УДК 631.36

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОГО СЛОЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ БУНКЕРНОГО ТИПА

Муханов Н.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Марченко С.А., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Барабанов Д.В.,ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Рябинин В.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Абалихин А.М., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА

Определяющими показателями сохранности зерна при длительном хранении являются его влажность и температура. Излишняя влага или повышенная температура могут привести к плесневению и к полной порче зернового материала. Для снижения влажности ниже критического уровня используют различные способы сушки и конструкции зерносушилок. Перспективными в этом направлении становятся зерносушилки, основанные на принципе активного вентилирования смесью воздуха и топочных газов, с конусно-кольцевыми камерами или наклонными поверхностями, контактирующими с зерновым материалом. Накопленный теоретический и практический опыт в исследовании позволяет составить схемы сил, действующих на зерновой материал в сушильных камерах различных зерносушилок. Данные схемы сил позволяют выделить основные и второстепенные факторы, оказывающие влияние на протекание технологического процесса сушки. Однако для повышения эффективности описываемого процесса в конусно-кольцевых камерах необходимо производить обоснованное принятие конструктивных параметров с целью создания оптимальных энергоэффективных режимов подачи агента сушки. Это возможно только через анализ модели, описывающей процессы движения, происходящие в сушилке. Уравнения, полученные на основе модельных представлений, описывают движение отдельно взятого тонкого слоя или элемент с малыми габаритами и позволяют опровергнуть или подтвердить выбранные начальные и граничные условия. При составлении уравнений для расчета скоростей движения зерна возникла необходимость в разработке стенда для определения свойств сыпучих материалов, позволяющего смоделировать протекание технологического процесса в конусно-кольцевой камере зерносушилки, с внесением изменений в протекающие исследования новых факторов и определить переменные для конечного уравнения.

Ключевые слова: *зерно; зерновой слой; рециркуляционная зерносушилка бункерного типа; сушильная камера; активная зона; уравнение движения.*

Для цитирования: *Муханов Н.В., Марченко С.А., Барабанов Д.В., Рябинин В.В., Абалихин А.М.* Уравнение движения зернового слоя в активной зоне рециркуляционной зерносушилки бункерного типа // *Аграрный вестник Верхневолжья. 2017. № 4 (21). С. 88-96.*

Введение. Важнейшей задачей при производстве зерна является его сохранность в течение длительного периода времени. Это связано с тем, что зерно представляет собой живой организм, который может погибнуть при несоблюдении определенных условий. Наиболее значимыми условиями сохранности зерна являются его влажность и температура.

Излишняя влага или повышенная температура могут привести к плесневению и даже к полной порче зернового материала. Влажность в значительной степени определяется методами

уборки зерна. Если в прошлом, после скашивания, зерно могло созревать и высыхать в неплотных снопах в поле до обмолота, что способствовало потере большой части влаги, то в настоящее время комбайновый способ уборки предполагает наличие в зерновом ворохе, находящегося в бункере зерноуборочного комбайна, примесей растительного и минерального происхождения. Частицы соломы, колосьев, сорняков и т.п., обладая большей, чем зерно влажностью, за счет гигроскопичности зерновок передают им часть своей влаги. Поэтому влажность зерна после уборки выше, чем его влажность до уборки. [1]

В настоящее время известно много способов удаления лишней влаги из зернового материала, но ведущую роль по-прежнему занимает термическая сушка, которая является одной из важных операций послеуборочной обработки собранного урожая для придания ему необходимого кондиционного состояния для длительного хранения.

Механизация и автоматизация процесса сушки зерна к уже имеющимся факторам добавила еще ряд факторов, оказывающих существенное влияние на этот процесс. С развитием сельскохозяйственного машиностроения ряд этих факторов удалось обосновать и дать рекомендации по режимам процесса сушки. Но что же делать с новыми инновационными конструкциями зерносушилок, в которых уже определенные факторы и показатели процесса сушки могут оказывать двойственное влияние? Применительно к конструкции рециркуляционной зерносушилки буккерного типа [2], разработанной коллективом автором в ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, к таким факторам следует отнести скорость прохождения слоя зерна через активную зону, время нагрева и охлаждения, частоту вращения центрального шнека.

Постановка проблемы исследования. В большинстве случаев в небольших сельскохозяйственных предприятиях для термической сушки используются конструкции бункерных зерносушилок или бункеров активного вентилирования. Общая конструктивная особенность таких установок заключается в наличии конусных оснований сушильных камер с подводом высушиваемого зернового материала к транспортирующим органам (нории, элеваторы, шнеки и т.д.). Вследствие этого конструкции различаются производительностью и эффективностью процесса сушки. При этом перед исследователями, занимающимися повышением эффективности процесса сушки, встают вопросы о взаимодействии зерна с наклонными поверхностями сушильных камер и конусных оснований.

Приступая к изучению вопроса о взаимодействии зерна с наклонными поверхностями, следует вначале определиться, что представляет собой отдельная зерновка и зерновой слой.

Итак, отдельно взятая зерновка представляет собой анизотропное коллоидное капиллярно-пористое тело с различным анатомическим строением основных частей – плодовые оболочки, зародыш и эндосперм. Плодовые оболочки, состоящие из нескольких слоев плотных клеточных стенок, содержат большое количеством микро- и макрокапилляров и микропор, через которые пары воды проникают как в зерно, так и в обратном направлении, из чего можно сделать вывод, что плодовые оболочки не являются препятствием для удаления влаги из зерна в процессе сушки. [3]

Различие в строении и химическом составе разных частей зерна определяет неравномерность распределения влаги в зерновке, что, в свою очередь, влияет на скорость обезвоживания и нагрева составных частей зерна. Все это необходимо учитывать при выборе и обосновании режимов сушки.

Но не стоит забывать, что зерно попадает в зерновые сушилки не как отдельный объект, а уже как полидисперсный зерновой материал, в связи с различием геометрических размеров зерновок. Во время проведения сушки более влажные зерна слипаются, чем зерна уже потерявшие часть влаги, это приводит к уменьшению межзернового пространства и к повышению гидродинамического сопротивления слоя потоку агента сушки, проходящему через зерновой слой [4].

Большое влияние на скорость сушки зернового материала, так и на другие параметры работы зерносушилок, определяющие производительность и качество сушки зерна, в большей степени оказывает толщина слоя зернового материала. Но по данным ученых В. Мальтри, Э. Пётке, Б. Шнайдера [5], увеличение толщины слоя влияет на скорость сушки всех видов зерна несущественно.

Цель исследования. Таким образом, целью исследования стал вывод уравнения движения зернового слоя в активной зоне сушильной камеры рециркуляционной зерносушилки бункерного типа и выяснения предпосылок к повышению эффективности процесса сушки за счет обоснования конструктивно-режимных параметров зерносушилки.

Результаты исследования. Достаточно мало на сегодняшний момент ответов о поведении зернового материала при воздействии агента сушки из-под наклонной перфорированной поверхности при разной скорости движении элементарных слоев.

Костромская научная школа исследует движение зернового слоя и воздействие различных параметров при его сушке на аэрожелобах [6], ими представлено три характерных варианта движения зерна: первый – когда сила тяжести, действующая на зерно, больше вертикальной составляющей от действия силы воздушного потока; второй – когда она равна вертикальной составляющей от действия силы воздушного потока; третий – она меньше вертикальной составляющей от силы воздушного потока. Для данной теории приводится схема сил, действующих на зерно при аэродинамической сушке на аэрожелобах (рис.1).

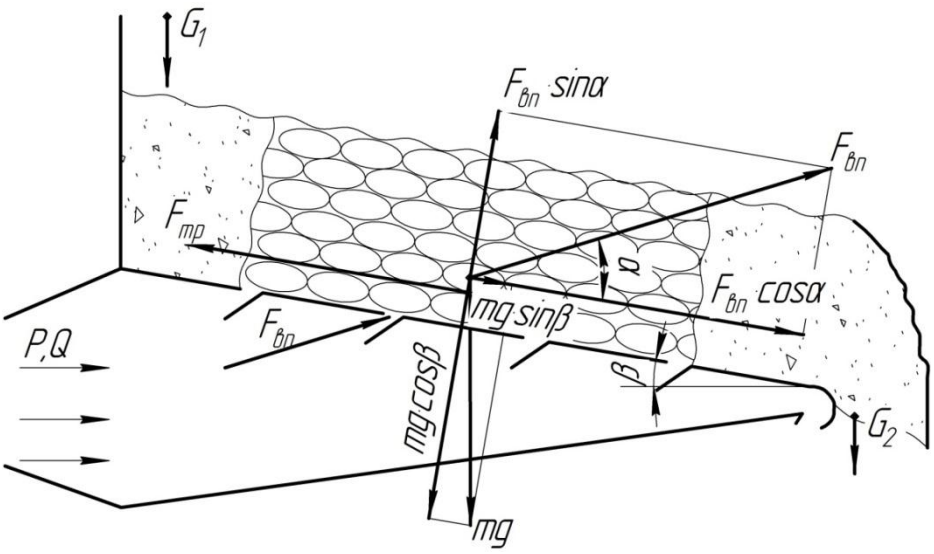


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на зерно [6]

G_1 – подача материала; $F_{тр.}$ – сила трения зерновки о зерновку; $F_{в.п.}$ – сила действия воздушного потока; $P_{а.с.}$, Q – соответственно напор и расход агента сушки; α – угол ввода агента сушки в зерновой слой; β – угол наклона грузонесущей перегородки к горизонту

В этой схеме учитывается трение между слоями зерна, как обычная сила скольжения, которая пропорциональна силе нормального давления на нижерасположенный слой. Такое распределение сил характерно для зернового слоя, расположенного на одной наклонной пластине или на аэрожелобе.

