потоков. Конкретный вид отображения соответствующих областей

$$w = -\frac{q_1}{\pi} \ln \frac{t-a}{a} - \frac{q_1 d}{\pi a} \ln \frac{t+d}{d} + i q_1, \quad q_1 = q_0 \frac{a}{a+d},$$

$$\Omega = \tilde{\Omega}(t) + \ln \frac{v_0}{v} - i t, \quad \tilde{\Omega}(t) = -E_1 \int \frac{(t+m)(t+p) dt}{t(t+k)\sqrt{(t-s)(t+\varepsilon)(t+b)}},$$

где E_1 — произвольная действительная постоянная. Координаты характерных точек на действительной оси плоскости t обозначены одноименными малыми буквами, которые имеются в схеме течения. Конкретизация некоторых соотношений приведена ниже и с учетом условий обхода характерных точек связывает параметры течения с геометрией обтекаемого профиля:

$$\left| \int_{-k}^s q(z) dz \right| = C_0, \quad \left| \int_{-b}^{-k} q(z) dz \right| = C_1,$$

$$\left| \int_{-L}^{-b} q(z) dz \right| = C_2 + Lk_2, \quad q(z) = \frac{q_0}{\Gamma v_2} \frac{L}{(z-a)(L+1)}$$

Результаты численного решения настоящей задачи приведены на Рис.5 (форма свободных границ и распределение скорости по твердым границам), на Рис.6 и Рис.7 представлены соответственно зависимости расхода донного слоя от длины подтормажи эжского профиля и угла атаки. Характерной особенностью этих зависимостей является то, что для каждой фиксированной длины профиля существует предельный угол атаки, при котором наблюдается резкое уменьшение расхода. Одновременно с этим увеличение длины профиля при фиксированном угле атаки приводит к возрастанию расхода.

Полученные результаты для течения идеальной несжимаемой жидкости позволили качественно оценить характеристики течения при обтекании профиля неоднородной жидкостью, для чего она представлена однородной путем усреднения плотности распределения твердых включений.

Экспериментальные зависимости подтверждают правильность предложенной модели и сведены в регрессионные уравнения; высокие значения коэффициента множественной регрессии и критерия Фишера позволяют судить об их адекватности наблюдаемому процессу.

Отмечая ценность регрессионных моделей, следует признать правомерность их использования в диапазонах изменения параметров, соответствующих условиям эксперимента. Одновременно с этим простота уравнений регрессии позволяет их применять в расчетной практике, ориентируясь на современные вычислительные средства небольшой мощности, что служит основанием, чтобы их рекомендовать для практического использования.

В частности апробированы и рекомендованы к использованию уравнения регрессии для выхода потока однородной жидкости при его разделении на воздушной струе:

