

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-273-3-17-23>

УДК 621.929 (678.053.3+66.05)

ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В ВІБРОАПАРАТІ З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ РОБОЧОЮ КАМЕРОЮ

Табуншчиков В.Г.

MIXING BULK MATERIALS IN A VIBRATING MACHINE WITH A HORIZONTAL WORKING CHAMBER

Tabunshchikov V.G.

В більшості галузей промисловості знаходять широке застосування процеси змішування сипких матеріалів. Найбільш поширені вони в будівельній, фармацевтичній, хімічній, харчовій галузях. Якість отримуваних сумішей, а саме їх однорідність, є основним чинником, що визначає споживчі властивості вироблених з них виробів. Змішування сипких твердих матеріалів є складним процесом. При цьому мають місце як безпосередньо змішування так і розділення (сегрегація) компонентів суміші на які впливають характеристики матеріалів, робочі умови, апаратурне оформлення процесу. Різноманітність матеріалів, які є компонентами сумішей, зростання об'ємів матеріалів, що переробляються – все це потребує подальших досліджень в означеній галузі. В статті представлено опис розробленої експериментальної установки, яка складається з універсального вібраційного стенду та горизонтального модельного апарата, вісь якого паралельна повздовжньої осі вібратора. В апарат може бути встановлена мішалка оригінальної конструкції. Конструкція вібратора універсального вібраційного стенду дозволяє отримувати кругові, еліптичні та направлені коливання модельного апарата. Методика вимірювань параметрів коливань модельного вібраційного апарата дозволяє фіксувати за допомогою катетометра та фотозйомки траєкторію коливань та визначати амплітуди. Експерименти проводилися на модельних матеріалах - скляному бісері та гранульованому поліетилені. Вони мають гарні сипкі властивості та суттєво відрізняються за насипною вагою. Якість змішування оцінювали шляхом відбору проб з подальшим аналізом їх змісту та визначенням коефіцієнта неоднорідності. В статті наведені результати експериментального вивчення впливу параметрів коливань та наявності мішалки оригінальної конструкції, вісь якої паралельна повздовжньої осі вібратора, на якість змішування матеріалів з гарними сипкими властивостями та з суттєво різною насипною вагою. Встановлено, що для таких матеріалів разом з процесом змішування має місце процес розділення (сегрегації). Показано, що введення мішалки в віброкиплячий шар сипких матеріалів дозволяє запобігти процесу розділення, характерному для деяких частот коливань при дії однієї вібрації. Але в цілому застосування мішалки не поліщило якість змішування компонентів.

Ключові слова: вібраційний стенд, змішування, сипкий матеріал, відносне прискорення, діаметр робочої камери, коефіцієнт неоднорідності.

Вступ. Для інтенсифікації процесу перемішування перспективними є способи, котрі збільшують циркуляцію та турбулізацію середовищ, які перемішуються. Одним з способів змішування сипких матеріалів є вібраційний, з використанням різних віброуючих пристроїв [1].

В промисловості, в якості змішувачого обладнання, знаходять широке використання змішувачі примусової дії. Вони характеризуються складною конструкцією та мають привід великої потужності. Навпаки, вібраційні змішувачі потребують менше енерговитрат на здійснення процесу змішування навіть при використанні робочого органу – мішалки тому, що вібрація викликає зрідження суміші сипких матеріалів [2]. Однак вплив вібрації на якість змішування часток сипких матеріалів в віброкиплячому шарі вивчено недостатньо.

У зв'язку з цим **метою роботи** є експериментальне вивчення на модельних тілах залежності процесу змішування у вібраційному апараті з горизонтальною робочою камерою гарно сипких матеріалів з насипною вагою яка істотно відрізняється, від параметрів коливань і наявності перемішувачого пристрою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

- Розробити експериментальну установку;
- Розробити методику проведення експериментів і визначення якості змішування компонентів;
- Провести експериментальні дослідження і виконати статистичну обробку отриманих даних.

