

Автор ер.  
Г 85 — Г 85

Вячеслав М. М.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

---

Инженер ГРИЦЕНКО Ю. Г.

На правах рукописи

**Вибротранспортирование и  
вибросепарирование сыпучих  
материалов в сложных силовых  
полях**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОДЕССА  
1967

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Инженер ГРИЦЕНКО Ю. Г.

ОНАХТ 15.07.11  
Вибротранспортирован



v001511

На правах рукописи

Вибротранспортирование и  
вибросепарирование сыпучих  
материалов в сложных силовых  
ПОЛЯХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Переучет 19/81

v0.0.1511



ОДЕССА  
1967

Проф. Волкову Д.М.

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы Гриценко Ю. Г. на тему: «Вибротранспортирование и вибросепарирование сыпучих материалов в сложных силовых полях», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится „12“ мая 1967 г.

Ваши отзывы и замечания в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова № 112, Одесский технологический институт.

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

Ученый секретарь Совета

(Запорожец Л. А.)

## ВВЕДЕНИЕ

Осуществление величественных задач по созданию материально-технической базы коммунизма требует огромной работы по комплексной механизации и автоматизации производственных процессов на базе применения машин с высокими и сверхвысокими параметрами.

Значительная роль в достижении этой цели отводится сравнительно молодой, но быстроразвивающейся вибрационной технике, применение которой во многих случаях приводит к сильной интенсификации технологических процессов и к упрощению их автоматизации.

Весьма перспективным в этом отношении является применение вибрационной техники в отраслях народного хозяйства, связанных с переработкой и, в частности, с транспортированием и сепарированием сыпучих материалов (смесей).

По вопросам движения сыпучих материалов на колеблющихся поверхностях имеется довольно большое количество работ советских и иностранных авторов таких как Линднер (1912 г.), Левенсон (1924 г.), Ганфштенгель (1924 г.), Спиваковский (1933 г.), Лойцянский (1934 г.), Берг (1935 г.), Малкин (1937 г.), Бауман (1939 г.), Терсков (1941 г.), Олевский (1941 г.), Абрамович, Рундквист, Плисс (1948 г.), Белецкий (1949 г.), Блехман (1952 г.), Смирнов (1958 г.), Бьотчер (1958 г.), Жучков (1960 г.), Дьячков (1960 г.) и др.

Однако все эти авторы в своих исследованиях исходили из предположения, что рассматриваемое ими движение сыпучего материала происходит в одном лишь поле силы тяжести. Рассматривался ли процесс транспортирования или сепарирования, но направление силы  $\vec{F}$ , действующей все время на каждую частицу со стороны силового поля, всегда считалось вертикальным ( $\vec{F} = \vec{G}$ ) где  $\vec{G}$  — сила тяжести). Исходя из этой предпосылки, ими были разработаны определенные рекомендации, которые и легли в основу проектирования современных транспортирующих и сепарирующих машин.

Цель настоящей работы — показать, что технологические возможности таких машин могут быть значительно расширены, если процесс транспортирования и сепарирования будет

происходить не в одном поле силы тяжести, а в так называемом «сложном» силовом поле, обеспечивающем силе  $\bar{F}$ , вообще говоря, не вертикальное направление ( $\bar{F} \neq \bar{G}$ ).

На основании использования сложных силовых полей в работе приводятся описания четырех способов транспортирования и сепарирования, а также результаты подробного исследования одного из них — аэровибрационного способа.

Гравитационное движение частиц здесь рассматривается как частный случай движения в сложном силовом поле — случай  $\bar{F} = \bar{G}$ .

Исследования носят теоретико-экспериментальный характер.

Диссертация состоит из трех глав текста на 161 страницах с 43 рисунками, списка литературы и приложений.

## I

**Первая глава** посвящена теоретическому обоснованию возможности осуществления нескольких способов вибротранспортирования и вибросепарирования сыпучих материалов в сложных силовых полях. В главе вводятся понятия сложного силового поля, отмечаются особенности движения в нем и указываются пути использования этих особенностей в практических целях (теоремы I и II).

Под выражением «сложное силовое поле» подразумевается сочетание в некотором пространстве поля силы тяжести с воздушной средой, либо поля силы тяжести с воздушной средой и магнитным полем, либо, наконец, поля силы тяжести с воздушной средой и электростатическим полем. Первый тип сложного силового поля существует объективно, поскольку земное притяжение и воздух в реальных условиях вездесущи, а последние два типа создаются искусственно: путем помещения под рабочей поверхностью полюса магнита и, соответственно, путем сообщения частицам и рабочей поверхности электрического заряда противоположного знака.

В сложном силовом поле на каждую совершающую отрывное движение частицу все время или, по крайней мере, во время полета действует не одна вертикальная сила тяжести  $\bar{G}$ , как это было принято в работах предшествующих авторов, а система нескольких сил с равнодействующей  $\bar{F}$  (рис. 1), направление и величина которой определяется количеством компонентных полей, их интенсивностью и направлением силовых линий, а также величиной и направлением силового воздействия воздушной среды.

Наводимые искусственно поля (магнитное, электростатическое) в принципе могут иметь различное направление си-

ловых линий, но по ряду соображений наиболее удобным направлением является нормальное к рабочей поверхности  $\Omega$  и именно такое направление обеспечивают указанные способы наведения этих полей. Что касается силового воздействия воздушной среды, то оно, как показывают опыты, всегда направлено нормально к рабочей поверхности.

Таким образом, в рассматриваемых типах сложных силовых полей на каждую частицу действуют две постоянные по направлению силы: вертикальная сила тяжести  $\bar{G}$  и нормальная к рабочей поверхности сила  $\bar{P}$ , равная геометрической