$$\epsilon_k = 0,104 + 0,066 - 1,78\alpha - 0,46P - 0,039B - 0,056P^2,$$

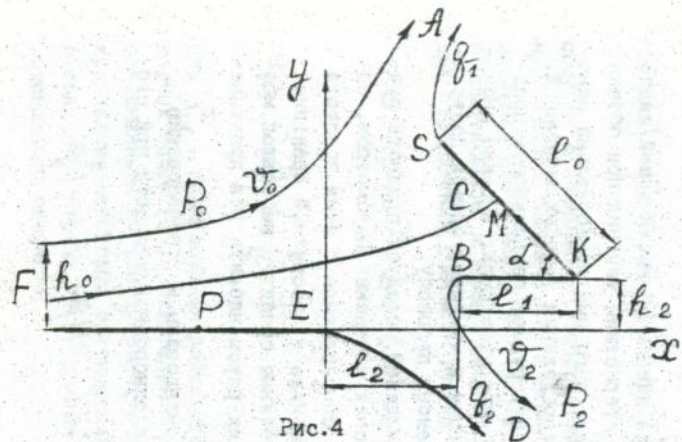


Рис.4

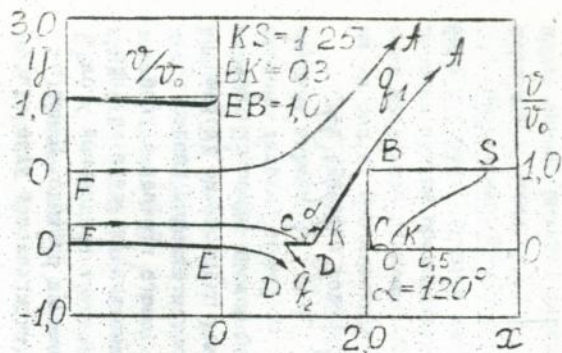


Рис.5

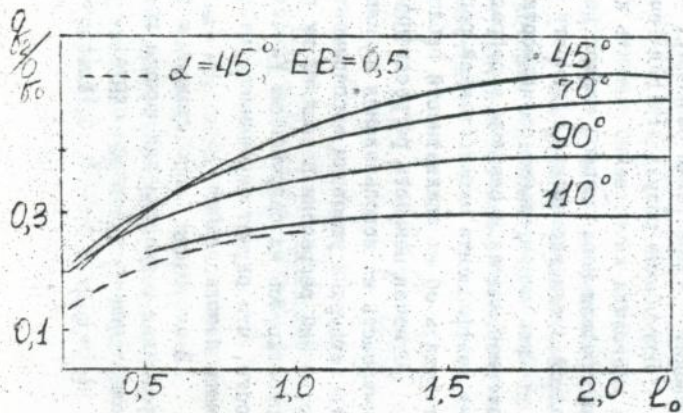


Рис.6

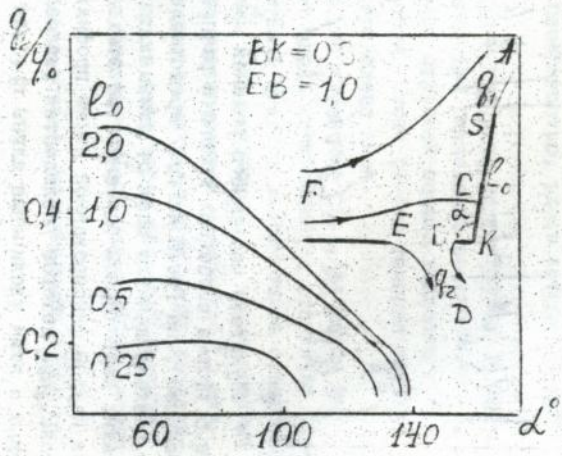


Рис.7

$$R = 0,94, \quad F = 123,37,$$

$$G_{п/п} = 198,93 + 0,048G - 0,98\alpha - 288,57P - 1,76\beta + 4,71P\beta,$$

$$R = 0,82; \quad F = 31,14;$$

$$575 \text{ кг/ч} \leq G \leq 970 \text{ кг/ч}, \quad 18^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ,$$

$$50^\circ \leq \beta \leq 90^\circ, \quad 0,6 \text{ атм} \leq P \leq 1,0 \text{ атм}$$

Экстремальные принципы в задачах распределения потоков однородной жидкости рассмотрены на примерах истечения жидкости при постоянном напоре и напорного движения в системах трубопроводов. Получены экстремальные зависимости расхода (максимум) при заданном напоре и напора (минимум) при заданном расходе.

Используются эти принципы также при решении задач обтекания стратифицированной жидкостью профиля или встречной струи. Причем, предварительно определяется количество пульпы, разгружающейся в донной области, а затем рассчитывается положение разделяющей линии тока и оценивается извлечение тяжелой фракции с учетом распределения твердых включений.

Промышленные испытания струйного сепаратора. Задача промышленных испытаний состояла в определении области использования и рациональных параметров сепаратора. Одновременно с этим следовало оценить совместное влияние технологических входных и конструктивных параметров сепаратора на качество разделения пульпы.

Испытаниям предшествовал анализ технологической схемы с целью выбора места установки сепаратора и дополнительных силовых факторов, приводящих к поддержанию частиц во взвешенном состоянии. В ходе экспериментов были апробированы результаты по регулированию ширины разгрузочной щели путем подачи под дном сепаратора встречной к потоку пульпы струи воздуха. Подобное техническое решение имеет высокую эксплуатационную надежность, т.к. достаточно, изменив давление в воздушной струе, изменить ширину щели. Расчетные зависимости расхода (6), позволяющие оценить влияние такой струйной разгрузки, имеют вид

$$Q = \mu_n S \sqrt{2gh + v^2}, \quad F_2 = v^2 / gh.$$

$$\mu_n = \frac{M}{1 + 0,34 F_2} \cos \frac{\pi \beta}{\pi - 2\alpha},$$

где M - коэффициент расхода при $V = 0$; h , S - соответственно высота слоя пульпы и площадь щели промпродукта; α , β - соответственно угол наклона желоба и угол между вертикалью и водяной струей.

Анализ процессов разделения титан-цирконовых песков на струйной сепараторе (Рис.8), установленном на обогатительной фабрике БДМЗ, предполагал использование в качестве исходной пульпы с вариацией содержания тяжелой фракции в пределах (6,10+16,4) % и крупность 98 % класса менее 300 мкм. При этом возможным было использование в качестве разделяющего элемента тонкостенного профиля, встречной воздушной или водяной струи. По результатам испытаний сделан вывод о целесообразности использования способа гидромеханического разделения струйных течений пульп и аэрогидродинамического струйного сепаратора для разделения сформировавшегося по слоям течения. Причем разделение пульпы на воздушной струе (Рис.9) привело к "вымыванию" тяжелой фракции в промпродукт и хвосты, тогда как разделение на водяной (Рис.10) струе и тонкостенном профиле (Рис.11) этого в большей степени лишено. Более того, лучшие показатели разделения пульпы достигнуты именно при ее делении на водяной струе.

При оценке результатов опробования сепаратора при разделении отмытых титан-цирконовых песков, отмечена структура потока пульпы, при которой крупные и с низким содержанием металла частицы располагаются в верхнем слое. С учетом такой структуры потока были проведены дополнительные исследования по разделению пульпы (защитной классификации) с целью обеспечить незабываемость разгрузочной щели конусного сепаратора. Одновременно с этим, учитывая предполагаемую замену грохотов по классу 2 мм, ставилась цель снижения в классе +2 мм содержания полезного компонента до 1,5 %, т.к. по существующей технологической схеме надрешетный продукт грохота возвращался в начало процесса и циркулировал. Результаты опробования сепаратора подтвердили возможность его использования для защитной классификации. Причем промпродуктовая разгрузка сепаратора содержала тяжелых металлов до 2 %, тогда как в действующей технологии их до 4 % и в концентратной разгрузке отсутствовали частицы +0,5 мм.