Основна частина

Розробка лабораторної установки

Загальний вигляд експериментальної установки представлено на рисунку 1.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з вібростенда і модельного апарату 9. Вібростенд докладно описано в [3]. Для виміру частоти коливання використовуємо стробоскоп 15, а для визначення амплітуди катетометр 16. Параметри коливань центру модельного апарату визначали відповідно до [3]

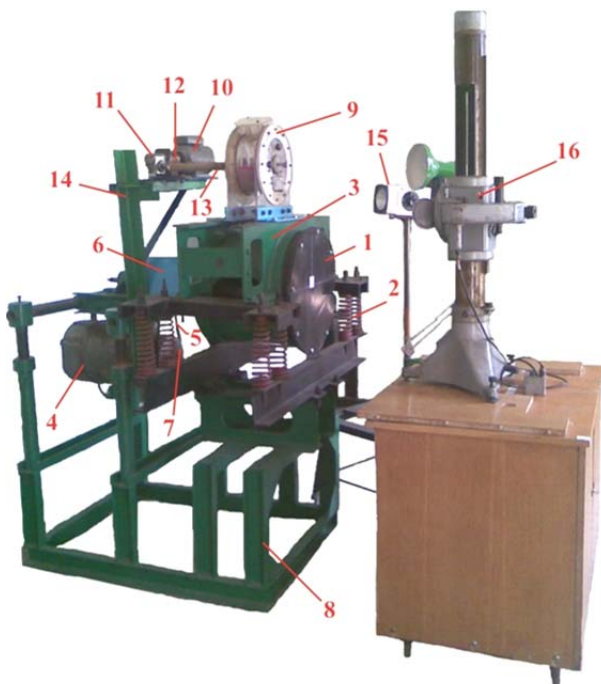


Рис. 1. Конструкція експериментальної установки:
1 – вібратор, 2 – пружини, 3 – віброплатформа,
4, 10 – електродвигун, 5 – ремінь клиновий, 6 – кожух для пружної муфти, 7 – шків ремінної передачі, 8 – опора,
9 – модельний змішувач, 11 – черв'ячний редуктор,
12, 13 – пружна муфта, 14 – полиця під двигун та редуктор, 15 – стробоскоп, 16 – катетометр



Рис. 2. Лопатева мішалка

Модельний змішувач 9 встановлений на платформі вібростенда. Він складається з циліндричного

горизонтального корпусу з внутрішнім діаметром 250 мм та мішалки (рисунок 2). Корпус – це, горизонтальна обичайка з торців закрита кришками, яка має штупери для завантаження початкового матеріалу і вивантаження суміші. Мішалка – включає лопаті оригінальної форми, закріплені на валу по гвинтовій лінії. Лопаті мають вікна, краї вікон відігнуті. Кромки і краї вікон заточені під кутом 45°. Мішалка приводиться в рух від електродвигуна 10 і черв'ячного редуктора 11 за допомогою муфт 12 і 13, які сполучають вал двигуна з швидкохідним валом редуктора і в мішалки з тихохідним валом редуктора відповідно. Двигун і редуктор встановлені на полиці 14, яка є складовою одиницею рами 8.

Методика проведення експериментів і визначення якості змішування

У змішувач завантажуються два компоненти, скляний бісер і поліетилен, в співвідношенні по масі 7:3 відповідно. Процес змішування проводиться періодично. Проби необхідно відбирати пробовідбірником (рисунок 3) через проміжки часу рівні 20 секундам в перебігу 4 хвилин, по 5 проб (рисунок 4) в кожному досліді. На аналітичних вагах вимірюється вага проби і вага бісеру в ній. Експериментальні дані заносяться в таблиці.



