

УДК 532.5.011: 622.33: 622.752.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВСПЛЫТИЯ ЯНТАРЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СУСПЕНЗИЮ

¹Надутьй В.П., ²Корниенко В.Я., ¹Чельшкіна В.В.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Национальный университет водного хозяйства и природопользования

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СПЛИВАННЯ БУРШТИНУ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ВПЛИВІ НА СУСПЕНЗИЮ

¹Надутьй В.П., ²Корнієнко В.Я., ¹Чолишкіна В.В.

¹Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Національний університет водного господарства і природокористування

RESULTS OF RESEARCHES OF THE AMBER EMERSION UNDER COMBINED IMPACT ON SUSPENSION

¹Nadutyi V.P., ²Korniyenko V.Ya., ¹Chelyshkina V.V.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, ²National University of Water Resources and Environmental Management

Аннотация. Актуальность исследований процесса гидравлического разделения частиц янтареносной породы в плотных суспензиях связана с разработкой новых конструкций классификаторов, в частности, спиральных гидравлических классификаторов, в которых пульпа подвергается дополнительному воздействию вибрации и барботации пузырьками воздуха.

По известным на сегодня технологиям янтарь мелких классов, крупностью меньше 5 мм, не извлекается, а поступает в отходы. В частности, из-за этого массовое извлечение янтаря составляет около 50%. В ИГТМ НАН Украины для извлечения мелкого янтаря разрабатываются новые конструкции гидравлических спиральных классификаторов, отличающиеся дополнительным воздействием на суспензию вибрации и барботации пузырьками воздуха. Проведены эксперименты, в которых определялась скорость всплытия янтаря в суспензии в виде смеси янтареносной породы с водой. Варьируемыми факторами являлись плотность суспензии, показатели вибрации и барботации. Методом многофакторного регрессионного анализа были получены зависимости скорости от переменных факторов. Установлено, что в порядке убывания степени влияния на скорость всплытия факторы ранжированы так: плотность среды, амплитуда, частота вибрации, объем воздуха для барботации. Получено, что использование вибрации и барботации суспензии повышает скорость всплытия мелких классов в 2-3 раза. Так, для крупности 5 мм при плотности суспензии $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$, расходе воздуха для барботации $q=1,11 \text{ см}^3/\text{с}$, частоте вибрации $w= 31\text{-}25 \text{ Гц}$ и амплитуде вибрации $A=1,5\text{-}2,3 \text{ мм}$ скорость всплытия янтаря составляет 130-140 мм/с. Это в 3,5 раз выше, чем при всплытии янтаря в суспензии той же плотности, но без вибрации и барботации суспензии.

Методом многофакторного регрессионного анализа получена обобщенная зависимость скорости всплытия от четырех переменных факторов, которые в порядке убывания степени влияния располагаются следующим образом: плотность суспензии, амплитуда, частота вибрации, объем воздуха для барботации.

Результаты определения скорости всплытия янтаря используются для расчета режимных параметров работы устройства, а также лежат в основе расчета конструкции гидравлических классификаторов комплексного воздействия.

Ключевые слова: янтарь, плотность суспензии, скорость всплытия.

Актуальность исследований процесса гидравлического разделения частиц янтареносной породы в плотных суспензиях связана с разработкой новых конструкций классификаторов, в частности, спиральных гидравлических классификаторов, в которых пульпа подвергается дополнительному воздействию вибрации и барботации пузырьками воздуха [1-3].

Такие устройства перспективны для извлечения мелкого янтаря, поскольку по существующим сегодня технологиям фракции крупностью минус 5 мм не извлекаются.

В поле совместного действия комплекса сил теоретическое решение задачи стесненного всплытия янтаря является весьма сложным.

Поэтому для изучения процесса использовался метод многофакторного регрессионного анализа базы экспериментальных данных, что позволило получить обобщенную регрессионную зависимость скорости всплытия янтаря от влияющих факторов.

При экспериментах измерялась скорость всплытия янтаря при вариации переменных факторов - плотности среды, объема воздуха для барботации, амплитуды и частоты вибрации. Каждый опыт, отраженный в базе данных, представлял среднее по 8-10 экспериментам.