Основной проблемой при замене грохота на сепаратор является необходимость предварительного сгущения пульпы. Для этого могут быть

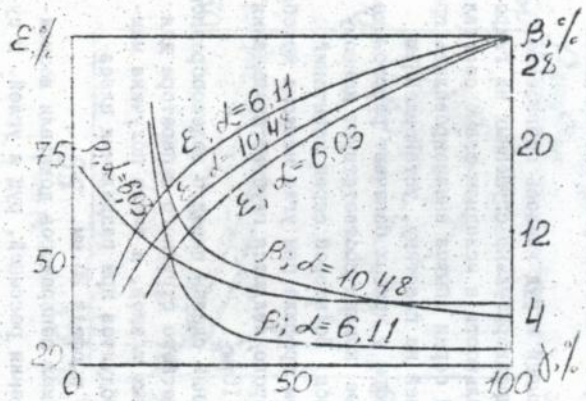


Fig. 8

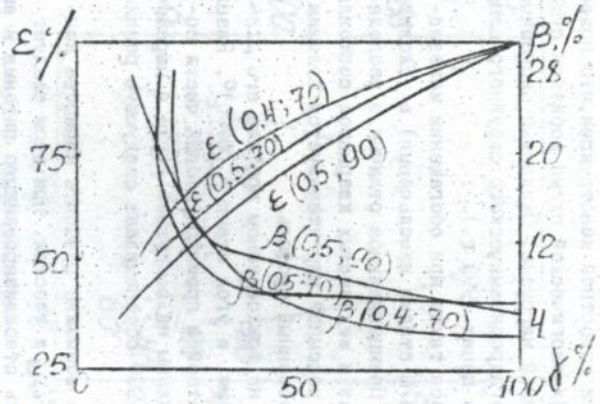


Fig. 9

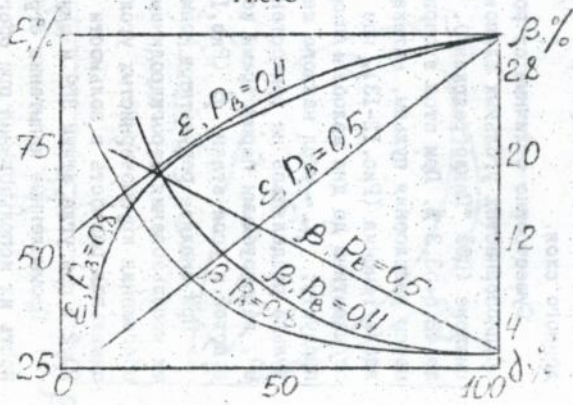


Fig. 10

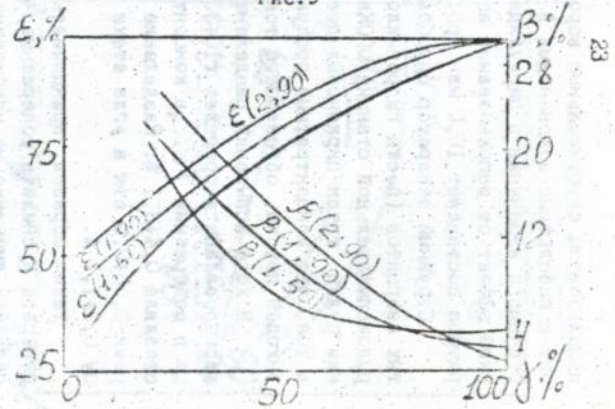


Fig. 11

использованы сгустительные воронки известной конструкции, что позволяет с небольшими изменениями в технологической схеме добиться существенного изменения в циркуляционной нагрузке. Ожидаемый экономический эффект от использования аэрогидродинамического струйного сепаратора составляет 10,5 млн руб. (в ценах 1993 г.).

Струйный сепаратор опробовался также при обогащении железистых кварцитов (пески гидроциклона III стадии измельчения) в условиях рудоиспытательной станции ЮГОКа. Принципиальное отличие в разделении пульпы титан-цирконовых песков и железистых кварцитов состояла в том, что концентратный продукт россыпей характеризуется большим выходом потока, обтекающего тонкостенный профиль.

В ходе испытаний разделения на тонкостенном профиле его длина варьировалась в пределах (10+30) мм, а угол атаки - (0+90)°. Разница в содержании $Fe_{с.к.}$ в концентратной и промпродуктовой части составляла 0,4+3,1 %. Разделение пульпы на воздушной струе с параметрами 0,55+0,6 атм и угла атаки 0+90° обеспечивает следующую разницу 0,2+1,1 %.

Таким образом, принципиально возможно повысить качество концентрата и снизить содержание $Fe_{с.к.}$ в хвостах. При этом следует обратить внимание на необходимость стабилизированного питания и выбор угла наклона сепаратора, который близок к углу заклинивания донного слоя.