Для выбора оптимальных конструктивных параметров (длины и угла установки) наклонной поверхности, служащей перфорированным днищем сушильной камеры, важно определить распределение профиля скоростей для различных слоев движущегося зерна. Этот профиль в целом будет определяться законами динамики, а также действующими внутренними и внешними силами (рис. 2)

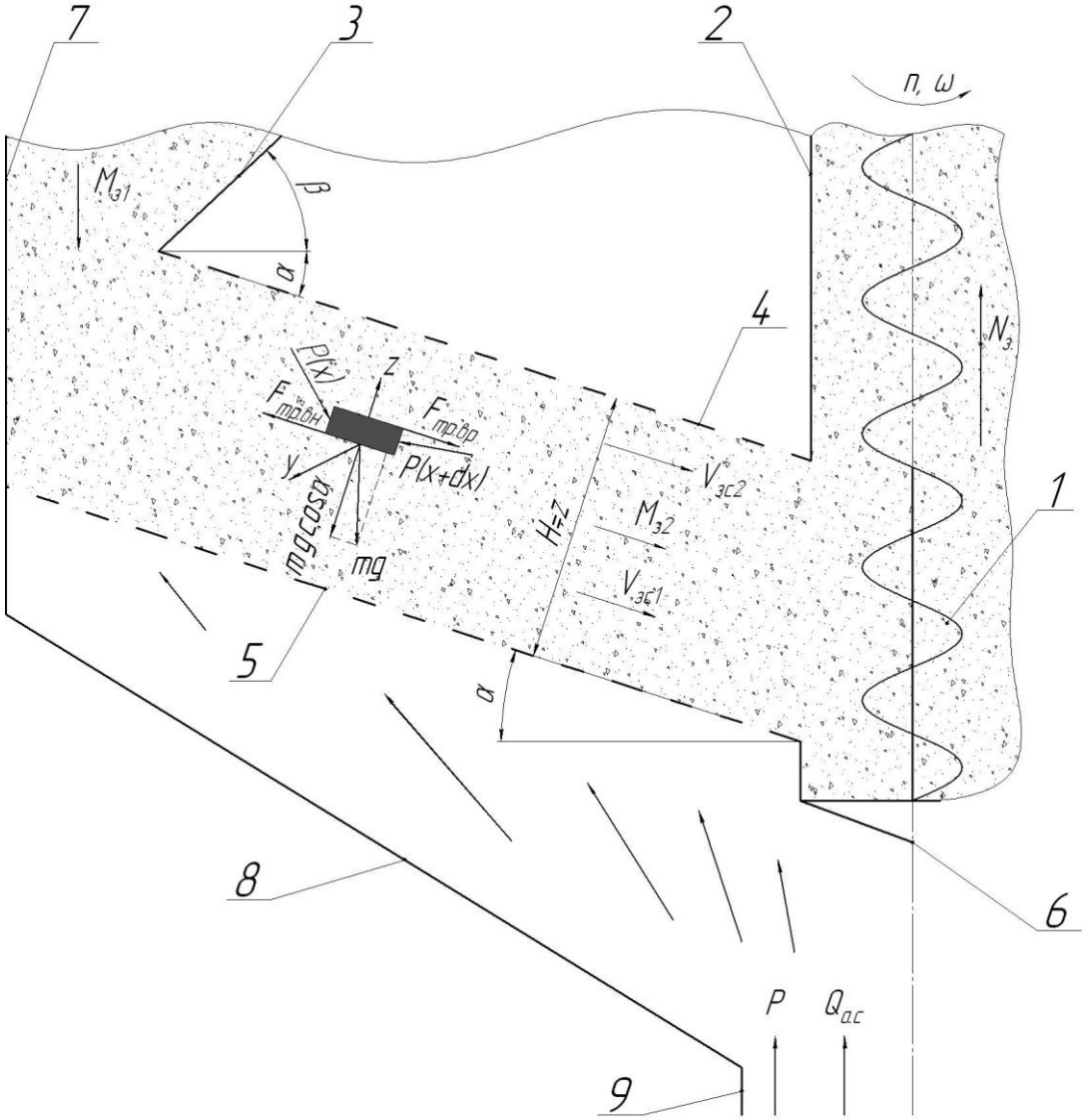


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на зерно в РЗБТ (продольное сечение)

1 – шнек; 2 – кожух шнека; 3 – верхний конус центральной секции; 4 – нижний перфорированный конус центральной секции; 5 – перфорированный конус дна сушильной камеры; 6 – рассекатель; 7 – бункер; 8 – конусное основание воздухораспределительной камеры; 9 – фланец подвода агента сушки

$M_{з1}$ – масса влажного зерна; $M_{з2}$ – масса подсушенного зерна; $F_{тр.}$ – сила трения зерна о перфорированную пластину; $V_{зс1}$ – скорость движения нижних слоев; $V_{зс2}$ – скорость движения верхних слоев; α – угол наклона перфорированной пластины; β – угол наклона верхнего конуса; γ – угол ввода воздушного потока в зерновой слой; H – толщина зернового слоя; P – напор воздушного потока; $Q_{ас}$ – подача агента сушки.

Движение зерна по конической поверхности является обобщением случая движения по обычной наклонной плоскости. Зерно по своей сути является сыпучим материалом и с точки зрения физики представляет собой систему большого количества, относительно мелких частиц. Движение массы зерна является движением сплошной среды.

Для описания движения зерна необходимо разработать идеализированную модель для упрощения вычислений. Модель движения зерна, по нашему мнению, во многом схожа с движением вязких жидкостей, также состоящих из огромного числа молекул. При этом возникающая вязкость является следствием перехода молекул, то есть частиц жидкости из одного слоя в другой. Подобный процесс может осуществляться и при движении зерна. То есть зерновки, в процессе движения будут переходить из одного слоя в другой, создавая силу аналогичную вязкому трению.

Для анализа движения массы зерна в целом по сложным поверхностям, в том числе и коническим, вначале необходимо проверить на адекватность решения, получаемые из уравнений, описывающих движение зерновой массы по более простым поверхностям, в частности по наклонной плоскости.

Рассмотрим движение по наклонной плоскости. Для описания движения зерна, на наш взгляд, возможно, применить следующие допущения:

– движение зерна происходит послойно;

– слои имеют распределение по скорости, то есть каждый слой движется со своей определенной скоростью (распределение по скоростям образует профиль скоростей);

– при движении всей массы между слоями возникает трение, вызванное обменом частиц (зерен) между слоями;

– между опорной плоскостью, по которой движется масса зерна, и ей самой возникает сила трения скольжения, определяемая коэффициентом трения для данного вещества и плоскости;

– в нижней части плоскости не происходит накапливания массы, что в противном случае приведет к потере инерции движения.

Рассмотрим слой зерна на наклонной плоскости. Среди этого слоя выделим элемент в виде небольшого куба, объем которого обозначим, как $dV = dxdydz$ и масса dm.

Если считать массу зерна однородной, то справедливо выражение для плотности зерновой массы: $\rho = \frac{dm}{dV} = \frac{dm}{dxdydz}$ (1)

Отсюда следует, что масса выделенного элемента зерновой массы равна $dm = \rho dxdydz$, где ρ – плотность зерновой массы (можно определить, как усредненную величину по массе и объему).

Отметим также, что торцевые сечения по ходу движения элемента $dV = dxdydz$, равны $dS = dydz$, а верхняя и нижняя площадь кубика равна $dS_1 = dzdx$.

Силу трения, действующую на верхнюю и нижнюю грань элемента $dV = dxdydz$, возникающую в результате трения о верхний и нижний слой, можно считать пропорциональной площади грани и изменению скорости на единицу длины:

$$F \sim S\frac{\upsilon}{x}, \text{ или } F = qS\frac{\upsilon}{z},$$

где q – коэффициент пропорциональности (определяется экспериментально).

На верхнюю грань выделенного элемента действует сила, равная $F_{верх} = qS\left.\frac{d\upsilon_x}{dz}\right|_{z+dz}$, в то время как на нижнюю грань действует сила, равная $F_{низ} = qS\left.\frac{d\upsilon_x}{dz}\right|_{z}$.

Несмотря на проведенную аналогию в движении зерна и жидкости, следует отметить, что имеются существенные отступления. Так зерно, расположенное в бункере, создает давление на нижерасположенные слои. В жидкостях это давление предается согласно закону Паскаля. Зерновая масса, находящаяся в бункере, создает давление на основании наклонной плоскости, не передавая давление на направление давления. Поэтому влияние вышерасположенной массы зерна не будем учитывать.

Применяя второй закон Ньютона для выделенного элемента, получим

$$dm \cdot \vec{a} = \vec{F}_{верх} + \vec{F}_{низ} + dm \cdot \vec{g}, \quad (2)$$

где a – ускорение элемента $dm = \rho \cdot dxdydz$.

