

// Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – No. 9 (143). – S. 173-179.

6. Belyaev V.I., Maynel T., Grunvald L., Shmidt G., Bondarovich A.A., Shcherbinin V.V., Ponkina Ye.V., Matsyura A.V., Shtefan E., Illiger P., Kozhanov N.A., Rudev N.V. Vodnyy rezhim pochvy i urozhaynost selskokhozyaystvennykh kultur pri razlichnykh tekhnologiyakh vozdeleyvaniya v Kurlundinskoj stepi Altayskogo kraja // Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Biologiya. Yekologiya. – 2016. – T. 24. – No. 2. – S. 531-539.

7. Belyaev V.I., Sokolova L.V. Perspektivnye agrotekhnologii proizvodstva zerna v Altayskom krae // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 4 (162). – S. 5-11.

8. Belyaev V.I., Maynel T., Yakovlev D.A. Pokazateli kachestva poseva yarovoy pshenitsy pri razlichnykh tekhnologiyakh vozdeleyvaniya v Kurlundinskoj stepi Altayskogo kraja // Materialy regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy pamyati dotsenta M.A. Anfinogenova. – Novosibirsk, 2018. – S. 151-159.



УДК 631.6.085.3

И.Я. Федоренко
I.Ya. Fedorenko

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ ВИБРАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ

THE PATTERNS OF BULK MATERIAL MOVEMENT IN THE CHAMBER OF A VIBRATION MIXER

Ключевые слова: смеситель вибрационный, сыпучие корма, вибровозбудители, уравнение Навье-Стокса, кривая вибросмешивания.

В Алтайском ГАУ были разработаны смесители, в которых роль турбулизирующего фактора играют специально организованные встречные потоки смешиваемого материала. В последнее время появились идеи по оснащению смесителей облегченными вибровозбудителями, а также предложения по надделению смесителей дополнительной функцией дозатора непрерывного действия. В этом случае динамический режим работы можно существенно облегчить. Эти предложения позволяют надеяться, что модернизированный вибросмеситель найдет свое место в практике кормоприготовления. В связи со сказанным большой интерес представляют аналитические закономерности перемещения материала в камере смешивания, позволяющие внести изменения в конструкцию вибросмесителя. Сыпучую среду, находящуюся в камере смешивания вибросмесителя, моделировали в виде вязкой жидкости. Движение среды в целом является ламинарным, за исключением небольших участков турбулентности на границе столкновения встречных потоков. Согласно гидродинамической аналогии в этом случае целесообразно использовать уравнения движения Навье-Стокса. Поставленная задача была сведена к гидродинамической задаче об увлечении жидкости вращающимися предметами, в частности диском (задача Кармана). Априорная информация, содержащаяся в решении Кармана,

позволила предложить аппроксимирующие тригонометрические функции. Исследование позволяет заключить, что сыпучая среда в процессе вибросмешивания совершает сложное пространственное перемещение. Интенсивность возникающих циркуляций определяется параметрами вибрации и реологическими свойствами среды. Система вибровозбуждения обеспечивает наличие радиальной, тангенциальной и аксиальной составляющих движения. Полученные данные позволяют, в частности, оптимально расположить зоны ввода исходных компонентов и выгрузки готовой кормосмеси.

Keywords: vibration mixer, pour feeds, vibration exciter, Navier-Stokes equation, vibration mixing curve.

At the Altai State Agriculture University were developed mixers in which specially organized counter flows of the mixed material play the role of a turbulizing factor. Recently, ideas have emerged for equipping mixers with lightweight vibration exciters, as well as proposals for endowing mixers with the additional function of a continuous dispenser. In this case, the dynamic mode of operation can be greatly facilitated. These proposals allow us to hope that the upgraded vibromixer will find its place in the practice of feed preparation. In connection with the aforementioned, of great interest are the analytical laws of material movement in the mixing chamber allowing to make changes to the design of a vibrating mixer. The flowing environment in the mixing chamber of the vibrating mixer was modeled as a viscous liquid. The