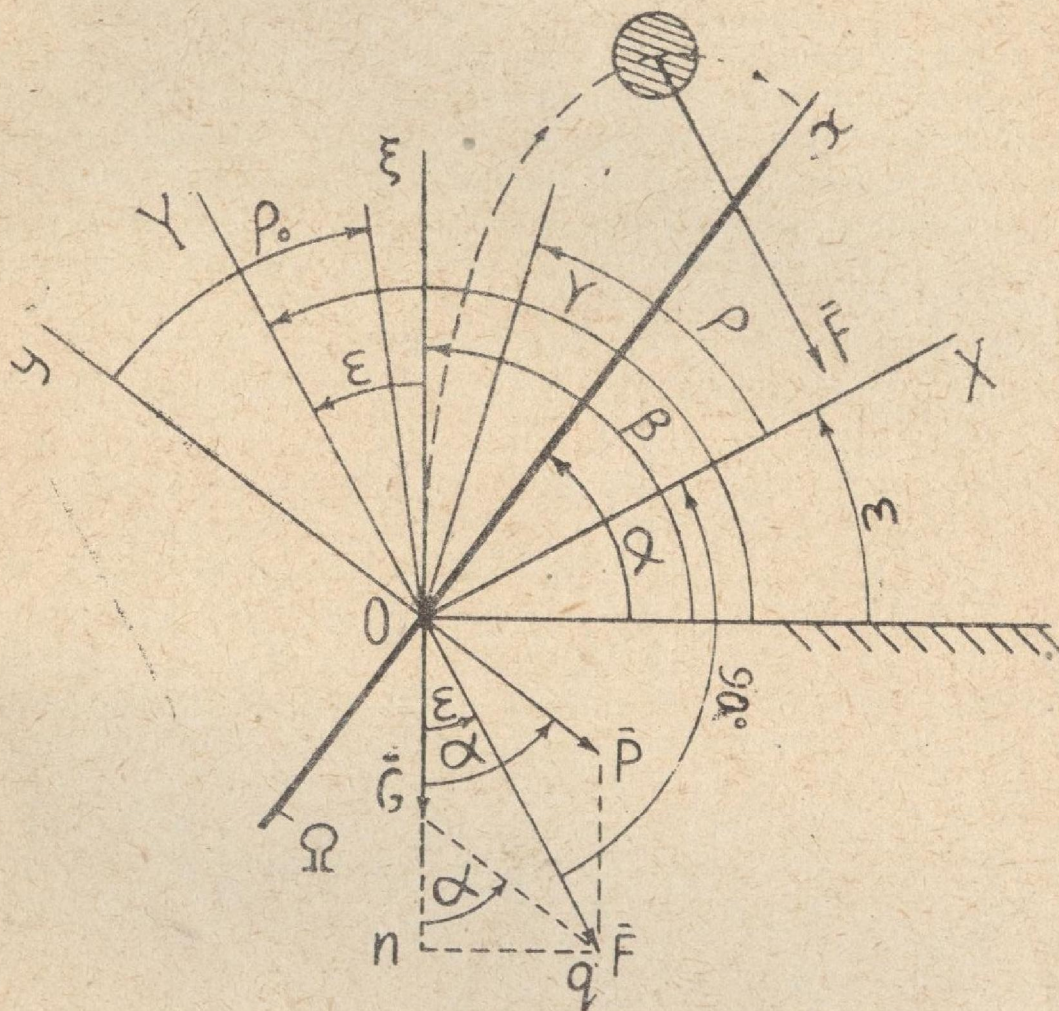


Рис. 1. Движение частицы вверх в сложном силовом поле ( $\beta=90^\circ$ ).

сумме всех сил от действия искусственно наведенных полей и воздушной среды. При этом отношение  $K=P:G$  определяет как величину равнодействующей:

$$F = \sqrt{G^2 + P^2 + 2GP \cos \alpha} = G \sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \alpha},$$

так и ее направление, характеризуемое углом отклонения от вертикали  $\epsilon$ , который может быть найден из треугольника  $onq$  (см. рис. 1):

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{P \sin \alpha}{G + P \cos \alpha} = \operatorname{arctg} \frac{K \sin \alpha}{1 + \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол между силой тяжести  $\bar{G}$  и нормальной силой  $\bar{P}$  (численно он равен углу наклона рабочей поверхности  $\Omega$  к горизонту).

Как видим, путем изменения величины безразмерного коэффициента  $K$  в пределах  $0 < K < \infty$  можно изменять направление силы  $\bar{F}$  в интервале:

$$0 < \varepsilon < \alpha \quad (1,1)$$

В этом заключается **первая** особенность движения в сложном силовом поле.

В промышленных условиях часто приходится иметь дело с бинарными сыпучими смесями, составные компоненты которых неодинаково реагируют на действие либо воздушной среды (порошок и крупнозернистый материал), либо магнитного поля (магнитные и немагнитные частицы), либо электростатического поля (частицы диэлектрика и недиэлектрика). Поместив такую смесь в сложное силовое поле соответствующего типа, можно достигнуть такого положения, при котором

