

itial information. Where it was necessary for solving the mentioned tasks we did the transition from fuzzy sets to traditional sets through the level sets, taking into account geological-geophysical conditions of the territory under review.

**Findings.** The technology of large-scale formalized rating and prediction of development of radiologic conditions of high-manmade-load territories in southeast Ukraine was developed. Thus we based the computing procedures of definition of parameters describing spatial distribution of radioactive pollution in various geospheres in concrete points on the solution of the task of fuzzy purposes achievement by Bellman-Zadeh approach. For this the formalized purposes and restrictions were determined. To determine the influence of the territory tectonic structure features on linear and area distribution of technogenous radioactive pollution we solved the formalized task of definition of fault fragment borders and association of fragments into uniform structures based on geological-geophysical data by calculation of

convex combination of fuzzy sets of indicators (attributes) of faults.

**Originality.** Application of the fuzzy sets theory for processing of multiparameter geological-geophysical data in order to solve various tasks of geoeological mapping of high-manmade-load territories of Ukraine.

**Practical value.** Application of the formalized procedures of geoeological mapping using geological-geophysical data (developed on the base of the fuzzy sets theory) allows us to raise the efficiency of development of the ways of increase of anthropogenic safety level and minimization of social, economic and ecological losses in the high-manmade-load territories of Ukraine.

**Keywords:** *geological-geophysical data, geoeological tasks, fuzzy sets*

*Рекомендовано до публікації докт. геол. наук М.М. Довбнічем. Дата надходження рукопису 02.07.13.*

УДК 622.7:534

**Ю.Г. Агафонов, канд. техн. наук, доц.,  
О.Л. Дудченко, канд. техн. наук, доц.,  
Г.Б. Федоров, канд. техн. наук, доц.**

ГОУ ВПО „Московский государственный горный университет“, г.Москва, Россия, e-mail: granat-agafonov@mail.ru

## ИНФРАЗВУКОВАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ – ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Yu.G. Agafonov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,  
O.L. Dudchenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,  
G.B. Fedorov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.**

Moscow State Mining University, Moscow, Russia,  
e-mail: granat-agafonov@mail.ru

### INFRASONIC METHODS AND TECHNOLOGY: INNOVATIVE APPROACH TO INTENSIFY MINING PRACTICES

**Цель.** Разработка инфразвуковой техники и технологии для интенсификации и повышения качества очистки промышленных стоков горных предприятий, тонкой классификации высокодисперсных суспензий.

**Методика.** На основании результатов гидродинамической ситуации и движения взвесей при воздействии инфразвуковых колебаний изучались характеристики различных фильтровальных материалов. Исследовались зависимости производительности и тонкости фильтрования от амплитуды и частоты колебаний.

**Результаты.** Установлено, что при воздействии инфразвуковых колебаний возрастает производительность фильтрования и повышается эффективность извлечения высокодисперсных частиц. Эффективность очистки сточных вод определяется характеристиками фильтроэлемента, колебательной скоростью и частотой.

**Научная новизна.** Заключатся в использовании виброакустических воздействий для получения высоких энергетических значений на молекулярном уровне в больших рабочих объемах с целью интенсификации жидкофазных технологических процессов.

**Практическая значимость.** На базе проведенных исследований разработаны и созданы установки для очистки сточных вод горных предприятий, которые прошли апробацию в промышленных условиях. Результаты этих испытаний показали перспективность их использования в водошламовом хозяйстве горных предприятий.

**Ключевые слова:** *инфразвуковое фильтрование, регенерация фильтра, противоточные потоки*

**Постановка проблемы.** Одним из перспективных инновационных направлений научных исследо-

ваний, способных принести ощутимые результаты в ближайшее время, является разработка инфразвуковой техники и технологии для интенсификации процессов горного производства [1].

© Агафонов Ю.Г., Дудченко О.Л., Федоров Г.Б., 2014

Отличительной особенностью инфразвуковой технологии, которую иногда называют виброакустической или гидроакустической, является возможность получить высокие энергетические значения на молекулярном уровне в больших технологических объемах при прямой трансформации механической энергии в колебательную.

Применение инфразвуковой технологии открывает широкие возможности для решения целого ряда сложных задач, связанных с тонким разделением суспензий вообще, и, в первую очередь, для создания высокоэффективных мобильных установок для очистки оборотных и шахтных вод, фильтрации промышленных стоков.

Фильтрация минеральных суспензий является одной из самых сложных технологических задач и в любой технологии это „узкое место“ не позволяет качественно решать вопросы горного производства, связано с высокой стоимостью оборудования и значительным потреблением электрической энергии.

