

3. Шкадов, В. Я. Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости: научные труды / В.Я. Шкадов. – М.: МГУ ин-т механики, 1973. - № 25. – 192 с.
4. Распыливание жидкостей [Текст] / Ю. Ф. Дитяткин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков, В.И. Ягодкин. - 2-е изд., доп и перераб. - М.: Машиностроение, 1977. - 207 с.
5. Соковишин, Ю. А. Теория струй несмешивающихся жидкостей / Ю.А. Соковишин, В.И. Елисеев, В.И. Коровкин. - Л.: ЛГУ, 1990. - 184 с.
6. Определение условий равновесного состояния частицы, висящей на перетяжке жидкости / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, И. П. Хмеленко // Науковий вісник національного гірничного університету. – Днепропетровск, 2008. - № 10. - С. 46-49.
7. Саранин, В. А. Равновесие жидкостей и его устойчивость. Простая теория и доступные опыты / В.А. Саранин. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.

УДК 622.794.3:622.74.3

Канд. техн. наук А.И. Шевченко
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ
КОЛЕБАНИЙ НА НЕПОДВИЖНОЙ ПРОСЕИВАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

Наведено результати досліджень зневоднювання матеріалу з допомогою низькочастотних звукових коливань на нерухомій просіваючій поверхні. Встановлено залежності вологості матеріалу від частоти звуку, рівня звуку, тривалості зневоднення та питомого навантаження.

**RESEARCH OF DEHYDRATION OF MINERAL RAW MATERIALS
BY MEANS OF LOW-FREQUENCY ACOUSTIC FLUCTUATIONS
ON THE MOTIONLESS SIFTING SURFACE**

Results of researches of dehydration of a material by means of low-frequency sound fluctuations on a motionless sifting surface are resulted. Dependences of humidity of a material on frequency of fluctuations of a sound, level of a sound, duration of dehydration and specific loading are established.

Для интенсификации процессов обогащения минерального сырья перспективными являются способы, основанные на физических воздействиях, среди которых важное место занимают вибрационные и акустические [1-11].

Механические колебания используют для интенсификации технологических процессов более полувека. Широко применяют вибрационную технику для решения различных задач обогащения минерального сырья. В последние десятилетия ведутся широкие исследования по использованию акустических колебаний для интенсификации таких технологических процессов, как промывка, классификация, обезвоживание и др. [1].

В отличие от вибрационной акустическая техника позволяет получать высокие значения колебательной скорости и ускорения в больших технологических объемах обрабатываемых сред. С середины шестидесятых годов ведутся исследования по применению низкочастотных звуковых и инфразвуковых колебаний в технологии обогащения совместно с разработкой акустических источников промышленного типа.

Интенсифицирующее действие низкочастотных акустических колебаний на процессы перемешивания, фильтрования и другие основано на таких физических эффектах, как кавитация, высокоамплитудное знакопеременное давление, переменные потоки жидкости, акустические течения, дегазация жидкости и образование в ней многочисленных газовых пузырьков и их равновесных слоев, сдвиг фазы колебаний между взвешенными частицами и жидкостью. Однако для каждого технологического процесса существуют свои оптимальные параметры акустического воздействия, позволяющие добиться максимального проявления одного или нескольких из указанных физических эффектов [1].

Условно акустическая технология занимает промежуточное место между ультразвуковой и вибрационной технологиями [1, 2].

Ультразвуковая технология – совокупность промышленных технологических процессов и методов переработки минерального сырья, основанных на использовании воздействия ультразвуковых волн (частота колебаний составляет десятки килогерц) на сырье и характер протекания физико-химических процессов. Вибрационная технология – процессы и методы, основанные на использовании воздействия механических колебаний рабочих органов на материал (частота колебаний сосредоточенной массы – десятки герц). Акустическая технология – совокупность промышленных технологических процессов, основанных на использовании воздействия упругих волн инфразвукового и звукового диапазона частот (от нескольких герц до 10000 Гц) на сырье и характер протекания физико-химических процессов [1].