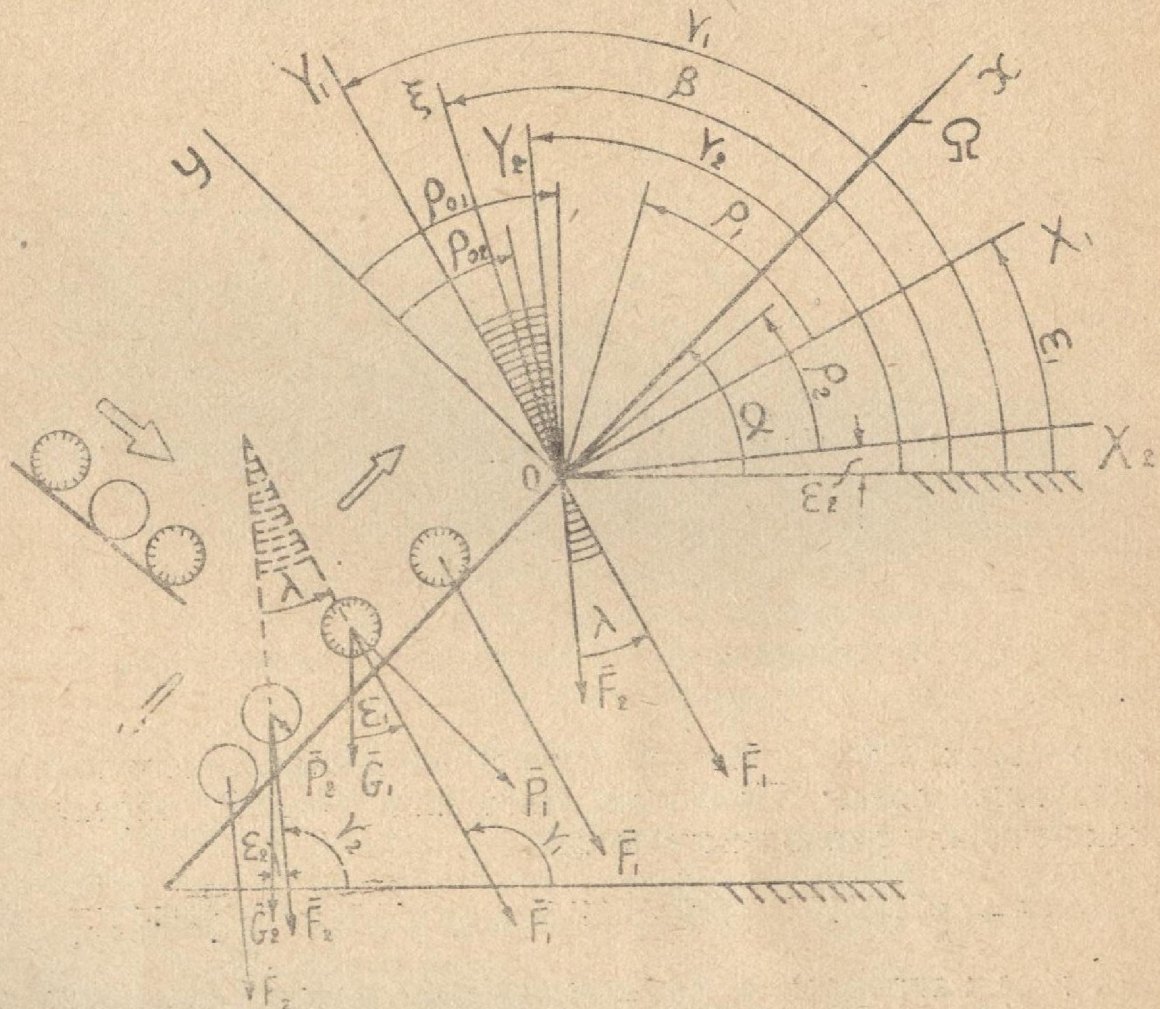


Рис. 2. Противоположно направленное движение разнородных частиц в сложном силовом поле ( $\gamma_1 > \beta > \gamma_2$ ).

в силу неравенства  $K_1 > K_2$  будет иметь место неравенство равнодействующих  $\overline{F}_1$  и  $\overline{F}_2$  (рис. 2) и, следовательно, углов.

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 \quad (1,2)$$

В этом заключается **вторая** особенность движения частиц в сложном силовом поле (здесь и везде в дальнейшем индексами 1 и 2 обозначена принадлежность данной величины к частице первой компоненты и второй соответственно)<sup>1</sup>.

Обе эти особенности можно использовать в целях транспортирования и сепарирования и вся диссертация в сущности посвящена показу, как это делается. Пути практического использования особенностей (1,1) и 1,2) вытекают из рассмотрения двух теорем, доказательства которых приводятся.

**Теорема 1.** Если на каждую частицу рассматриваемого сыпучего материала неvertикальная сила  $\overline{F}$  действует так (см. рис. 1), что выполняется соотношение (1,1), то такой сыпучий материал можно заставить двигаться вверх по наклонной поверхности  $\Omega$ , совершающей вертикальные вибрации

$$\beta = 90^\circ; \quad (1,3)$$

для этого нужно выполнить следующие дополнительные условия:

а) рассматриваемый сыпучий материал должен быть достаточно мелким порошком, чтобы диаметр  $d$  каждой его частицы удовлетворял соотношению

$$d < d_*; \quad (1,4)$$

б) интенсивность гармонических вибраций, характеризуемая отношением  $j_y = (\omega^2 a)_y$ , должна удовлетворять условию:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi^2 \cdot p^2 + 4}} \leq \frac{j_y}{(\omega^2 a)_y} \leq \frac{1}{\sqrt{\pi^2 \cdot p^2 + 1}}, \quad (1,5)$$

в) должно, наконец, выполняться неравенство

$$\alpha < \rho + \varepsilon \quad (1,6)$$

где  $\beta$  — угол наклона к горизонту оси вибраций  $\xi$ , вдоль которой колеблется рабочая поверхность  $\Omega$ ;

$d_*$  — некоторое предельное значение диаметра частицы, которому соответствует пренебрежимо малая упру-

<sup>1</sup> Особенность движения в сложном силовом поле состоит еще в том, что безразмерный коэффициент  $K$ , модуль силы  $F$  и угол  $\varepsilon$  зависят от времени, скорости и положения частицы. Мы будем полагать, что величины  $F$ ,  $K$ ,  $\varepsilon$  имеют фиксированное значение и будем рассматривать эти значения как некоторые усреднения их переменных величин. Такая идеализация не мешает однако увидеть основные преимущества вибротранспортирования и вибросепарирования в сложных силовых полях.

гость (определяется экспериментально,  $d_* = 50 \div \div 120$  мк);

$j_y$  — проекция на нормаль  $ou$  ускорения  $j = F:m$  свободного падения в сложном силовом поле;

$\omega$  — круговая частота;

$\alpha$  — амплитуда вибраций;

$(\omega^2 a)_y$  — проекция на ось  $ou$  амплитудного значения ускорения рабочей поверхности;

$p$  — целое положительное число ( $p = 1, 2, \dots$ );

$\rho$  — угол, отсчитываемый от перпендикуляра  $oX$  к силе  $\bar{F}$  и численно равный динамическому углу трения  $\rho_0 = \text{const}$ .

(Вертикальное направление вибраций позволяет принимать новые и удобные конструктивные решения при создании конвейеров-порошкоподъемников. В частности представляется возможным осуществить конвейеры-порошкоподъемники с рабочими органами в виде вибрирующих вертикально систем наклонных плоскостей, учесенных конусов или винтовых поверхностей).

**Теорема II.** Если на каждую частицу первой и второй компоненты бинарной сыпучей смеси силы  $\bar{F}_1$  и  $\bar{F}_2$  действуют так (см. рис. 2), что выполняется условие (1,2) и к тому же:

а) обе компоненты (или по крайней мере, одна из них — первая) представляет собой достаточно мелкий порошок:

$$d_1 < d_* \quad (1.7)$$

б) для первой компоненты справедливо соотношение

$$\frac{1}{\sqrt{\pi^2 \cdot p^2 + 4}} \leq \frac{j_{1y}}{(\omega^2 a)_y} \leq \frac{1}{\sqrt{\pi^2 \cdot p^2 + 1}}; \quad (1.8)$$

в) ось вибраций  $\xi$  лежит внутри заштрихованного угла  $\lambda = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$  или, иначе говоря, имеет место соотношение

$$\gamma_1 > \beta > \gamma_2; \quad (1.9)$$

г) выполняется условие

$$\alpha < \rho_1 + \varepsilon_1 \quad (1.10)$$

или лучше условие

$$\rho_2 + \varepsilon_2 < \alpha < \rho_1 + \varepsilon_1, \quad (1.11)$$

где  $d_1$  — диаметр частицы первой компоненты;

$j_{1y}$  — проекция на нормаль  $ou$  ускорения  $j_1 = F_1:m_1$  свободного падения частицы первой компоненты в сложном силовом поле;

$\gamma_1, \gamma_2$  — углы, характеризующие наклон силы  $\bar{F}_1$  и, соответственно,  $F_2$  к горизонту

$\rho_1, \rho_2$  — углы, отсчитываемые соответственно от перпендикуляров  $OX_1$  и  $OX_2$  к силам  $F_1$  и  $F_2$  и численно равные динамическим углам трения  $\rho_{01} = \text{const}$ ,  $\rho_{02} = \text{const}$ ,

то первая компонента будет перемещаться по вибрирующей наклонной поверхности  $\Omega$  вверх, а вторая — вниз, и таким образом исходная бинарная смесь будет сепарироваться.