Перспективным в решении этой задачи является использование фильтровальных элементов при воздействии на них инфразвуковых колебаний. Это значительно улучшает показатели процессов фильтрации и классификации, что позволяет вовлекать в разработку бедные, некондиционные и забалансовые запасы месторождений, техногенное сырье из отвалов горных предприятий. Решается также актуальная задача очистки сточных вод горных предприятий, городских коммунальных стоков.

**Цель работы.** Разработка инфразвуковой техники и технологии для интенсификации и повышения качества очистки промышленных стоков горных предприятий, тонкой классификации высокодисперсных суспензий.

Лабораторные эксперименты показали, что при воздействии инфразвуковых колебаний повышается производительность и улучшаются показатели таких технологических процессов как фильтрование, классификация, диспергирование, промывка, обезвоживание, сгущение. Эффективность воздействия значительно повышается, если это реализовать в резонансном режиме. Установлено, что производительность процессов возрастает в 5–7 раз, а полнота фильтрования достигает 93–95% (практически чистая вода на выходе).

**Изложение основного материала.** На базе проведенных работ в Московском государственном горном университете разработаны экспериментальные модули и установки для интенсификации процессов горного производства.

Создан инфразвуковой фильтр – принципиально новый вид оборудования для очистки шахтных и сточных вод горных предприятий от механических примесей [2].

На рис. 1 приведена принципиальная схема инфразвукового фильтра.

Инфразвуковой фильтр работает следующим образом. Через патрубок 2 шахтная вода подается в камеру б исходной суспензии. Очищенная фильтром 5 жидкость поступает в камеру 7 фильтрата и отводится че-

рез патрубок 3. Твердая фаза задерживается фильтром и отводится через патрубок сгущенного осадка 4. На стационарный процесс фильтрования накладываются синусоидальные колебания жидкости, создаваемые поршнями. Креативным элементом фильтра является выполнение вибровозбудителя в виде диполя, т.е. двух поршней, жестко связанных между собой и расположенных по разные стороны от фильтровальной перегородки. Противофазное движение поршней относительно фильтровальной перегородки значительно улучшает процесс фильтрования.

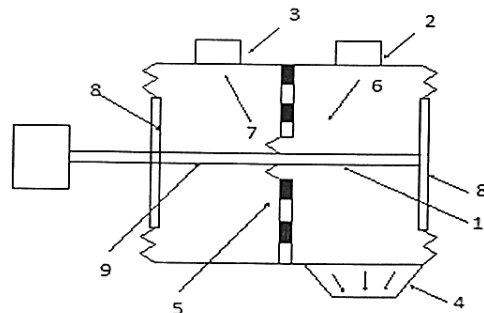


Рис. 1. Инфразвуковой фильтр: 1 – корпус; 2,3, 4 – патрубки для подачи суспензии, отвода фильтрата и сгущенного осадка; 5 – фильтрующая перегородка; 6,7 – камеры исходной суспензии и фильтрата; 8 – поршни, жестко связанные между собой стержнем (9) и совершающие колебания

Анализ гидродинамической ситуации в камерах фильтра показал, что при синхронном движении поршней изменяются условия фильтрования. В камерах фильтровальной установки происходит периодическое изменение давления. Причем, когда давление в одной камере возрастает, то в другой – падает и наоборот.

Расчеты показали, что изменение перепада давления на фильтровальном элементе зависит от производительности фильтрования  $Q$  и амплитуды колебательной скорости поршней  $V_m$ . Этот перепад определяется по формуле

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{K}{S} \cdot (Q - S \cdot V_m \cdot \sin \alpha t), \quad (1)$$

где  $P_1, P_2$  – давление в камере исходной суспензии и камере чистой воды соответственно;  $K$  – гидравлическое сопротивление;  $S$  – площадь фильтрования;  $\omega = 2\pi t$  – циклическая частота колебаний.

Из формулы (1) видно, что если  $S \cdot V_m > Q$ , то на фильтроэлементе возникает „обратный“ перепад давления  $P_2 > P_1$  и жидкость будет двигаться в обратном направлении – из камеры чистой воды в камеру фильтрата (возникают так называемые противоточные потоки). Эти потоки возникают периодически с частотой колебания поршней. Эти потоки разрушают слой частиц на фильтре (регенерируют фильтроэлемент). При этом производительность

филтрования восстанавливается и поддерживается постоянной.