Особенностью анализа являлось то, что в базу данных включили т.н. «нулевые» точки – скорость всплытия без дополнительных воздействий, во-первых, в чистой воде, а также без дополнительных воздействий в суспензии с плотностью 1,6 и 1,7 г/см³ – при таких плотностях было выполнено большинство экспериментов с дополнительными воздействиями (табл.1).

При проведении экспериментов использовались кусочки янтаря крупностью 5 мм, большей частью покрытые окисной пленкой темно-коричневого цвета. Плотность янтаря составила 1,24 г/см³. В чистой воде кусочки такой крупности не всплывают, а осаждаются со средней скоростью 139 мм/с, поскольку плотность янтаря выше, чем воды. Когда янтарь осаждается, его скорость принята отрицательной, когда всплывает – положительной, и таковой она являлась во всех проведенных экспериментах при плотности суспензии выше 1,3 г/см³. Переменными факторами являлись:

- частота вибрации, $\omega = 23,3 \div 36,7$ Гц;
- плотность среды, $\rho = 1,65 \div 1,73$ г/см³;
- среднеквадратичное значение амплитуды вибрации, $A = 1 \div 2,47$ мм;
- объем воздуха для барботации $q = 1,11$ и $1,67$ см³/с.

В табл.1 приведены средние по 7-10 опытам результаты экспериментов. Данные табл.1, в частности, показывают, что при $\rho=1,65$ г/см³ за счет вибрации и барботации скорость всплытия янтаря возрастает в 3,5 раз: с 33,1 до 115,3 мм/с. Однако ниже будет показано, что это не предел, и скорость можно повысить за счет выбора рациональных параметров вибрации.

Для оценки степени влияния каждого из факторов на скорость всплытия построена простая линейная регрессионная зависимость без учета квадратов и произведений переменных. Для построения использована программа Ms.Excel.

$$V = - 391,3 + 1,29 \omega + 256,2 \rho + 38,9 A - 33,01 q, \quad (1)$$

$$R^2 = 0,90$$

Как видим, уравнение (1) имеет недостаточно высокую степень аппроксимации в оценке по квадрату коэффициента корреляции $R^2 = 0,9$.

Однако уравнение (1) позволяет оценить степень влияния параметров по величине коэффициентов при переменных. В порядке убывания степени влияния переменные факторы располагаются следующим образом: плотность среды, амплитуда, частота вибрации, объем воздуха для барботации.

Таблица 1 – Фрагмент базы экспериментальных данных по определению скорости всплытия янтаря. Расчетные данные - по формуле (2)

V, мм/с		ω , Гц	ρ , г/см ³	A, мм	q, см ³ /с
Расч.	Эксп.				
115,3	113	23,333	1,650	2,47	1,1111
132,8	135	26,667	1,730	2,25	1,1111
130,7	130	30,000	1,685	1,50	1,1111
105,9	109	33,333	1,684	1,20	1,1111
71,9	70	36,667	1,700	1,00	1,1111
94,3	96	23,333	1,650	2,47	1,6667
111,6	110	26,667	1,730	2,25	1,6667
108,3	107	30,000	1,685	1,50	1,6667
83,2	84	33,333	1,684	1,20	1,6667
49,1	50	36,667	1,700	1,00	1,6667
38,0	38,07	0	1,6	0	0
33,1	25,65	0	1,65	0	0
25,2	25,15	0	1,7	0	0
-139,0	-139,0	0	1,0	0	0

Регрессионный анализ результатов табл.1 выполнялся средствами прикладного пакета статистической обработки SPSS Statistics [4]. Использовалась встроенная функция “Regress. Enter”, когда в регрессионное уравнение последовательно включаются переменные с наибольшими коэффициентами частной корреляции с зависимой переменной. Критерий отбора выбран на основе значимости (вероятности) F - статистики 0,05-0,1, [4]. Это позволило сократить число членов регрессионного уравнения и получить зависимость, имеющую высокую степень аппроксимации в оценке по квадрату коэффициента корреляции R^2 :

$$V = -1401,859 + 2,451 \omega + 1867,767 \rho - 0,151 w^2 + 5,659 wA + 0,115 wq - 604,904 \rho^2 - 34,342 A^2 + 3,36 Aq - 17,549 q^2, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,999$$

При последовательном введении переменных факторов из уравнения регрессии были исключены следующие переменные: A , q , $w\rho$, ρA , ρq . По

величине коэффициентов уравнения (2) можно сказать, что на увеличение скорости всплытия янтаря сильно влияет увеличение плотности суспензии, а также частоты вибрации.