Технической базой вибрационной технологии являются вибровозбудители различного назначения: для грохотов, центрифуг, концентрационных столов и т. д. Ультразвуковая технология основана на использовании генераторов и излучателей ультразвука. Техническую базу акустической технологии составляют излучатели низкочастотных акустических колебаний: механические, электро-механические, пневматические и гидравлические [1].

Опыт применения вибрационной техники в обогащении минерального сырья выявил ряд трудностей эксплуатации: высокий уровень шумов и вибраций, сложность виброизоляции оборудования, малая надежность вибровозбудителей. Ультразвуковая технология не получила широкого применения из-за невозможности обработки больших объемов сред вследствие быстрого затухания ультразвуковых волн, сложности и высокой стоимости генераторов и излучателей ультразвука [1].

Промышленное освоение акустической технологии показало ее преимущества в сравнении с вибрационной и ультразвуковой. Они заключаются в простоте и надежности излучателей акустических колебаний, возможности эффективной обработки больших объемов трехфазных сред, более высокой производительности оборудования при резком снижении его энерго- и металлоемкости, а также сокращении необходимых производственных площадей и улучшении санитарно-гигиенических условий труда [1].

Существенным тормозом в развитии и расширении сфер применения акустической технологии стала разобщенность и недостаточность сведений о физических эффектах, вызываемых акустическими колебаниями в трехфазных

средах, методах и средствах возбуждения колебаний, а также недостаточная осведомленность широкого круга исследователей, проектировщиков и инженерно-технических работников о возможностях акустической технологии. При конструктивной простоте технических средств природа физических эффектов и закономерности протекания различных технологических процессов при акустическом воздействии имеют сложный характер. Вследствие этого исследования, направленные на установление этих закономерностей являются актуальными.

Цель работы – изучение влияния низкочастотных гармонических колебаний на обезвоживание минерального сырья на неподвижной просеивающей поверхности.

Обезвоживание происходит в результате прохождения жидкости сквозь слой материала и через ячейки просеивающей поверхности (сит). При грохочении по классу, меньшему, чем капиллярная постоянная, этому процессу препятствуют силы поверхностного натяжения, которые преодолеваются за счет динамического воздействия.

Одним из методов интенсификации процесса обезвоживания на ситах является наложение низкочастотных гармонических колебаний на просеивающую поверхность. Под действием колебаний изменяются структурные свойства материала, уменьшаются его эффективные плотность и вязкость, его свойства приближаются к свойствам высоковязкой жидкости. Эта "жидкость" под действием силы тяжести непрерывно стекает вниз, чем обеспечивается регенерация просеивающей поверхности и высокая скорость процесса [12, 13].

Другой способ колебательного воздействия, приводящий к аналогичным результатам, – возбуждение акустических колебаний низкой частоты непосредственно в материале на неподвижной просеивающей поверхности. Промышленная реализация данного способа стала возможной после разработки низкочастотных гидропневматических излучателей с площадью излучения, сопоставимой с просеивающей поверхностью [14-18].

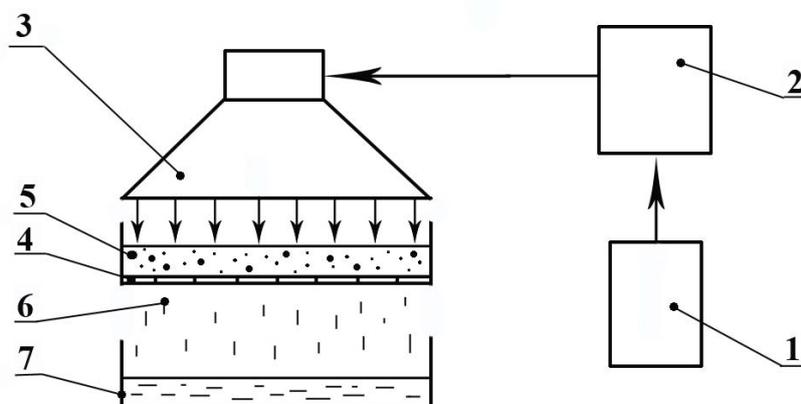
Перспективным для возбуждения акустических колебаний низкой частоты является использование акустических звуковых головок с площадью излучения, сопоставимой с просеивающей поверхностью. Однако до настоящего времени этому направлению не уделялось достаточно внимания. Поэтому в ИГТМ НАН Украины экспериментальным методом были выполнены исследования, направленные на установление влияния низкочастотных гармонических колебаний на обезвоживание материала на неподвижной просеивающей поверхности.