Существенно отличим от россыпей и руд явилось обогащение крупнозернистых угольных шламов, предварительно сгущенных на гидроциклоне (ЦФ "Павлоградская"). Зольность в исходном шламе составляла 48,6+53,3 %. При этом в первой серии опытов анализировались процессы расслоения пульпы, натекающей на пластину, установленную вдоль течения (Рис. 12-13), где цифры у кривых означают расстояние от пластины до дна желоба и сплошные кривые соответствуют донному продукту; α - угол наклона желоба. Во второй серии испытаний пульпа разделялась на тонкостенном профиле при угле наклона желоба 90°, варьируемыми параметрами которого являются глубина проникания в поток и угол атаки β (Рис. 14-15).

При анализе результатов испытаний сделан вывод о целесообразности использования аэрогидродинамического струйного сепаратора для обогащения крупнозернистых угольных шламов, а также получена максимальная разность в зольности продуктов при разделении слоев 20,2 % при угле атаки 35° и длине профиля 25 мм.

Промышленные испытания струйных сепараторов доказали возможность их использования при обогащении россыпей, руд и углей. В существующих технологиях доказано на основе этих испытаний, что пу-

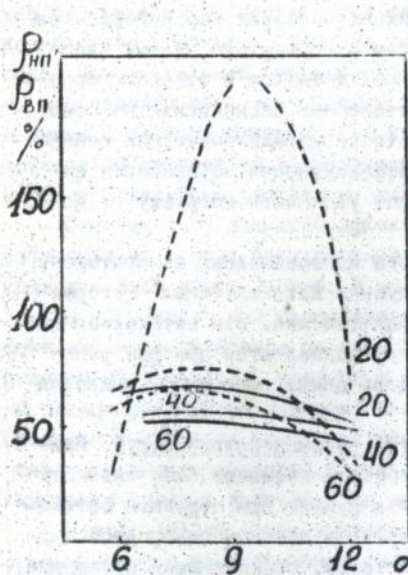


Рис. 12

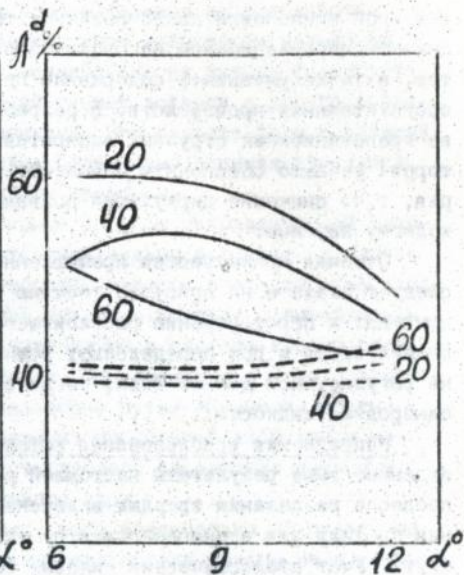


Рис. 13

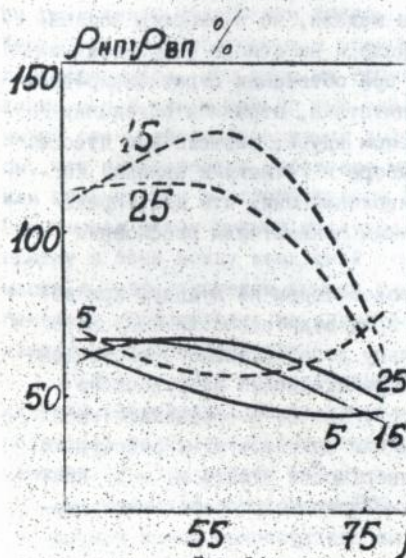


Рис. 14

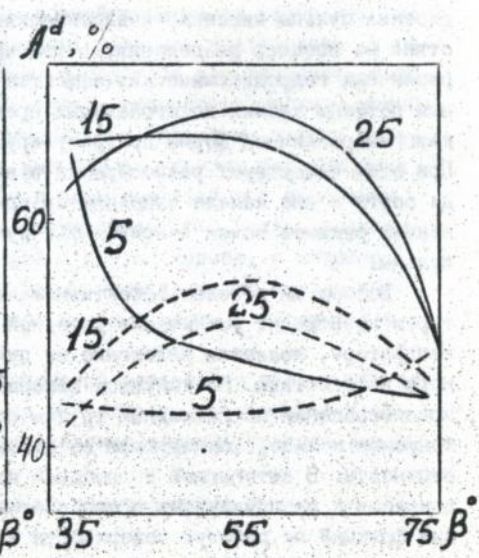


Рис. 15

тем иной компоновки апробированных технологических решений удается снизить циркуляционные нагрузки сбросом относительно чистых хвостов, а также уменьшить содержание ценных металлов в отходах горно-обогатительных производств. В разрабатываемых технологиях на основе гравитационных струйных аппаратов (аэрогидродинамических сепараторов) реально обеспечить повышение эффективности переработки сырья, т.к. снижение циркуляции позволяет увеличить нагрузку по исходному питанию.

Отмечая преимущества промышленного использования сепараторов, следует указать на присущие течению пульпы автоколебания, которые приводят к перемешиванию расслоившегося течения. Эти автоколебания сглаживаются и при определенных режимах подавляются при разгрузке на регулируемой донной шели, когда вдоль днища сепаратора подается однородная жидкость.