По табл. 1 видно, что увеличение объема воздуха для барботации ведет к снижению скорости всплытия янтаря. Однако этот вопрос требует отдельного изучения с учетом влияния размера пузырьков, скорости их всплытия, распределения в рабочей зоне классификатора. Такая задача в настоящих исследованиях не рассматривалась. Согласно результатам проведенных экспериментов, было принято, что объем подаваемого воздуха должен быть ограничен верхним значением $1,11 \text{ см}^3/\text{с}$.

Относительно влияния амплитуды и частоты вибрации на скорость всплытия янтаря отметим следующее. Между амплитудой и частотой вибрационного устройства существует нелинейная зависимость: увеличение одной ведет к увеличению другой лишь до определенного момента совпадения частоты вынужденных и собственных колебаний системы. В нелинейной области возникает период, когда частота увеличивается, а амплитуда остается практически постоянной. Процесс вибровоздействия на суспензию связан с энергией, которую может подавать двигатель вибратора и энергией, которую может «освоить» частица. С увеличением частоты возникает процесс, когда при определенных частотах частица начинает пропускать колебания.

Учитывая это, для корректной оценки влияния вибрации на всплытие янтаря на кривой зависимости амплитуды от частоты был выбран определенный участок, который близок к линейному (рис.1).

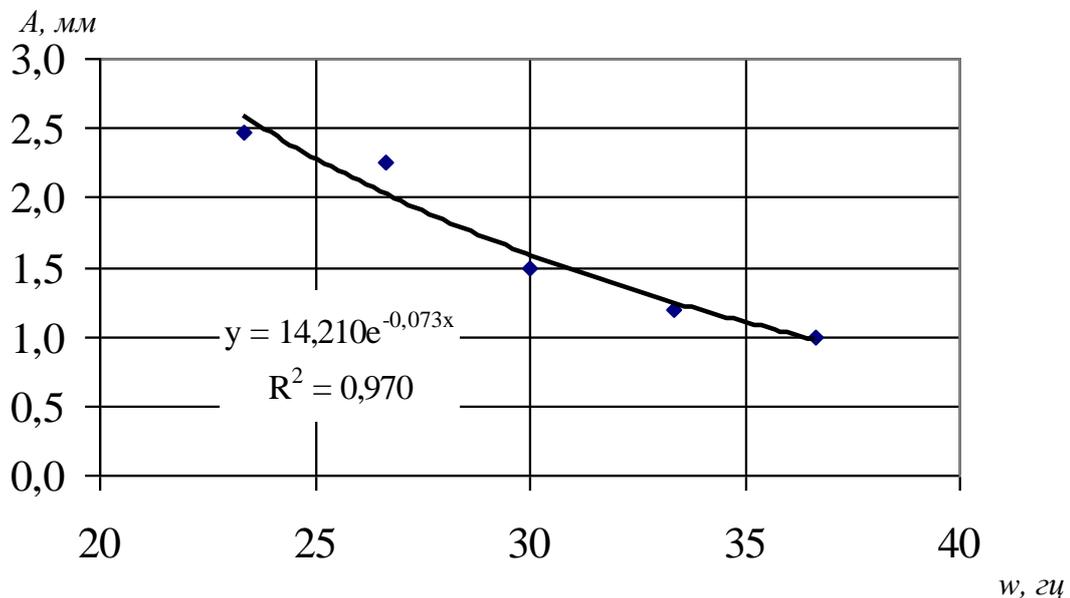


Рисунок 1.- Зависимость амплитуды от частоты виброколебаний

При линейной аппроксимации $R^2=0,95$, при описании этого участка обратным экспоненциальным уравнением $A=14,21w^{-0,073}$ точность несколько выше- $R^2=0,97$, поэтому это уравнение используем далее в расчетах (табл.2). Приведенные на рис. 1 параметры вибрации являются фрагментом общей базы данных.

Среди данных табл.1 выбраны два граничных параметра вибрации $A=2,47$ мм и $A=1$ мм и соответствующих им частот ω . Для них проведен анализ влияния плотности пульпы на скорость всплытия (рис.2).