С помощью тензодатчиков измерялись давления в камерах фильтровальной установки. Осциллограмма этих измерений представлена на рис. 2. Из представленной осциллограммы видно, что периодически, в течение короткого времени, возникают „обратные“ перепады давления, и при этом происходит разрушение слоя частиц на фильтроэлементе.

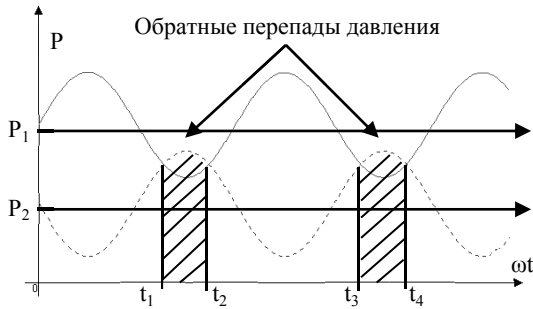


Рис. 2. Осциллограмма изменения давления в камерах фильтровальной установки

Обратные потоки возникают на всех исследуемых фильтровальных материалах в диапазоне частот от 10 до 70 Гц при перепадах давления от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $10^5$  Па.

Важным является понимание физического механизма воздействия виброакустических колебаний на процесс очистки шахтных вод, так как это единственная основа рационального подхода к конструированию виброакустической техники и выбору оптимального режима. Решение этого вопроса сводится к исследованию поведения угольных и минеральных частиц около фильтровального элемента. В присутствии области в нестационарном и неоднородном потоке проявляется инерционность частиц, и они не полностью увлекаются жидкостью („витают“ около фильтра, не создавая плотного слоя на его поверхности). При этом наблюдается максимальная производительность фильтрования и повышается её эффективность.

В результате решения уравнения Навье-Стокса было получено выражение для амплитуды колебательной скорости ( $V_m$ ), при которой начинается „витание“ частиц

$$V_m = K \cdot \frac{Qd}{Sa} \cdot \left[ \frac{\mu S_k}{d(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{ж}}$  — плотность частицы и жидкости соответственно;  $S_k$  — коэффициент живого сечения фильтра;  $a, d$  — радиус частицы и ячейки фильтра соответственно;  $\mu$  — вязкость жидкости.

Полученное выражение позволяет по дисперсному составу угольных и минеральных частиц, их

плотности и свойствам фильтровального элемента определять динамические условия проведения очистки шахтных вод.

Границы частотного диапазона воздействия виброакустических колебаний зависят от состава и свойств твердой фазы шахтных вод, определяются с помощью критерия

$$H = \frac{\rho_{\text{ч}}^2 a^2 f}{\rho_{\text{ж}} \mu}, \quad (3)$$

где  $f$  — частота колебаний.

Экспериментально исследовалась зависимость производительности фильтрования от динамического и частотного диапазона воздействия виброакустических колебаний. На рис. 3 представлен график этой зависимости.

Из приведенного графика видно, что регенерация фильтровального материала зависит от режима проведения самого процесса фильтрования динамического и частотного режимов воздействия этих колебаний. Если амплитуда колебательной скорости  $V_m$  превышает удельную производительность фильтрования  $V_0 = \frac{Q}{S}$  (где  $Q$  — производительность фильтра

при заданном перепаде давления  $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$  Па), то наблюдается регенерация фильтра и стабильная производительность процесса.

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил разработать методику расчета виброакустического фильтровального аппарата. Это явилось основой создания виброакустического фильтра для очистки шахтных вод. На рис. 4 представлена плотная конструкция инфразвукового фильтра.

Учитывая весьма сложный комплекс вопросов, связанных с реализацией виброакустического способа очистки, в задачу опытных исследований входило определение работоспособности разработанной конструкции виброакустического аппарата в условиях, максимально приближенных к производственным.

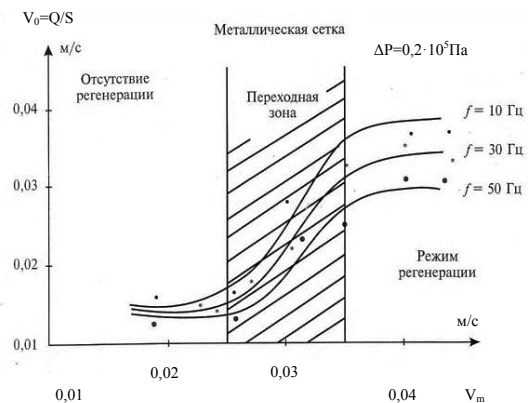


Рис. 3. Зависимость удельной производительности фильтрования от амплитуды и частоты колебаний