Рис. 3. Конструкція пробовідбірника

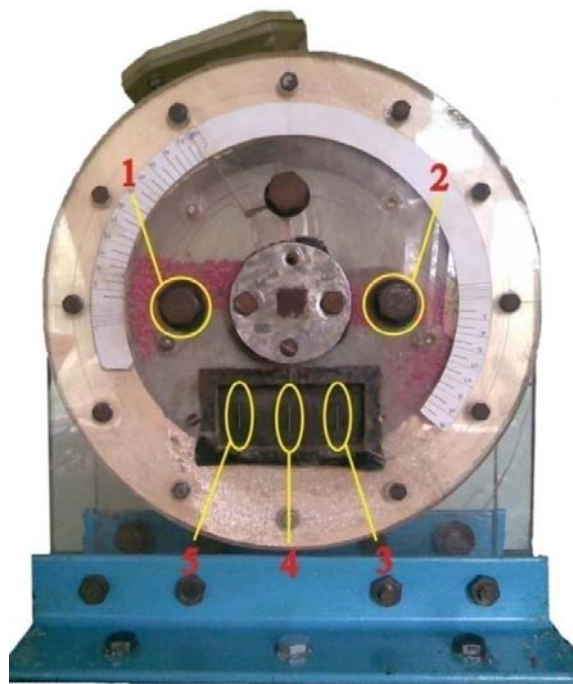


Рис. 4. Модельний апарат:
1, 2, 3, 4, 5 – місця для відбору проб

Проводяться досліді в декілька серій. Перша з вібрацією без мішалки, друга без вібрації (працює тільки мішалка) та остання при спільній дії вібрації і

мішалки. В процесі експериментів: амплітуда $\approx \text{const}=0,7$ мм, при еліптичній траєкторії з частотою коливань від 25 до 60 Гц. Число обертів мішалки було 75 об/хв.

Як критерій оцінки якості змішування використовуватимемо коефіцієнт неоднорідності (варіації) V_c [4].

$$V_c = \frac{S \cdot 100}{\bar{c}} \%, \quad (1)$$

де \bar{c} - середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента в пробах %;

S - середнє квадратичне відхилення

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad (2)$$

c_i - значення концентрації ключового компоненту в i -тій пробі %;

n - число проаналізованих проб.

Експериментальна частина

В якості сипкого матеріалу були вибрані:

- скляний бісер: діаметр часток 0,8 мм, насипна вага 15195 н/м³, кут природного укосу 30,2°;

- поліетилен гранульований: середній розмір часток 3,2 мм, насипна вага 5527 н/м³, кут природного укосу 26,3°

Коефіцієнт заповнення робочої камери модельного апарату складав 0,6.

Результати експериментів приведені в таблицях і на рисунках.

Таблиця 1

Відносне прискорення центра тяжіння модельного апарату

f (Гц)	ω (рад/с)	A (мм)	Δ
25	157	0,7175	1,803
30	188,4	0,7012	2,537
35	219,8	0,7443	3,666
40	251,2	0,7143	4,595
50	314	0,7014	7,049
60	376,8	0,6989	10,115

В таблиці: f - частота; A - амплітуда;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; $\Delta = \frac{A \cdot \omega^2}{g}$ - відносне прискорення ві-

брації: g - прискорення вільного падіння

Таблиця 2

Коефіцієнт неоднорідності V_c в експерименті з дією однієї вібрації

t (сек)	V_c (%)					
	25 Гц	30 Гц	35 Гц	40 Гц	50 Гц	60 Гц
20	36,0	35,1	37,0	36,1	19,1	30,3
40	28,8	30,2	31,1	32,9	31,3	20,6
60	30,5	20,3	32,2	29,6	26,1	17,1
80	24,5	24,0	24,9	26,8	27,8	20,4
100	22,7	21,2	26,6	25,5	23,2	20,3
120	30,8	33,6	23,9	27,7	27,6	21,5
140	31,1	25,10	30,8	27,2	36,4	17,3
160	28,8	22,0	31,5	22,5	29,2	15,9
180	22,9	19,8	29,6	28,3	38,4	20,8
200	20,3	21,9	32,3	25,6	31,8	20,1
220	20,8	27,7	25,5	23,2	24,7	14,7
240	26,5	18,0	24,7	29,7	37,4	15,3