Как видно из рис.2, увеличение плотности свыше 1650 г/л ведет к снижению скорости всплытия. Это согласуется с ранними исследованиями авторов, где для свободного и стесненного всплытия янтаря установлен рациональный диапазон плотности пульпы 1400-1600 г/л.

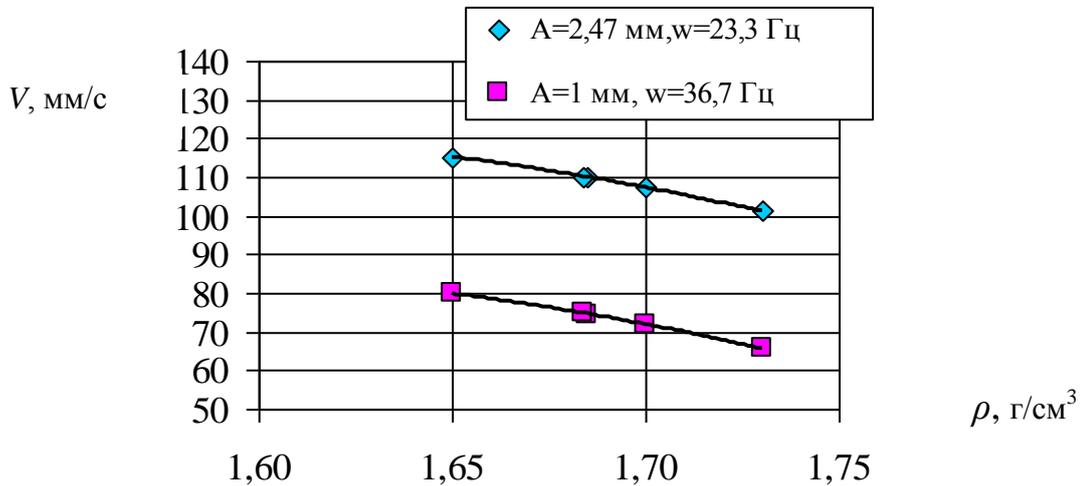


Рисунок 2.- Зависимость скорости всплытия янтаря от плотности суспензии при минимальной и максимальной амплитуде и соответствующей ей частоте вибрации

На рис.3 показана зависимость скорости всплытия янтаря от частоты вибрации, где V получено по уравнению (2) при $\rho = 1,65$ г/см³.

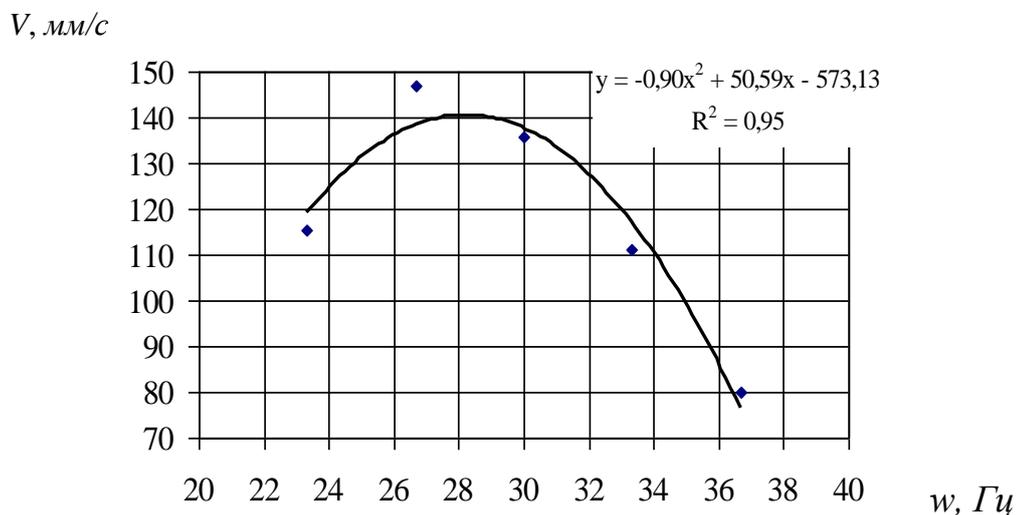


Рисунок 3.- Зависимость скорости всплытия янтаря от частоты вибрации при плотности суспензии 1,65 г/см³

Согласно рис.3, скорость всплытия янтаря нелинейно зависит от частоты колебаний. Оптимальное значение частоты - $28,0 \pm 3$ Гц, где скорость составляет 130-140 мм/с. При указанной частоте 31 - 25 Гц амплитуда

колебаний, согласно рис.1, составляет 1,5 -2,3 мм, соответственно. Подробнее этот результат иллюстрирует табл.2.