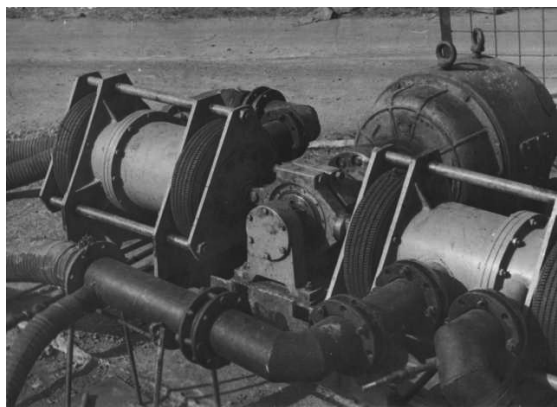


Рис. 4. Внешний вид инфразвукового фильтра

При проведении испытаний инфразвуковой фильтр встраивался в традиционную технологическую схему очистки шахтных вод. Апробация фильтра проводилась на шахтах различных регионов. Качественные и количественные показатели очистки шахтных вод приведены в таблице 1.

Результаты промышленных исследований показали перспективность использования инфразвукового фильтра в водошламовом хозяйстве горных предприятий. Фильтр при большой удельной производительности (до 70м<sup>3</sup>/ч) обеспечивает высокий уровень очистки (эффективность осветления до 70–80%). Разработанная конструкция показала свою работоспособность и надежность, не требует дорогостоящего сервисного обслуживания. Технологические возможности разработанного фильтра в области фильтрования практически не ограничены и он не имеет аналогов в мире.

Разработана виброакустическая промывочно-классифицирующая машина (ВПКМ) классификации, промывки, транспортировки и обезвоживания различных руд, гравия, песка и других сыпучих материалов. Принципиальная схема аппарата представлена на рис. 5.

Разработана виброакустическая промывочно-классифицирующая машина (ВПКМ) классификации, промывки, транспортировки и обезвоживания различных руд, гравия, песка и других сыпучих материалов. Принципиальная схема аппарата представлена на рис. 5.

Таблица 1

Результат промышленных испытаний виброакустического фильтра

Название шахты	Тип фильтровального материала	Показатели фильтра				Показатели работы отстойника, мг/л
		Удельная производительность, м <sup>3</sup> /ч	Концентрация взвесей, мг/л		Полнота фильтрования, %	
			Шахтная вода	Фильтрат		
„Алмазная“	Металлическая сетка	70	35	11	60	20
	Бельтинг	25	35	5	85,7	
„Кировская“	Металлическая сетка	70	100	33	67	50
	Металлокерамика (никель)	32	100	28	72	
	Металлокерамика (бронза)	38	100	30	70	
„Актасская“	Металлическая сетка	70	200	100	50	180
	Лавсан	70	200	79	60,5	

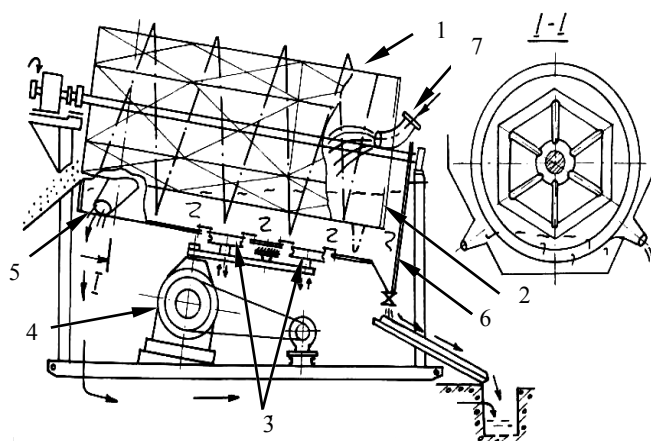


Рис. 5. Принципиальная схема виброакустической промывочно-классифицирующей машины

Машина выполнена в виде шестигранного вращающегося барабана 1. Боковая поверхность барабана

набрана из шпальтовых сит с размерами отверстий 150–200 мкм. На внутренней поверхности барабана имеется спиральная перегородка для транспортировки твердого продукта. Барабан частично погружен в поддон 2. Оси камеры и поддона наклонены под углом к горизонту. На дне поддона установлены излучающие мембраны 3, сведенные с вибровозбудителем 4. Поддон снабжен регулирующим патрубком 5 и патрубком 6 для отвода шлака. Суспензия подается внутрь барабана через патрубок 7.

