

2. Belyaev V.I., Volnov V.V. Kontsepsiya formirovaniya resursosberegayushchikh tekhnologiy vozdeleyvaniya zernovykh kultur v Altayskom krae // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – No. 11. – S. 92-97.
3. Belyaev V.I. Tekhnicheskoe i tekhnologicheskoe obespechenie resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva zerna v Altayskom krae // Aktualnaya statistika Sibiri. – Informatsionno-statisticheskiy zhurnal. – 2013. – No. 1. – S. 72-81.
4. Belyaev V.I., Maynel T., Sokolova L.V. Formirovanie urozhaya yarovoy myagkoy pshenitsy po razlichnym predshestvennikam pri minimizatsii obrabotki pochvy v umerenno-zasushlivoy stepi Altayskogo kraya // Rol tseliny i perspektivy razvitiya zemledeliya i rastenievodstva Kazakhstana: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu osvoiniya tselinnykh i zaleznykh zemel. – Shortandy-Astana: Izd-vo NPTs zernovogo khozyaystva im. A.I. Baraeva, 2014. – S. 158-163.
5. Belyaev V.I., Maynel T., Kozhanov S.A., Tissen R., Belyaev V.V., Kozhanov N.A. Mezhdunarodnyy proekt «Kulunda»: obosnovanie innovatsionnykh kompleksov mashin i tekhnologiy vozdeleyvaniya selskokhozyaystvennykh kultur dlya stepnoy zony Altayskogo kraya // Agrarnaya nauka – selskomu khozyaystvu: sbornik statey: v 3 kn. / IX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (5-6 fevralya 2014 g.). – Barnaul: RIO AGAU, 2014. – Kn. 3. – S. 3-8.
6. Belyaev V.I. Ratsionalnye parametry tekhnologii «No-Till» i pryamogo poseva pri vozdeleyvanii selskokhozyaystvennykh kultur v Altayskom krae // Vestnik Altayskoy nauki. – 2015. – No. 1 (23). – S. 7-12.
7. Belyaev V.I. Pryamoy posev na Altae // Resursosberegayushchee zemledelie. – 2016. – No. 2 (30). – S. 8-14.
8. Belyaev, V.I., Sokolova, L.V., Kuznecov, V.N., Matsyura, A.V. (2017). Effect of sowing aggregates on sowing quality of spring soft wheat (the case of moderate dry-forest steppe, Altay region). Ukrainian Journal of Ecology. No.7 (3): 258-263.
9. Belyaev, V.I., Rudev, N.V., Maynel, T., Kozhanov S.A., Sokolova L. V., Matsyura, A.V. (2017). Effect of sowing aggregates for direct sowing, sowing seeding rates and doses of mineral fertilizers on spring wheat yield in the dry steppe of Altai Krai. Ukrainian Journal of Ecology. No. 7 (4): 145-150.
10. Belyaev V.I., Maynel T., Gryunvald L., Sokolova L.V., Kuznetsov A.V., Matsyura A.V. Vliyanie tekhnologii vozdeleyvaniya yarovoy myagkoy pshe-nitsy, gorokha i rapsa na vodnyy rezhim pochvy i urozhaynost. – Ukrainian Journal of Ecology, 2018, No. 8 (1), s. 873-879.
11. 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.



УДК 631.363:634.1

**И.Я. Федоренко**  
I.Ya. Fedorenko

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С КОРМОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