Доказательство теорем сводится к тому, что выполнением условий (1.1), (1.3) — (1.6) и (1.2), (1.7) — (1.11) обеспечивается устойчивое отрывное движение с мгновенными контактами, при котором в начале каждого перелета возникает направленность сил  $\bar{F}$  и начальных скоростей  $v_0$ , обеспечивающая частицам в первом случае движение вверх (рис. 3а), а во втором —

в противоположные стороны (рис. 4а, б).

Доказательство теорем сопровождается двумя замечаниями, первое из которых относится к вопросу о возможности

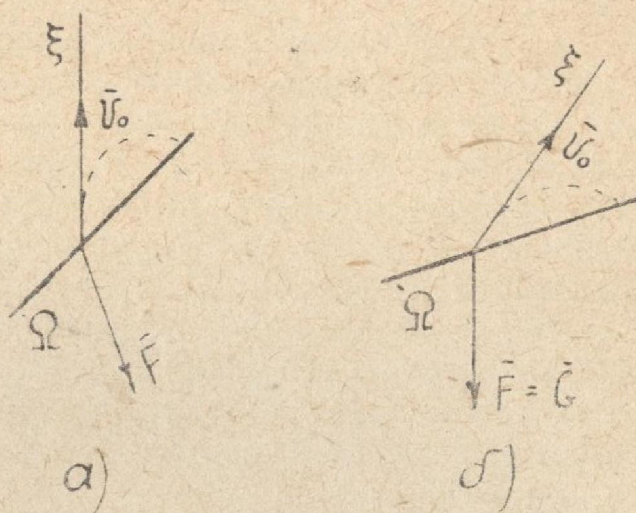


Рис. 3. Необходимая направленность сил и начальных скоростей при транспортировании в сложных силовых полях (а) и в поле силы тяжести (б).

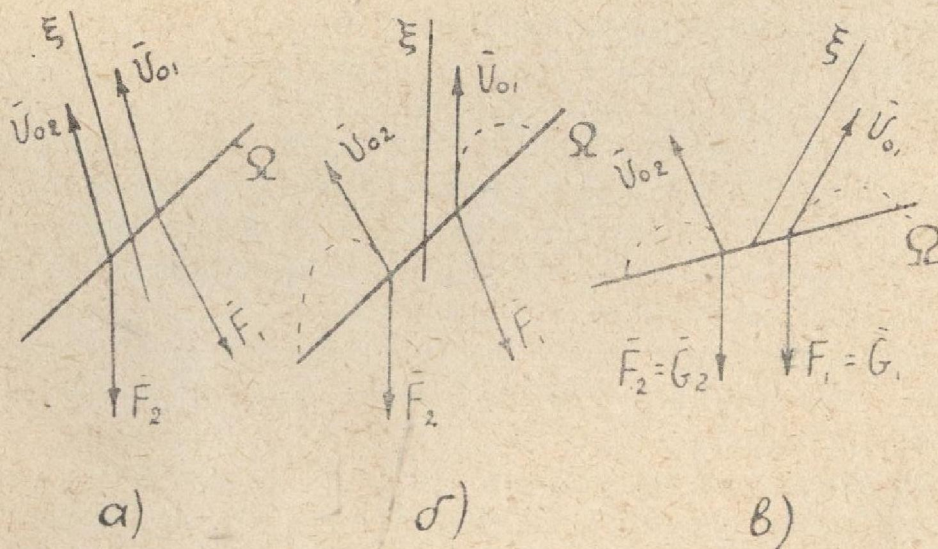


Рис. 4. Необходимая направленность сил и начальных скоростей при сепарировании в сложных силовых полях (а, б) и в поле силы тяжести (в).

распространения математического аппарата гравитационной теории на случай движения в сложном силовом поле (для этого нужно лишь скорректировать соответствующим обра-

зом на величину  $\varepsilon$  углы, входящие в формулы гравитационной теории), а второе — к вопросу о возможности распространения теорем на жидкости (эмульсии), являющиеся гидравлическими аналогами сыпучих материалов (смесей).

## II

Во второй главе приводится краткая характеристика способов транспортирования и сепарирования в сложных силовых полях, а также дается метод их осуществления.

Различие способов определяется типом сложного силового поля, обеспечивающего выполнение условий (1.1) и (1.2). Остальные условия, требуемые теоремами I и II, во всех случаях выполняются без особого труда одним и тем же путем — путем использования достаточного мелкого исходного материала, достаточно интенсивными вибрациями; приданием соответствующего наклона рабочей поверхности  $\Omega$  и, наконец, что самое главное, установкой соответствующего направления оси вибраций  $\xi$ .

**Аэровибрационный** или «звуковой» способ<sup>1</sup> — один из наиболее перспективных способов — основан на использовании в качестве сложного силового поля сочетания гравитационного поля с воздушной средой. Транспортирующим и сепарирующим фактором (агентом) здесь является воздух или, вообще говоря, газовая среда. Способ этот может применяться для транспортирования (подъема) и выделения порошка. Изучению этого способа посвящена вся III-я глава диссертации.

Для **магнитовибрационного** способа сложным силовым полем служит сочетание гравитационного поля с магнитным полем и с неизбежно присоединяющейся к ним воздушной средой. Способ может применяться для разделения магнитных и немагнитных (или слабомагнитных) материалов, например, железной руды от вкрапленной в нее породы. Для этого их нужно сначала измельчить в порошок, а затем подвергнуть сепарированию.

**Электровибрационный** способ аналогичен предыдущему способу. Только здесь роль магнитного поля играет электростатическое поле.