Для дальнейшего анализа влияния вибрации на скорость всплытия янтаря было получено уравнение регрессии, в котором вместо частоты и амплитуды использован комплексный параметр - виброскорость:

$$v = 2\pi \cdot A \cdot \omega, \text{ (мм/с)}$$

Виброскорость характеризует мощность колебательного процесса: $P=m \cdot v$, где P , m , v - мощность, масса объекта, скорость механического колебания.

Таблица 2.- Оптимальные параметры вибрации (см. рис.2)

V^{**} , мм/с	ω^* , Гц	ρ , г/см ³	A^* , мм	q , см ³ /с
138	31	1,65	1,50	1,1111
142	30	1,65	1,59	1,1111
146	29	1,65	1,71	1,1111
147	28	1,65	1,84	1,1111
142	26	1,65	2,13	1,1111
134	25	1,65	2,30	1,1111

* - ω - оптимум по рис.2 , A –согласно ω по рис.1;

** V – по формуле (2).

Уравнение регрессии, включающее виброскорость, получено с помощью программы MS Excel, опции “Сервис. Анализ данных. Регрессия”. По сравнению с программой SPSS Statistics, это позволило повысить величину R^2 , но ценой увеличения количества членов уравнения за счет полного учета переменных факторов.

$$V = -1425,13 + 1905,07 \rho + 1,55 v - 749,94 q - 618,95 \rho^2 + 2,42 \rho v - 239,52 \rho q - 0,0088 v^2 + 0,0146 vq + 399,85 q^2, \quad (3)$$

$$R^2 = 0,998$$

Уравнение (3) может использоваться для расчета скорости всплытия янтаря наряду с уравнением (2). Однако оно не имеет преимуществ перед уравнением (2), так как оба уравнения включают 10 слагаемых, а величины R^2 примерно одинаковы. Уравнение (3), так же как и (2), указывает на преимущественное влияние плотности суспензии на процесс всплытия янтаря.

Таким образом, согласно выполненным исследованиям, скорость всплытия янтаря за счет вибрации и барботации можно существенно повысить. Рациональными значениями параметров, обеспечивающими высокую скорость, являются: $q = 1,11 \text{ см}^3/\text{с}$, $\omega = 31 - 25 \text{ Гц}$, $A = 1,5 - 2,3 \text{ мм}$. Так, в суспензии одинаковой плотности $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$ обычная скорость всплытия – 33,1 мм/с, а с применением дополнительных воздействий - 134-147 мм/с (табл.2), что в 4 -4,4 раза выше.

Для крупности янтаря меньше 5 мм, аналогичным образом, можно получить свои уравнения регрессии и соответствующие диапазоны рациональных параметров. Однако, эти исследования не несут новой информации о процессе, они лишь подтверждают полученный результат, что применение дополнительных воздействий – вибрации и барботации суспензии существенно, в 2-3 раза увеличивает скорость всплытия янтаря в плотной среде.

Выводы.

Применительно к разработке новых конструкций спиральных классификаторов, отличающихся дополнительным использованием вибрации и барботации суспензии пузырьками воздуха, рассмотрен процесс гравитационно-гидравлического разделения частиц янтареносной породы в поле комплексных сил. Методом многофакторного регрессионного анализа получена обобщенная зависимость скорости всплытия от четырех переменных факторов, которые в порядке убывания степени влияния располагаются следующим образом: плотность суспензии, амплитуда, частота вибрации, объем воздуха для барботации. Дополнительное воздействие вибрации и барботации позволяет в 2-3 раза повысить скорость всплытия мелких классов янтаря. Так, при наибольшей исследованной крупности 5 мм скорость всплытия составляет 130-140 мм/с по сравнению с 33 мм/с без воздействия вибрации и барботации. Указанная скорость достигается при следующих параметрах вибрации – частота $w = 31 - 25$ Гц, амплитуда $A = 1,5 - 2,3$ мм, расход воздуха для барботации $q = 1,1$ см³/с, плотность суспензии $\rho = 1,65$ г/см³.