### MODELING OF INTERACTION OF VIBRATING WORK PARTS WITH FEED MATERIALS: PRINCIPLES, METHODS, RESULTS

**Ключевые слова:** вибрационные кормоприготовительные машины, слой корма, динамическое поведение, критерии подобия.

**Keywords:** vibrating feed production machines, feed layer, dynamic behavior, similarity criteria.

При разработке вибрационных кормоприготовительных машин важнейшую роль играет моделирование взаимодействия вибрационных рабочих органов с обрабатываемой технологической средой. Этот этап во многом определяет структурный и параметрический облик будущей машины. Предложена классификация вибрационных технологических процессов, в основу которой положен комплекс условий, характеризующих обрабатываемый кормовой материал в виде свободного или стесненного слоя. В отдельную группу выделены технологические процессы с преобладанием фрикционного сопротивления в механической системе. Динамику свободного слоя сыпучего корма характеризует модель Лоренца, разработанная ее автором для объяснения тепловой конвекции в вязкой жидкости. Для возможности применения этой модели нами развита аналогия в движениях жидкости при ее подогреве и движениях сыпучего материала при действии вибраций. В вибрируемом стесненном слое кормового материала возникают специфические явления, обусловленные ускорением процессов релаксации напряжений и ползучести деформаций. Эти явления не могут быть объяснены при помощи теории линейной вязкоупругости, поэтому была предложена нелинейная модель, являющаяся модернизацией модели Бюргерса. Методы подобия и размерности эффективно дополняют аналитические методы решения задач взаимодействия вибрационных рабочих органов и кормовых материалов, поскольку эти взаимодействия сложны и не имеют строгой математической постановки.

In the development of vibrating machines for feed preparation, the most important role is played by the simulation of the interaction of the vibrating working parts with the processed technological medium. This stage largely determines the structural and parametric appearance of the future machine. A classification of vibration technological processes based on a set of conditions characterizing the processed feed material in the form of a free or limited layer is proposed. Technological processes with frictional resistance predominance in the mechanical system were combined into a separate group. The free layer dynamics of flowing feed is characterized by the Lorentz model developed by its author for explaining thermal convection in a viscous fluid. To apply this model, we have developed an analogy in the movements of the fluid during heating and the movements of the bulk material under the action of vibrations. In the vibrated constrained layer of feed material there are specific phenomena caused by the acceleration of the relaxation processes of stress and creep deformation. These phenomena cannot be explained using the linear viscoelasticity theory, and therefore, a nonlinear model was proposed which is a modification of Burger's equation. The methods of similarity and dimension effectively complement the analytical methods for solving the problems of interaction between vibrating working parts and feed materials, since these interactions are complex and do not have a rigorous mathematical formulation.

**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

Длительные исследования Южно-Уральского, Алтайского ГАУ и других организаций показали, что перспективным направлением технического прогресса в кормоприготовлении является полезное использование вибраций [1-7]. Это универсальное средство воздействия на кормовые материалы. При помощи вибраций можно уплотнять и разрыхлять, разделять по плотности и крупности, смешивать и проводить другие операции по механической обработке кормов.

Однако применение вибromетода для приготовления кормов в животноводстве поставило много сложных научных проблем, в частности обусловленных сложными физико-механическими и реологическими свойствами кормов, нелинейностью уравнений, характеризующих взаимодей-

ствие вибрационных рабочих органов и материала, и т.д.

Поэтому **целью** работы является изложение опыта Алтайского ГАУ по моделированию взаимодействия вибрационных рабочих органов с обрабатываемой кормовой средой.

В процессе выполнения научной работы «Развитие теории вибрационных машин различного целевого назначения для разработки высокоэффективных технологических процессов в АПК» (№ г. р.01201157188) решались и решаются следующие **задачи**:

- разработать элементы динамики сыпучей кормовой среды;
- установить методы прогноза деформационного поведения кормовых материалов и на этой

основе способы управления реологическим состоянием кормов;

- выявить механизмы и закономерности внешнего и внутреннего трения кормовых материалов;

- провести экспериментальные исследования для подтверждения отдельных теоретических закономерностей и обоснования режимно-технологических параметров вибрационных кормоприготовительных машин;

- выработать рекомендации по оптимальному проектированию вибрационных рабочих органов;

- корректировать технологии хозяйственного приготовления комбикормов на основе использования машин вибрационного действия;

- обобщать и оценивать результаты исследований.

В работе раскрываются и обобщаются результаты решения этих задач.

#### **Общие методологические подходы**

Опыт свидетельствует, что для разработки вибрационных кормоприготовительных машин приемлема схема исследований, включающая проведение теоретических исследований, а также экспериментов с отбором существенных факторов процесса, уменьшением размерности факторного пространства, дополнительным отсеиванием факторов, математическим планированием экспериментов и, наконец, поиском и принятием решений по полученным регрессионным моделям (рис. 1).

