

УДК 621.86.067.2

**Экспериментальный стенд питателя для оценки воздействия ультразвуковых колебаний на процесс истечения круп***Канд. техн. наук В.Т. Антуфьев, antufjew2010@yandex.ru**канд. техн. наук В.А. Демченко, dem8484@gmail.com**Ю.Р. Казаков, kazakyu75@yandex.ru**Университет ИТМО**191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*Предложены теоретические и экспериментальные исследования повышения точности работы дозаторов для сыпучих пищевых продуктов путем применения питателя-бункера с ультразвуковой стабилизацией потока. Подача потока крупы из ультразвукового питателя-бункера через выпускное отверстие представлено в виде стабильного движения псевдооживленных вибрацией частиц с сопротивлением пропорциональным амплитуде ультразвука. Обращено внимание на малую зависимость точности дозирования от плавающей высоты продукта в питателе, что достаточно заметно при неравномерности подачи сыпучего продукта в механизм дозирования, вздрагивании механизма дозирования и фундаментах, вариативности продукта (удельный вес, размер, неоднородность, насыпная плотность, гигроскопичность, текучесть, способность к гранулированию).*

*Исследовательская работа направлена на изучение процесса дозирования трудно сыпучих зерновых продуктов путем подбора параметров ультразвукового излучателя, которые достаточно эффективно влияют на равномерность истечения их из питателя при увеличении производительности и надежности дозатора. Применение данной технологии позволит обеспечить устойчивую подачу сыпучих материалов с минимальными удельными энергозатратами. Использование рассматриваемого питателя с меньшей дисперсией существенно снизит годовой перерасход продукта. Результаты эксперимента свидетельствуют о возможности применения ультразвука для повышения устойчивости подачи сыпучих материалов на дозирование.*

**Ключевые слова:** ультразвук, устойчивая подача, стабилизация потока, повышение устойчивости, подача сыпучих материалов, точность дозы.

---

**Experimental stand feeder to assess the impact of ultrasonic oscillations on the expiry of cereals***Ph. D. V.T. Antufjew, antufjew2010@yandex.ru**Ph. D. V.A. Demchenko, dem8484@gmail.com**Y.R. Kazakov, kazakyu75@yandex.ru**ITMO University**191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*The theoretical and experimental study of improving the accuracy of the work feeders for bulk food products through the use of feeder - Hopper with ultrasonic flow stabilization. Feed flow semolina ultrasonic feeder - hopper through the outlet provided in the form of a stable movement of the fluidized particles with vibration resistance is proportional to the amplitude of the ultrasound. Attention is paid to low dependence of the accuracy of dosing of the floating height of the product in the feeder, but quite markedly from the uneven flow of bulk product in the dosing mechanism, startle dosing mechanism and foundations, the variability of the product (the proportion, size, heterogeneity, bulk density, hygroscopicity, flowability ability to granulation).*

*The research work is aimed at studying the dosing process is difficult bulk grain products by selecting the parameters of the ultrasonic transducer, which effectively influence the uniformity of the expiry of their feeder while increasing the performance and reliability of the dispenser. Application of this technology will provide a stable supply of bulk materials with minimal specific energy consumption. Using the feeder considered at variance with the significantly reduce the annual cost overruns product. The experimental results show the possibility of applying ultrasound to enhance the stability of supply to the dosing bulk materials.*

**Keywords:** ultrasound, steady supply, the stabilization of the stream, increased resistance, supply bulk materials, the accuracy of the dose.