moving as a whole is laminar, with the exception of small areas of turbulence at the boundary of collisions of oncoming flows. According to the hydrodynamic analogy, in this case it is advisable to use the Navier-Stokes equations of motion. The starting task was reduced to the hydrodynamic task about fluid increase with rotating things, in particular a disk (the Karman problem). A priori information contained in the solution of Karman allowed to propose approximating trigonometric functions. The research allows concluding that the

pour environment in the mixing process makes a complex spatial movement. The intensity of the emerging circulations is determined by the parameters of vibration and the rheological properties of the environment. The system of vibration excitation provides the presence of the radial, tangential and axial components of the movement. The obtained data allow, in particular, to optimally arrange the zones for introducing the initial components and unloading the finished feed mixture.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., проф., зав. каф. «Механизация производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Алтайский государственный аграрный университет. Тел: (3852) 203-272. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Agricultural Production Mechanization and Processing, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-272. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Введение

В Алтайском ГАУ в свое время были разработаны смесители, в которых роль турбулизирующего фактора играют специально организованные встречные потоки смешиваемого материала [1, 2]. Цилиндрическая камера смешивания (рис. 1) не содержит каких-либо рабочих органов в виде валов, лопастей, лопаток и т.д., а встречная циркуляция смешиваемого материала достигается за счет сложных пространственных колебаний корпуса смесителя. Сложность проектирования этих смесителей заключалась в синтезе системы вибровозбуждения, обеспечивающей требуемый закон колебаний корпуса смесителя. Решение было найдено за счет использования двух вибровозбудителей и их синхронизации при встречном вращении дебалансных валов [3].

Траектории движения смешиваемого материала встречаются на линии $a - a$ (рис. 1), где происходят турбулизация встречных потоков, их завихрение, проникновение друг в друга и т.д. Это способствует интенсификации процесса смешивания, при этом параметры вибраций значительно ниже тех, которые требуются для получения режимов стохастического перемешивания.

Испытания смесителя показали его высокую технологическую эффективность, но на производстве он нашел ограниченное применение. Причина обусловлена наличием двух вибровозбудителей и, соответственно, двух электроприводов. В последнее время появились идеи по оснащению смесителя облегченными вибровозбудителями с

единым электроприводом, а также предложения по наделению смесителя дополнительной функцией дозатора непрерывного действия. В этом случае динамический режим работы можно существенно облегчить. Эти предложения позволяют надеяться, что модернизированный вибросмеситель найдет свое место в практике кормоприготовления.

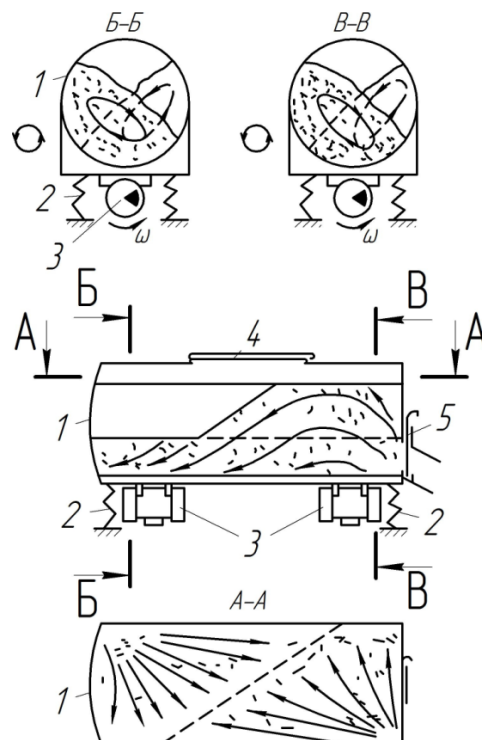


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема вибрационного смесителя периодического действия:
1 – корпус камеры смешивания;
2 – опорные пружины; 3 – вибровозбудители;
4, 5 – загрузочное и выгрузное устройства

В связи со сказанным большой интерес представляют аналитические закономерности перемещения материала в камере смешивания, позволяющие внести изменения в конструкцию вибросмесителя.