Решение рассматриваемых оптимизационных задач опирается, главным образом, на понятие качества работы машин (однородности кормовой смеси, неравномерности дозирования ингредиентов, степени измельчения корма и т.д.). Характеристики этих свойств могут быть измерены или рассчитаны на основе существующих методик.

Постановка задачи оптимизации вибрационных рабочих органов состоит в максимизации или минимизации критерия качества кормосмеси, также других критериев, характеризующих технический уровень разработки.

Решение задач оптимизации качества выполнения технологического процесса предполагает

наличие математических моделей – зависимостей показателей качества от входных параметров. Поскольку теория вибрационных процессов разработана недостаточно, то оптимизация осуществляется, главным образом, на основе экспериментальных исследований с получением регрессионных математических моделей.

Обратимся теперь к рассмотрению классификации технологических вибрационных процессов приготовления кормов. Такая классификация помогает выработать некоторые общие теоретические подходы и приемы конструирования кормоприготовительных машин, использующих вибрации в качестве инструмента воздействий на обрабатываемую среду.

Известно, как важно при этом выбрать главный классификационный признак. По нашему мнению, им должен быть не вид и род вибраций (прямолинейная, круговая, случайная, детерминированная, вертикальная, горизонтальная и т.д.), не вид технологического процесса или операции (смешивание, уплотнение, разделение и т.д.), а совокупность условий (в том числе граничных) взаимодействия исполнительного органа и рабочей среды.

В связи со сказанным мы разделяем все вибрационные технологические процессы, в первую очередь, не осуществляемые в открытом и стесненном слоях материала (рис. 2). В первом случае одна из границ материала (как правило, верхняя) является открытой (свободной), а зона распространения вибраций сопоставима с высотой слоя. Во втором случае материал испытывает трехосное сжатие или стеснение граничными поверхностями.

Такое разграничение связано с тем обстоятельством, что в открытом слое ведущую роль в формировании движения частиц играют силы инерции и силы тяжести, а также аэродинамические сопротивления. Во втором случае эти силы малы в сравнении с действующими силами сжатия. Например, при гранулировании и брикетировании давление в слое достигает 30-40 МПа. В этих условиях силы тяжести в слое не имеют существенного значения и могут не учитываться при

теоретическом анализе данных процессов. Следовательно, приходим к выводу, что для свободного и стесненного слоя материала, обрабатываемого вибрацией, должны быть построены разные математические модели.

Это следует также из того положения, что в стесненном слое распространение вибрационных возмущений (волн) и их энергии не связано с переносом вещества, в то время как в открытом слое перенос вещества имеет место вследствие циркуляционных движений составляющих среды.

Как видно из рисунка 2, наиболее многочисленны технологические процессы, осуществляемые в открытом слое. В таких условиях можно проводить прямо противоположные по назначению операции, например, смешивание и сепарацию. Характерно, что в группу процессов, осуществляемых в открытом слое, отнесено и уплотнение материала под действием сил тяжести, в то время как процессы гранулирования, брикетирования, уплотнения силоса и сенажа в ямах и башнях выделены в группу процессов, протекающих в стесненном слое.