Цикл производства пищевых сыпучих продуктов обычно заканчивается дозированием и упаковкой в тару. Сейчас существует возможность автоматического дозирования практически любого продукта с высокой точностью. Современные дозаторы представляют собой физико-механические системы, работающие под контролем сложной электроники. Питатель обычно входит в состав дозатора и создает упорядоченный поток сыпучего продукта по определенному закону. Это может быть стабилизированный или пульсирующий потоки продукта или дискретные дозы продукта. Имеется достаточно много круп, которые плохо выгружаются из-за статических электрических сил, межатомного сцепления и т.д. [1, 2]. Крупы достаточно легко впитывают влагу из воздуха при незначительных перепадах температур хранилища дозируемых материалов и цеха, что обуславливает дополнительные адгезионные силы, существенно влияющие на стабилизацию потока. При этом наблюдаются кластерообразование частиц, сводо- и воронкообразование в бункерах и питателях [2]. Это отрицательно влияет на производительность и нарушает равномерность истечения сыпучего продукта. При этом даже качественные дозаторы непредсказуемо изменяют точность доз, и даже с выходом за пределы, указанные в технической характеристике машины. Погрешность дозирования можно определить, взвешивая контрольные пробы при установившемся режиме работы дозатора [3]. Вычисленное среднее квадратическое отклонение величины дозы от заданного значения должно укладываться в диапазон 1–3%. Пока для уменьшения нестабильности их работы используют не всегда эффективные низкочастотные вибрационные и другие механические устройства, усложняющие конструкцию, стоимость и шумность дозаторов (до 80 Дб).

Точность дозирования зависит от многих факторов:

- изменяющейся высоты крупы в питателе;
- пульсаций подачи сыпучего продукта в механизм дозирования;
- вибраций механизма дозирования и фундаментов;
- кратковременных изменений физических свойств продукта (гигроскопичность, удельная плотность, размер, неоднородность, насыпная плотность, текучесть, способность к комкообразованию и др.)
- непериодически изменяющиеся свойства сыпучести продукта: его электризация и слипание в слишком сухом воздухе, образование поверхностной пленки воды.

В значительной степени эти факторы могут быть снижены наложением ультразвуковых колебаний на поток крупы из питателя. Применение ультразвукового излучателя позволит снизить энергетические затраты за счет уменьшения массы колеблющихся элементов питателя, которые практически всю энергию отдают поглощающему зернистому продукту, что существенно снижает шум работы такого вибрационного устройства.

Задачами исследования являются:

- теоретическое исследование процесса перемещения слоя сыпучего продукта при высокой частоте вибрации и обоснование режимов работы ультразвукового питателя;

- получение расчетных зависимостей производительности ультразвукового питателя от параметров генератора и некоторых физико-механических свойств крупы;
- экспериментальное подтверждение основных теоретических положений;
- разработка методики расчета ультразвукового питателя дозатора, позволяющего стабилизировать технологический процесс дозирования сыпучих пищевых продуктов.

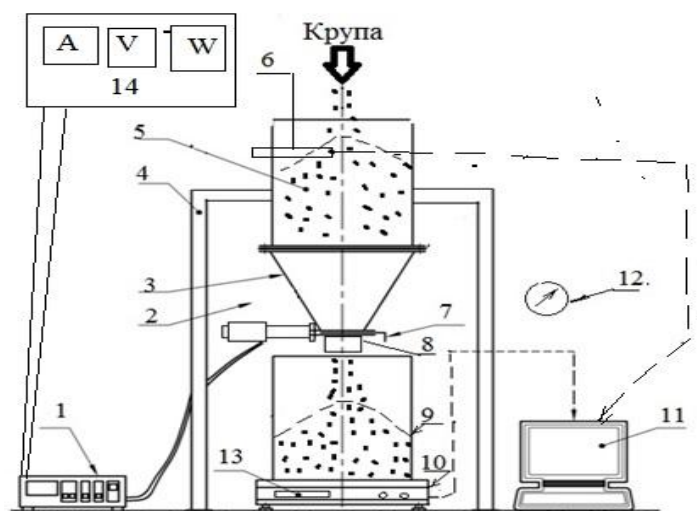
Обзор литературных источников показал, что для повышения равномерности сыпучести зернистых материалов может использоваться механическая энергия затухания ультразвука в частицах материала [2, 3, 10, 11].