В качестве просеивающей поверхности использовалась стальная сетка с размером ячеек 0,1 мм. Материалом для обезвоживания служил гранитный отсев – отходы добычи и переработки гранита с размерами частиц +0,1-0,4 мм. Во время экспериментов изучалось влияние удельной нагрузки по исходному питанию, которая составляла 6,25 кг/м², 12,5 кг/м² и 25 кг/м². Влажность исходного продукта – 30 %.

Для исследований была создана модель устройства для обезвоживания с помощью низкочастотных гармонических колебаний, которая схематически изображена на рис. 1. Модель состояла из генератора звука 1, усилителя звука 2, излучателя звука 3, установленного над просеивающей поверхностью 4. Ма-

териал для обезвоживания 5 подавался на просеивающую поверхность. Жидкость 6 собиралась в емкость 7.

Площадь излучения была сопоставима с площадью просеивающей поверхности.



- 1 – генератор звука; 2 – усилитель звука; 3 – излучатель звука;
4 – просеивающая поверхность; 5 – обезвоживаемый материал; 6 – жидкость;
7 – емкость для сбора жидкости.

Рис. 1 – Модель устройства для обезвоживания с помощью низкочастотных акустических колебаний.

Генератор звука имел регулировку частоты от 10 Гц до 10 МГц.

Номинальная мощность усилителя 100 Вт; диапазон воспроизводимых частот 20 Гц–20 кГц.

В качестве излучателя использовалась звуковая головка 30ГД-301 со следующими параметрами: звуковое давление 0,35 Па (среднее стандартное звуковое), номинальное электрическое сопротивление 12 Ом, паспортная мощность 40 Вт, номинальная мощность 30 Вт, номинальный диапазон частот 63 Гц–12,5 кГц, частота основного резонанса 63 Гц. Диаметр излучателя 304 мм.

Уровень сигнала замерялся с помощью прибора VEB Robotron 00 033.

Исследовалось изменение влажности от частоты колебаний звука, уровня его сигнала и времени обезвоживания.

Методика проведения экспериментов была следующей:

- монтировалась просеивающая поверхность с заданным размером отверстий;
- на просеивающую поверхность подавался материал для обезвоживания;
- включался генератор звука, устанавливалась требуемая частота и уровень звука на усилителе;
- включался секундомер;
- через заданное время выключался генератор звука;
- извлекался и взвешивался надрешетный продукт;
- далее надрешетный продукт подвергался сушке и снова взвешивался.

В результате испытаний определялось количество воды, остающееся после воздействия низкочастотных акустических колебаний в надрешетном продукте.

Интенсивность процесса прохождения жидкости через материал характеризовалась относительным количеством воды, оставшейся в надрешетном продукте после акустического воздействия

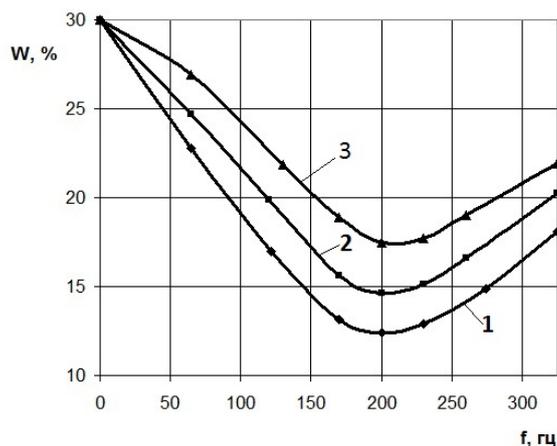
$$W = \frac{m_m - m_c}{m_c} \cdot 100\%,$$

где m_m – масса мокрого материала; m_c – масса сухого материала.