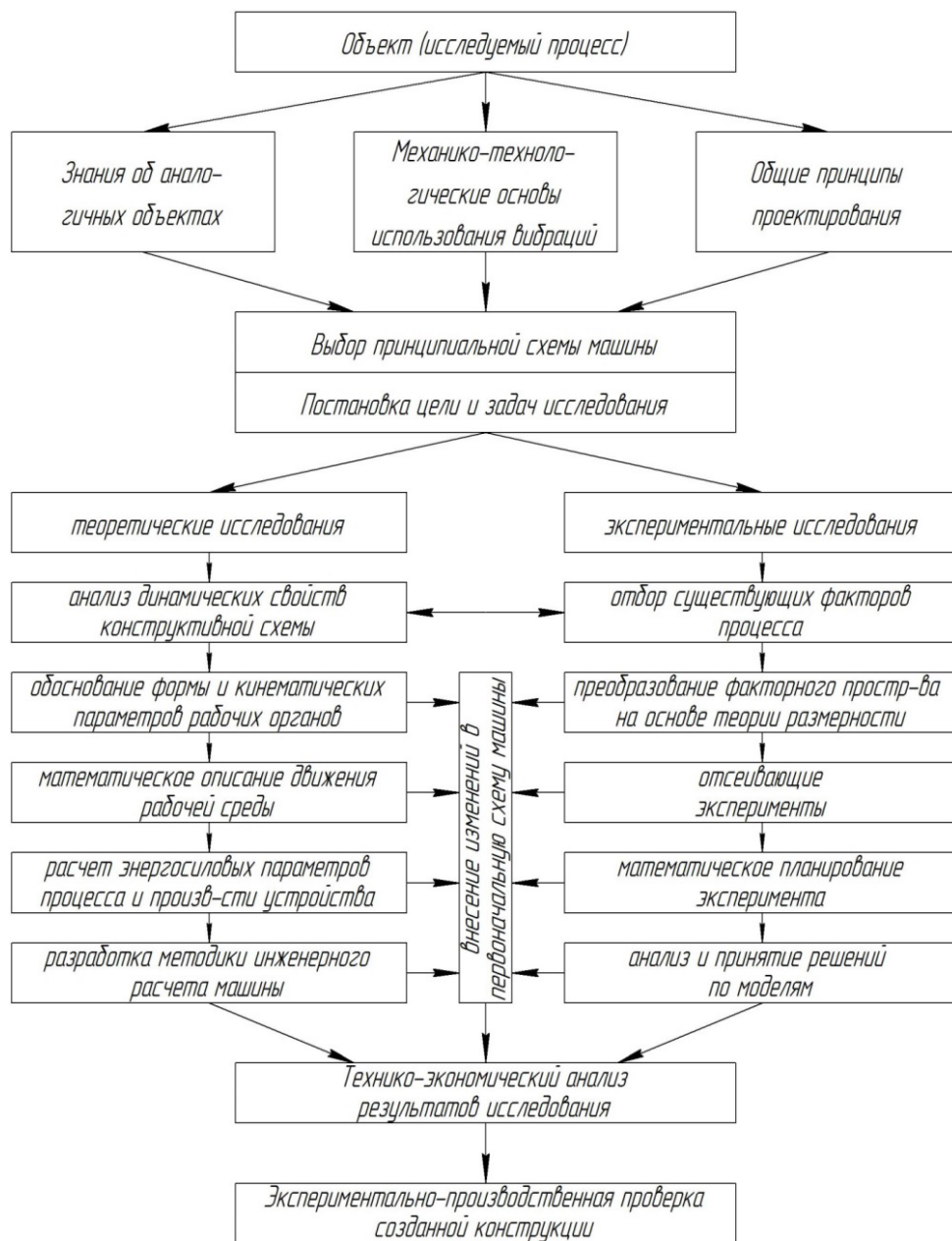


Рис. 1. Схема исследования и разработки вибрационных кормоприготовительных машин





**Рис. 2. Классификация вибрационных технологических процессов приготовления кормов**

В отдельную группу выделены также процессы, главные взаимодействия которых протекают в зоне фрикционного взаимодействия исполнительного органа и рабочей среды. Процессы распространения вибраций в толщу материала, возникновение циркуляционных потоков частиц и т.д. здесь либо не возникают, либо не имеют существенного значения. В этом случае обрабатываемый материал можно моделировать сплошным твердым телом или представлять совокупностью отдельно движущихся частиц. Главная отличительная особенность этой группы процессов – существенная роль явления вибрационного преобразования внешнего трения.

Очевидно, что эта группа технологических процессов также требует своих специфических математических моделей.

### Результаты моделирования и их обсуждение

**Свободный слой сыпучего кормового материала.** Из экспериментов известно, что слой кормового материала может проявлять при вибрациях как детерминированное (правильные циркуляции), так и стохастическое поведение (беспорядочное виброкипение). При малом же вибрационном воздействии циркуляций частиц нет, однако происходит небольшое уплотнение слоя сыпучего материала.