На рисунке 1 представлены траектории материала, наблюдаемые в натурном эксперименте. Как видно, картина очень сложна и требует соответствующего математического аппарата.

Цель исследования – повышение эффективности вибрационного смесителя на основе математического моделирования процессов виброперемещения потоков рабочей среды в камере смешивания.

Методы исследования

Известные подходы к моделированию движения рабочей загрузки смесителей чаще всего связаны с использованием модели одиночной (единичной) модели. В связи с ее недостатками чаще всего не удается получить реалистичную картину динамики слоя [4]. В связи с этим мы применим модель смешиваемого материала как сплошной среды.

Сыпучую среду, находящуюся в камере смешивания вибросмесителя, будем моделировать в виде вязкой жидкости. Движение среды в целом является ламинарным, за исключением небольших участков турбулентности на границе столкновения встречных потоков. Согласно гидродинамической аналогии в этом случае целесообразно использовать уравнения движения Навье-Стокса. Для удобства описания перейдем к цилиндрическим координатам r, φ, y_1 (рис. 2).

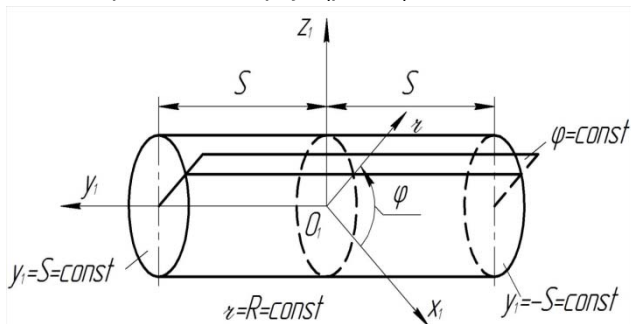


Рис. 2. Система поверхностей круговых цилиндрических координат корпуса смесителя и их связь с декартовыми координатами $o_1 x_1 y_1 z_1$.

Три компоненты уравнения Навье-Стокса в этих координатах имеют вид (индекс 1 оси y в дальнейшем опущен)

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)v_r - \frac{v_\varphi}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)v_\varphi - \frac{v_r v_\varphi}{r} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)v_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &+ \nu \Delta v_y, \end{aligned} \quad (1)$$

причем операторы $(\vec{V}\nabla)$ и Δ определяются следующим образом

$$\begin{aligned} (\vec{V}\nabla) &= v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + v_y \frac{\partial}{\partial y}; \\ \Delta &= \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \end{aligned}$$

Сюда нужно присоединить уравнение неразрывности (непрерывности)

$$\frac{1}{r} + \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Будем рассматривать установившееся движение сыпучего материала, вследствие чего все локальные производные типа $\partial v_r / \partial t$ обращаются в нуль. При этом не нужно задавать начальные условия, а лишь граничные. Для формирования последних важно подчеркнуть, что каждый из вибровозбудителей генерирует круговые (фактически эллиптические) колебания, характеризующиеся определенным направлением обегания траектории. Таким образом, можно говорить о кинематической анизотропии в системе взаимодействия материала со стенками камеры смешивания и наличии фрикционного виброперемещения в системе.

Поэтому в данном случае, учитывая также ламинарность потока материала, действие вибрации можно представить не в виде объемной вибрационной силы, а в виде поверхностной (терминология И.И. Блехмана) [5], приводящей к циркуляции сыпучей среды.

В практике вибротранспортирования установлено, что скорость виброперемещения, в данном

случае v_φ , может быть рассчитана по упрощенной формуле [5]

$$v_\varphi = kA\omega, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида колебаний, направления вибраций, свойств материала и т.д.;

A, ω – амплитуда и частота колебаний.