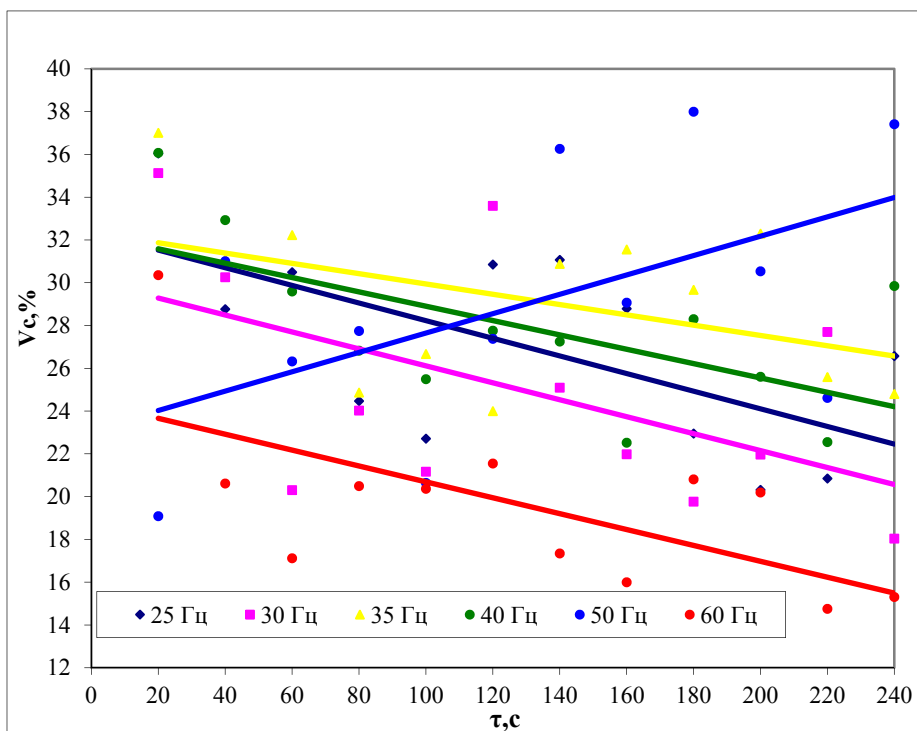


Рис. 5. Залежність коефіцієнта неоднорідності від часу змішування для всіх експериментальних частот (дія однієї вібрації)

Таблиця 3

Коефіцієнт неоднорідності V_c в експерименті з дією однієї мішалки

t (сек)	V_c (%)	t (сек)	V_c (%)	t (сек)	V_c (%)
20	25,3	100	30,1	180	30,5
40	26,6	120	31,6	200	29,2
60	26,7	140	32,6	220	27,2
80	29,1	160	26,0	240	29,9

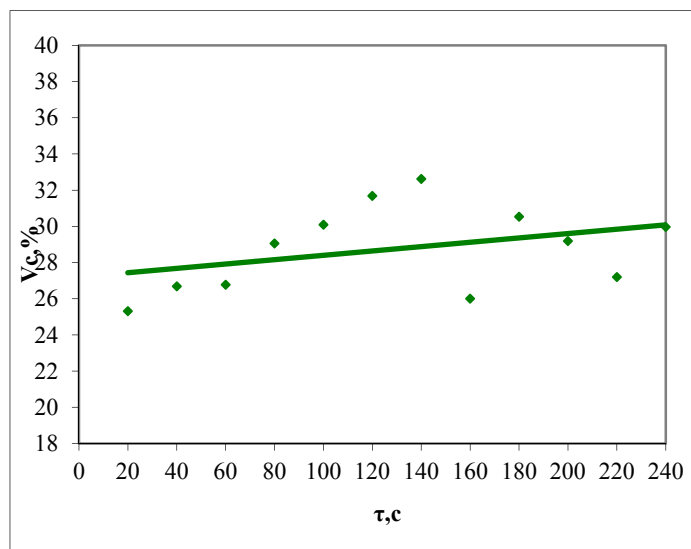


Рис. 6. Залежність коефіцієнта неоднорідності від часу змішування з дією однієї мішалки