Принципиальным является вопрос о том, какие динамические силы поднимают поток частиц вверх при циркуляциях среды. Здесь нужно выделить одну частицу и рассматривать три принципиально различающихся случая:

1) частица имеет размеры, сопоставимые с размерами других частиц, но их плотности разные, т.е.  $\rho_1/\rho_0 \neq 1$  (где  $\rho_1$  – плотность выделенной частицы,  $\rho_0$  – плотность частиц, окружающих выделенную);

2) плотности частиц одинаковы, но выделенная частица по размеру много больше частиц, ее окружающих. В этом случае  $\rho_1/\rho_0 \neq 1$ , но под  $\rho_0$  следует подразумевать плотность среды (т.е. среднюю плотность среды, состоящую из частиц и воздуха, окружающую выделенную частицу), зависящую от её порозности;

3) размеры и плотность частиц практически одинаковы (цельное зерно различных сельскохозяйственных культур).

В первых двух случаях при вибрациях слоя частица, отличающаяся по плотности или размерам от соседних, при определенных условиях, обусловленных соотношением переносной силы инерции и сил сопротивления, начинает проскальзывать относительно друг друга. При этом возникают силы сухого трения, а также их асимметрия при движении частицы вверх и вниз. Это и приводит к направленному движению отдельных частиц, в том числе возможно движение и вверх [8].

В третьем случае относительного проскальзывания частиц нет, и возникновение восходящих потоков частиц можно объяснить лишь действием осциллирующего воздушного потока, который генерируется вибрирующими рабочими органами.

Теоретический анализ позволил установить, что осциллирующий воздушный поток способен

создавать подъемную силу, но для этого нужно учесть затухание вибраций по мере удаления от вибрирующего рабочего органа. Осциллирующий воздушный поток как бы выталкивает частицы в зону, где вибрационное воздействие мало, т.е. вверх.

Эксперименты подтверждают существенную роль воздушного потока в формировании динамики свободного слоя. Так, при создании вакуума (до 60 кПа) в вибрирующей емкости, где находился виброкипящий слой сыпучего материала, внутрислойные процессы существенно уменьшались [2]. При вибрировании воздухонепроницаемого слоя (измельченный мел, мука и т.п.) он целиком поднимается вверх на некоторую высоту (левитирует), причем между днищем и слоем образуется воздушная подушка (наверно).

Все это говорит о том, что роль воздушного потока недооценивается, более того, не учитывается в большинстве исследований по виброкипящему слою.

Наличие подъемной силы в слое сыпучего материала, подвергаемого вибрациям, позволило развить гидродинамическую аналогию с поведением слоя вязкой жидкости, подогреваемого снизу. В пользу такой аналогии говорит картина динамического поведения этих систем, включающая три стадии развития (покой, детерминированное и стохастическое движение составляющих среды), а также наблюдение нами на поверхности вибрируемого слоя сыпучего материала структуры типа «зигзаг» [1]. Интересно, что в вязкой жидкости и сыпучем материале качественные перестройки (бифуркации) описываются одной и той же моделью – аттрактором Лоренца [1-3].

Нами накоплен большой опыт по использованию в исследованиях теории размерности. В частности, для процессов в свободном слое существенны три критерия:

$$\pi_1 = \frac{A\omega^2}{g} - \text{коэффициент перегрузки};$$

$$\pi_2 = \frac{A\omega h}{\nu} - \text{вибрационный аналог числа Рейнольдса};$$

$$\pi_3 = \frac{h}{D} - \text{масштабный фактор}.$$

В перечисленных критериях:  $A, \omega$  – амплитуда и угловая частота колебаний;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h, D$  – геометрические размеры слоя сыпучего материала;  $\nu$  – эффективная вязкость слоя.

Теория размерности дает еще один критерий –  $d/D$  ( $d$  – характерный размер частиц корма). Однако этот критерий обычно является несущественным, поскольку для сельскохозяйственных материалов  $d \ll D$ .

Полученные критерии подобия позволяют объединить математическое и физическое моделирование. Эти критерии, с одной стороны, входят как параметры в уравнения Лоренца, а с другой, позволяют уменьшить число факторов при проведении эксперимента, а также строить типоразмерный ряд вибрационных машин различной производительности, но со сходными качественными и энергетическими показателями.

Сейчас известно несколько физических систем, динамическое поведение в которых описывается моделью Лоренца: уже упомянутая тепловая конвекция в слое вязкой жидкости, домены Вильямса в жидких кристаллах (нематиках), конвекция в замкнутой трубке, водяное колесо, одномодовый лазер. В эту же группу попадает и наша простая система в виде слоя сыпучего материала, находящегося в вибрируемом контейнере. Поэтому изучение данной системы должно проводиться с привлечением самых современных методов нелинейной механики, основу которой составляют представления о динамическом хаосе и диссипативных структурах.

**Стесненный слой.** Для стесненного слоя актуальна научная задача определения сопротивления сжатию, а также эволюция этого сопротивления во времени (релаксация) напряжений. В связи со сказанным встает проблема обоснованного выбора соответствующей реологической модели стесненного слоя материала органического происхождения.

Деформирование самих частиц при сжатии, движение воздуха в порах, сухое трение при скольжении частиц друг о друга, распространение волн – основные факторы, определяющие слож-

ное реологическое поведение стесненного слоя кормового материала при воздействии знакопеременной нагрузки.

Как показывают эксперименты, механическое поведение кормовых материалов в связи с перечисленными явлениями в значительной степени зависит от времени. Такое поведение называют вязкоупругостью, или наследственной упругостью. Она проявляется в виде ползучести при постоянном напряжении, релаксации напряжений при постоянной деформации, а также зависимостью диаграмм «давление – деформация» от скорости нагружения.

Нами было показано, что ряд практических задач возможно решать с привлечением теории линейной вязкоупругости. Речь идет о распространении волн в вязкоупругом теле, оценке зоны затухания и т.д. [3].

В то же время явления ускорения процессов ползучести и релаксии невозможно объяснить с помощью теории линейной вязкоупругости. В свете сказанного нами предложена механическая модель слоя кормового материала, отражающая основные экспериментальные факты воздействия вибраций: ускорение релаксации напряжений и ползучести деформации, уменьшение потребной нагрузки для сжатия слоя, сокращения цикла последствия (обратного расширения спрессованного образца). Модель представляет модернизацию известной модели Бюргерса, в которую добавили инерционный элемент, а один из катарактов заменили парой Сен-Венана [3].

При статическом сжатии основное уравнение прессования может быть записано в виде [4]

$$p = cz^m,$$

где  $p$  – потребное давление, Па;

$z$  – относительная плотность;

$c, m$  – экспериментально определяемые коэффициенты ( $[c] = \text{Па}$ ;  $m$  – безразмерен).

Относительная плотность слоя

$$z = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{x}{h-x} = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon},$$

где  $\rho, \rho_0$  – текущая и начальная плотность корма в слое, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – высота слоя кормового материала, м;

$x$  – перемещение поршня (штемпеля), м;

$\varepsilon = x/h$  – относительная деформация слоя, м.

Если же на слой действует знакопеременная нагрузка, то

$$p = p_0 + p_A \sin \omega t,$$

где  $p_0, p_A$  – среднее и амплитудное значение давления на единичную площадку слоя, Па;

$\omega$  – угловая частота колебаний нагрузки, с<sup>-1</sup>;

При действии вибрационной нагрузки следует также учесть:

$T$  – время действия закономерной нагрузки, с;

$T_p$  – время релаксации напряжений в статических условиях, с;

$f$  – коэффициент внешнего трения материала о контейнер (стенки прессовальной камеры).

Используя перечисленные величины, определяющие данное физическое явление (процесс вибрационного прессования), можно получить критерии подобия

$$\left( \frac{x}{h}; \frac{p_A}{p_0}; \frac{T_p}{T}; \omega T; \frac{h}{D}; \frac{P_0}{\rho_0 h^2 \omega^2}; \mu, m, f \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона (коэффициент бокового распора).