Тогда угловую скорость циркуляции сыпучей среды в проекциях на плоскость $y = y_i = const$ можно определить так

$$\Omega = \frac{v_\varphi}{R} = \frac{kA\omega}{R}. \quad (4)$$

Поэтому граничные условия, учитывающие различное направление циркуляции в левой и правой половинах корпуса смесителя, можно записать в виде

$$\begin{aligned} 1) v_r = 0; v_\varphi = \Omega r; v_y = 0 \text{ при } y = s; \\ 2) v_r = 0; v_\varphi = -\Omega r; v_y = 0 \text{ при } y = -s. \end{aligned} \quad (5)$$

Поставленная задача может быть сведена к гидродинамической задаче об увлечении жидкости вращающимися предметами, в частности диском (задача Кармана [6]).

Пользуясь приемом Кармана, решение уравнений движения (1) для нашего случая ищем в виде

$$\begin{aligned} v_r = r\Omega\psi_1(y_*); v_\varphi = r\Omega\psi_2(y_*); \\ v_y = \sqrt{V}\Omega\psi_3(y_*); p = -pV\Omega\psi_4(y_*); \end{aligned} \quad (6)$$

где $y_* = \sqrt{\Omega/V} \cdot y$.

В таком распределении радиальная v_r и круговая v_φ скорости пропорциональны расстоянию от оси симметрии корпуса смесителя, а горизонтальная скорость v_y постоянна вдоль каждой вертикальной плоскости.

Подстановка данных решений в уравнения Навье-Стокса и уравнение непрерывности приводит к нелинейным дифференциальным функциям, которые, являясь обыкновенными и с одной переменной.

$$\begin{aligned} \psi_1'' \cdot \psi_2^2 + \psi_1' \psi_3 = \psi_1''; 2\psi_1 \cdot \psi_2 + \psi_2' \psi_3 = \psi_2''; \quad (7) \\ \psi_3 \psi_3' = \psi_4' \psi_3'; 2\psi_1 + \psi_3' = 0. \end{aligned}$$

В этих уравнениях штрих означает дифференцирование по y_* . Краевые условия теперь запишутся в виде

$$\begin{aligned} 1) \psi_1 = 0; \psi_2 = 1; \psi_3 = 0 \text{ при } y_* = s_*; \\ 2) \psi_1 = 0; \psi_2 = -1; \psi_3 = 0 \text{ при } y_* = -s_*. \end{aligned} \quad (8)$$

Систему (7) интегрируем численно методом аппроксимирующих функций. Сущность этого метода заключается в том, что искомое решение представляется некоторой аппроксимирующей функцией, которая точно удовлетворяется краевым условиям и зависит от некоторых свободных коэффициентов [7]. Значения последних выбираются из условия равенства нулю невязки, являющейся характеристикой уклонения функции от неизвестного решения краевой задачи.

Результаты исследования

Априорная информация, содержащаяся в решении Кармана, позволяет в данном случае предложить аппроксимирующие функции в виде

$$\begin{aligned} \psi_{1*} = C_1 \cos\left(\frac{3\pi}{2} \cdot \frac{y_*}{s_*}\right); \\ \psi_{2*} = -y_*^3 / s_*^3; \\ \psi_{3*} = C_3 \sin\left(\frac{\pi y_*}{s_*}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

где C_1, C_2 – коэффициенты аппроксимации.

На рисунке 3 приведены графики функций $\psi_i = \psi_i(y_*)$, полученные для следующих значений параметров: $R = 0,2$ м; $L = 1,2$ м; $\nu = 19,8 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $A = 2$ мм; $\omega = 295$ рад/с; $k = 0,5$; $s_* \approx 5$.

Значения коэффициентов C_1 и C_3 были подсчитаны по схеме коллокаций: $C_1 = -0,291$ и $C_3 = 0,926$.

Обращение к рисунку 3 позволяет заключить, что сыпучая среда в процессе вибросмешивания совершает сложное пространственное перемещение. Интенсивность возникающих циркуляций определяется параметрами вибрации и реологическими свойствами среды. Система вибровозбуждения смесителя обеспечивает наличие радиальной, тангенциальной и аксиальной составляющих движения.