**Ультразвуковой** способ по сходству стоит ближе к аэровибрационному способу. Отличается он от последнего тем, что объектом сепарирования или транспортирования здесь является жидкость или механическая смесь двух разнородных жидкостей (эмульсия). Для обеспечения отрывного движения жидкости, рабочая поверхность должна совершать ультразвуковые колебания. Кроме сил, которые действуют на

<sup>1</sup> Авторское свидетельство № 114116

частицу при аэровибрационном способе, на элементарный объем жидкости в этом случае действуют еще и силы молекулярного сцепления. Условие (1.2) выполняется за счет различия вязкости, смачивающей способности и других физических свойств жидких компонент.

### III

**Третья глава**, как уже отмечалось, посвящена аэровибрационному способу — его возникновению, развитию и современному состоянию знаний о нем.

Лежащее в основе способа физическое явление («аэровибрационный эффект сепарирования») было обнаружено при попытке разобраться в причинах неодинакового поведения манной крупы и муки на диффузоре электродинамического громкоговорителя (крупы на наклонной вибрирующей поверхности диффузора движется вниз, а мука вверх).

Движение крупнозернистых и мелкозернистых фракций в противоположные стороны само по себе не было чем-то новым и ранее невиданным. За несколько лет до обнаружения аэровибрационного эффекта теоретически (Г. Д. Терсков, И. И. Блехман) и экспериментально (Д. А. Плисс) была доказана возможность такого движения при обязательном условии, что параметры  $\alpha$  и  $\beta$  удовлетворяют неравенствам:

$$\alpha < \rho; \quad \beta < 90^\circ, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  — угол трения скольжения в движении.

На диффузоре громкоговорителя условия (3.1) не выполнялись, но мука тем не менее почему-то двигалась вверх и при условиях (3.1) и при условиях

$$\rho \leq \alpha < \rho + \varepsilon; \quad 90^\circ \leq \beta < 90^\circ + \varepsilon, \quad (3.7)$$

т. е. когда рабочая поверхность  $\Omega$  и ось вибраций  $\xi$  лежат в пределах заштрихованных углов (рис. 5) и когда абсолютно все частицы должны двигаться вниз.

В объяснение неувязки теории с действительностью была выдвинута гипотеза, сущность которой сводилась к тому, что в движении крупнозернистых фракций преобладают гравитационные силы, а в движении порошкообразных фракций (типа муки) — аэродинамические и что, поэтому, движение достаточно мелкого порошка невозможно объяснить без учета влияния воздушной среды.

Гипотеза была экспериментально проверена и подтверждена путем сравнения движения в воздушной среде и в вакууме. Опыты показали, что в вакууме при условиях (3.7), абсолютно все частицы перемещаются вниз. Движение же вверх имело место лишь при наличии условий (3.1), как того и требовала теория.

Следует отметить, что сам факт влияния воздушной среды на движение частиц во многих работах признавался и ранее, но дальше признания дело не шло. Отмечалось обычно (до 1956 г.), что влияние воздушной среды пренебрежимо мало, а вопросы о том, на чем сказывается это влияние и можно ли

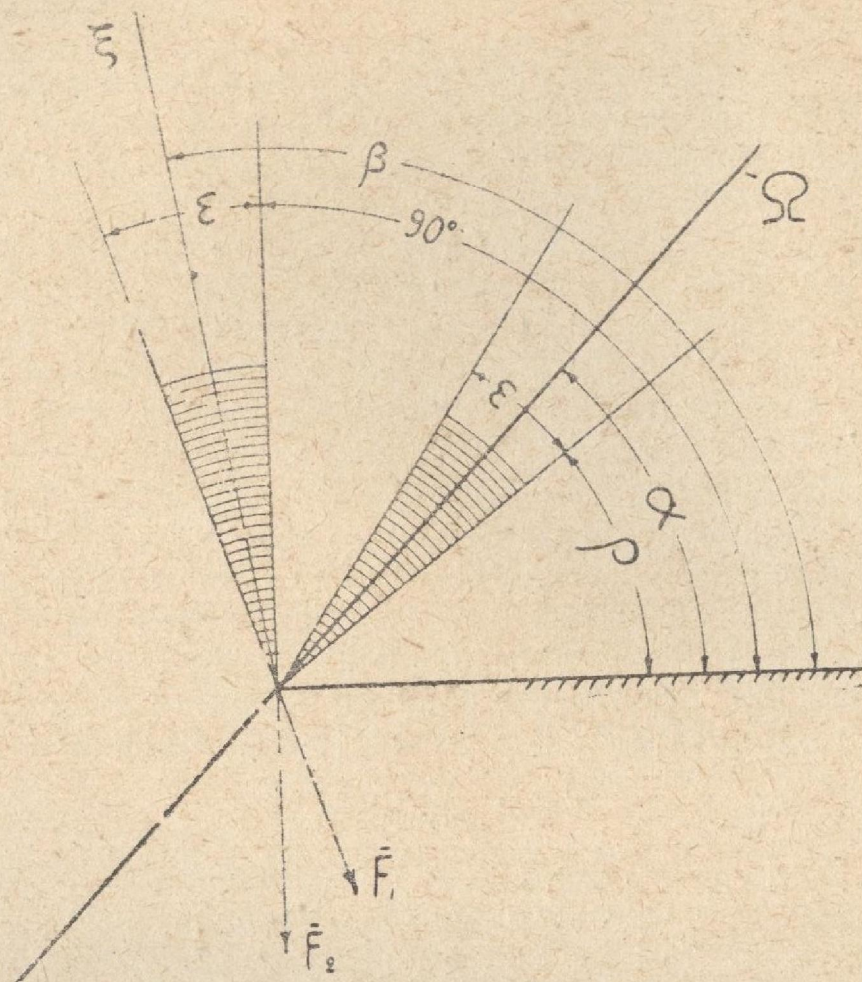


Рис. 5. Области значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых частицы способны двигаться вверх, за счет влияния воздушной среды расширяются на величину заштрихованных углов.

извлечь пользу из него оставались без ответа. Следствием такого поверхностного отношения к воздуху явилось всеобщее принятие допущения, что полет любой частицы при отрывном движении сопровождается действием на нее вертикальной силы  $\bar{F} = \bar{G}$ . Последнее неизбежно приводит к выводу, что частицы могут двигаться вверх только при условиях (3.1).