Если нас интересует, например, относительная деформация слоя  $\varepsilon = x/h$ , то выражение (1) можно представить так

$$\varepsilon = \varphi \left( \frac{p_A}{p_0}; \frac{T_p}{T}; \omega T; \frac{h}{D}; \frac{P_0}{\rho_0 h^2 \omega^2}; \mu, m, f \right),$$

где  $\varphi$  – некоторая неизвестная функция, подлежащая определению в эксперименте.

Среди полученных критериев можно выделить ранее известные критерии. Так, критерий Деборы  $\pi_3 = T_0/T$  определяет собой степень проявления слоем упругих и вязких сопротивлений. Критерий  $\pi_5 = P_0/(\rho_0 h^2 \omega^2)$  носит название критерия Эйлера и определяет соотношение между статическим и динамическим напряжением в слое.

Простой физический смысл имеют и другие критерии подобия. Их много, поэтому основному эксперименту должен предшествовать отсеивающий эксперимент.

**Процессы с преобладанием фрикционного сопротивления.** Для таких процессов обычно легко написать дифференциальные уравнения, которые являются нелинейными в связи с нали-

чем сухого трения. Из всех известных методов решения дифференциальных уравнений для таких систем наиболее приемлемы методы гармонического баланса и прямого разделения движений И.И. Блехмана. Последний метод как раз и разработан для систем, результирующее движение  $x(t)$  которых можно представить в виде

$$X(t) = X(t) + \xi(\omega t),$$

где  $X(t)$  – медленное движение;

$\xi(\omega t)$  – быстрое (вибрационное) движение, которое накладывается на эволюционное  $X(t)$ .

Технологически требуемым является как раз движение  $X(t)$ , а движение  $\xi(\omega t)$  – вспомогательным.

При проведении вычислительных или реальных экспериментов важно оперировать критериями подобия. Для фрикционных систем, когда известны математические модели в виде дифференциальных уравнений, удобно использовать метод подобия, а не размерности.

Например, для виброрежущего устройства уравнение колебаний было записано в виде [9]

$$M\ddot{x} + F \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + V^2}} = \Phi_0 \sin \omega t,$$

где  $M$  – масса колеблющихся частей;

$F$  – сопротивление продукта резанию;

$V$  – скорость подачи продукта к вибрирующему ножу;

$\Phi_0$  – вынуждающая сила вибровозбудителя ( $\Phi_0 = me\omega^2$ , где  $m$  – масса дебаланса;  $e$  – его эксцентриситет,  $\omega$  – круговая частота колебаний).

После преобразований уравнение было записано в безразмерном виде с тремя критериями подобия:

$$\pi_1 = \frac{M}{m} \cdot \frac{V}{e\omega}; \pi_2 = \frac{F}{me\omega^2}; \pi_3 = \omega t.$$

Таким образом, вместо шести исходных параметров  $M, m, V, e, \omega, F, t$  получили всего лишь три критерия подобия. При этом ценность полученной информации возрастает, поскольку она носит обобщающий характер.

Изложенные принципы и методы исследований вибрационных процессов и устройств позволили создать различные конструкции дозаторов, смесителей, дробилок, пресс-грануляторов,

пресс-брикетировщиков и других машин, работающих на основе вибрационного воздействия на кормовые материалы. Эти разработки защищены 50 свидетельствами и патентами на изобретения. К сожалению, внедрение этих машин в производство идет на уровне единичных изделий или мелкосерийных партий. При таких масштабах мы неизбежно проиграем китайским изделиям подобного назначения [10].

## Выводы

1. При разработке вибрационных кормоприготовительных машин важнейшую роль играет моделирование взаимодействия вибрационных рабочих органов с обрабатываемой технологической средой. Этот этап во многом определяет структурный и параметрический облик будущей машины.

2. Предложена классификация вибрационных технологических процессов, в основу которой положен комплекс условий, характеризующих обрабатываемый кормовой материал в виде свободного или стесненного слоя. В отдельную группу выделены технологические процессы с преобладанием фрикционного сопротивления в механической системе.