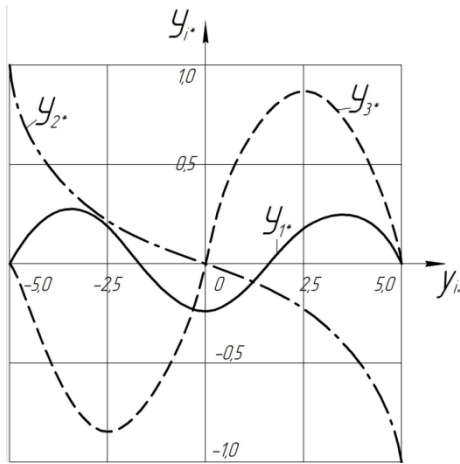


Рис. 3. Графики функций, аппроксимирующих движение сыпучей среды в процессе вибрационного смешивания

Возникновение их можно объяснить следующим образом. Вибрационное воздействие торцов и боковых стенок корпуса смесителя приводит первоначально лишь к тангенциальной циркуляции материала. Под действием развившихся центробежных сил появляется радиальная составляющая скорости, в результате чего наблюдается отток части материала к боковым стенкам корпуса. Для восполнения этого оттока часть материала в центре камеры втягивается в обратное радиальное движение, а также аксиальное, скорость которого равна v_y . Именно появление последней составляющей движения способствует интенсивному перемешиванию среды. Это положение справедливо для любых типов смесителей и достигается чаще всего применением шнеков, установки под некоторым углом к продольной оси лопастей, мешалок и т.д. Подчеркнем, что в изучаемом вибрационном смесителе аксиальное движение среды достигнуто без применения каких-либо специальных рабочих органов, а лишь посредством задания определенных законов вибрации корпуса.

Сравнение с экспериментальной картиной (рис. 1) циркуляций сыпучей среды в вибрирующей камере смешивания показывает, что полученная теоретическая схема в целом правильно описывает особенности движений, однако не учитывает пересыпание смеси по свободной (верхней) ее поверхности. В связи с этим не удалось показать обратные токи среды вдоль оси u .

Анализ выражений (6) и (9), определяющих собой скорости среды по всем направлениям координатных осей, позволяет заключить, что по параметрам вибрации A и ω экстремума не наблюдается. Их увеличение непрерывно интенсифицирует циркуляцию среды и, следовательно, процесс вибросмешивания в целом. Таким образом, процессом смешивания легче всего управлять, учитывая применение дебалансных вибровозбудителей, изменением амплитуды колебаний.

В экспериментах смешиванию подвергали пшеничную дерть и семена ячменя, которые служили контрольным компонентом процесса смешивания и вводились в количестве 1% к массе всей смеси. Условия опыта характерны для приготовления комбикормов и различных добавок при использовании в качестве наполнителя дерти. Опыты проводили для встречного и одинакового направления вращения дебалансных валов вибровозбудителей. В последнем случае условия смешивания являлись такими же, как и в случае использования одного, но более мощного вибровозбудителя.

Полученные кривые вибросмешивания (рис. 4) позволяют заключить, что встречное вращение дебалансов дает более высокую однородность смешивания, чем их вращение в одинаковом направлении. Разница в однородности смеси достигает 30%. Можно также утверждать о том, что использование двух вибровозбудителей (при встречном вращении их дебалансных валов) вместо одного той же суммарной мощности существенно интенсифицирует процесс смешивания сыпучей среды и позволяет достичь лучшей однородности кормосмеси. Следует обратить внимание на то, что максимальная однородность смеси достигается в вибрационном смесителе за 2-3 мин. В известных же смесителях того же назначения это время равно 5-10 и даже 15 мин.