Направления использования эффектов взаимодействия струй. Приведенные выше результаты настоящей работы показывают эффективность процесса разделения твердых включений в пульпе при струйном обтекании профиля или взаимодействии со встречным потоком однородной жидкости. Учет стохастических силовых факторов, определяющих поведение включений, позволяет не только построить адекватные процессу расслоения пульпы численно-аналитические модели, но и выбрать воздействия на процесс разделения, в том числе и на основе использования различных гидродинамических эффектов при обтекании стратифицированным потоком гибких полигональных препятствий, отрывном обтекании каверны различной формы при регулируемом вдуве, впрыске или отсосе. При этом существует разнообразие в выборе и геометрии канала, когда борта и дно канала выполняются криволинейными, что для определенных режимов течения приводит к лучшим показателям расслоения пульпы.

Возможным и более эффективным воздействием на пульпу, при котором происходит увеличение удельной производительности конусного сепаратора, является наложение на пульпу дополнительного вибрационного воздействия. На конусном сепараторе пульпа из загрузочного приспособления по расходным трубам поступает на распределительное конусное кольцо, формирующее ее поток при выходе его на рабочую поверхность. В вытекающей по рабочей поверхности пульпе по мере продвижения к разгрузочному приспособлению происходит осаждение тяжелых фракций на рабочую поверхность и на разгрузочном конце конуса тяжелая и легкая фракции разделяются отсекателем и направляются в соответствующие трубопроводы. По мере движения пульпы по рабо-

чей поверхности осуществляется ее дополнительная виброобработка колеблющейся гибкой вставкой в генерируемом индуктором магнитном поле. Дополнительное вибрационное воздействие на пульпу формируется посредством возбуждения колебаний гибкой вставки с упруго соединенными с рабочей поверхностью кромками. При расчете форм колебаний вставки ей поставлена в соответствие бесконечно длинная пластинка, например, шарнирно опертая по длинным сторонам.

Отметим, что возможны эффективные способы гидравлической классификации на основе формирования течения пульпы в соплах или вдоль криволинейных поверхностей. В частности, автором в соавторстве предложены устройства для классификации пульп, в которых повышение эффективности достигается за счет движения ее в системе соосно расположенных цилиндров, конусов и сопел. Одновременно с этим получены принципиальные результаты, позволяющие путем изменения эпюры продольной скорости (смещение максимума продольной скорости в направлении дна сепаратора) достигнуть лучшего расслоения пульпы и вымывания крупных включений из донного слоя.

Использование аэро- и гидроструйного воздействия на пульпу не ограничивается разделением расслоившегося потока пульпы на встречной однородной струе. Проведенные экспериментальные исследования по разделению пульпы при локальном воздействии на ее свободную поверхность в лабораторных и промышленных условиях подтвердили их целесообразность. При этом на струйном сепараторе варьировалось положение сопла относительно дна вдоль бортов сепаратора, причем устойчивый режим вихреобразования достигался при пережатии потока пульпы, что эквивалентно установке на дне желоба упругих тел вращения или организации в потоке пульпы воздушных полостей под давлением. Запирающая поток пульпы воздушная струя приводит к гидравлическому прыжку в зоне между воздушной струей и бортом желоба, а имеющее место в гидравлическом прыжке циркуляционное движение пульпы обеспечивает выбрасывание из вихря более плотных частиц, которые осаждаются на дно сепаратора.

Регрессионное моделирование процесса разделения пульпы при локальном воздействии на ее свободную поверхность воздушной струей позволило получить уравнение для извлечения тяжелых фракций в концентрат (ξ_K) и хвосты (ξ_{x_2}):

форсунка на расстоянии 350 мм от разгрузочного конца

$$\begin{aligned} \epsilon_K = & 572,24 - 0,269G - 0,268L - 1935,11P - \\ & - 0,223HP + 1875,81P^2; R = 0,991; F = 211,077; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{XB} = & -523,24 + 0,49G + 1947,59P - 1817,8P^2; \\ R = & 0,985; F = 45,926 \end{aligned}$$

где G , L , H , P - соответственно нагрузка на сепаратор, содержание тяжелых фракций в питании, высота форсунки над дном сепаратора и давление в воздушной струе; R , F - соответственно коэффициент множественной корреляции и критерий Фишера. Высокие значения коэффициента множественной корреляции и критерия Фишера подтверждают учет определяющего набора факторов и адекватность уравнений регрессии описываемому процессу.

Анализ уравнений регрессии позволяет сделать вывод об экстремальной зависимости параметров разделения пульпы (ϵ_K , ϵ_{XB}) от параметров локального воздействия (P , H).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации осуществлено теоретическое обобщение и решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, заключающейся в разработке гидромеханических основ теории и методов расчета процессов расслоения, неравномерного течения и разделения расслоившегося течения пульпы при струйном обтекании тонкостенных препятствий или соударении со встречной струей однородной жидкости, обосновании способов и параметров аэрогидродинамических струйных сепараторов для разделения тонкослойных струйных течений.

В диссертации получены следующие основные результаты.

I. Разработаны детерминированные модели расслоения пульпы при ее неравномерном течении и рассчитаны критические режимы. При этом осаждающаяся на дно канала примесь представлена квазизжидкостью, а уравнение баланса массы и импульса учитывают плотность упаковки донного слоя. Установлены закономерности для касательных напряжений на границах сечения потока в приближении, что они определяются параметрами течения в этом же сечении, а также рассчитаны параметры

течения в зависимости от скорости осаждения частиц.