3. Динамику свободного слоя сыпучего корма характеризует модель Лоренца, разработанная ее автором для объяснения тепловой конвекции в вязкой жидкости. Для возможности применения этой модели нами развита аналогия в движениях жидкости при ее подогреве и движениях сыпучего материала при действии вибраций.

4. В вибрируемом стесненном слое кормового материала возникают специфические явления, обусловленные ускорением процессов релаксации напряжений и ползучести деформаций. Эти явления не могут быть объяснены при помощи теории линейной вязкоупругости, поэтому была предложена нелинейная модель, являющаяся модернизацией модели Бюргера.

5. Методы подобия и размерности эффективно дополняют аналитические методы решения задач взаимодействия вибрационных рабочих органов и кормовых материалов, поскольку эти взаимодей-



ствия сложны и не имеют строгой математической постановки.

### 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. Вибрационные процессы и устройства в АПК: монография. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2016. – 289 с.
4. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учеб. пособие для вузов. – М.: Форум, 2011. – 176 с.
5. Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Литаш А.В. Инновационная разработка по вибрационному дозированию сыпучих кормов // Актуальные вопросы агроинженерных наук: теория и практика: матер. национ. науч. конф. Института агроинженерии / под ред. М.Ф. Юдина. – 2018.
6. Сабиев У.К., Яцунов А.Н. Виброударная технология и техника для приготовления комбикормов в условиях сельскохозяйственных предприятий // Эффективное животноводство – залог успешного развития АПК региона: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 279-285.
7. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г. Вибрационные машины и технологии для переработки гранулированных сред. – Старый Оскол, 2014.
8. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
9. Федоренко И.Я., Смышляев А.А. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры: учебное пособие для вузов. – М.: ФОРУМ, 2014. – 320 с.
10. China Vibration Machine | Manufacturers & Suppliers. – Режим доступа: [www.made-in-china.com/hot-products/bulk-buying](http://www.made-in-china.com/hot-products/bulk-buying).

### References

1. Fedorenko I.Ya. Mekhaniko-tehnologicheskoe obosnovanie i razrabotka vibratsionnykh kormopriготовителnykh mashin: dis. ... dok. tekhn. nauk / 05.020.01. – Chelyabinsk, 1992. – 392 s.
2. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. Vibriruemyy zernistyuy sloy v selskokhozyaystvennoy tekhnologii: monografiya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 166 s.
3. Fedorenko I.Ya. Vibratsionnye protsessy i ustroystva v APK: monografiya. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2016. – 289 s.
4. Fedorenko I.Ya. Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov: ucheb. posobie dlya vuzov. – M.: Forum, 2011. – 176 s.
5. Sergeev N.S., Nikolaev V.N., Litash A.V. Innovatsionnaya razrabotka po vibratsionnomu dozirovaniyu syuchikh kormov // V sb.: Aktualnye voprosy agroinzhenernykh nauk: teoriya i praktika. Materialy natsionalnoy nauchnoy konferentsii Instituta agroinzhenerii. Pod red. M.F. Yudina. – 2018.
6. Sabiev U.K., Yatsunov A.N. Vibroudarnaya tekhnologiya i tekhnika dlya prigotovleniya kombikormov v usloviyakh selskokhozyaystvennykh predpriyatiy // V sb.: Effektivnoe zhivotnovodstvo – zalog uspeshnogo razvitiya APK regiona. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – 2017. – S. 279-285.
7. Yatsun S.F., Loktionova O.G. Vibratsionnye mashiny i tekhnologii dlya pererabotki granulirovannykh sred. – Staryy Oskol, 2014.
8. Blekman I.I. Vibratsionnaya mekhanika. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 s.
9. Fedorenko I.Ya., Smyshlyaev A.A. Proektirovanie tekhnicheskikh ustroystv i sistem: printsipy, metody, protsedury: uchebnoe posobie dlya vuzov. – M.: Forum, 2014. – 320 s.
10. China Vibration Machine. Manufacturers & Suppliers. – Rezhim dostupa: [www.made-in-china.com/hot-products/bulk-buying](http://www.made-in-china.com/hot-products/bulk-buying).