Полученные результаты используются при расчетах конструкции классификатора комплексного действия для извлечения янтаря, а также режимных параметров работы устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 102869, UA, МПК8 В03В 5/52. Вібраційний класифікатор / Надутий В.П., Чолишкіна В.В., Сухарев В.В., Корнієнко В.Я.; заявник і патентоволодар - ІГТМ НАН України. - № U201504518; заявл.08.05.2015; опубл. 25.11.15, Бюл. № 22.
2. Пат. 113977, UA, МПК В03В 5/52. Класифікатор комплексної дії / Надутий В.П., Сухарев В.В., Корнієнко В.Я.; заявник і патентоволодар ІГТМ НАН України. - № U201608378; заявл. 29.07.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4.
3. Сребродольский, Б.И. Янтарь Украины / Б.И. Сребродольский. - Киев: Наукова думка, 1980. – С.31.
4. Промислові технології видобутку бурштину. Монографія / А.Ф. Булат, В.П. Надутий, Є.З. Маланчук, З.Р. Маланчук, В.Я. Корнієнко / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України - Національний університет водного господарства та природокористування. – Дніпро-Півне, 2017. – 237 с.
5. Официальный сайт АО «Калининградский янтарный комбинат» (2018), «Применяемое оборудование и технология», доступно по адресу: http://www.ambercombine.ru/ /extraction_and_processing_of_amber/ used_equipment_and_technology/, (2018)
6. Веб. сайт янтарной мастерской ТМ «Янтарь Полесья» (2018), «Добыча янтаря», доступно по адресу: <https://ukrburshtyn.com/blog/kak-dobyvayut-yan-tar.html>, (2018).
7. Бюль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бюль, П. Цефель П.: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

REFERENCES

1. Nadutiy, V.P., Chelyshkina, V.V., Suhariyev, V.V. Korniyenko, V.Ya., Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (2015), *Vibratczyyny klasifikator* [Vibration Classifier], State Register of Patents of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Pat. 102869.
2. Nadutiy, V.P., Chelyshkina, V.V., Suhariyev, V.V. Korniyenko, V.Ya., Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (2017), *Klasifikator kompleksnyi diyi* [Complex action Classifier], State Register of Patents of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Pat. 113977.
3. Srebrodolsky, B.I. (1980). *Yantar Ukrainy* [Amber of Ukraine], Naukova dumka, Kyiv, UA.

4. Bulat, A.F., Nadutiy, V.P., Malanchuk, E.Z., Malanchuk, Z.R. and Kornienko, V.Ya. (2017). *Promyslovi tekhnolohiyi vydobutku burshyynu* [Industrial technologies for the production of amber], Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine and National University of Water Management and Nature Management, Dnipro-Rivne, Ukraine.

5. Joint stock company "Kaliningrad Amber Plant" (2018), "Applied equipment and technology", available at (http://www.ambercombine.ru/extraction_and_processing_of_amber/used_equipment_and_technology/), (Accessed 12 Jan 2018).

6. Amber workshop TM "Amber Polesie" (2018), "Extraction of amber", available at: <https://ukrburshtyn.com/blog/kak-dobyvayut-yantar.html> (Accessed 8 Jan 2018).

7. Buyul, A. and Tsefel, P., (2005), *SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonemostey* [SPSS: the art of information processing. Analysis of statistical data and restoration of hidden patterns], Dia-SoftYuP, St. Petersburg, Russia.

Об авторах

Надутьй Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, nadutyvp@gmail.com

Корниенко Валерий Яковлевич, кандидат технических наук, доцент Национального университета водного хозяйства и природопользования (НУВХПП), Днепр, Украина.

Чельшкіна Валентина Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, chel.valenti@gmail.com

About the authors

Naduty Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnegr, Ukraine, nadutyvp@gmail.com

Korniyenko Valeriy Yakovlevich, Ph.D. (Tech.), Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of National University of Water Resources and Environmental Management (NUWREM), Dnegr, Ukraine.

Chelyshkina Valentina Vasilievna, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnegr, Ukraine, chel.valenti@gmail.com

Анотація. Актуальність досліджень процесу гідравлічного розділення частинок бурштиноносної породи у щільних суспензіях пов'язана з розробкою нових конструкцій класифікаторів, зокрема, спіральних гідравлічних класифікаторів, у яких пульпа піддається додатковій дії вібрації і барботації міхурами повітря.