Для количественной оценки воздействия наложения ультразвуковых колебаний на поток дозируемых круп на кафедре Технологических машин и оборудования Университета ИТМО разработана экспериментальная установка с применением ультразвукового технологического аппарата серии «Волна-М» – Модель УЗТА-1/22-ОРв (Рис. 1). Экспериментальная установка состоит из гравитационно-ультразвукового питателя и системы управления питателем. Вертикальный выпускной насадок питателя приводится в движение поперек гравитационного потока зерна ультразвуковым излучателем через согласующее устройство с амплитудой 10, 20, 30 и 40 мкм.

Вибрирующий бункер-питатель и вертикальный выпускной насадок питателя создают систему из двух масс: бункера-питателя и вибрационного рукава, активирующего поток крупы к более плотной укладке и дезагрегирующего отдельные комплексы (кластеры) крупы. Такая технология ресурсосберегающего выпуска трудносыпучих ингредиентов с применением управляемого разрушения неплотной укладки частиц и создания геометрически правильной структуры позволит пропустить через узел дозирования повышенное количество продукта, причем со стабилизацией скорости потока. Надо учесть и тот факт, что ультразвук при определенной амплитуде и частоте снижает силы межчастичного и пристенного трения, также влияющего на скорость потока в стесненных условиях.

Наша исследовательская работа направлена на изучение процесса дозирования трудно сыпучих зерновых продуктов путем подбора параметров ультразвукового излучателя, которые достаточно эффективно влияют на равномерность истечения их из питателя сыпучих продуктов при увеличении производительности и надежности дозатора [7]. Для оценки эффектов влияния УЗВ на зерновой материал в состоянии насыпной плотности была разработана и изготовлена специализированная ультразвуковая оснастка для соединения излучателя ультразвука с выпускной насадкой (окном) питателя. Обработка материала ультразвуком осуществлялась четырьмя уровнями амплитуды (10, 20, 30, 40 мкм.), задаваемыми по программе через компьютер.

Заполнение питателя сыпучим материалом производилось непрерывно, а затем и периодически с соблюдением условия, что высота слоя должна быть всегда более диаметра бункера [3]. Истечение сыпучего материала из бункера в первом варианте происходило при величине эквивалентного диаметра выгрузного отверстия  $d_{\text{экв}} = 10$ , наклоне стенок днища питателя к вертикали 35 градусов и влажности перловой крупы 13%, во втором варианте  $d_{\text{экв}} = 15$ , наклоне стенок днища питателя к вертикали 35 градусов и влажности перловой крупы 18%. Влажность измерялась влагометром непрерывно и сигнал регистрировался компьютером.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – электронный генератор; 2 – ультразвуковая колебательная система 3 – питатель; 4 – рама с упругим держателем питателя; 5 – приемно-питающая камера; 6 – датчик влажности крупы; 7 – задвижка; 8 – приемный патрубок (насадок); 9 – разгрузочный бункер; 10 – клемма подачи сигнала с весов в компьютер; 11 – компьютер; 12 – секундомер; 13 – тензометрические весы; 14 – КА-50 (амперметр + вольтметр + ваттметр)