2. Изучено влияние случайных силовых факторов на поведение твердых включений в пульпе, когда свободная поверхность пульпы представлена отражающим экраном, а дно сепаратора - поглощающим экраном. Получены зависимости плотности вероятности достижения нестационарных границ марковским процессом, которые позволяют оценить массу оседающих на поверхность сепаратора частиц и учитывают нестационарность границы течения (дно сепаратора) в соответствии с детерминированной компонентой скорости осаждения.

3. Исследованы процессы взаимодействия гибких деформирующихся элементов со стохастической нагрузкой, которые моделируют колебания рабочих органов вибрационных транспортно-технологических машин и определены условия "всплывания" твердых частиц в прямом цилиндре со случайным кинематическим возбуждением продольной волны на торце, построены зависимости, характеризующие перемещение частицы продольной волной со случайными свойствами. Разработано обобщение метода статистической линеаризации на основе корреляционной идентификации, что позволило получить оценки параметров колебаний ряда дискретных систем.

4. Установлены закономерности струйного обтекания невязкой и несжимаемой жидкостью тонкостенного профиля при регулируемом стоке в донной области. Рассчитаны форма свободной границы, распределение скорости по твердым границам и расход через разгрузочное отверстие в зависимости от угла атаки и длины профиля в потоке. При этом отмечено резкое снижение расхода донного слоя при некотором угле атаки $\alpha = 1000 \pm 1400$, который пропорционален длине подтормаживающего профиля $l = 0,25-2,00$ см.

Сформулированы экстремальные принципы, позволяющие рассчитать параметры разделения двухслойной жидкости на тонкостенном профиле.

5. Результаты промышленных испытаний стенда струйного сепаратора при обогащении отмытых титан-цирконовых песков, песков гидроциклонов III стадии измельчения железистых кварцитов и крупнозернистых угольных шламов доказали возможность его практического использования. В настоящее время на основе испытаний разработан струйный сепаратор, конструктивные элементы которого апробированы и реализованы на конусных сепараторах обогатительного производства по переработке россыпей. Ряд принципиально новых технических решений защищен авторскими свидетельствами.

6. Разработан новый способ разделения расслоившегося течения пульпы на основе ее взаимодействия со встречным однородным потоком

жидкости или газа. Промышленное опробование способа и аэрогидродинамического струйного сепаратора подтверждают целесообразность его дальнейшего использования для обогащения полезных ископаемых, причем, при обогащении пульпы титан-цирконовых песков и разделении на встречной водяной струе получен черновой концентрат с содержанием тяжелых фракций $\beta = 34,5\%$, а при разделении крупнозернистых угольных шламов достигнута разность в зольности в продуктах $\Delta A^d = 20,2\%$.

7. Разработаны научные основы создания аэрогидродинамических струйных сепараторов, инженерная методика и пакет прикладных программ его расчета, а также построены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать технологические показатели разделения пульпы в зависимости от входных технологических и конструктивных параметров сепаратора.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора.

1. Резников В.Д., Блюсс Б.А. Аналитическое исследование нестационарных фрикционных колебаний // Тез. докл. XIII конф. по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем. - Киев: Наук. думка, 1963. - С.10-11.

2. Резников В.Д., Блюсс Б.А. О приближенном интегрировании динамических систем // Тез. Всесоюз. научн. техн. семинара "Машинные методы решения краевых задач". - Казань: Минсвязь СССР, 1984. - С.24-25.

3. Резников В.Д., Блюсс Б.А. Стохастизация и аппроксимация нелинейных колебаний // Тез. Всесоюз. научн. техн. семинара "Машинные методы решения краевых задач". - Рига: Минсвязь СССР, 1985. - С.11.

4. Резников В.Д., Блюсс Б.А., Колтовец А.Н. Контактные колебания и идентификация высокочастотного возбуждения при трении // Сб. Совершенствование горных машин. - Киев: Наук. думка, 1987. - С.108-110.

5. Надутый В.П., Блюсс Б.А., Потураев С.В. Исследование колебаний гибких просеивающих поверхностей виброгрохотов при стохастической технологической нагрузке // Тез. Всесоюз. конф. по вибрационной технике. - Тбилиси: Мецниереба, 1987. - С.36.

6. Надутый В.П., Блюсс Б.А. Вибрационное перемещение в сыпучей среде под действием случайного возбуждения // Тез. III Респ. научн. техн. конф. Повышение надежности и долговечности машин и сооружений. Киев: ИПП УН УССР, 1988. - С.36-37.

7. Блюсс Б.А., Надутый В.П. Обобщение метода статистической линеаризации при расчете параметров колебаний гибких стержней //

Тез. докл. Всесоюзн. конф. Проблемы механики железнодорожного транспорта. - Днепропетровск: ДИИТ, 1968. - С.116-117.

8. Потураев В.Н., Надутый В.П., Блюсс Б.А. Волновые процессы в цилиндрической оболочке из пьезокомпозиционного материала // Тез. II Всесоюзн. семинара "Полимерные и композиционные сегнето-, пьезо-, пироматериалы и электроды в ускорении научно-технического прогресса". - Москва: НИИПИ, 1969. - С.17.

9. Надутый В.П., Блюсс Б.А., Шайкевич Р.С. Нелинейные случайные колебания гибких оболочек с учетом рассеяния энергии // Тез. докл. XV Респ. конф. по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем. - Киев: Наук. думка, 1969. - С.23-24.