Таблиця 4

Коефіцієнт неоднорідності V_c в експерименті з дією вібрації і мішалки

t (сек)	V_c (%)					
	25 гц	30 гц	35 гц	40 гц	50 гц	60 гц
20	32,9	36,9	35,8	32,4	28,2	23,1
40	37,8	38,3	36,3	28,0	28,7	26,3
60	38,1	39,7	33,5	33,8	30,8	22,7
80	35,2	35,7	35,1	29,1	30,1	23,3
100	34,7	33,2	33,0	27,0	28,5	25,9
120	37,2	35,2	29,6	30,2	26,0	21,8
140	35,1	33,9	26,4	27,7	30,9	22,3
160	32,2	34,1	28,7	25,9	29,9	21,4
180	32,1	31,6	26,0	25,5	26,4	22,2
200	29,9	30,5	28,3	22,7	28,2	23,0
220	33,3	30,1	25,8	29,9	27,0	22,8
240	35,0	29,5	26,2	29,1	26,4	25,4

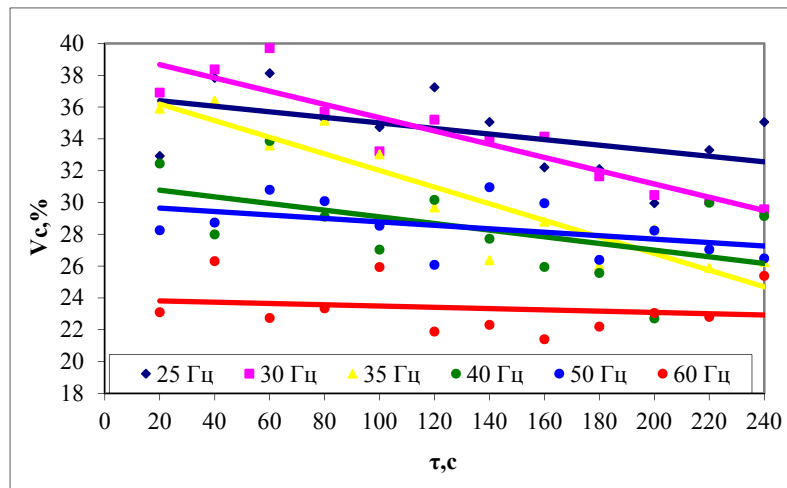


Рис. 7. Залежність коефіцієнта неоднорідності від часу змішування з дією вібрації і мішалки

Для зручності аналізу на рисунках 5 - 7 в діапазоні часу змішування від 20 до 240 секунд отримані дані апроксимовані по методу найменших квадратів відповідно до рівняння:

$$V_c = m \cdot \tau + b \quad (3)$$

де m - кут нахилу;

b - координата перетину ординати.

В таблиці 5 наведено рівняння отриманих прямих.

Таблиця 5

Рівняння апроксимованих даних

f (Гц)	вібрація	вібрація + мішалка	мішалка
25	$V_c = -0,0412 \cdot \tau + 32,349$	$V_c = -0,0175 \cdot \tau + 36,747$	$V_c = 0,0012 \cdot \tau + 27,198$
30	$V_c = -0,0396 \cdot \tau + 30,074$	$V_c = -0,0417 \cdot \tau + 39,499$	
35	$V_c = -0,0241 \cdot \tau + 32,355$	$V_c = -0,0522 \cdot \tau + 37,234$	
40	$V_c = -0,0335 \cdot \tau + 32,258$	$V_c = -0,021 \cdot \tau + 31,199$	
50	$V_c = 0,0453 \cdot \tau + 23,124$	$V_c = -0,0108 \cdot \tau + 29,867$	
60	$V_c = -0,0372 \cdot \tau + 24,407$	$V_c = -0,0041 \cdot \tau + 23,895$	

Аналіз результатів експериментів

Отримані експериментальні дані дають можливість наочно оцінити характер (тенденцію) зміння якості змішування протягом часу, а також залежність коефіцієнта неоднорідності від зміни параметрів коливання.

1. Дослідження показали, що при дії на модельну суміш однією вібрацією (рисунок 5) коефіцієнт неоднорідності зменшується зі збільшенням часу

змішування для частот 25, 30, 35, 40, 60 гц, а при частоті 50 гц зростає. Погіршення якості змішування з часом при частоті коливань 50 гц можна пояснити тим, що в апараті одночасно відбувається два процеси - змішування і розділення. При частоті 50 гц в апараті переважає процес розділення.

2. При дії на суміш перемішуючого пристрою з часом спостерігається збільшення коефіцієнта неоднорідності (рисунок 6). Пояснюється це конструктивним фактором - між лопатями мішалки і модельним апаратом є якийсь простір, де в процесі матеріал скупчується і погано перемішується.

3. Порівнюючи рисунки 5 та 7, можна зробити висновок, що введення в віброкиплячій шар мішалки, запропонованої конструкції не поліпшило якість змішування компонентів.

4. В рівняннях апроксимованих даних коефіцієнт m указує швидкість зміння коефіцієнту неоднорідності в досліджуваному діапазоні та в першому приближенні може розглядатися як інтенсивність процесу перемішування (при $m < 0$) та розділення (при $m > 0$).

Дійсно, з рисунку 8 добре видно, що для досліджуваної суміші компонентів при дії однієї вібрації в діапазоні частот 44 - 56 гц процес розділення превалує над процесом змішування ($m > 0$). На противагу цьому крива спільної дії вібрації та мішалки має більш чітку та стабільну поведінку і для всього діапазону частот процес змішування превалує над процесом розділення ($m < 0$).

5. Коефіцієнт b впливає на абсолютні значення коефіцієнту неоднорідності, тобто відповідає за якість змішування. В розглядаємому діапазоні часу змішування, b - це відправна координата процесу при будь-якій частоті коливань. На коефіцієнт впливає багато чинників - фізико-механічні властивості, конструктивні особливості апарату та інше. Саме вплив конструктивного фактору можна побачити на рисунку 8, де пряма вібрація + мішалка розташована вище за пряму вібрації.

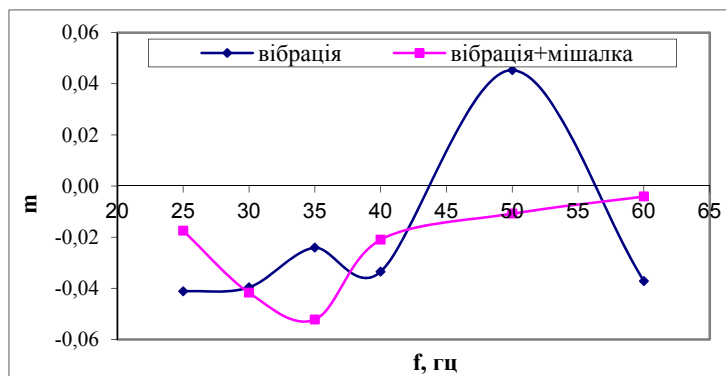
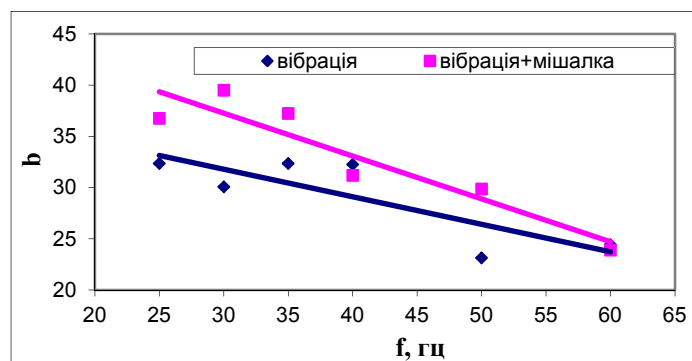
Рис. 8. Залежність коефіцієнта m від частоти вібраціїРис. 9. Залежність коефіцієнта b від частоти вібрації

Рисунок 9 наочно демонструє що зі збільшенням частоти вплив фактора b зменшується.

Висновки

Розроблена експериментальна установка для дослідження процесу змішування сипких матеріалів в віброкиплячому шарі. Відпрацьована методика визначення якості змішування в апаратах періодичної дії. Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів коливань та конструктивного фактору (наявності мішалки) на процес змішування гарно сипких матеріалів з насипна вага яких істотно відрізняється. Показано, що введення мішалки в віброкиплячий шар сипких матеріалів дозволяє запобігти процесу розділення, характерному для деяких частот коливань при дії однієї вібрації. Але в цілому застосування мішалки не поліпшило якість змішування компонентів.