Из предварительных экспериментов установлено, что максимальное значение времени обезвоживания t равно 60 с (при этом значении выполнены последующие эксперименты).

Исследования процесса обезвоживания материала крупностью +0,1–0,4 мм были выполнены при различных удельных нагрузках и режимах низкочастотных акустических колебаний (рис. 2–4). На графиках приведены средние значения по результатам пяти опытов при каждом режиме.

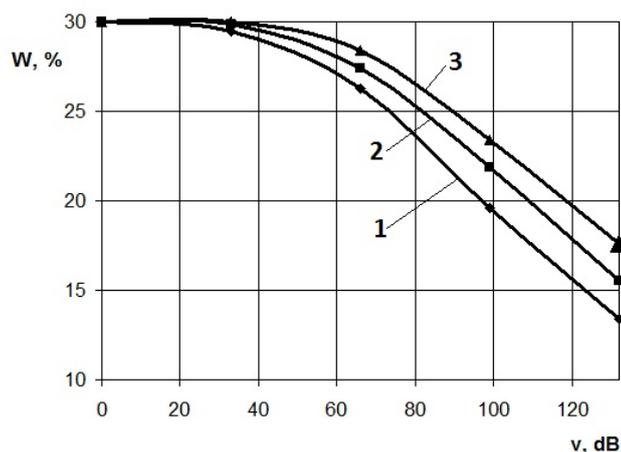
На начальном этапе изучалось изменение влажности материала от частоты колебаний звука f при фиксированных уровне звука ν , продолжительности обезвоживания t и варьировании удельной нагрузки (рис. 2).



1 – удельная нагрузка 6,25 кг/м²; 2 – 12,5 кг/м²; 3 – 25 кг/м²

Рис. 2 – Зависимость влажности W от частоты колебаний f при фиксированных уровне звука ($\nu = 125$ dB) и продолжительности обезвоживания ($t = 60$ с).

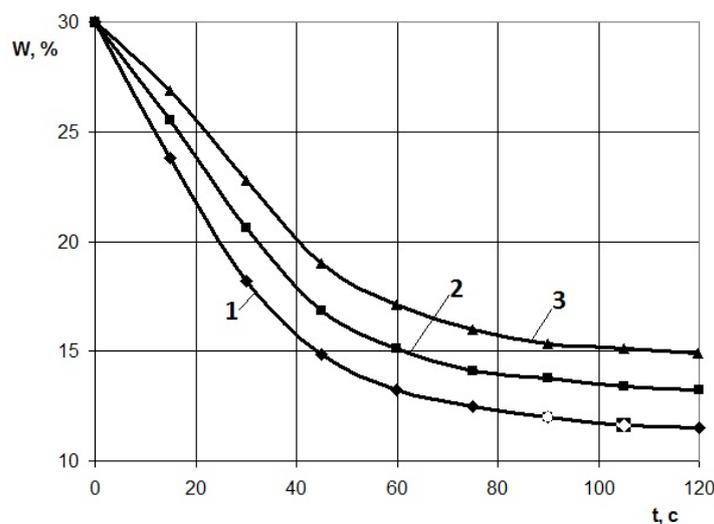
Установлено (рис. 2), что максимальное снижение влажности достигается в полосе частот от 180 Гц до 220 Гц.



1 – удельная нагрузка $6,25 \text{ кг/м}^2$; 2 – $12,5 \text{ кг/м}^2$; 3 – 25 кг/м^2

Рис. 3 – Зависимость влажности W от уровня v звука при фиксированных частоте колебаний ($f = 200 \text{ Гц}$) и продолжительности обезвоживания ($t = 60 \text{ с}$).

При увеличении уровня звука до 75 dB влажность снижается до $26\text{--}28 \%$ (рис. 3). Дальнейшее его повышение (от 75 dB до 130 dB) позволяет уменьшать влажность до $14\text{--}16 \%$.



1 – удельная нагрузка $6,25 \text{ кг/м}^2$; 2 – $12,5 \text{ кг/м}^2$; 3 – 25 кг/м^2

Рис. 4 – Зависимость влажности W от времени обезвоживания t при фиксированных частоте колебаний ($f = 200 \text{ Гц}$) и уровне звука ($v = 125 \text{ dB}$).

Как видно из графика (рис. 4), прохождение жидкости сквозь слой материала наиболее интенсивно происходит в течение 30 с (угол наклона касательной изменяется в пределах от 105° до 145°). Затем по мере уменьшения влаги, когда все большее влияние оказывает поверхностное натяжение жидкости, прохождение замедляется и в интервале времени $60\text{--}120 \text{ с}$ угол наклона касательной меняется только от 170° до 178° .

При фиксированных продолжительности обезвоживания, частоте колебаний звука, уровне звука и варьировании удельной нагрузки от $6,25 \text{ кг/м}^2$ до 25 кг/м^2 показатели влажности изменяются от 12 % до 17 % (рис. 2-4).

Таким образом, на лабораторной установке изучено влияние режимов низкочастотных гармонических колебаний на обезвоживание минерального сырья на неподвижной просеивающей поверхности. Исследования процесса обезвоживания выполнены при удельных нагрузках $6,25 \text{ кг/м}^2$; $12,5 \text{ кг/м}^2$ и 25 кг/м^2 . Установлено, что их использование позволяет снижать влажность материала с 30 % до 14–15 %. Определена область оптимальных параметров низкочастотных акустических колебаний, при которых достигается максимальное уменьшение влажности: частота колебаний 180–220 Гц; уровень сигнала более 80 дВ. При этих параметрах необходима звукоизоляция, что будет учтено при дальнейших исследованиях.

Полученные данные будут использованы при дальнейших исследованиях виброакустического обезвоживания, где будет изучено влияние на обезвоживание низкочастотных акустических колебаний одновременно с вибрацией, что позволит в дальнейшем выполнить математическое моделирование для определения рациональных конструктивных и динамических параметров процесса обезвоживания минерального сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустическая технология в обогащении полезных ископаемых / [А.И. Шульгин, Л.И. Назарова, В.И. Рехтман и др.] ; под ред. В.С. Ямщикова. – М.: Недра, 1987. – 232 с.
2. Звуковая техника и технология в промышленности / [А.Б. Бут, В.И. Жулин, В.С. Ямщиков и др.]. В кн.: Доклады IX Всесоюзной акустической конференции. – М., 1977. – С. 101-111.
3. Волобуев Н.К. Применение упругих колебаний в процессах фильтрования / Н.К. Волобуев, Е.К. Полуянченко // Химическая промышленность. – 1972. – № 10. – С. 57-59.
4. Назарова Л.И. Исследование механизма акустического фильтрования суспензий / Л.И. Назарова, Г.Б. Федоров. – В кн.: Доклады X Всесоюзной акустической конференции. – М., 1983. – С. 115-118.
5. Стоев Ст. М. Виброакустична техника при переработката на минералнике суровини / Стоев Ст. М. – София: Техника, 1979.
6. Римский-Корсаков А.В. Инфразвуковая техника и технология – новое направление в интенсификации жидкофазных процессов / А.В. Римский-Корсаков, В.С. Ямщиков // Вестник АН СССР. – 1980. – № 7. – С. 11-18.
7. Шульгин А.И. Исследование влияния твердой и газообразной фаз на эффективность обеззараживания шахтных вод при низкочастотном акустическом воздействии / А.И. Шульгин, Л.П. Негурица, А.В. Куликов // В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов : VIII Всес. конф. вузов СССР с участием НИИ. – М., 1984. – С. 23.
8. Интенсификация переработки минерального сырья / Под ред. Г.М. Краснова. – М.: Наука, 1975.
9. Исследование процесса акустической классификации угольных пульп / [А.Б. Бут, В.С. Бутовецкий, Л.К. Надярный и др.] // Кокс и химия. – 1976. – № 4. – С. 10-13.
10. Майдуков Г.Л. Технология фильтрования продуктов обогащения углей / Г.Л. Майдуков. – М.: Недра, 1975.
11. Акустические подводные низкочастотные излучатели / [А.В. Римский-Корсаков, В.С. Ямщиков, В.И. Жулин и др.]. – Л.: Судостроение, 1984.
12. Бут А.Б. Классификация суспензий на ситах с применением низкочастотных акустических колебаний / А.Б. Бут // Известия вузов Горный журнал. – 1978. – № 9. – С. 159-165.
13. Волобуев Н.К. Применение упругих колебаний в процессах фильтрования / Н.К. Волобуев, Е.К. Полуянченко // Химическая промышленность. – 1972. – № 10. – С. 57-59.
14. Ямщиков В.С. Звуковые излучатели для интенсификации обогатительных процессов / В.С. Ямщиков, В.И. Рехтман, А.Б. Бут // Известия вузов. Горный журнал. – 1976. – № 7. – С. 177-180.
15. Бут А.Б. Акустическая классификация угольной пульпы / А.Б. Бут, В.С. Бутовецкий, Л.К. Надярный // Обогащение и брикетование угля. – 1975. – № 9. – С. 12-13.
16. Бут А.Б. Акустический классификатор для разделения мелких фракций / А.Б. Бут, В.И. Рехтман // Строительные материалы. – 1976. – № 3. – С. 8-9.