10. Надутый В.П., Блюсс Б.А., Потураев С.В. Исследование и расчет параметров колебаний гибкой просеивающей поверхности вибрационного грохота при стационарном стохастическом нагружении // Сб. Вибрационные эффекты в процессах добычи и переработки минерального сырья. - Киев: Наук. думка, 1969. - С.89-96.

11. Блюсс Б.А., Надутый В.П. Магнитоупругие изгибные колебания элементов вибрационных машин // Тез. Респ. конф. Применение магнитоактивных материалов и магнитных систем в народном хозяйстве. - Ивано-Франковск: УкрНИИПИ, 1969. - С.35-36.

12. Блюсс Б.А. Колебания локально возбуждаемой пьезо-керамической пластинки // Тез. докл. I У Всесоюзн. конф. "Смешанные задачи механики деформируемого тела". - Одесса: ОГУ, 1969. - С.46.

13. Блюсс Б.А. Корреляционная идентификация и предельные свойства статистической линеаризации // Докл. АН УССР. - Сер. А. - 1969. - № 6. - С.32-35.

14. Блюсс Б.А. Обобщение метода статистической линеаризации на основе корреляционной идентификации // Сб. Вибрационные эффекты в горных технологиях. - Киев: Наук. думка, 1990. - С.88-94.

15. Блюсс Б.А., Надутый В.П. Обобщение статистической линеаризации в расчетах колебаний вязкоупругих элементов вибрационных машин // Сб. Вибрационные эффекты в горных технологиях. - Киев: Наук. думка, 1990. - С.116-119.

16. Потураев В.Н., Надутый В.П., Брченко А.В., Блюсс Б.А. Кинематика вибрационных машин с эластичными рабочими органами. - Киев: Наук. думка, 1991. - С.152.

17. Блюсс Б.А. Стационарные течения твердых включений в дисперсных потоках // Тез. докл. У Всесоюзн. научн. конф. "Механика сыпучих материалов". - Одесса: УТИП, 1991. - С.96.

18. Блюсс Б.А. Разделение твердых включений по крупности в жидкости при случайных волновых воздействиях // Тез. докл. III Всесоюзн.

научн. конф. "Гидромеханические процессы разделения гетерогенных систем". - Тамбов: ТИХМ, 1991. - С.

19. Блюсс Б.А. Транспортирование сыпучей среды статистически однородной продольной волной // Сб. Вибрационные и волновые транспортно-технологические машины. - Киев: Наук.думка, 1991. - С. II-14.

20. Потураев В.Н., Блюсс Б.А., Гоман О.Г. Нестационарное течение двухслойной жидкости и оценка эго локальной устойчивости // Докл. АН Украины. - 1992. - № 5. - С. 65-68.

21. А.с.1613165 СССР, МКИ⁴ В03В. Гидравлический классификатор / Потураев В.Н., Надутый В.П., Блюсс Б.А., Благута А.А., Соколов В.И. Дудник Б.Ф. - Оpubл. 15.12.90. Еюл. № 46.

22. А.с.1632495 СССР, МКИ⁴ В03В 5/00. Устройство для гидравлической классификации / Потураев В.Н., Надутый В.П., Блюсс Б.А., Бараненко В.Д. - Оpubл. 07.03.91. Еюл. № 9.

23. А.с.1741906 СССР, МКИ⁴ В03В. Гидравлический классификатор / Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А., Потураев С.В. - Оpubл. 23.06.92. Еюл. № 23.

24. А.с.1740065 СССР, МКИ⁴ В03В 5/26. Вибрационный струйный концентратор / Потураев В.Н., Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А. Оpubл. 15.06.92. Еюл. № 22.

25. А.с.1748875 СССР, МКИ⁴ В03В 5/40. Устройство для обогащения материалов / Потураев В.Н., Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А. Оpubл. 23.07.92 Еюл. № 27.

26. А.с.1755924 СССР, МКИ⁴ В03В 5/26. Вибрационный желоб / Потураев В.Н., Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А. Оpubл. 23.08.92 Еюл. № 31

27. А.с.1755925 СССР, МКИ⁴ В03В . Вибрационный струйный желоб / Потураев В.Н., Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А. - Оpubл. 23.08.92. Еюл. № 31.

28. А.с.1651956 СССР, МКИ⁴ В03В 5/34. Устройство для классификации пульп / Потураев В.Н., Надутый В.П., Благута А.А., Блюсс Б.А., Дудник Б.Ф., Дьяченко В.Г. - Оpubл. 30.05.91. Еюл. № 20.

29. А.с.1645016 СССР, МКИ⁴ В03В 5/04. Концентрационный стол / Надутый В.П., Блюсс Б.А., Лепехин В.В., Бутова Н.Ю. Оpubл. 30.04.91, Еюл. № 16.

30. А.с.1713648 СССР, МКИ⁴ В03В 5/40. Конусный сепаратор / Надутый В.П., Блюсс Б.А., Лепехин В.В., Бутова Н.Ю. - Оpubл. 23.02.92. Еюл. № 7.

31. А.с.1734851 СССР, МКИ⁴ В03В 5/66. Устройство для гидравлической классификации / Потураев В.Н., Надутый В.П., Блюсс Б.А., Ле-

пехин В.В., Бурова Н.Ю. - Опубл. 23.05.92. Бюл. № 19.