Спроектировав на ось OX, имеем

$$dm \cdot a = F_{верх} - F_{низ} + dm \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

Ускорение определяется производной, следовательно

$$a = \frac{d\upsilon_x}{dt} \quad (4)$$

С учетом этого, подставляя выражение (4) в уравнение (3), получим

$$dm \cdot \frac{d\upsilon_x}{dt} = F_{верх} - F_{низ} + dm \cdot g \sin\alpha \quad (5)$$

Подставим в полученное уравнение (5) и остальные силы:

$$dm \cdot \frac{d\upsilon_x}{dt} = qS \left.\frac{d\upsilon_x}{dz}\right|_{z+dz} - qS \left.\frac{d\upsilon_x}{dz}\right|_{z} + dm \cdot g \cdot \sin\alpha . \quad (6)$$

В результате преобразований с учетом производной скорости $\frac{\upsilon_x(z+dz) - \upsilon_x(z)}{dz} = \frac{d\upsilon_x}{dz}$, уравнение (6) примет вид:

$$\rho \cdot \frac{d\upsilon_x}{dt} = q\frac{d^2\upsilon_x}{dz^2} + \rho \cdot g \cdot \sin\alpha . \quad (7)$$

Решением этого уравнения является функция $\upsilon_x = f(\rho, q, z, t)$, где ρ – плотность зерна, q – коэффициент пропорциональности, определяющий величину силы трения между слоями, z и t – переменные координаты и времени.

Эта функция также позволит определить скорость во всех параллельных плоскостях и расход зерна, проходящего через сечение, перпендикулярное движению зерна.

Для решения уравнения (7) необходимо его дополнить начальными и граничными условиями. Начальные условия определяют скорость массы зерна в начальный момент времени и могут быть определены в виде:

$$\upsilon_x(0; z) = 0 \quad (8)$$

Граничные условия определяют характер движения зерна у внешней и внутренней границы, то есть при $z = 0$ и $z = d$, где d – толщина зернового слоя.

Для внутренней поверхности движущихся жидкостей, как правило, используют условие прилипания слоя, то есть скорость слоев, соприкасающихся с поверхностью, вдоль которых происходит движение, равна нулю. Очевидно, что для зерновой смеси это условие выполняться не будет. Движение нижнего слоя в этом случае будет определяться действием силы трения скольжения, и задача в этом случае подобна движению твердого тела по наклонной плоскости:

$$\left.\frac{\partial\upsilon_x}{\partial t}\right|_{z=0} = g\sin\alpha - \mu g\cos\alpha \quad (9)$$

Несколько сложнее обстоит дело с внешней границей движущегося зернового слоя. Однако в этом случае поверхность можно считать свободной и в качестве условия принять равенство нулю напряжений в слое, то есть $\tau = 0$. При этом внутреннее напряжение в слое вызывает воздействие сил, аналогичных вязкому трению, рассмотренных выше и обусловленных обменом количеством движения между слоями. Поскольку напряжение определяется соотношением $\tau = \frac{F}{S}$, то из равенства нулю напряжения следует условие:

$$\left.\frac{\partial\upsilon_x}{\partial z}\right|_{z=d} = 0 \quad (10)$$

Объединяя уравнение (7), начальное условие (8) и граничные условия (9) (10), получаем начально-краевую задачу:

$$\begin{cases} \rho \cdot \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = q\dfrac{d^2\upsilon_x}{dz^2} + \rho \cdot g \cdot \sin\alpha, \\ \upsilon_x(0; z) = 0, \\ \left.\dfrac{\partial\upsilon_x}{\partial t}\right|_{z=0} = g\sin\alpha - \mu g\cos\alpha, \\ \left.\dfrac{\partial\upsilon_x}{\partial z}\right|_{z=d} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Решение полученной начально-краевой задачи позволяет определить характер движения зерна согласно поставленной математической задаче.

Поскольку граничные условия имеют неоднородность, от которой необходимо избавиться, решение представим в виде суммы двух функций:

$$\upsilon_x(z; t) = U(z; t) + S(z; t) \quad (12)$$

где функция $S(z; t)$, выбирается произвольно согласно граничным условиям.

Выбирая функцию $S(z;t)$ в виде:

$$S(z;t)=(g\sin\alpha-\mu\cos\alpha)\left(tz-\frac{z^2t}{2d}+t\right) \quad (13)$$

получаем начально-краевую задачу с однородными граничными условиями:

$$\begin{cases}\rho\cdot\dfrac{dU}{dt}=q\dfrac{d^2U}{dz^2}+\rho\cdot g\cdot\sin\alpha-(g\sin\alpha-\mu g\cos\alpha)\cdot\left(\dfrac{qt}{d}+\rho z-\dfrac{\rho z^2}{2d}+\rho\right),\\ U(0;z)=0,\\ \left.\dfrac{\partial U}{\partial t}\right|_{z=0}=0,\\ \left.\dfrac{\partial U}{\partial z}\right|_{z=d}=0\end{cases} \quad (14)$$

Решение этой задачи $U(z;t)$ в виде разложения по собственным функциям:

$$U(z;t)=\sum_{n=0}^{\infty}T_n(t)\sin\left(\frac{z}{d}\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)\right). \quad (15)$$

Подстановка функции (15) в уравнение начально-краевой задачи (14) позволяет определить вид функции $T_n(t)$:

$$T_n(t)=\left(\frac{2\left(\rho g\sin\alpha-G\left(\frac{qt}{d}+\rho\right)\right)}{\frac{\pi}{2}+\pi n}+\frac{2G}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}\left((d-1)(-1)^n-\frac{d}{\frac{\pi}{2}+\pi n}\right)\right)\frac{d^2}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}+\frac{2G\rho d^3}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^3 q}-$$
$$-\left(\left(\frac{2(\rho g\sin\alpha-G\rho)}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)}+\frac{2G}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}\left((d-1)(-1)^n-\frac{d}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)}\right)\right)\frac{d^2}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}+\frac{2G\rho d^3}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^3}\right)\exp\left(-\frac{qt}{\rho d^2}\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2\right) \quad (16)$$

где $G=g\sin\alpha-\mu g\cos\alpha$ – величина, введенная для удобства вычислений.

С учетом (16), (12) и (13) получим окончательное решение математической модели, определяющей характер движения зерновой массы по наклонной плоскости:

$$\upsilon_x=\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\left(\frac{2\left(\rho g\sin\alpha-G\left(\frac{qt}{d}+\rho\right)\right)}{\frac{\pi}{2}+\pi n}+\frac{2G}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}\left((d-1)(-1)^n-\frac{d}{\frac{\pi}{2}+\pi n}\right)\right)\frac{d^2}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}+\frac{2G\rho d^3}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^3 q}-\right.$$
$$-\left(\left(\frac{2(\rho g\sin\alpha-G\rho)}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)}+\frac{2G}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}\left((d-1)(-1)^n-\frac{d}{\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)}\right)\right)\frac{d^2}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2}+\frac{2G\rho d^3}{q\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^3}\right)\exp\left(-\frac{qt}{\rho d^2}\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)^2\right) \quad (17)$$
$$\left.\sin\left(\frac{z}{d}\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)\right)\right\}+G\left(dt-\frac{z^2t}{2d}+t\right)$$

Полученное решение определяет послойное распределение скоростей.

Предложения и выводы. Уравнение (17) движения зерна в активной зоне сушильной камеры рециркуляционной зерносушилки бункерного типа позволит получить скорости в различных слоях, благодаря чему можно подобрать оптимальные конструктивно-режимные параметры активной зоны. Однако для расчета скоростей необходимо значение коэффициента пропорциональности *q*, величину которого можно определить экспериментально. В частности можно определить выражение для расчета пропускной способности зернового материала в единицу времени, а сравнивая теоретически полученные значения с экспериментальными прийти к значению *q*.

Исходя из этого, возникла необходимость в разработке стенда для определения свойств сыпучих материалов, позволяющего смоделировать протекание технологического процесса в конусно-кольцевой камере зерносушилки, с внесением изменений в протекающие исследования новых факторов и определить переменные для конечного уравнения.

Таким образом, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, которые помогут повысить знания о конструктивных особенностях рециркуляционной зерносушилки бункерного типа и конкретизировать протекающий технологический процесс сушки зернового материала, некоторые результаты исследований которого рассматривались нами ранее [1, 7].

Список используемой литературы:

1. Муханов Н.В., Марченко С.А., Воронков В.В., Шевяков А.Н., Тихонов Е.А. Экспериментальные исследования технологического процесса рециркуляционной зерносушилки бункерного типа // Resources and Technology. 2016. Т. 13. №4. С. 93-105.

2. Пат. РФ 2628686 F26B 9/06. Рециркуляционная зерносушилка бункерного типа / В.В. Воронков, С.А. Марченко, Н.В. Муханов и др. Опубл. 21.08.2017. Бюл. № 24.

3. Марченко С.А., Муханов Н.В. Зерно как объект сушки // Развитие научной, творческой инновационной деятельности молодежи: материалы VII Всероссийской научно-практической заочной конференции молодых ученых. Курган: КГСХА, 2015. С. 63-65.

4. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. Сушка высоковлажных семян и зерна. М.: Росагропромиздат, 1991.

5. Мальтри В., Пётке Э., Шнайдер Б. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения.М.: Машиностроение, 1979.

6. Волхонов М.С. Обоснование и совершенствование процессов и аэрожелобных устройств для послеуборочной обработки зерна: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Кострома, 2007.

7. Марченко С.А., Муханов Н.В., Шевяков А.Н. К выбору конструктивных параметров активной зоны рециркуляционной зерносушилки бункерного типа // Сельское хозяйство - драйвер российской экономики (для обсуждения и выработки решений): материалы международного конгресса. Санкт-Петербург: ЗАО «ЭкспоФорум», 2016. С. 311

References:

1. Muhanov N.V., Marchenko S.A., Voronkov V.V., SHevyakov A.N., Tihonov E.A. Eksperimentalnyie issledovaniya tehnologicheskogo protsessa retsirkulyatsionnoy zernosushilki bunkernogo tipa // Resources and Technology. 2016. T. 13. №4. S. 93-105.

2. Pat. RF 2628686 F26B 9/06. Retsirkulyatsionnaya zernosushilka bunkernogo tipa / V.V. Voronkov, S.A. Marchenko, N.V. Muhanov i dr. Opubl. 21.08.2017. Byul. № 24.

3. Marchenko S.A., Muhanov N.V. Zerno kak obyekt sushki // Razvitie nauchnoy, tvorcheskoy i innovatsionnoy deyatelnosti molodeji: Materialyi VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy zaochnoy konferentsii molodyih uchenyih. Kurgan: KGSHA, 2015. S. 63-65.

4. GolubkovichA.V., Chzhikov A.G. Sushka vyisokovlajnyih semyan I zerna. M.: Rosagropromizdat, 1991.

5. Maltri V., Pëtke E., SHnayder B. Sushilnyie ustanovki selskohozyaystvennogo naznacheniya. M: Mashinostroenie, 1979.

6. VolhonovM.S. Obosnovanie i sovershenstvovanie protsessov i aerojelobnyih ustroystv dlya posleuborochnoy obrabotki zerna: Avtoref..dis. ... d-ra tehn. nauk. . Kostroma, 2007.

7. Marchenko S.A., Muhanov N.V., SHevyakov A.N. K vyiboru konstruktivnyih parametrov aktivnoy zonyi retsirkulyatsionnoy zernosushilki bunkernogotipa // Selskoehozyaystvo - drayver-rossiyskoy ekonomiki (dlya obsujdeniya I vyirabotri resheniy): Materialyi mejdunarodnogo kongressa. Orgkomitet mejdunarodnoy agropromyishlennoy vyistavki - yarmarki " Agrorus-2016" – Sankt-Peterburg: ZAO «EkspoForum», 2016. S. 311.

УДК 621.892.83:621.89.017

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Терентьев В.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Баусов А.М., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Кувшинов В.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Орешков Е.Л., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА

В статье представлены результаты экспериментальных исследований магнитных жидкостей, используемых в качестве магнитных смазок подшипников качения. Исследовались магнитные жидкости различных составов (в качестве феррофазы исследовался магнетит и карбонильное железо, в качестве жидкости носителя - кремнийорганическая жидкость, керосин и трансформаторное масло). Работоспособность подшипников определялась по температуре тепловыделения в подшипниковых узлах на испытательном стенде оригинальной конструкции. Установлено, что применение всех исследованных составов магнитных смазок по сравнению с традиционными смазочными материалами приводит к значительному снижению тепловыделений в подшипниковых узлах в области высоких частот вращения (при частоте вращения подшипника 5000 мин$^{-1}$ снижение температуры в подшипниковом узле составило от 8 ^{0}С до 21^{0}С). При этом температура подшипниковых узлов с магнитными смазками стабилизируется при повышении частот вращения подшипника от 2000 мин^1. Исследование термостабильности исследуемых смазок осуществлялось по разработанной авторами методике. Повышение магнитной индукции приводит к лучшему структурированию магнитной жидкости. Для магнитных жидкостей, где в качестве жидкости-носителя были использованы кремнийорганические жидкости, рост индукции магнитного поля приводит к улучшению термостабильности магнитной жидкости (коэффициент термостабильности для магнитной жидкости снизился в 2,5 -3,14 раза). Отмечена высокая термостабильность магнитной жидкости на основе трансформаторного масла с магнетитом, размер частиц феррофазы которого составил 75 А. При увеличении индукции магнитного поля в 5 раз (с 0,2 до 1 Тл) рост коэффициента термостабильности составил 16 %).

Ключевые слова: *смазка, подшипник, магнитная жидкость, термостабильность, магнитная индукция, работоспособность*

Для цитирования: *Терентьев В.В., Баусов А.М., Кувшинов В.В., Орешков Е.Л. Исследование свойств магнитных смазочных материалов // Аграрный вестник Верхневолжья. 2017. № 4 (21). С. 96-102.*

Введение. Современное оборудование сельскохозяйственного производства эксплуатируется в сложных условиях, отличающихся рядом характерных особенностей. К числу данных особенностей можно отнести: значительные нагрузки (зачастую непостоянные по времени), вредное воздействие окружающей среды (как на рабочие органы, так и на всю машину в целом) и ряд других.

Эти негативные факторы способствуют значительному снижению ресурса составных частей и удорожанию эксплуатации машины в целом.

В кормопроизводстве широко применяются машины для измельчения кормов (дробилки, мельницы, дезинтеграторы). Рабочий процесс данных машин осуществляется при высоких частотах вращения рабочих органов (3000 мин$^{-1}$ и выше).

В этих условиях подшипниковые узлы данных машин не обеспечивают должного уровня надежности, вследствие недостаточной эффективности применяемых смазочных материалов. Сегодня проблема дефицита отечественных смазочных материалов с высокими эксплуатационными свойствами в отраслях сельскохозяйственного производства и сельскохозяйственного машиностроения стоит особенно остро [1, с. 49].

При высоких частотах вращения и росте температуры применяемые серийно смазочные материалы вследствие снижения их вязкости не обеспечивают гидродинамического режима смазывания элементов трения, что приводит к их повышенному трению и износу.

Анализ видов изнашиваний и повреждений поверхностей деталей и узлов из-за различных нагрузок указывает на недостаточные противоизносные и антифрикционные свойства применяемых смазочных материалов [2, с. 54].

Одним из перспективных путей повышения износостойкости элементов подшипниковых узлов, работающих в условиях высоких скоростей, является применение в качестве смазочного материала магнитных жидкостей различного состава. Магнитная жидкость представляет из себя высокоустойчивый коллоидный раствор магнитного материала в жидкости-носителе.

В качестве магнитного материала могут применяться высокодисперсные порошки магнетита, кобальта, ферритов, никеля и т. д. В качестве жидкости-носителя применяют олеиновую кислоту, керосин, воду, силиконовые масла и т.п.

Для эффективного использования магнитной жидкости в качестве смазочного материала она должна обладать высокой устойчивостью. К числу основных параметров коллоидной системы магнитной жидкости можно отнести дисперсность и равномерность распределения частиц магнитного материала в жидкости-носителе. При этом должна обеспечиваться как агрегативная устойчивость (способность системы к сохранению дисперсности и индивидуальности частиц дисперсной фазы), так и седиментационная устойчивость (устойчивость дисперсной фазы к внешним градиентным полям).

Наиболее мощным фактором стабилизации в дисперсных системах является структурно-механический фактор. Агрегативная устойчивость дисперсных систем, обеспеченная за счет стабилизации магнитных частиц поверхностно-активными веществами в статических условиях, обусловлена высокой вязкостью и механической прочностью слоя ПАВ, а также лиофильностью его наружной части.

При контакте жидкости с твердой поверхностью возникает адгезионное взаимодействие. Одновременно жидкость смачивает эту поверхность [3, с. 91].

Способность ПАВ образовывать сольватные оболочки в коллоидных растворах на границе раздела фаз «твердое тело-жидкость» во многом определяет характеристику всей магнитной смазки.

Таким образом, в данных растворах значительную роль играют процессы адсорбции.

При этом в статических условиях при столкновении частиц, покрытых слоями ПАВ, важную роль играют процессы десорбции адсорбированных слоев и их взаимопроникновение.

В динамических условиях возможность коагуляции определяется в первую очередь гидродинамикой вязкой дисперсионной среды между поверхностями частиц.

При этом потеря устойчивости может обеспечиваться следующими факторами [4, с.22]:

- лиофобно-лиофильная мозаичность поверхности частиц (наличие на них областей, свободных от адсорбционного слоя). В динамических условиях увеличивается вероятность соприкосновения частиц по лиофобным участкам, что приводит к потере устойчивости;

- вытеснение молекул ПАВ из зазора между частицами;
- упругая деформация слоя ПАВ.

В магнитных смазках наличие магнитных материалов, которые, как правило, являются лиофобными, приводит к значительному избытку свободной энергии на границе раздела фаз. Наличие диполь-дипольного взаимодействия между частицами, зависящего от величины и ориентации магнитных моментов частиц также способствует агрегатированию частиц и нарушению седиментационной устойчивости смазочного материала (или изменению механических свойств системы). С учетом вышеизложенного для магнитных смазочных материалов важным являются также соблюдения условий термодинамической, механической, магнитной и диффузионной устойчивости.

Наличие внешнего магнитного поля способствует обеспечению устойчивости магнитного смазочного материала.

Изменяя магнитное поле в процессе работы, можно обеспечивать различную вязкость смазочного материала, в результате чего обеспечить эффективное разделение трущихся поверхностей при различном нагрузочно-температурном факторе.

Целью данной работы являлось исследование свойств магнитных жидкостей различного состава, определяющих возможность их использования в качестве смазочных материалов в подшипниковых узлах.

Методика исследований. Определение работоспособности подшипников качения с магнитной жидкостью в качестве смазочного материала проводилось на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

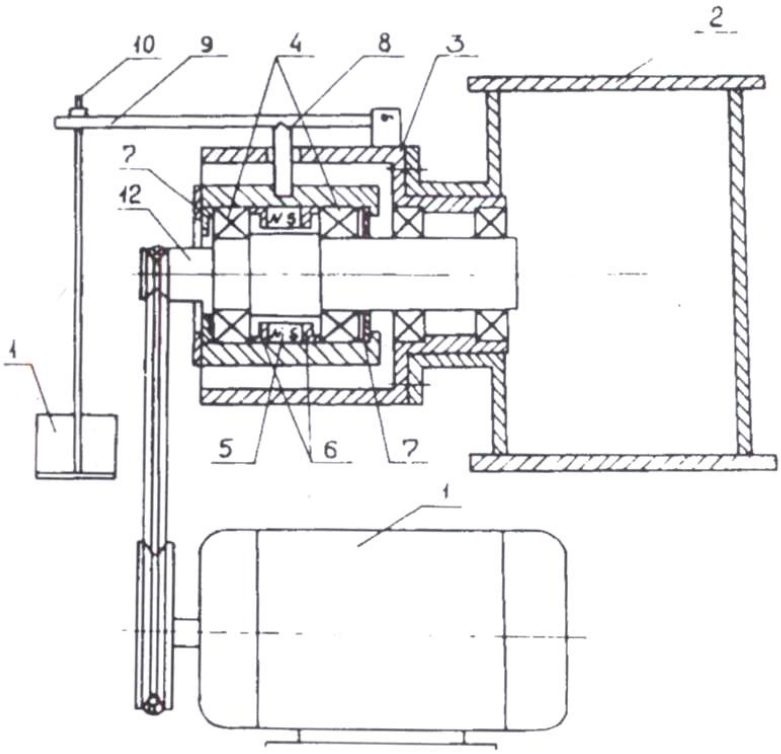


Рисунок 1 – Схема установки для определения работоспособности подшипников качения с магнитным смазочным материалом

1 – электродвигатель; 2 – бак; 3 – корпус установки; 4 – подшипники качения; 5 – постоянные магниты; 6,7 – полюсные наконечники; 8 – упор; 9 – рычаг; 10 – штанга; 11 – груз; 12 – вал.

Определение работоспособности подшипникового узла осуществлялось по следующей методике. Исследуемый подшипниковый узел заполнялся выбранной магнитной жидкостью. С помощью рычага устанавливалась нагрузка на подшипник 500 Н. Далее включался в работу

приводной электродвигатель, который через клиноременную передачу приводил в действие вал. Частота вращения вала исследуемого подшипникового узла изменялась от 1000 мин$^{-1}$ до 5000 мин$^{-1}$. Для каждого скоростного режима подшипникового узла определялась установившаяся температура. По величине тепловыделений в опорах качения, в сравнении различных магнитных жидкостей, делался вывод об их работоспособности в данной конструкции магнитной системы подшипникового узла. Для сравнения в качестве серийных смазочных материалов принимались пластичные литиевые смазки Литол-24 и ЦИАТИМ-201.

Состав исследованных магнитных жидкостей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав и свойства исследованных магнитных жидкостей

Магнитная жидкость	Состав магнитной жидкости, %			Характеристики магнитной жидкости		
	Феррофаза, %		Жидкость - носитель	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см^3	Вязкость при 20^{0}С, Па·с
	Магнетит 75 А	карбонильное железо 50 А				
№1	11	23	ПЭС-5	10	1,4	0,7
№2	-	35	ПЭС-5	40	1,3	0,5
№3	50	-	керосин	50	1,45	0,01
№4	45	-	масло транформаторное	40	1,42	0,13

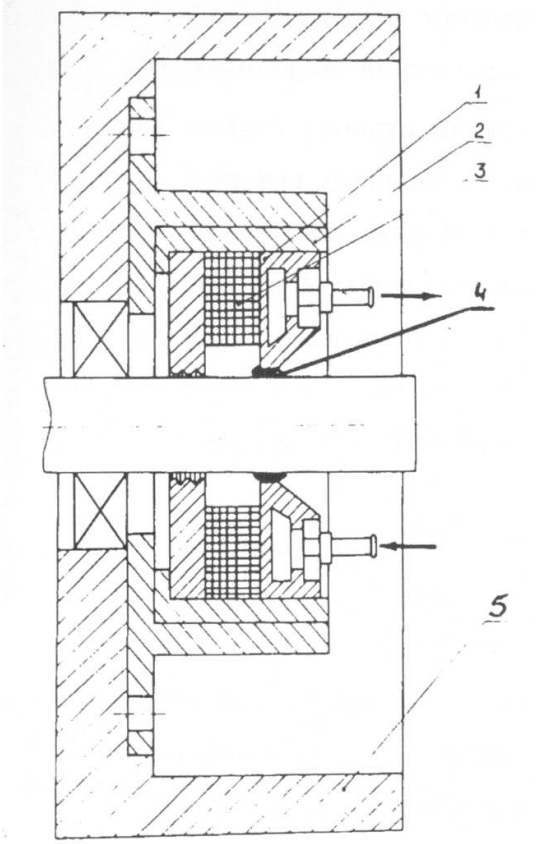


Рисунок 2 – Схема установки для определения термостабильности магнитных жидкостей
1 – полый однозубый полюс; 2 – диэлектрический стакан; 3 – эл.катушка; 4- исследуемая магнитная жидкость; 5 – корпус установки

Исследование термостабильности магнитных жидкостей проводилось на установке, схема которой представлена на рисунке 2.

Влияние температуры на работоспособность магнитной жидкости исследовалось в интервале температур от 20^0С до 100^0С. Для определения коэффициента термостабильности магнитных жидкостей различного состава предварительно были сняты зависимости ΔP=f(t) при средних индукциях в рабочем зазоре B = 0,2-1 Тл с шагом 0,2 Тл. После выявления зависимостей ΔP=f(t) определялся коэффициент термостабильности при различных значениях индукции по формуле:

$$K_t = \Delta P_{max} / \Delta P_{min}, \quad (1)$$

где: ΔP_{max} – удерживаемое давление в подшипниковом узле при минимальной температуре, МПа; ΔP_{min} – удерживаемое давление в подшипниковом узле при максимальной температуре, МПа/

При соотношении $\Delta P_{max}/ \Delta P_{min}$ =1 свойства магнитной жидкости не изменяются с ростом температуры, следовательно K_t = 1 принималось за начало отсчета. При испытаниях магнитных жидкостей наиболее термостабильной является та, у которой данный показатель ближе к 1.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты определения тепловыделений в подшипниковых узлах представлены на рисунке 3.

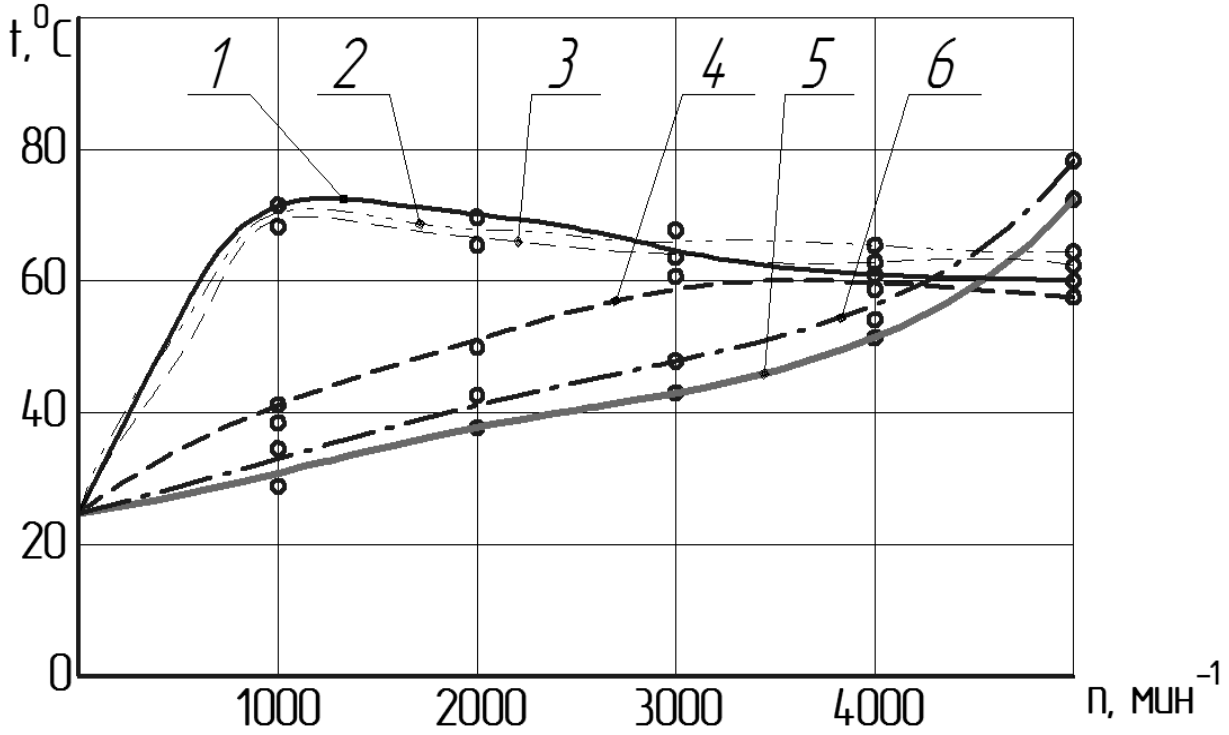


Рисунок 3 – Зависимость температуры в подшипниковом узле от частоты вращения вала подшипника

1 - магнитная жидкость № 1; 2 - магнитная жидкость № 2; 3 - магнитная жидкость № 3; 4 - магнитная жидкость № 4; 5 – ЦИАТИМ-201; 6 – Литол-24.