Методика проведения исследований заключалась в следующей последовательности: исследуемый сыпучий материал постоянно подавали в приемно-питающую камеру 1, запускали компьютер и открывали задвижку 7. Информация о массе материала, высыпавшегося из камеры 5 в приемный бункер 9, регистрировалась тензометрическими весами 10 и передавалась на персональный компьютер 11. По истечении некоторого времени проведения эксперимента, выполняли обработку зарегистрированных сведений. Далее дополнительно включали электронный генератор 7 и после подстройки на режим резонанса, открывали задвижку 7. При включении ультразвукового генератора излучатель колебаний передает колебательные движения выпускному насадку (окну) питателя с зернистым продуктом перпендикулярно его истечению. При открытии заслонки выпускного отверстия происходит истечение продукта, количество которого замерялось электронными весами за определенный промежуток времени и регистрировалось в компьютере. Во время эксперимента ультразвук эффективно поглощается крупой и диссипация звуковой энергии приводит к разрушению зерновых агломератов, повышению дисперсности поступающего на дозирование продукта с изменением морфологии частиц и их механоактивацией. Этому также способствует массоперенос частиц, происходящий благодаря возникновению акустических течений. Информация о массе, поданной из камеры крупы, регистрировалась с тензометрических весов 10 на компьютер 11. Опыты проводили по 9 раз для каждого режима с использованием круп определенной влажности. Некоторые результаты исследований представлены графически на рисунках 2, 3 и 4 и в таблице 1, из которых, видно, что ультразвуковое воздействие приводит к снижению неравномерности истечения материала из камеры (кривые 1). Для материалов, обладающих повышенной сыпучестью, к каким и можно отнести, например, перловую крупу сухую, влияние ультразвуковых колебаний на производительность истечения не существенно, тогда как при воздействии ультразвуком на горох, а тем более овсяные хлопья, производительность выгрузки значительно увеличилась (таблица 1).

При дозировании сыпучих сред выполняются следующие основные операции: перемещение зерновых продуктов от входа питателя к его выходу, формирование равномерного потока, и предварительное дозирование в пределах производительности дозатора. Все эти процессы в значительной степени улучшаются. Уменьшаются коэффициент внешнего трения между стенками питателя и дозируемым материалом  $f_{cm}$ , как и коэффициент внутреннего трения дозируемого материала  $f_в$ , который должен быть  $f_{cm} > f_в$ . Применение ультразвука даже на увлажненном продукте позволяет

снизить влияние на производительность питателя в пределах погрешности дозатора, что ранее было неосуществимо (таблица 1).

Таблица 1

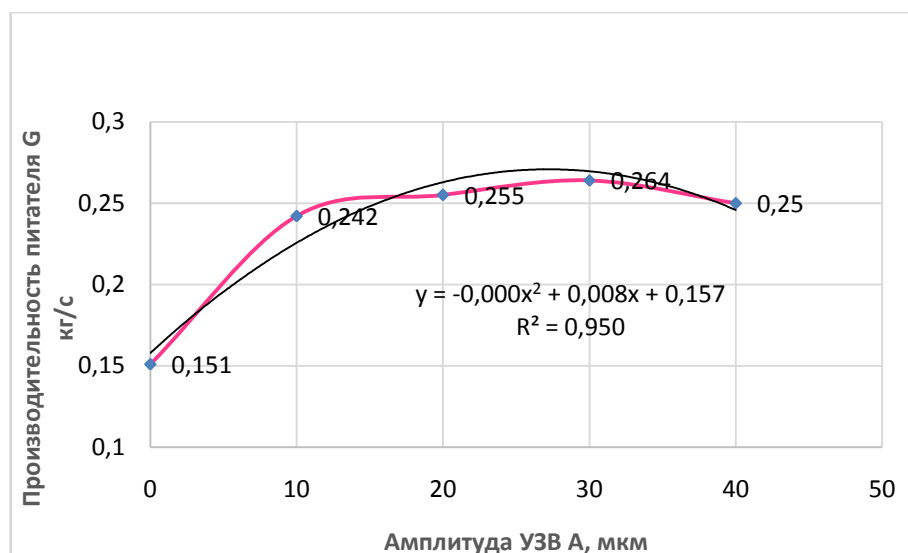
### Результаты исследований производительности питателя

№ п/п	Наименование материала	Максимальная производительность, кг/с	
		без ультразвукового воздействия	при ультразвуковом воздействии 20.000Гц А = 30-40 мкм
1	Перловая крупа (13 %)	0,0333	0,0363 [2]
2	Перловая крупа (18 %)	0,0295	0,0412
3	Крупа гороховая (14 %)	0,190	0,231
4	Крупа гороховая (18 %)	0,151	0,264 [3]
5	Овсяные хлопья (13 %)	0,106	0,118
6	Овсяные хлопья (18 %)	0,082 и менее	0,124