32. А.с. 1787544 СССР, МКИ⁴ В 03 В 5/26. Способ гидравлического разделения пернистых смесей / Потураев В.Н., Подутий В.П., Блюсс Б.А., Лепехин В.В., Бурова Н.Ю. - Опубл. 15.01.93. Бюл. № 2.

33. V. Poturayev, B. Bluess, A. Yurchenko. Simulation of stochastic oscillation of elastic elements of shaker machines during design // IAMSDC-1, Nashville, Tennessee, 1989.

34. V. Poturayev, B. Bluess, A. Yurchenko. Wave movement of non-deformed (strained) particles by stochastic longitudinal wave in a medium with dispersion // 13th IMACS World Congress, Dublin, Ireland, 1991.

fl

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ АЕРОГІДРОДИМОПІЛІТИЧНИХ СТРУМІНИХ СЕПАРАТОРІВ

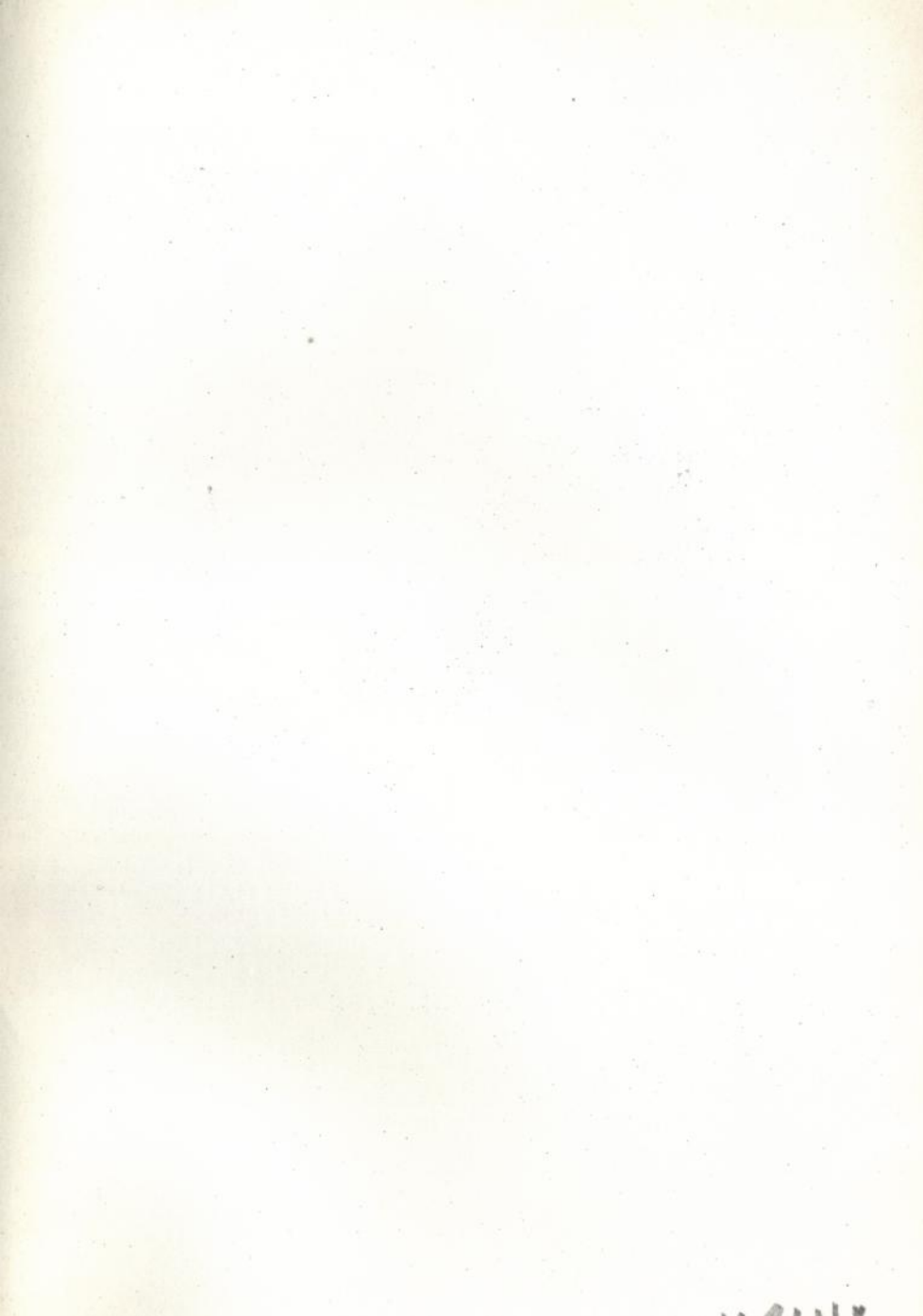
Відповідальний за видуси Шакунов І.А.

Підписано до друку 31.03.94. Формат 60x84 1/16. Папір друкарський.

Обсяг 174 друк. Умовн. друк. арк. 1,86. Умовн. друк.-відд. 1,86. Тираж 110. Замовлення "2104. Замовлено.

Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро".

ВПОП "Дніпро" 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.



AB 29.58

AB 29.581