На сетчатых элементах вращающегося барабана под действием инфразвуковых колебаний и центробежных сил происходит разделение частиц руды по заданному классу и их промывка. Транспортировка готового продукта осуществляется с помощью спиральной перегородки, установленной внутри вращающегося барабана. Обезвоживание готового продукта проводится в верхней части барабана выше уровня пульпы. Инфразвуковые колебания возбуждаются на резонансной частоте, которая рассчитывается по формуле

$$f = \frac{C}{4H}, \quad (4)$$

где  $H$  – высота колеблющегося столба суспензии;  $C$  – скорость звука в суспензии.

Инфразвуковые колебания, возбуждаемые на резонансной частоте, и „каскадный“ режим движения твердого продукта повышают эффективность разделения взвешенных частиц, улучшают условия их промывки.

Этот аппарат был внедрен на Брянском фосфоритном комбинате для классификации фосфоритной руды по классу 150–200 мкм.

Технические характеристики машины представлены в таблице 2.

Опыт эксплуатации машины показал перспективность ее использования для классификации взвешенных частиц, поскольку при высокой производительности (100–120 т./час) эффективность классификации составляла 93–95%. Это позволяет значительно увеличить извлечение полезного ископаемого из исходной руды.

Разработан и создан инфразвуковой классификатор для разделения водоугольных смесей с одновременной классификацией твердого продукта на шпальтовых ситах с ячейками 200–500 мкм.

На рис. 6 представлена схема инфразвукового классификатора.

Установка состоит из цилиндрического корпуса 3 диаметром 3 м с нижней конической частью. В корпус вставлено щелевидное сито 2 с размером щели 0,5 мм площадью 2 м<sup>2</sup>. Внутри сита помещен пневматический вибровозбудитель 1 с цилиндрической

резинокордной оболочкой площадью 0,5 м<sup>2</sup>. Предусмотрен тангенциальный ввод пульпы в нижнюю часть корпуса классификатора. Сгущенный продукт разгружается в нижней части конуса. Постоянный уровень пульпы в классификаторе поддерживают регулированием задвижки на линии питания и с помощью трубы перелива. Отвод подрешетного продукта осуществляется в нижней части сита. Вибровозбудитель работает в диапазоне частот 10–70 Гц. К вибровозбудителю подведены сжатый воздух для создания давления 0,05–0,2 МПа и вакуумная линия для отсоса отработанного воздуха и создания вакуума 0,05–0,08 МПа.

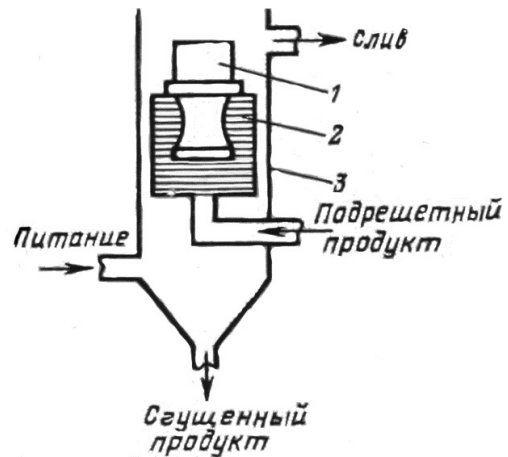


Рис. 6. Схема инфразвукового классификатора

Таблица 2

Технические характеристики виброакустической промывочно-классифицирующей машины

Технические характеристики		Значения характеристик
1. Производительность по исходному продукту, т./час		100–120
2. Классификация по классу, мкм		150–200
3. Эффективность классификации, %		92–97
4. Влажность готового продукта, %		8–10
5. Габариты, м	Длина	6
	Ширина	2,5
	Высота	3
6. Угол наклона, град.		8–10
7. Скорость вращения барабана, об/мин		8–15
8. Частота колебаний мембраны, Гц		3–8
9. Амплитуда смещения мембраны, мм		5–10
10. Площадь шпальтового сита, м <sup>2</sup>	Общая	10
	Рабочая	2
11. Вес, т.		5
12. Потребляемая электрическая мощность, кВт		15

На классификатор поступает подрешетный продукт колосникового грохота крупностью 25 мм.

При испытаниях определяли производительность классификатора по подрешетному продукту в зависимости от давления, создаваемого вибровозбудителем на поверхности сита, и частоты. Частота колебаний вибровозбудителя изменялась от 20 до 25 Гц.