За відомими на сьогодні технологіями бурштин дрібних класів, розміром менше ніж 5 мм, не вилучається, а надходить у відходи. Зокрема, через це масове вилучення бурштину становить близько 50%. В ІГТМ НАН України для вилучення дрібного бурштину розробляються нові конструкції гідравлічних спіральних класифікаторів, які відрізняються додатковим впливом на суспензію вібрації і барботації бульбашками повітря. Проведено експерименти в яких визначалася швидкість спливання бурштину в суспензії у вигляді суміші бурштиномісної породи з водою. Варіюваними факторами були щільність суспензії, показники вібрації і барботації. Методом багаточинникового регресійного аналізу були отримані залежності швидкості від змінних факторів. Встановлено, що в порядку зменшення впливу чинники ранжовані так: щільність середовища, амплітуда, частота вібрації, обсяг повітря для барботації. Встановлено, що використання вібрації і барботації підвищує швидкість спливання дрібних класів в 2-3 рази. Так, для крупності 5 мм при щільності суспензії $\rho = 1,65 \text{ г / см}^3$, кількості повітря для барботування $q = 1,11 \text{ см}^3 / \text{с}$, частоті вібрації $w = 31\text{-}25 \text{ Гц}$, амплітуді вібрації $A = 1,5\text{-}2,3 \text{ мм}$, швидкість спливання бурштину становить 130-140 мм/с. Це в 3,5 раз вище, ніж при спливанні бурштину в суспензії тієї ж щільності, але без вібрації і барботації.

Методом багаточинникового регресійного аналізу одержано узагальнену залежність швидкості спливання від чотирьох змінних чинників, які в порядку убунання ступеню впливу розташовуються наступним чином: густина суспензії, амплітуда, частота вібрації, об'єм повітря для барботації.

Результати визначення швидкості спливання бурштину використовуються для розрахунку режимних параметрів роботи пристрою, а також лежать в основі розрахунку конструкції гідравлічних класифікаторів комплексного впливу.

Ключові слова: бурштин, щільність суспензії, швидкість спливання.

Annotation. Actuality researches of process of hydraulic division of particles of amber-carrier breed in dense suspensions is related to development of new constructions of classifiers, in particular, spiral hydraulic classifiers in which pulp is exposed to additional influence of vibration and bubbling of air.

According to currently known technologies, small-sized amber with particle size less than 5 mm is not extracted, but is accumulated as waste. Due to this, in particular, mass extraction of amber is only about 50%. The IGTM NAS of Ukraine designed new hydraulic spiral classifiers, which differ by additional impact on the suppression by vibration and barbotage by the air bubbles. Experiments were conducted to determine speed of amber surfacing in suspension, which presented a mixture of amber-bearing rocks and water. The variable factors were density of suspension and parameters of vibration and barbotage. Dependencies between speed and variable factors were obtained by method of multifactorial regression analysis. It is stated that at decreasing degree of the impact, the factors are ranked in the following order: density of the medium, amplitude of vibration, frequency of vibration and volume of air for barbotage. It is further stated that applying of the suspension vibration and barbotage gives 2-3 speeding-up of the small class surfacing. Thus, for size 5 mm at density $\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$, air consumption for bubbling $q = 1.11 \text{ cm}^3/\text{s}$, vibration frequency $w = 31\text{-}25 \text{ Hz}$ and vibration amplitude $A = 1.5\text{-}2.3 \text{ mm}$, speed of the amber surfacing was 130-140 mm/s. This is 3.5 times faster than when amber is surfaced in suspension with the same density but without vibration and barbotage.

By the method of multifactor regressive analysis is collected the generalized dependence of speed of emerging from four variable factors which in order of decrease of degree of influencing are disposed as follows: closeness of suspension, amplitude, frequency of vibration, volume of air for barbotage.

The results of determining speed of the amber surfacing can be used for calculating operating parameters of the device and are the basis for calculation of design of hydraulic classifiers for complex impact.

Key words: amber, suspension density, surfacing speed.

Стаття надійшла до редакції 13.02. 2018.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Б.О. Блюссом.