Таким образом, теория и эксперимент подтверждают, что совершенствование смесителя следует вести с использованием встречного, а не одинакового направления вращения дебалансов вибровозбудителей. Полученная картина перемещений кормового материала позволяет наме-

тить конструктивные способы совершенствования машины как смесителя-дозатора.

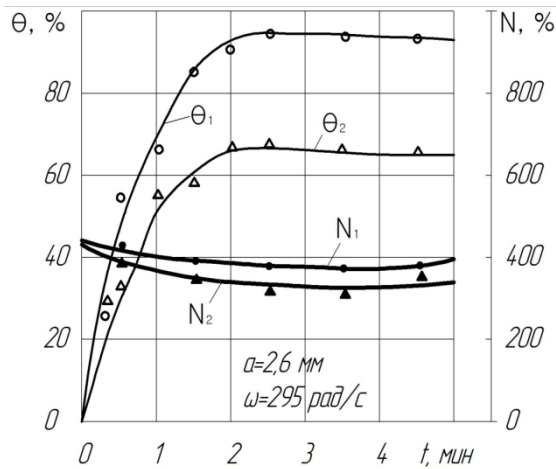


Рис. 4. Изменение однородности смеси θ и потребляемой мощности N во времени: 1 – встречное вращение дебалансных валов; 2 – вращение дебалансных валов в одинаковых направлениях. Материал: дерть пшеничная ($W=11,7\%$) и семена ячменя

Выводы

1. Разработанная аналогия между движением вязкой жидкости и сыпучей средой при вибрациях позволила выявить картину движения сыпучего кормового материала в камере смешивания, констатировать появление аксиальной скорости – неперемного условия качественного смешивания в смесителях любого типа.

2. Полученные данные позволяют, в частности, оптимально расположить зоны ввода исходных компонентов и выгрузки готовой кормосмеси.

3. Данная теория и эксперимент еще раз подтверждают, что совершенствование смесителя следует вести с использованием встречного, а не одинакового направления вращения дебалансных вибровозбудителей.

Библиографический список

1. Федоренко И.Я. Механико-технологическое обоснование и разработка вибрационных кормоприготовительных машин: дис. ... докт. техн. наук / 05.020.01. – Челябинск, 1992. – 392 с.

2. Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монография. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 166 с.

3. Федоренко И.Я., Смышляев А.А. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры: учебное пособие для вузов. – М.: ФОРУМ, 2014. – 320 с.

4. Tatiana Tupolskikh. Simulation of the process of movement of bulk material in a vibrating conveyor-mixer / Tatiana Tupolskikh, Natalia Gucheva, and Oleg Kirishiev.- MATEC Web of Conferences 224, 05021 (2018).

5. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. – Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

7. Волков Е.А. Численные методы. – СПб.: Лань, 2008. – 256 с.

References

1. Fedorenko I.Ya. Mekhaniko-tehnologicheskoe obosnovanie i razrabotka vibratsionnykh kormopriготовitelnykh mashin: dis. ... dokt. tekhn. nauk / 05.020.01. – Chelyabinsk, 1992. – 392 s.

2. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. Vibriruemyy zernisty sloy v selskokhozyaystvennoy tekhnologii: monografiya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 166 s.

3. Fedorenko I.Ya., Smyshlyayev A.A. Proektirovanie tekhnicheskikh ustroystv i sistem: printsipy, metody, protsedury: uchebnoe posobie dlya vuzov. – M.: FORUM, 2014. – 320 s.

4. Tatiana Tupolskikh. Simulation of the process of movement of bulk material in a vibrating conveyor-mixer / Tatiana Tupolskikh, Natalia Gucheva, and Oleg Kirishiev. – MATEC Web of Conferences 224, 05021 (2018).

5. Blekman I.I. Vibratsionnaya mekhanika. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 s.

6. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. V 10 t., t. VI Gidrodinamika / L.D. Landau, Ye.M. Lifshits. – M.: Nauka, 1988. – 736 s.

7. Volkov Ye.A. Chislennyye metody. – SPb.: Lan, 2008. – 256 s.