На самом же деле сила  $\bar{F}$  из-за влияния воздушной среды никогда не бывает вертикальной ( $\bar{F} \neq \bar{G}$ ). Она всегда отклонена от вертикали на угол  $\epsilon \neq 0$ , величина которого зависит от размеров частиц. Для крупных частиц типа манной крупы угол  $\epsilon$  пренебрежимо мал ( $\epsilon_2 \approx 0$ ), а для достаточно мелких частиц типа муки величина  $\epsilon = \epsilon_1$  может достигать  $30^\circ$ . Объясняется это тем, что модуль силы нормального воздействия

воздушной среды  $P$  пропорционален квадрату диаметра частицы ( $d^2$ ), а модуль вертикальной силы тяжести  $G$  — кубу ( $d^3$ ). С изменением диаметра частицы  $d$  величина  $K = P:G$  и, следовательно, угол  $\varepsilon$  настолько резко меняется, что для частиц крупы  $\varepsilon_2 \approx 0$ , а для частиц муки  $\varepsilon_1 = 5 \div 30^\circ$ .

Короче говоря, в случае движения на диффузоре громкоговорителя, как и на вибрирующей наклонной поверхности вообще, влияние воздушной среды на крупные и мелкие частицы приводит к автоматическому выполнению условий (1.1), (1.2) и воспроизведению движения по теоремам I и II.

О том, что действующая на каждую частицу порошка сила  $\bar{F} = \bar{F}_1$ , отклонена от вертикали на угол  $\varepsilon_1 \neq 0$ , свидетельствует расположение обнаруженных путем эксперимента областей изменения углов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых порошок движется вверх (на рис. 5 они показаны заштрихованными). По отношению к граничным положениям рабочей поверхности  $\Omega$  ( $\alpha = \rho$ ) и оси вибраций  $\xi$  ( $\beta = 90^\circ$ ) обе они расположены в направлении против движения часовой стрелки, что может быть лишь в случае поворота в том же направлении силы  $\bar{F}_1$ .

Таким образом мы видим, что движение частиц вверх возможно и при условиях (3.1) и при условиях (3.7), но в основе этого движения лежат разные явления. В первом случае приращение движения частиц происходит за счет механических бросков и воздух здесь лишь искажает (укорачивает) траекторию полета, а во втором случае искажение «вакуумной» траектории полета воздухом является единственным источником приращения движения. В первом случае движение вверх может происходить и в воздушной среде и в вакууме, а во втором случае только при наличии воздушной (газовой) среды. В первом случае движущиеся вверх частицы могут быть довольно крупными (до нескольких миллиметров и даже сантиметров в диаметре), а во втором случае не более 150 микрон (для продуктов размола пшеницы). Наконец, противоположно направленное движение частиц в процессе сепарирования при условиях (3.1) происходит за счет различия коэффициентов трения и восстановления, а при условиях (3.7) — за счет различия линейных размеров частиц и неодинаковости, вследствие этого, взаимодействия с воздушной средой.

Соображения о причинах несправедливости соотношений (3.1) и о необходимости особого подхода к изучению движения порошка автором опубликованы и уже получили признание в литературе (см. например, книгу И. И. Блехмана и Г. Ю. Джанелидзе. Вибрационное перемещение. М. 1964. стр. 88, 89, 218, 342, 343).

В работе приводятся описание опытной установки и полученные на ней результаты экспериментального исследования

процессов транспортирования и сепарирования продуктов размола пшеницы аэровибрационным способом (3.7) и «инерционным» способом (3.1) (для возможности сопоставления).

Опытная установка представляла собой участок виброжелоба, конструкция которого позволяла плавно изменять в широких пределах основные параметры, определяющие движение материала: углы  $\alpha$  и  $\beta$ , амплитуду вибраций  $a$  и подачу  $Q$  материала в единицу времени. Частота вибраций не менялась и была все время равной 3000 колеб./мин (50 гц).

В качестве подопытного материала при исследовании процесса транспортирования использовалась пшеничная мука с диаметром частиц  $d < 120$  мк, а при исследовании процесса сепарирования — искусственно приготовленная двухкомпонентная смесь муки ( $d < 137$  мк) и более крупных частиц.

В результате исследования процесса транспортирования в зависимости от углов  $\alpha$  и  $\beta$  было в частности установлено, что по мере увеличения  $\alpha$  производительность  $Q$  увеличивается и при  $\alpha = 40^\circ$  принимает максимальное значение  $Q = Q_{max} = 85$  г/см·мин (если амплитуда равна 1,5 мм), а при дальнейшем увеличении  $\alpha$  — уменьшается и при  $\alpha \approx 65^\circ$  становится равной нулю (см. табл. 1).

Таблица 1

Зависимость производительности  $Q$  [г/см·мин] от угла  $\alpha$  ( $f = 50$  гц,  $\beta = 90^\circ$ ,  $d < 120$  мк)

Вариации амплитуды мм	Значение $\alpha$ , град.											
	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$a = 0,5$	0	0,4	2,0	2,8	3,6	6,0	3,0	0,6	0	0	0	0
$a = 1,0$	0	2,6	21,0	25,6	31,8	38,6	37,0	25,0	7,0	0	0	0
$a = 1,5$	0	11,0	41,0	50,0	70,0	80,0	85,0	79,0	53,0	26,0	2,0	0

Если же увеличивать угол  $\beta$  (при неизменных значениях  $\alpha = 40^\circ$ ,  $a = 1,5$  мм,  $d < 120$  мк,  $f = 50$  гц), то сначала производительность увеличивается; при  $\beta = 80^\circ$  она принимает максимальное значение  $Q = Q_{max} = 190$  г/см·мин, затем уменьшается до  $Q = 80$  г/см·мин. при  $\beta = 90^\circ$  (вертикальные вибрации) и, наконец, становится равной нулю при  $\beta = 115^\circ$  (см. табл. 2)

Таблица 2

Зависимость производительности  $Q$  [г/см·мин.] от угла  $\beta$  ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $d < 120$  мк,  $f = 50$  гц)

Вариации амплитуды мм	Значения $\beta$ , град												
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
$a = 1,0$	3,4	5,2	20,0	37,0	49,0	52,0	57,0	39,0	11,0	6,4	3	1,2	0
$a = 1,5$	26,0	60,6	84,6	121,0	145,0	190,0	140,0	86,0	46,0	31,0	14,0	7,0	0

Исследование процесса сепарирования искусственной двухкомпонентной смеси сводилось, в частности, к определению зависимости величин

$$E = \left( \frac{G_1}{P} - \frac{G_2}{S} \right) \cdot \frac{G_1}{G_n} \cdot \frac{S - G_2}{G_k}; \quad n_1 = \frac{G_1}{P}; \quad n_2 = \frac{G_2}{S},$$