17. Бут А.Б. Исследование процесса разделения суспензий при воздействии звуковых колебаний / А.Б. Бут // Докл. IX Всес. акуст. конф. Секция М. – М., 1977. – С. 91-93.

18. Ямщиков В.С. Виброакустический метод классификации тонкодисперсных суспензий на сите / [В.С. Ямщиков, В.И. Рехтман, М.Т. Заховаев, В.В. Белявский] // Известия вузов. Горный журнал. – 1984. – № 7. – С. 123-126.

УДК 534.121.122

Асп. А.В. Шептилевский аспирант
(Николаевский государственный аграрный университет),
д-р физ-мат. наук И.Т. Селезов
(Институт гидромеханики НАН Украины)
канд. техн. наук В.М. Косенков
(ИИПТ НАН Украины)

ГИДРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Виконано побудову математичної моделі динамічної системи, що складається з сферичної оболонки заданої товщини, яка заповнена рідиною з газовою порожниною в центрі. Побудова моделі виконано в тривимірній постановці. Проведено тестування одержаної математичної моделі.

HYDROELASTIC OSCILLATIONS OF SPHERICAL SHELL FILLED WITH FLUID

A model of dynamical system consisting of a spherical shell by a compressible liquid with a gas bubble in the center is developed. The corresponding initial boundary value problem includes the Kirchhoff-Love shell equations. The balance equation for a gas state, wave equation for liquid, boundary and initial equations.

Рассматриваемая система часто встречается в различных областях науки и техники, в частности при хранении сжиженного газа под давлением и легко воспламеняющихся веществ применяют сферические резервуары. Сферические ёмкости входят в состав оборудования технологических линий в химической промышленности. Также подобные модели применяются в биомеханике при рассмотрении глазного яблока как сферической оболочки, заполненную жидкостью. Кроме того оболочки сферической формы применяются в взрывных камерах, для моделирования и исследования взрывных процессов.

Целью данной работы является построение математической модели для исследования процессов, возникающих в динамической системе, состоящей из сферической оболочки, заполненной жидкостью, с пузырьком газа в центре при условии отсутствия центральной и осевой симметрии.

Задачи исследования:

- Составить систему уравнений исследуемой физической системы.
- Разработать алгоритм решения, используя аппарат численных методов решения дифференциальных уравнений.
- Выполнить тестирование математической модели.

При построении математической модели использовали гипотезы Кирхгофа-Лява. Эти предположения позволили рассматривать перемещения в каждой точке оболочки, а так же определить напряжения (σ_{ij}) через перемещения срединной поверхности. Считали оболочку тонкой, однако, в связи с тем, что она