Производственные испытания опытного образца классификатора показали, что классификатор имеет высокую производительность. При этом качество продукции значительно улучшалось.

Учитывая опыт ранее проведенных научно-исследовательских работ, разработаны и испытаны в промышленных условиях инфразвуковой модуль для очистки буровых растворов от выбуренной массы, сгущения и утилизации шламов. Этот модуль предназначен для очистки буровых растворов по классу 50 мкм и сгущения шламов.

Качественный и количественный показатели очистки бурового раствора с применением инфразвукового модуля выше показателей 3-х стадийной технологии очистки буровых растворов при значительном (7–10 раз) сокращении потребления электроэнергии.

**Выводы.** Результаты исследований и промышленной эксплуатации показывают, что применение инфразвуковых аппаратов в технологических жидкофазных процессах позволяет увеличить их производительность и значительно повысить их эффективность.

Конструкции инфразвуковых модулей просты, надежны в эксплуатации и не требуют дорогостоящего сервисного сопровождения.

Инновационная составляющая предложения заключается в возможности использования изготавливаемых по нанотехнологиям фильтроэлементов с ультратонкими ячейками. Это позволяет значительно повысить качество очищаемых жидкостей и успешно решать вопросы экологии.

#### Список литературы / References

1. Вулси Дж.Р. самоочищающийся акустический фильтр для очистки сточных шахтных вод / Дж.Р. Вулси, С.З. Шкундин // Проблемы экологии и управление отходами в энергетике и добыче полезных ископаемых. – Роттердам, 2000. – С. 361–367

Woolsey, J.R. and Shkundin, S.Z. (2000), “Self-cleaning acoustic screen filter system for mine waste water”, *Environmental Issues and Management of waste in Energy and Mineral Production*, Rotterdam, pp. 361–367.

2. Дудченко О.Л. Виброакустический способ очистки сточных вод промышленных предприятий / О.Л. Дудченко, Г.Б. Федоров // Экология и развитие общества. – 2012. – № 1. – С. 35–38

Dudchenko, O.L. and Fedorov, G.B. (2012), “The vibro-acoustic method of industrial enterprises sewage treatment”, *Ecology and Sustainable Development*, no. 1, pp. 35–38.

**Мета.** Розробка інфразвукової техніки й технології для інтенсифікації та підвищення якості очистки промислових стоків гірничих підприємств, тонкої класифікації високодисперсних суспензій.

**Методика.** На підставі результатів гідродинамічної ситуації та руху зависей під дією інфразвукових коливань вивчалися характеристики різних фільтрувальних матеріалів. Досліджувались залежності продуктивності й тонкощі фільтрування від амплітуди та частоти коливань.

**Результати.** Встановлено, що під дією інфразвукових коливань зростає продуктивність фільтрування та підвищується ефективність вилучення високодисперсних часток. Ефективність очистки стічних вод визначається характеристиками фільтроелемента, коливальною швидкістю й частотою.

**Наукова новизна.** Полягає у використанні віброакустичних впливів для отримання високих енергетичних значень на молекулярному рівні у великих робочих об'ємах з метою інтенсифікації рідкофазних технологічних процесів.

**Практична значимість.** На базі проведених досліджень розроблені та створені установки для очистки стічних вод гірничих підприємств, що пройшли апробацію у промислових умовах. Результати цих випробувань показали перспективність їх використання у водошламовому господарстві гірничих підприємств.

**Ключові слова:** *інфразвукове фільтрування, регенерація фільтру, протитічні потоки*

**Purpose.** Development of ultrasonic methods and technology for more intense and higher quality treatment of mining plants effluents, as well as for fine classification of finely-divided suspension.

**Methodology.** [We studied different filter materials basing on hydrodynamic situation results and movement of suspension under the influence of infrasonic vibration. We analyzed the filtration efficiency and fineness dependence on vibration amplitude and frequency.

**Findings.** It was found that infrasound vibration increases filtration performance and efficiency of fine particles extraction. Efficiency of wastewater treatment depends on filtering element characteristics, vibration speed and frequency.

**Originality.** Application of vibroacoustic impact to get high energy values on molecular level in large operating volumes for intensification of liquid-phase processes.

**Practical value.** The studies have resulted into the development and construction of the units for effluent waters treatment, which were tested in industrial environment. The results of the tests showed good prospects of their application for slime services of mining companies.

**Keywords:** *infrasound filtration, filter regeneration, counter flows*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Кармазіним. Дата надходження рукопису 31.05.13.*