от углов  $\alpha$  и  $\beta$ , а также от параметров  $a$ ,  $n$ ,  $\Delta$ ,  $Q$ , где  $E$  — критерий технологической эффективности сепарирования по Левятину;  $G_n$ ,  $G^k$ ,  $G$  — соответственно вес муки, крупок и исходной смеси;  $P$ ,  $S$ ,  $G_1$ ,  $G_2$  — соответственно вес прохода, вес схода, вес муки с  $d < 137$  мк в проходе и вес муки с  $d < 137$  мк в сходе («проход» — фракция, которая движется вверх, а «сход» — вниз);  $n$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  — степень концентрации муки с  $d < 137$  мк в исходной смеси, проходе и сходе соответственно ( $n = G_n : G$ );  $\Delta$  — разность между максимальным размером частиц муки ( $d_{max} = 137$  мк) и средним диаметром подмешиваемых крупок. (Необходимо также иметь в виду, что  $P + S = G$ ;  $G_n + G_k = G$ ;  $G_1 + G_2 = G_n$ ).

Опыты показали, что по мере увеличения угла  $\alpha$  при прочих неизменных параметрах, критерий  $E$  падает за счет увеличения поступления муки в сход. Концентрация же муки в проходе  $n_1$  сначала падает и при  $\alpha = 25 \div 35^\circ$  принимает минимальное значение, а затем опять увеличивается; показатель же  $n_2$  все время увеличивается (см. табл. 3).

Таблица 3

Зависимости величин  $E, n_1, n_2$  от угла  $\alpha$  ( $Q = 30$  г/см.мин,  $f = 50$  гц,  $a = 1,5$  мм,  $\beta = 90^\circ$ ,  $n = 0,5$ ,  $\Delta = 520$  мк)

Исследуемые показатели	Значения $\alpha$ , град								
	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$E$	0,927	0,869	0,824	0,823	0,785	0,715	0,660	0,600	0,263
$n_1$	0,972	0,960	0,945	0,951	0,940	0,960	0,990	0,993	0,998
$n_2$	0,018	0,018	0,025	0,035	0,047	0,063	0,102	0,180	0,320

Наиболее показательными являются результаты исследования зависимости  $E, n_1, n_2$  от угла  $\beta$  при вариации угла  $\alpha$ . Как видно из приведенной таблицы 4 возрастающему ряду значений  $\beta$  соответствует возрастающий ряд значений показателя  $n_1$ , характеризующего качество прохода (а качество прохода представляет наибольший интерес). Наибольшие значения  $n_1$  получаются при  $\beta \geq 90^\circ$  (аэровибрационный способ сепарирования) или вблизи значения  $\beta = 90^\circ$ , а не при значениях  $\beta < 45^\circ$ , имеющих место в инерционном сепараторе конструкции Д. А. Плисс. Обращает на себя внимание высокое качество схода  $n_2$  (да и прохода  $n_1$ ) при  $\alpha = 15^\circ$  и  $\beta = 90^\circ$ .

Помимо перечисленных опытов были проделаны также серии опытов по снятию характеристик двух действующих моделей аэровибрационных сепараторов с конусообразным рабочим органом. Конструкция обоих сепараторов представляет собой соединение увеличенного электродинамического громкоговорителя (динамика) с питательным устройством для равномерной подачи исходной смеси на рабочий орган-диффузор. Отличаются сепараторы размерами и конструкцией питателя: у первого питатель самотечного типа, а у второго — с побуждением (см. табл. 5).

Таблица 4

Зависимости величин  $E$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  от угла  $\beta$   
 ( $Q=30$  г/см.мин,  $f=50$  гц,  $a=1,5$  мм,  $n=0,5$ ,  $\Delta=520$  мк)

Вариации угла $\alpha$ , град	Исслед. показат.	Значения $\beta$ , град											
		45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
15	$E$	—	0,087	0,179	0,212	0,448	0,533	0,652	0,766	0,867	0,917	—	—
	$n_1$	—	0,510	0,600	0,630	0,720	0,764	0,840	0,900	0,950	0,981	—	—
	$n_2$	—	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,007	0,01	0,017	0,014	—	—
30	$E$	0,130	0,256	0,408	0,526	0,632	0,687	—	0,721	0,745	0,773	0,715	0,518
	$n_1$	0,550	0,610	0,710	0,768	0,830	0,865	0,792	0,880	0,900	0,930	0,980	0,990
	$n_2$	0,004	0,007	0,011	0,018	0,020	0,020	0,021	0,023	0,027	0,062	0,120	0,220
45	$E$	—	—	—	—	0,383	0,558	0,783	0,811	0,756	0,715	0,436	0,332
	$n_1$	—	—	—	—	0,950	0,950	0,960	0,980	0,980	0,990	0,995	0,998
	$n_2$	—	—	—	—	0,418	0,190	0,072	0,072	0,100	0,130	0,265	0,300

Таблица 5

Основные технические данные сепараторов

Характеристики	Сепаратор типа I (питание самотечное)	Сепаратор типа II (питание с побуждением)
Диаметр большого основания диффузора	330 мм	585 мм
Угол наклона образующей диффузора	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=39^\circ$
Габариты без станины	450x450x800	700x700x800
Вес	12 кг	20 кг
Производительность	1 кг/мин	2 кг/мин
Мощность привода	100—150 вт	250 вт
Направление вибраций	вертикальное	вертикальное

Приведенные выше результаты исследования технологической эффективности сепарирования относятся к искусственным смесям. На сепараторе типа II сепарированию подвергалась естественная смесь, полученная путем размола пшеницы на вальцевом станке (продукт 1-й размольной системы влажностью 14,2%). Качественная характеристика процесса сепарирования (гранулометрический состав) определялась путем просеивания стограммовой навески исходной смеси, схода и прохода на ситах с отверстиями убывающего размера, а количественная (отношение  $i = P:S$ ) путем взвешивания прохода и схода, полученного за 1 мин. Исследуя зависимость характеристик процесса сепарирования от частоты было установлено, что с увеличением частоты количество прохода увеличивается (значениям  $f_1=40$  гц,  $f_2=50$  гц,  $f_3=60$  гц,  $f_4=70$  гц соответствуют значения  $i_1=0,23$ ;  $i_2=0,42$ ,  $i_3=0,95$   $i_4=1,10$ ), а качество его ухудшается, что видно из ситового анализа (см. табл. 6).