Література

1. Борщев В.Я., Сухорукова Т.А., Ерохина А.А., Трегубова Е.В. Усреднение сыпучих материалов: способы, конструкции, математическое описание. Вестник ТГТУ. 2018 Том 24. №1. 96 – 103с.
2. Фатахетдинов А.М. Совершенствование процесса вибрационного смешивания при производстве сухих строительных смесей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Ивановский государственный политехнический университет. Иваново, 2021. 16 с.
3. Табунщиков В. і Москалик В. «Циркуляція сипкого матеріалу в горизонтальних циліндричних робочих камерах віброапаратів». Вісник СНУ ім. В. Даля, вип.

1(265), Березень 2021, с. 117-123, <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-117-123>.

4. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М., «Машиностроение», 1973, с. 216.

References

1. Borshhev V.Ja., Suhorukova T.A., Erohina A.A., Tregubova E.V. Usrednenie sypuchih materialov: sposoby, konstrukcii, matematicheskoe opisanie. Vestnik TGTU. 2018 Tom 24. №1. 96 – 103s.
2. Fatahetdinov A.M. Sovershenstvovanie processa vibracionnogo smeshivaniya pri proizvodstve suhih stroitel'nyh smesej: avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.02.13 / Ivanovskij gosudarstvennyj politehnicheskij universitet. Ivanovo, 2021. 16 s.
3. Tabunshchikov V. i Moskalik V. «Cirkuljacija sipkogo materialu v gorizont'al'nyh cilindrichnyh robochih kamerah vibroaпаратiv». Visnik SNU im. V. Dalja, vip. 1(265), Berezhen' 2021, s. 117-123, <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-117-123>
4. Makarov Ju.I. Apparaty dlja smeshenija sipuchih materialov. M., «Mashinostroenie», 1973, s. 216.

Tabunshchikov V.G. Mixing bulk materials in a vibrating machine with a horizontal working chamber

In most areas of industry, mixing processes for bulk materials are widely used. They are most common in the construction, pharmaceutical, chemical, food industries. The quality of the resulting mixtures, namely their uniformity, is the main factor that determines the consumer properties of the products produced from them. Mixing bulk solids is a complex process. At the same time, both direct mixing and separation (segregation) of the components of the mixture take place, which are affected by the characteristics of the materials, op-

erating conditions, instrumentation of the process. Further research in the designated area. The article presents a description of the developed experimental setup, which consists of a universal vibrating stand and a horizontal modeling device, the axis of which is parallel to the longitudinal axis of the vibrator. An agitator of original design can be installed in the device. The design of the vibrator of the universal vibrating stand allows to receive circular, elliptical and directed fluctuations of the model device. The method of measuring the oscillation parameters of the model vibrating apparatus allows to record the trajectory of oscillations with the help of a cathetometer and photography and to determine the amplitudes. The experiments were performed on model materials - glass beads and granular polyethylene. They have good bulk properties and differ significantly in bulk density. The quality of mixing was assessed by sampling with subsequent analysis of their content and determination of the coefficient of heterogeneity. The article presents the results of experimental study of the influence of oscillation parameters and the presence of a stirrer of the original design, the axis of which is parallel to the longitudinal axis of the vibrator; on the quality of mixing materials with good bulk properties and

significantly different bulk density. It is established that for such materials together with the process of mixing there is a process of separation (segregation). It is said that the introduction of the stirrer into the vibrating fluidized bed of bulk materials prevents the separation process, which is characteristic of some oscillation frequencies under the action of a single vibration. But in general, the use of the stirrer did not improve the quality of mixing components.

Keywords: vibrating stand, mixing, bulk material, relative acceleration, working chamber diameter, inhomogeneity coefficient.

Табунціков Володимир Георгійович – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), tabvladimir1954@gmail.com

Стаття подана 31.01.2022