Результаты исследований показали, что при начальной частоте вращения 1000 мин$^{-1}$ температура в подшипниковом узле оказалась выше для магнитных жидкостей, чем при смазке ЦИАТИМ-201 и Литол-24. Это связано с более сильным структурированием магнитных жидкостей под действием постоянного магнитного поля. Исследованные образцы магнитных

жидкостей показали более устойчивую термостабильность по сравнению с традиционными смазочными материалами.

Исследования показывают, что в условиях высокой частоты вращения (более 4000 мин$^{-1}$) температура подшипниковых узлов снижается более чем на 8^{0}С по сравнению с серийно используемыми смазочными материалами. При этом температура узла стабилизируется, начиная с частоты вращения 2000 мин$^{-1}$ (в серийных смазочных материалах наблюдается постоянный рост температуры вплоть до достижения предела работоспособности смазочного материала).

Применение магнитного поля при использовании магнитного смазочного материала позволяет удерживать его в зоне подшипника. Для наиболее эффективного снижения трения в подшипниках необходимо подбирать процентный состав магнитных жидкостей для каждого узла. При этом необходимо учитывать, кроме всего прочего, температурные режимы эксплуатации самого узла. Рост температуры смазочного материала негативно сказывается на его несущей способности. Известно, что характеристики магнитных жидкостей зависят от индукции магнитного поля. Изменение величины индукции магнитного поля изменяет силу взаимодействия между частицами феррофазы магнитной жидкости, а, соответственно, упрочняет структурный каркас магнитной жидкости.

Для определения изменяющихся характеристик исследованных магнитных жидкостей проведены исследования их термостабильности в зависимости от изменения индукции магнитного поля.

Результаты определения термостабильности магнитных жидкостей представлены на рисунке 4.

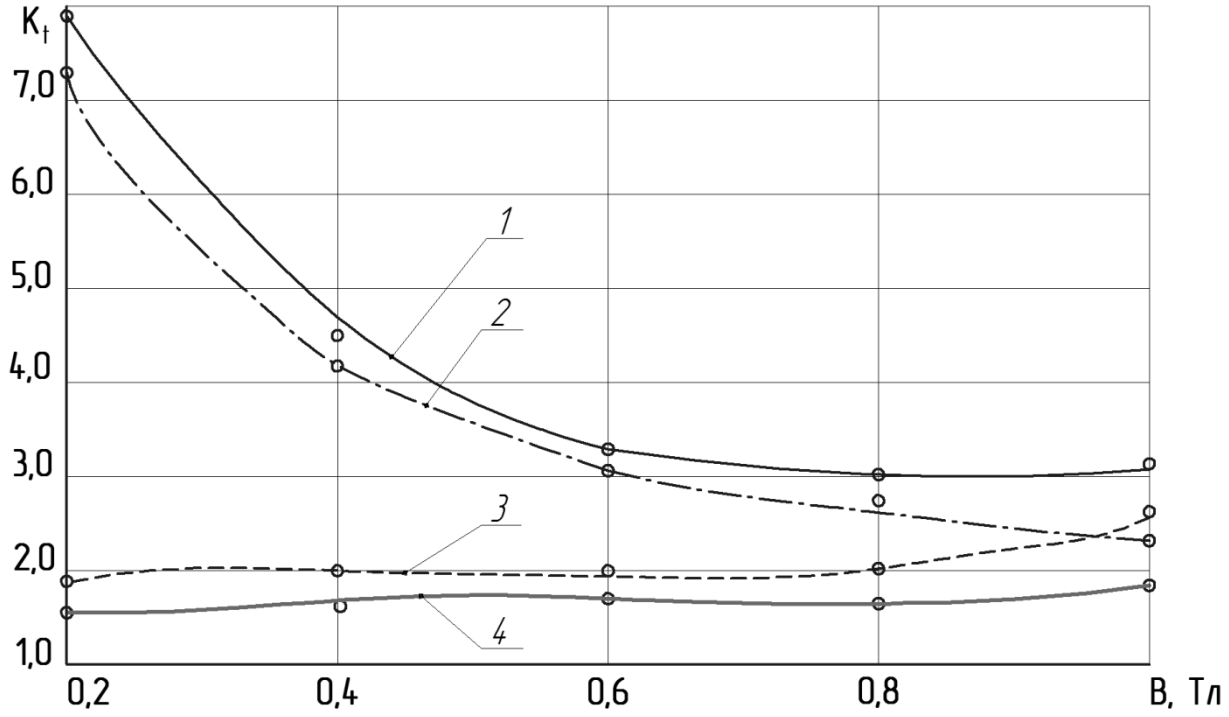


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента термостабильности от индукции магнитного поля для различных магнитных жидкостей

Анализируя представленные зависимости, можно отметить, что магнитная жидкость № 4 обладает наибольшей устойчивостью к температурным воздействиям во всем исследованном диапазоне магнитной индукции, что говорит о более прочной структуре магнитной жидкости,

где в качестве жидкости-носителя было использовано трансформаторное масло. При этом коэффициент термостабильности для данной магнитной жидкости изменяется незначительно при увеличении индукции магнитного поля. При увеличении индукции магнитного поля в 5 раз (с 0,2 до 1 Тл) рост коэффициента термостабильности составил 16 %).

Для магнитных жидкостей, где в качестве жидкости-носителя были использованы кремнийорганические жидкости (ПЭС-5), рост индукции магнитного поля приводит к улучшению термостабильности магнитной жидкости (коэффициент термостабильности для магнитной жидкости № 1 снизился в 2,5 раза, для магнитной жидкости № 2 снизился в 3,14 раза). Более значительное снижение коэффициента термостабильности для магнитной жидкости № 2 связано с тем, что в состав феррофазы данной жидкости входит карбонильное железо более высокой дисперсности, чем магнетит в магнитной жидкости № 1. Это определяет более прочную структуру самой магнитной жидкости при повышении индукции магнитного поля.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о эффективности использования в качестве смазочных материалов подшипниковых узлов магнитных жидкостей на различной основе. При этом перспективным является использование магнитной жидкости, где в качестве жидкости-носителя используется трансформаторное масло, а в качестве феррофазы – магнетит. Исследования показывают, что эффективным является введение до 45-50 % частиц феррофазы в жидкость-носитель.

Однако использование магнитных жидкостей для смазки подшипников в подшипниковых узлах возможно лишь при изменении конструкции самого узла за счет введения в него магнитной системы.

Список используемой литературы:

1. Гайдар С.М. Новый наполнитель для консистентных смазок // Международный технико-экономический журнал. 2010. № 1. С. 49-53.

2. Gaydar S.M. Nanomodified greases // Международный научный журнал. 2010. № 1. С. 54-57.

3. Карелина М.Ю. Процессы межфазной границы. М.: изд-во ФГБНУ «Росинформагротех», 2015.

4. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988.

References:

1. Gajdar S.M. Novy napolnitel dlya konsistentnyh smazok // Mezhdunarodny tehniko-ekonomicheskiy zhurnal. 2010. № 1. S. 49-53.

2. Gaydar S.M. Nanomodified greases // Mezhdunarodny nauchny zhurnal. 2010. № 1. S. 54-57.

3. Karelina M.Ju. Protsessy mezhfaznoj granicy. M.: izd-vo FGBNU «Rosinformagroteh», 2015.

4. Ur'ev N.B. Fiziko-himicheskie osnovy tehnologii dispersnyh sistem i materialov. M.: Himiya, 1988.

УДК 631.361; 331.451

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕМЯН НЕКОТОРЫХ СЕЛЬХОЗКУЛЬТУР С ПОВЕРХНОСТЯМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Родимцев С.А., ФГБОУ ВО Орловский ГАУ;
Гальянов И.В., ВНИИ Соцразвития села;
Гавриченко А.И., ФГБОУ ВО Орловский ГАУ;
Патрин Е.И., ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

Для механизированных работ в процессах селекции и первичного семеноводства актуальной является проблема вредного влияния шума. Так, например, эквивалентный уровень звука работающей стационарной сноповой молотилки составляет не менее 110 дБА; лабораторной колосовой молотилки – 75,6…85,8 дБА, при допустимых 75 дБА для условий лабораторий с шумным оборудованием. Установлено, что основными источниками шума работающей молотилки являются процессы соударения семян с рабочими органами и панелями молотилки. Уровень звука динамической "семена-кожух молотилки" составляет 75,3 дБА. Моделированием ударных процессов в молотильной камере сбрасыванием семян на консольные пластины из различных материалов, определены зависимости уровня звука от высоты сбрасывания и материала ударной поверхности. Независимо от материала ударной поверхности, уровень звука удара повышается с увеличением высоты сбрасывания семян и их массы, подчиняясь логарифмическому закону. При сбрасывании семян с высоты h=1210 мм, максимальный уровень звука зафиксирован для металлической поверхности (63,8; 68,3 и 72,4 дБА - для пшеницы, гороха и фасоли, соответственно); минимальный – для поверхности из резины (45,8; 48,6 и 54,2 дБА). Для математического описания взаимосвязи акустических и динамических параметров процесса соударения семян с некоторой поверхностью, предложена аналитическая зависимость. Полученная зависимость позволяет планировать организационно-технические мероприятия, по улучшению условий труда на рабочих местах, на участках обработки растениеводческой продукции, в зависимости от условий выполнения технологических операций, а также физико-механических свойств и состояния объекта обработки.

Ключевые слова: *молотильно-сепарирующее устройство, шум, профессиональное заболевание, ударная поверхность, звук, условия труда.*

Для цитирования: *Родимцев С.А., Гальянов И.В., Гавриченко А.И., Патрин Е.И. Исследование интенсивности звука ударного взаимодействия семян некоторых сельхозкультур с поверхностями из различных материалов // Аграрный вестник Верхневолжья. 2017. № 4 (21). С. 103-110.*

Введение. Одним из наиболее распространенных вредных факторов, физиологическое воздействие которого вызывает повреждение слухового аппарата и нарушения в центральной нервной системы человека, является шум. Так, в структуре профессиональной заболеваемости, обусловленных воздействием физических факторов трудового процесса, превалирует нейросенсорная тугоухость, составляющая 55,88 % от количества всех заболеваний. По данным того же источника, нейросенсорная потеря слуха находится на уровне 11,2 % [1, с. 82, 165]. По мнению ряда отечественных исследователей, данная патология в отношении различных «шумовых» профессий может достигать 70-77 % [2]. Установлено также [3], что у работающих в акустической среде с уровнем звукового давления 85,2 дБ SPL, нарушения нервной

системы и сердечно-сосудистые заболевания встречаются чаще, чем у работающих при уровне звукового давления 42,5 дБ SPL, в среднем, на 5 % и 30 % - соответственно.

Статистика ВОЗ демонстрирует [2], что среди основных профессиональных рисков, связанных с профессиональными заболеваниями, шум занимает второе ранговое место (16%) после болей в спине (37 %). По данным Росстата [4, с.5] в 2016 году, среди работающих всех отраслей и форм собственности, доля находящихся под вредным влиянием шума, ультразвука воздушного и инфразвука составляет 18,2 %. В сельскохозяйственном производстве доля шума, ультразвука воздушного и инфразвука в общем объеме вредных и опасных факторов, влияющих на работающих, составляет 9,3 % и является превалирующей, среди факторов производственной среды (рис. 1). Таким образом, производственный шум продолжает оставаться одной из основных проблем охраны труда в сельском хозяйстве.

Как отмечалось ранее [5-10], процесс обмолота хлебной массы в молотильно-сепарирующих устройствах (МСУ) является одним из наиболее “шумных”, среди применяемых в сельском хозяйстве операций. Эквивалентный уровень звука работающего МСУ зерноуборочного комбайна может достигать 156 дБА и более; стационарной сноповой молотилки, применяемой в процессах селекции и первичного семеноводства – не менее 110 дБА; лабораторной колосовой молотилки – 75,6…85,8 дБА, при допустимых 75 дБА для условий лабораторий с шумным оборудованием [11].

Анализом шумового воздействия на оператора лабораторной колосовой молотилки Wintersteiger установлено следующее. Основными источниками шума работающей молотилки являются двигатель, движущиеся части молотилки, вибрация отдельных узлов и деталей, воздушные потоки в аспирационной системе, процессы соударения семян с рабочими органами и панелями молотилки, а также истирания соломы на деке [6].

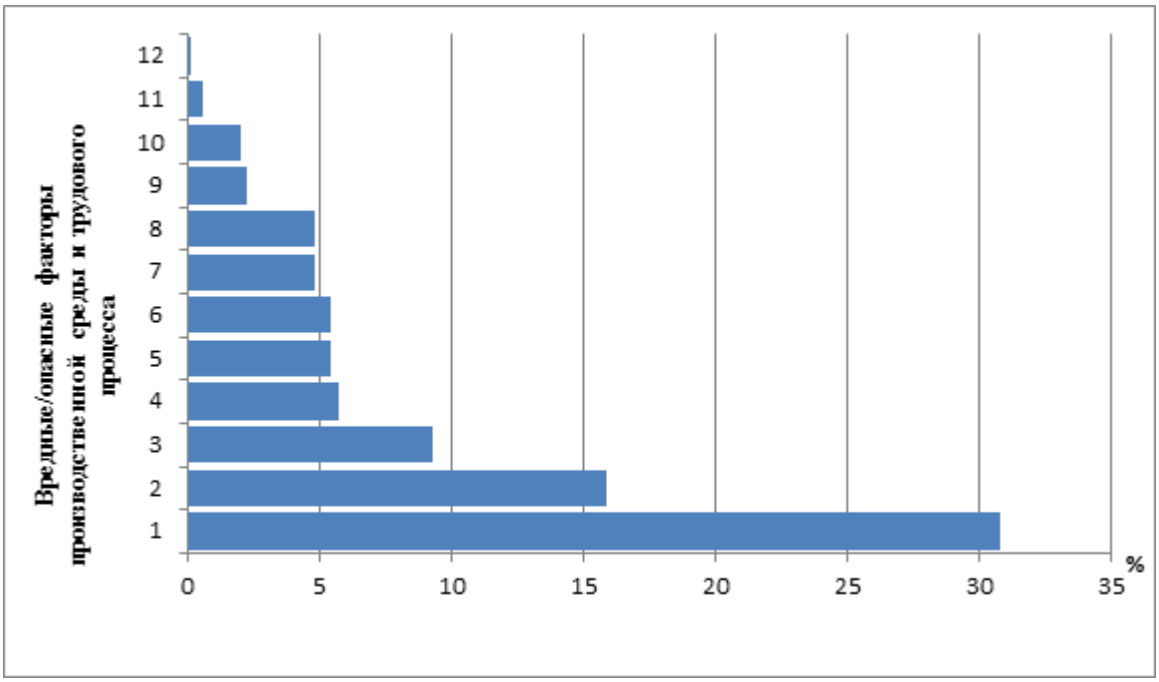


Рисунок 1 – Долевое влияние факторов производственной среды и трудового процесса на работающих в сельском и лесном хозяйстве и охоте в 2016 году (по данным [4]):
1 - всего, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда - 30,8 %; 2 - тяжесть - 15,9 %; 3 - шум, ультразвук воздушный, инфразвук - 9,3 %; 4 - напряженность - 5,7 %; 5 - вибрация (общая и локальная) - 5,4 %; 6 - химический - 5,4%; 7 - микроклимат - 4,8 %; 8 - световая среда - 4,8 %; 9 - биологический - 2,2 %; 10 - аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия – 2 %; 11 - неионизирующее излучение - 0,6 %; 12 - ионизирующее излучение - 0,1 %

Как видно из диаграммы на рис. 2, к источникам шума с максимальным уровнем воздействия относятся работающий двигатель, движущиеся элементы конструкции (в основном - механические устройства передачи энергии) и ударный шум, вызванный множественным взаимодействием семян с рабочими органами и кожухом молотильного устройства. Доля последнего в общей структуре акустического воздействия велика и превышает даже шум электродвигателя, а также шум, обусловленный динамическими процессами в кинематических парах привода молотилки.

Очевидно, что к основополагающим факторам, определяющим уровень звука от ударного взаимодействия динамической системы “семена-кожух” относятся скорость соударения, масса и материал элементов системы, а также состояние этих элементов. Следовательно, использование соответствующей аналитической зависимости позволит определить уровень шума, создаваемого ударным взаимодействием семян обмолачиваемых растений с кожухом молотилки.