Таблица 6

Результаты ситового анализа  
( $a=1$  мм,  $\alpha=39^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ ,  $Q=2$  кг/мин)

Нумерация мельничных сит	Размеры от- верстий сит. мм	Результаты просеивания навески весом 100 г (остатки на ситах №№ 110—58 и проход сита № 58)									
		исход- ная смесь	$f_1=40$ гц		$f_2=50$ гц		$f_3=60$ гц		$f_4=70$ гц		
			про- ход	сход	про- ход	сход	про- ход	сход	про- ход	сход	
110 (30)	667x746	0	0	0,02	0	0,02	0	0	0	0	0
130 (34)	552x621	0,10	0	0,05	0	0,55	0	0,02	0	0,02	
150 (40)	448x517	0,15	0	0,10	0	0,10	0	0,10	0	0,15	
170 (46)	391x458	2,48		2,85	0,02	3,15	0,10	3,50	0,12	2,35	
190 (50)	346x404	4,00	0	4,20	0,03	4,85	0,15	4,62	0,30	4,95	
23 (III)	279x336	4,45	0	4,45	0,15	5,15	0,25	6,29	0,85	6,75	
25 (IV)	244x301	5,48	0,04	5,35	0,22	7,45	0,48	8,85	0,65	9,85	
27 (V)	214x271	7,10	0,07	6,85	0,60	8,20	1,20	10,70	1,20	10,70	
29 (VI)	207x255	5,02	0,10	5,80	0,75	6,60	1,20	8,50	0,75	10,62	
32 (VII)	175x235	9,77	0,63	11,75	2,80	13,10	4,60	14,50	6,45	17,68	
35 (VIII)	173x197	14,40	3,15	16,20	6,80	19,80	11,22	18,57	11,85	19,82	
38 (IX)	159x185	5,65	2,10	7,45	5,35	6,15	8,00	6,10	7,13	5,75	
43 (X)	137x163	12,00	9,53	13,55	16,80	11,05	19,08	7,60	20,00	5,45	
46 (XI)	127x148	4,20	3,62	3,05	4,65	2,70	5,25	1,40	4,88	1,00	
49 (XII)	118x135	6,05	6,60	3,40	9,10	2,55	7,55	2,20	8,20	0,55	
58 (XV)	99x116	4,95	9,92	4,10	9,60	2,60	9,57	1,65	9,25	0,20	
		12,07	62,83	5,70	38,70	2,15	27,20	1,30	25,20	0,10	
Итого:	—	97,87	98,59	94,87	95,57	95,67	95,85	95,90	96,83	95,94	

№ 0. В. 1511

Продукт	Условия опыта			Показатели классификации			Граничный размер классификац. мм
	частота, гц	напряжение, в	угол, град	к %	к.п.д.	производит. кг/час	
Цинковые огарки	50	1,7	20	93,5	0,60	410	0,15
Бентонитовая глина	50	1,7	20	79,2	0,75	226	0,06
Перлит	50	1,7	20	96,0	0,84	1000	0,40
Оловянно-цинковая руда	50	1,7	20	87,2	0,86	350	0,40

Примечание. Производительность относится к одноконусному сепаратору диаметром один метр. При многоконусном сепараторе производительность увеличивается пропорционально количеству конусов.

Представление о возможностях аэровибрационного способа при сепарировании сыпучих смесей минерального происхождения дает таблица 7, приведенная в одной из публикаций сотрудников Софийского горно-геологического института, исследовавших данный вопрос<sup>1</sup>.

## ВЫВОДЫ

1. Теорию движения сыпучих материалов на вибрирующих поверхностях необходимо привести в соответствие с современными запросами практики. Она должна учитывать существование воздушной среды и возможность искусственного наведения силовых полей электрического происхождения.

2. Применение сложных силовых полей открывает новые горизонты в использовании гладких вибрирующих поверхностей в качестве рабочих органов для сепарирования и транспортирования сыпучих материалов. Необходимо провести поисковые исследования в направлении реализации и выяснения технологических возможностей магнитовибрационного, электровибрационного и ультразвукового способов.

3. Аэровибрационный способ — это еще одно реальное средство в арсенале техники переработки сыпучих материа-

<sup>1</sup> Стойко М. Стоев, Щелиана Джендова, Иван Вълчев. Относно едно решение на въпроса за пневматичното класиране на смлени минерални суровини. Рудодобив, металургия, кн. 7, година XX, 1965.

Ст. Стоев и Щ. Джендова. Относно възможността за използване вибриращи неперфорирани повърхности за класиране на дребнозърнести мономинерални суровини в сухо състояние. Годишник на миннегеоложкия институт-София, X Т. (1963—1964), св. IV.

лов. По своим технологическим возможностям он может успешно конкурировать с другими способами и может оказаться незаменимым при сепарировании химически агрессивных или абразивных сыпучих смесей, а также когда требуется обеспечить высокую культуру производства (например, в фармацевтической промышленности). Поскольку качественно-количественные характеристики процесса сепарирования зависят от амплитуды вибраций, а последняя определяется напряжением тока питания электровибратора, то применение аэровибрационных сепараторов может быть с успехом применено в самонастраивающихся автоматических системах или в системах централизованного управления.

С. Стоев и Щ. Джендова считают, что этот способ (метод) «особо перспективен для фабрик, перерабатывающих неметаллические ископаемые».

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях автора:

1. Гриценко Ю. Г. Способ выделения порошкообразной тонкодисперстной фракции из сыпучей смеси. Авт. свид. № 114116 с приоритетом от 17 декабря 1956 г., Бюллетень изобретений, 1958, № 7.

2. Гриценко Ю. Г. О возможности применения гладкой вибрирующей поверхности в качестве рабочего органа для сепарирования сыпучих смесей. Труды Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова, 1960, т. XIII.

3. Гриценко Ю. Г. О выборе рабочих параметров виброподъемников для подъема сухих порошкообразных материалов. Цветные металлы, 1963, № 2.

4. Гриценко Ю. Г. Некоторые вопросы теории вибротранспортирования и вибросепарирования сыпучих материалов в сложных силовых полях. Цветные металлы, 1964, № 2.

5. Гриценко Ю. Г. Музыка просеивает муку. Изобретатель и рационализатор, 1963 г., № 8.

6. Гриценко Ю. Г. О возможности использования гладких вибрирующих поверхностей в качестве рабочих органов для сепарирования сыпучих смесей. Тезисы докладов XIV научной конференции Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова, 1961.

7. Музыка — сепаратор. Эврика, 1964, Издательство ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия».