

**SILINDRIK SHAKLDAGI VIBRO-SEPARATORLARDA DONLI
АРАЛАШМАЛАРНИ ТОЗАЛАШ ТЕХНОЛОГИК ЖАРAYONLARINI
МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАСHTIRISHDA SUN'IY INTELLEK
ТЕХНОЛОГИYALARDAN FOYDALANISH**

Bozorboy Palvanov,

.“Ma'mun-universiteti” NTM, Aniq fanlar kafedrası dotsenti

+99899 8568076

, e-mail: Bozorboy@yandex.ru

Zarnigor Yusupova

Student of the University of Sheffield, United Kingdom

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda silindrik shakldagi aylanma barabanli vibro-separatorda donli aralashmalarni tozalash texnologik jarayonlarini matematik modellashtirishda sun'iy intellekt (AI) texnologiyalari imkoniyatlaridan foydalanish masalasi ko'rib chiqilgan. Bunda zarraga ta'sir etuvchi markazdan qochma kuch, Koriolis kuchi, og'irlik kuchi, Arximed kuchi, Stoks qarshilik kuchi va vibratsiya kuchlari hisobga olingan holda zarra harakatining uch o'lchovli matematik modeli keltirilgan. Texnologik jarayonni ifodalaydiga vibratsiya chastotasi, amplituda, silindr radiusi, aylanish tezligi, zarra massasi, dinamik qovushqoqlik kabi asosiy kiruvchi parametrlarning qiymatlari asosida separator samaradorligini bashorat qilish imkoniyati o'rganilgan. Matematik model orqali AI yordamida separatorning optimal ish rejimi va tozalangan aralashmaning sifat ko'rsatkichini aniqlash imkonini taqdim etadi. Bundan tashqari AI yordamida separator ichida zarra trayektoriyasini aniqlash imkonini taqdim etadi. AI yordamida o'tkazilgan tadqiqot natijasida zarra diametri, baraban aylanish tezligi, vibratsiya amplitudasi va chastotasi zarra trayektoriyasiga o'zaro ta'siri aniqlandi hamda separatorning talab etiladigan ish rejimlari belgilandi.

Аннотация. В данном исследовании рассматривается использование технологий искусственного интеллекта (AI) при математическом

моделировании технологических процессов очистки зерновых смесей в цилиндрическом вращающемся барабанном вибросепараторе. Представлена трёхмерная математическая модель движения частицы с учётом действия центробежной силы, силы Кориолиса, силы тяжести, силы Архимеда, силы сопротивления Стокса и вибрационных сил. Исследована возможность прогнозирования эффективности сепаратора на основе значений основных входных параметров технологического процесса, таких как частота вибрации, амплитуда, радиус цилиндра, скорость вращения, масса частицы и динамическая вязкость. Математическая модель позволяет с использованием AI определять оптимальный режим работы сепаратора и показатели качества очищенной смеси. Кроме того, AI предоставляет возможность определения траектории движения частицы внутри сепаратора. В результате исследований, проведённых с использованием AI, установлено взаимное влияние диаметра частицы, скорости вращения барабана, амплитуды и частоты вибрации на траекторию частицы, а также определены требуемые режимы работы сепаратора.

Abstract. This study considers the application of artificial intelligence (AI) technologies in the mathematical modeling of technological processes for cleaning grain mixtures in a cylindrical rotary drum vibro-separator. A three-dimensional mathematical model of particle motion is developed taking into account the centrifugal force, Coriolis force, gravitational force, Archimedes force, Stokes drag force, and vibration forces acting on the particle. The possibility of predicting separator efficiency based on the values of key input parameters describing the technological process, such as vibration frequency, amplitude, cylinder radius, rotational speed, particle mass, and dynamic viscosity, is investigated. The mathematical model enables the determination of the optimal operating mode of the separator and the quality indicators of the cleaned mixture using AI methods. In addition, AI provides the possibility to determine the particle trajectory inside the separator. The results of the AI-based study revealed the mutual influence of particle

diameter, drum rotational speed, vibration amplitude, and frequency on particle trajectory, and the required operating modes of the separator were determined.