Таким образом, применение данной технологии позволит обеспечить устойчивую подачу сыпучих материалов с минимальными удельными энергозатратами. Использование рассматриваемого питателя с меньшей дисперсией существенно снизит годовой перерасход продукта. Совершенно очевидно, что при дозировании продукта высокого качества дорогостоящее и точное дозирующее устройство быстро себя окупит. Как показали эксперименты, ожидаемый экономический эффект от снижения затрат на электроэнергию и повышения качества продукции составил около 12–15% при стоимости модернизации любого дозатора 5–8%. Без снижения точности дозирования могут быть смягчены требования к равновесной влажности круп. Известно, что продукт даже одной партии может иметь колебания влажности до 1–2% за счет конденсации атмосферной влаги и влаги от жизнедеятельности обрушенного зерна. Обычно питатели в этом случае снижают производительность и равномерность подачи продукта на дозирование. На рис. 2 показано, что незначительно увлажненный горох (до 17,5%) снизил паспортную производительность питателя по сухому гороху (14%) с 0,198 кг/с до 0,151 кг/с (амплитуда ультразвукового генератора А = 0). Подача высокочастотных колебаний даже амплитудой 10 мкм позволила повысить производительность питателя на увлажненном горохе на 55–60%. И только при амплитуде 40 мкм наблюдается незначительное снижение подачи продукта (разуплотнение потока).

Ранее предварительные опыты показали, что подача ультразвука в осевом направлении является менее эффективной, чем в направлении, перпендикулярном вертикальной оси питателя и поэтому такие эксперименты далее не проводили.

Таким образом, ультразвуковое воздействие в исследованных режимах позволяет в бункере питателя ингибировать образование каверн и агломератов, повысить равномерность плотности зернового материала в потоке, подаваемом в дозатор. Этот факт свидетельствует о формировании однородной структуры зернового материала. При использовании влажной гороховой крупы 17,5% влияние ультразвука сказывается очень сильно.



**Рис. 2. Зависимость производительности питателя от амплитуды ультразвука (гороховая крупа с влажностью 17,5%)**

Таким образом, можно регулировать и поддерживать скорость подачи зернистых материалов на дозирование изменением режимов ультразвукового излучателя.

Механизм воздействия ультразвуковых колебаний на процесс истечения увлажненной крупы можно объяснить тем, что при воздействии ультразвуковыми колебаниями силы давления частиц друг на друга и на стенки конусного днища 3 и силы трения между частицами, частицами и днищем периодически изменяются, а водяная пленка, присутствующая на поверхности, не успевает соединиться по всей поверхности контакта зерен. В результате этого сыпучесть материала резко повышается, а процесс истечения увлажненного материала в этом случае становится более устойчивым. Но при больших амплитудах на снижение производительности влияет повышенное разрежение материала.

Результаты настоящих экспериментов, и опыты, проведенные нами ранее, свидетельствуют о возможности применения ультразвука для повышения устойчивости подачи сыпучих материалов на дозирование.

### Литература

1. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции: учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2009. 448 с.
2. Варсанюфьев В.Д., Кальман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия, 1985. 240 с.
3. Воронкин П.А., Тарасов В.П. Методика исследований ультразвукового воздействия на процесс пневмотранспортирования // Материалы XII международной научно-практической конференции «Современные проблемы техники и технологии пищевых производств» (Барнаул, 17 ноября 2009 г.) Барнаул, 2009. С. 76–81.
4. Воронкин П.А., Тарасов В.П. Влияние ультразвукового воздействия на скорость трогания сыпучих материалов // Хранение и переработка зерна. 2009. № 7. С. 39–40.
5. Першин В.Ф., Капитонов Е.Н., Деревякин Н.А. К расчету точности дозирования // Каучук и резина. 2003. № 10. С. 44–45.
6. Казаков Ю.Р., Антупьев В.Т. Возможные пути совершенствования питателей для высокоточного дозирования сыпучих зерновых продуктов // Вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 4. С. 19–20.
7. Казаков Ю.Р., Демченко В.А. Пути повышения точности работы дозаторов для сыпучих пищевых продуктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2.
8. Косой В.Д., Виноградов Я.И., Малышев А.Д. Инженерная реология биотехнологических сред. СПб.: ГИОРД, 2005. 648 с.

9. Рогинский Г.А. Дозирование сыпучих материалов. М.: Химия, 2008. 176 с.
10. Свойства сыпучих материалов и термины / М. П. Макевнин [и др.] // Механика сыпучих материалов: тез. докл. IV Всесоюз. конф. Одесса, 2007. С. 6–7.
11. Сорokin С.А., Гнездилов А.А., Пехтерев К.А. Изменение эффективной вязкости дисперсных сыпучих материалов под воздействием вибрации дозатора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2006. № 4. С. 24–29.
12. Хмелёв В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: научная монография. Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997. 160 с.
13. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев С.С., Лебедев А.Н. Ультразвуковой аппарат для интенсификации процесса прессования волокнистых материалов // Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices. Новосибирск: НГТУ, 2009.

### References

1. Aret V.A., Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. *Physical and mechanical properties of raw materials and finished products*. Tutorial. SPb., GIORД, 2009, 448 p.
2. Varsanof'ev V.D., Kalman-Ivanov E.E. *Vibration technique in chemical industry*. М: Chemistry, 1985. 240 p.
3. Voronkin F.P., Tarasov V.P. Technique research of ultrasound exposure on pnevмотransportirovaniya. *Contemporary problems of technique and technology of food production: proceedings of the Twelfth International Conference (November 17, 2009)*. Barnaul, 2009. p. 76-81.
4. Voronkin P.A., Tarasov V.P. Effect of ultrasonic treatment on the breakaway speed of bulk materials. *Grain storage and processing*. 2009, № 7, pp. 39–40.
5. Pershin V. F., Kapitonov E. N., Derevjakin N. A. On the calculation accuracy of dosing. *Rubber and rubber*. 2003, № 10, pp. 44-45.
6. Kazakov Y.R., Antufiew V.T. Possible ways to improve the precision of dosing feeders for bulk grain products. *Bulletin of St. Petersburg State Agrarian University*. 2014. № 4. pp. 19-20.
7. Kazakov Y.R., Demchenko V.A. Ways to improve the accuracy of dispensers for bulk foods. *Electronic scientific journal "Processes and devices of food manufactures"*. 2014. № 2.
8. Kosoj V.D., Vinogradov Ja.I., Malyshev A.D. *Engineering rheology biotech environments*. SPb., GIORД, 2005. 648 p.
9. Roginsky G.A. *Dosing of bulk materials*. Moscow, Chemistry, 2008, 176 p.
10. Makevnnin M.P. Properties of bulk materials and terms. *Mechanics of granular materials: tez. rep. (IV) Vsesouz. conf.* Odessa, 2007. pp. 6-7.
11. Sorokin S.A., Gnezdilov A.A., PehtereV V. The change in the effective viscosity of dispersed granular materials under the influence of vibration of the dispenser. *Bulletin of the Altay State Agrarian University*. 2006, no. 4, pp. 24-29.
12. Hmelev V.N., Popova O.V. *Multifunctional ultrasonic devices and their application in small industries, agriculture and at home: a scientific monograph*. Barnaul: izd. AltGTU, 1997. 160 p.
13. Hmelev V.N., Cyganok S.N., Hmelev S.S., Lebedev A.N. Ultrasonic intensification of the process of pressing the fibrous materials. *Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices*. Novosibirsk: NGTU, 2009.