Kalit soʻzlar. Silindrik vibro-separator, donli aralashma, model, zarra harakati, markazdan qochma kuch, Koriolis kuchi, Stoks qarshilik kuchi, trayektoriya, sonli usul.

Ключевые слова: Цилиндрический вибросепаратор, зерновая смесь, модель, движение частицы, центробежная сила, сила Кориолиса, сила сопротивления Стокса, траектория, численный метод.

Keywords: Cylindrical vibro-separator, grain mixture, model, particle motion, centrifugal force, Coriolis force, Stokes drag force, trajectory, numerical method.

Kirish. Qishloq xoʻjalik mahsulotlarini yetishtirish, ularni dastlabki tozalash va qayta ishlash muhim texnologik bosqichlarni tashkil etadi.

Donli mahsulotlarni qayta ishlash jarayonida dastlabki tozalash bosqichlari alohida ahamiyatga ega boʻlib, bu jarayon mahsulot sifati va tozalovchi agregatning ish samaradorligiga bevosita taʼsir koʻrsatadi.

Hozirgi vaqtda donli aralashmalarni tozalashda keng qoʻllanilayotgan qurilmalar qatoriga vibratsion separatorlar kiradi. Ularning afzalligi yuqori unumdorlik, energiya samaradorligi va konstruktiv soddaligi bilan tavsiflanadi. Ayniqsa, silindrik shakldagi vibratsion separatorlar don massasi boʻylab zarrachalarning bir tekis taqsimlanishini taʼminlashi, ajratish jarayonining uzluksizligi va aerodinamik hamda inertsiya kuchlarining samarali taʼsiri bilan boshqa turdagi separatorlardan ajralib turadi. Biroq separator ichida don va aralashma zarrachalarining murakkab fazoviy harakati, koʻplab tasodifiy

to'qnashuvlar va tebranish parametrlarining o'zgaruvchanligi texnologik jarayonni aniq tahlil qilishni qiyinlashtiradi.

Mazkur jarayonni chuqur tadqiq etish va separatorning optimal ish rejimlarini aniqlash uchun matematik modellashtirish usullaridan foydalanish muhim ahamiyatga ega. Matematik modellashtirish separator ichida zarrachalar trayektoriyasini, tezlik maydonlarini, inertsiya va aerodinamik kuchlarning taqsimotini nazariy jihatdan baholash imkonini beradi. Shu bilan birga, klassik differensial tenglamalar asosidagi modellar ko'pincha real ishlab chiqarish sharoitlaridagi murakkab va noxiziqli bog'lanishlarni to'liq ifodalab bera olmaydi.

So'nggi yillarda texnologik jarayonlarni modellashtirish va optimallashtirishda sun'iy intellekt texnologiyalaridan foydalanish jadal rivojlanmoqda. Xususan, mashinali o'qitish algoritmlari, sun'iy neyron tarmoqlar va regressiya modellaridan foydalanish murakkab texnologik tizimlarning parametrlarini yuqori aniqlikda prognozlash va optimal boshqaruv rejimlarini aniqlash imkonini bermoqda. Sun'iy intellekt asosidagi modellar katta hajmdagi eksperimental ma'lumotlarni qayta ishlash orqali texnologik parametrlar bilan chiqish ko'rsatkichlari orasidagi yashirin bog'lanishlarni aniqlaydi hamda an'anaviy matematik modellarni sezilarli darajada takomillashtiradi.

Shu munosabat bilan silindrik shakldagi vibratsion separatorlarda donli aralashmalarni tozalash texnologik jarayonlarini matematik modellashtirishda sun'iy intellekt usullarini qo'llash ilmiy va amaliy jihatdan katta ahamiyat kasb etadi. Ushbu yondashuv separator ish parametrlarini optimallashtirish, energiya sarfini kamaytirish, ajratish samaradorligini oshirish va qurilmaning konstruktiv parametrlarini takomillashtirish imkonini beradi.

Donli aralashmalarni tozalash texnologik jarayonlarini modellashtirish bo'yicha dunyoning bir qancha davlatlari olimlari tomonidan tadqiqotlar olib borilgan hamda ijobiy natijalarga erishilgan. Jumladan [Xinhao Li, 2025] ishda sentrafugali pnevmoseparatorlarda aralashmalarni ajratish bo'yicha matematik modeli qurilgan hamda sonli hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan. Shu bilan birgalikda

[Jiawei Hu, 2024] ishda sochiluvchan aralashmalar tozalash jarayonlarining matematik modelini yechishda diskret element usuli (DEM) algoritmi qo'llanilgan va natijalar olingan.

Agregatda havo oqimini o'zgaruvchan holat uchun aralashmalarni tozalash jarayoning matematik modellari [Stepanenko S., 2023] ishlarda keltirilgan. Unda og'ir va yengil fraksiyalardagi zarrachalarning harakat trayektoriyalari bir-biridan farq qilishligi isbotlangan.

Donli aralashmalarini pnevmatik kanalda havo tezligini sun'iy ravishda eksponensial o'zgartirish orqali turli fraksiyalarga ajratish usuli [Bulgakov V., 2020] ishda tadqiq etilgan. Tadqiqot doirasida yaratilgan model Mathcad dasturiy muhitida yechilgan.

Yuqorida olib borilgan tadqiqotlarda turli agregatlar uchun zarra harakati trayektoriyasini eng mukammal tarzda ifodalash uchun yetarli emas va qo'shimcha tadqiqotlar olib borishga extiyoj tug'diradi.

Biz tomondan olib borayotgan ilmiy izlanishning asosiy maqsadi silindrik shakldagi aylanma barabanli vibro-separator ichida don zarralarining harakatini matematik modellashtirish, zarraning fizik-mexanik xususiyati va tozalovchi agregatning texnologik parametrlari zarra harakatiga o'zara ta'sirini aniqlashdan iborat.

Masalaning qo'yilishi. Ma'lumki, separatorga tushgan aralashma markazdan qochma kuch asosida harakatga keltiriladi. Shu bilan birgalikda zarraga boshqa fizik-mexanik kuchlar ta'sirida bo'ladi. Zarraga ta'sir etuvchi asosiy kuchlar quyidagi jadvalda keltirilgan:

Kuch	Formula
Markazdan qochma	$F_c = m\omega^2 r$
Koriolis	$F_k = 2m\omega v_r$
Og'irlik	$F_g = mg$
Arximed	$F_A = \rho_f Vg$
Stoks qarshilik	$F_d = 6\pi\mu R_p v$

Vibro kuch	$F_u = mA\Omega^2 \sin(\Omega t)$
Normal reaksiya	N
Ishqalanish	$F_f = fN$

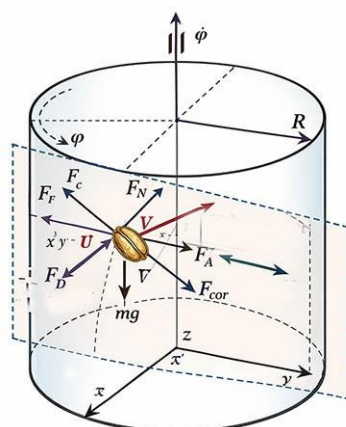
Donli mahsulotlarni tozalash jarayonining matematik modelini keltirib chiqarish uchun kuchlar balansi tenglamasidan foydalanamiz.

$$\vec{F}_n + \vec{F}_N + \vec{F}_G + \vec{F}_s + \vec{F}_p + \vec{F}_k = 0$$

(1)

Shuni ta'kidlash joizki, ishqalanish kuchi vektori nisbiy tezlik vektoriga nisbatan qarama-qarshi yo'nalishda bo'ladi (1-rasm), u holda nisbiy tezlik formula

$V_{omni} = \sqrt{U^2 + W^2}$ orqali aniqlanadi.



1-rasm. Silindrik shakldagi separatorida zarraga ta'sir etuvchi kuchlar.

Dastlab dekart koordinatalar tizimi uchun ishlatiladiga belgilarni keltiramiz:

z – aylanish o'qi,

R – baraban radiusi,

L – Uzunlik (balandlik),

$x(t), y(t), z(t)$ - zarra koordinatalari,

Tezlikliklar:

$$V_x = \frac{dx}{dt}, \quad V_y = \frac{dy}{dt}, \quad V_z = \frac{dz}{dt}$$

Ushbu kuchlarni ifodalaydigan formulalarni tenglamaga qo'ysak va bir

qancha almashtirishlar kiritsak, Dekart koordinatalar tizimi uchun zarralar harakati trayektoriyasini ifodalaydigan uch o'lovchi oddiy differensial tenglamalar tizimi ko'rinishidagi matematik modelga ega bo'lamiz [5]:

$$\begin{aligned}
 m \frac{d^2 x}{dt^2} &= m\omega^2 x + 2m\omega \frac{dy}{dt} - 3\pi\mu d \frac{dx}{dt} + 2V_x(\omega + A\Omega \cos \Omega t) \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \\
 m \frac{d^2 y}{dt^2} &= m\omega^2 y - 2m\omega \frac{dx}{dt} - 3\pi\mu d \frac{dy}{dt} + 2V_y(\omega + A\Omega \cos \Omega t) \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \\
 m \frac{d^2 z}{dt^2} &= mg - \rho_f Vg - 3\pi\mu d \frac{dz}{dt} + mA^2 \sin(\Omega t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

yoki

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_x}{dt} &= \omega^2 x + 2\omega V_y - \frac{3\pi\mu d V_x}{m} + 2V_x(\omega + A\Omega \cos \Omega t) \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \\
 \frac{dV_y}{dt} &= \omega^2 y - 2\omega V_x - \frac{3\pi\mu d V_y}{m} + 2V_y(\omega + A\Omega \cos \Omega t) \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \\
 \frac{dV_z}{dt} &= g - \frac{\rho_f Vg + 3\pi\mu d V_z}{m} + A\Omega^2 \sin(\Omega t)
 \end{aligned}$$

Boshlang'ich shartni quyidagicha olish mumkin:

$$\begin{aligned}
 t = 0: \quad x(0) &= x_0, \quad y(0) = y_0, \quad z(0) = z_0, \\
 V_x &= V_{x0}, \quad V_y = V_{y0}, \quad V_z = V_{z0},
 \end{aligned}$$

(3)

Bu yerda V_x, V_y, V_z - zarralarning koordinata o'qlari bo'ylab aralashish tezliklari, Ω - tebranish chastotasi; R, ω – radius va burchak tezlik, A – tebranish amplitudasi, d – zarra diametri.

Yechish usuli va natijalar tahlili. Qo'yilgan masala chiziqsiz differensial tenglamalar tizimi ko'rinishida bo'lganligi uchun uning analitik yechimini olish murakkab sanaladi. Shuning uchun uni sonli usulda yechishda AI texnologiyalarini qo'llash va hisoblash tajribalarini o'tkazish qulay hisoblanadi.

AI bilan bog'lash uchun va neyro tarmoqlarda o'qitish uchun dastlab kiruvchi va chiquvchi parametrlarini belgilaymiz:

Input:

Output:

Bu yerda:

= tozalash samaradorligi

Q= unumdorlik

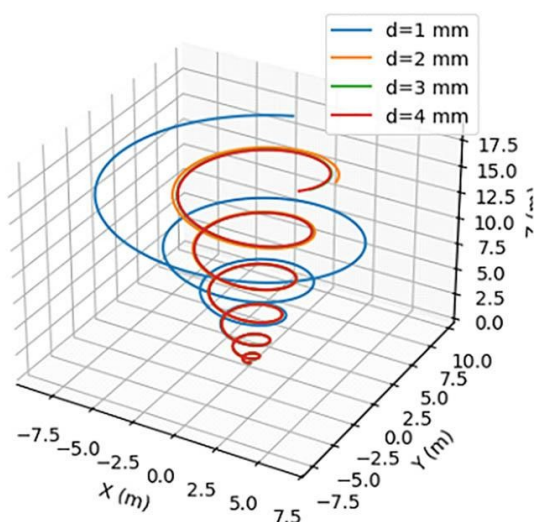
E= energiya sarfi

Optimal parametrlarni topish uchun:

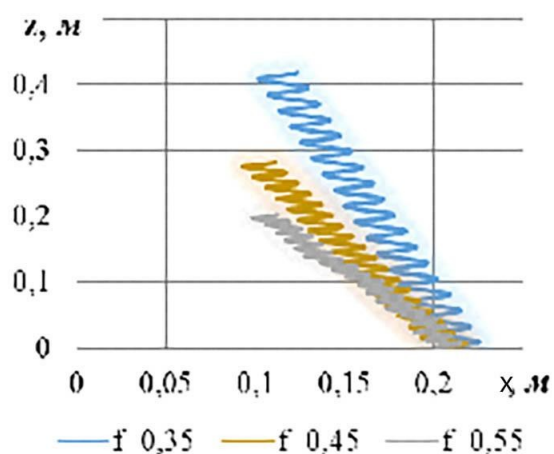
Objective:

Cheklovlar:

Hisoblashlar sonini optimallashtirish uchun qadamlarni avtomatik tanlaydigan qilamiz. Qo'yilgan masalani sonli yechishda Kutta–Merson algoritmidan foydalanildi va Python dasturlash tilida dasturiy vosita yaratildi hamda hisoblash tajribalari o'tkazildi. Hisoblash tajribalaridan olingan natijalar grafik shaklda taqdim etilgan (2, 3-rasmlar).



2-rasm. Turli diametrli zarralar mpaekmopiyalari.



3-rasm. Baraban bo'ylab zarra trayektoriyasining ishqalanish koeffitsiyentiga bog'liqligi.

O'tkazilgan hisoblash natijalaridan shuni xulosa qilish mumkinki, silindrik aylanma vibro separator ichida zarra trayektoriyasi fazoda spiralsimon shaklda bo'lib, uning (x,z) tekislikdagi proeksiyasi to'lqinsimon chiziqdan iborat bo'ladi. Trayektoriya shakli baraban burchak tezligi, chastotasi va amplitudasi, zarra diametri va muhit yopishqoqligiga bog'liq. Yirik zarralar kichik amplitudali trayektoriya bilan tez pastga tushadi, mayda zarralar esa katta amplitudali trayektoriya bilan uzoq vaqt baraban ichida harakatlanadi. Bu esa separatorning fraksiyalarga ajratish jarayonini ta'minlaydi.

Shunday qilib, aylanma barabanli separatorida donli aralashmalarni tozalash texnologik jarayoni uchun zarra harakati Dekart koordinatalar sistemasida Nyutonning ikkinchi qonuni asosida differensial tenglamalar tizimi orqali ifodalandi.

Ishlab chiqilgan matematik model zarra trayektoriyasi va tezligi, separator ichida zarra turib qolish vaqti, zarra diametriga bog'liq holda ajralish jarayoni hamda separatorning optimal ish rejimlari uchun zarra holatini aniqlash imkonini berdi.

Separator samarali ishlashi uchun baraban aylanish tezligi, vibratsiya chastotasi va amplitudasining qiymatlarini zarra diametriga mos ravishda o'zgartirish kerak bo'ladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- 1.Xinhao Li, Runyu Liu, Yuhan Liu, Jiale Yuan, Chenlong Duan, Jida Wu, Hong Wang, Haishen Jiang, Long Huang, Study on spatial flow field instability in a disturbing rotary centrifugal air classifier based on simulation and experimental methods, Powder Technology, Volume 458, 2025, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120990>.
- 2.Jiawei Hu, Rafael L. Rangel, Francisco Kisuka, Ling Zhang, Shaowu Yin, Chuan-Yu Wu, DEM analysis of heat generation and transfer during granular flow in a rotating drum, Chemical Engineering Journal, Volume 499, 2024, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155945>.
- 3.Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag

channel // Journal of Central European Agriculture Year. – 2023. – Volume: 24.
– Issue: 1. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>.

4. Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Boris A., Kiurchev S., Ihnatiev Y., Olt J. Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation // 2020 Agronomy Research, 18 (Special Issue 2), – P. 1177–1188. Cited 11 times. DOI: 10.15159/AR.20.069.
5. Ravshanov N., Palvanov B.Yu., Islamov Yu. Kompyuter modeli protsessa separirovaniya trudnorazdelyaemyx sypuchix smesey tsentrobejnym separatorom // Problemy vychislitelnoy i prikladnoy matematiki. – Toshkent, 2015. – № 1 (1). – S. 40–46.