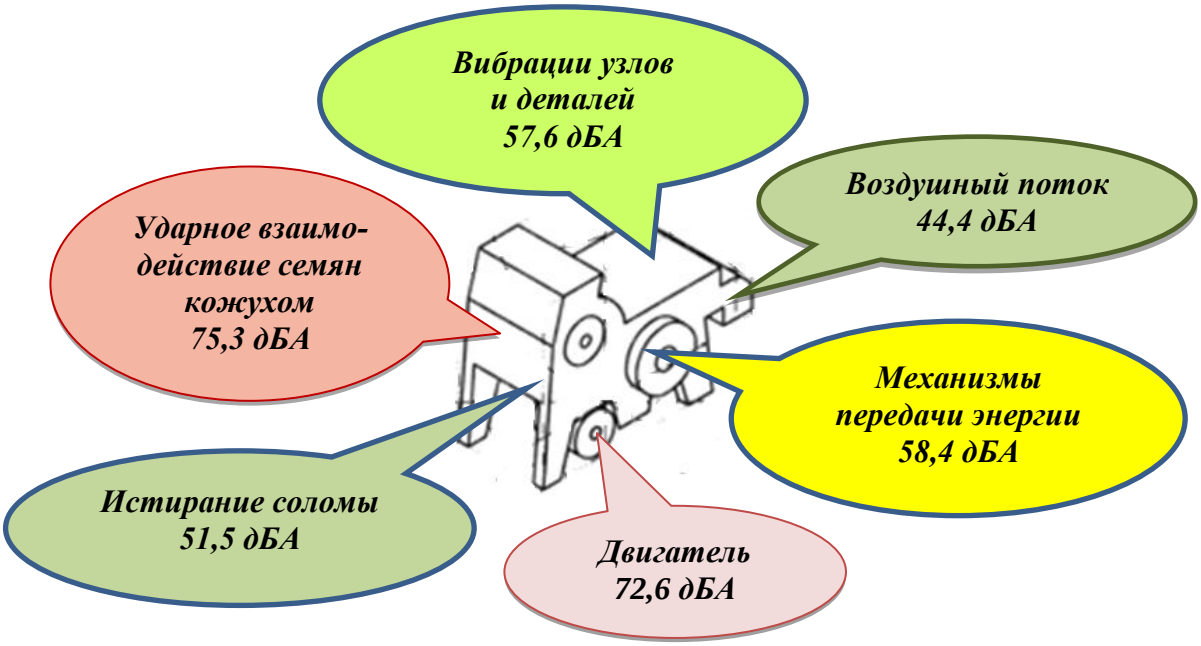


Рисунок 2 – Источники шума лабораторной молотилки и создаваемые ими уровни звука

Результаты исследований. Предваряя теоретические исследования зависимости уровня звука от параметров рассматриваемой динамической системы, были проведены тестовые эксперименты. Экспериментальные исследования заключались в сравнительной оценке эквивалентного уровня звука, вызванного ударным взаимодействием семян сельскохозяйственных культур с неподвижной поверхностью.

Моделирование ударных процессов в молотильной камере осуществлялось сбрасыванием равных порций семян с некоторой высоты на консольную пластину. С этой целью был разработан специальный прибор (рис. 3).

В исследованиях использовались семена сельскохозяйственных культур - фасоли, гороха и пшеницы, отличающихся массой, формой и геометрическими размерами. Масса семян варьировалась в пределах 1,7…3,3 %, относительно среднеарифметической величины (таблица 1).

Для оценки зависимости уровня звука при взаимодействии семян с поверхностями из различных материалов, применялись резиновая, металлическая и деревянная пластины (табл. 2). Высота сбрасывания семян принималась равной 10, 310, 610, 910 и 1210 мм.

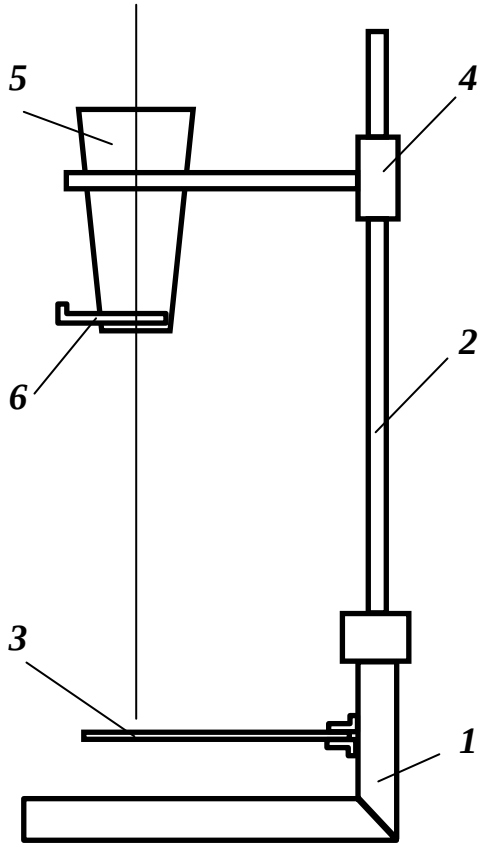


Рисунок 3 - Схема прибора для исследования ударно-акустического эффекта: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – сменная консольная пластина; 4 – кронштейн; 5 – направляющая воронка; 6 - клапан

Таблица 1 – Масса семян сельскохозяйственных культур, используемых в исследованиях

Культура	Средняя масса семян, г	σ, г	K_v, %
Горох	0,12	0,002	1,7
Пшеница	0,03	0,01	3,3
Фасоль	0,41	0,01	2,4

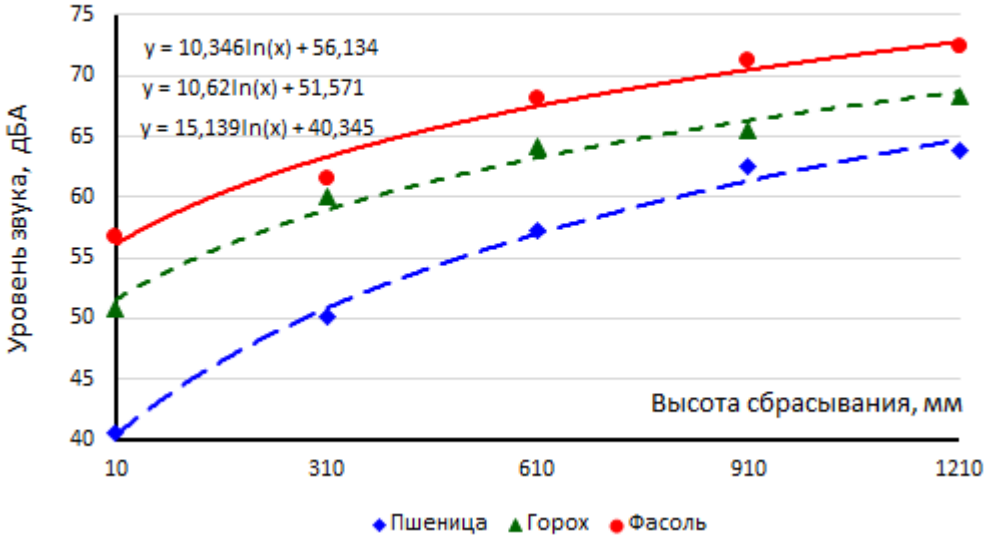
Таблица 2 – Характеристика ударных поверхностей прибора

Материал пластины	Габаритные размеры пластины, мм: длина ширина высота	Модуль упругости, E^{10^5}, МПа*
Дерево (сосна)	200×70×10	10000
Резина (ТМКЩ-С)	200×70×10	5
Сталь (Ст.3)	200×70×10	200000

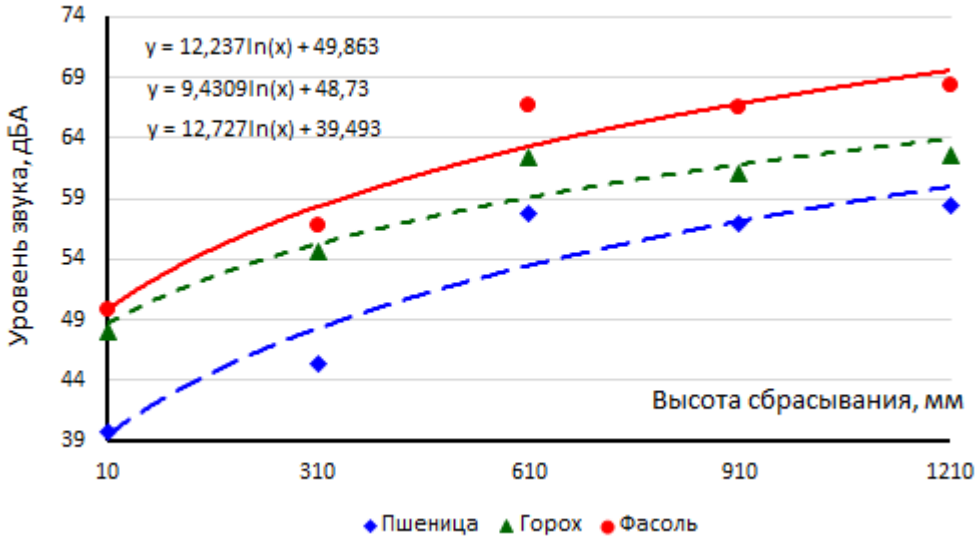
*Справочные данные [9]

Уровень звука измеряли шумомером-анализатором спектров "Октава - 101 АМ", класс точности 1, по методике, изложенной в ГОСТ 12.1.050-86 [12]. Предусилитель микрофонный «КММ 400» с микрофонным капсюлем «ВМК-205». Микрофон устанавливали на расстоянии 1,2 метра от источника шума. Повторность измерений - пятикратная.

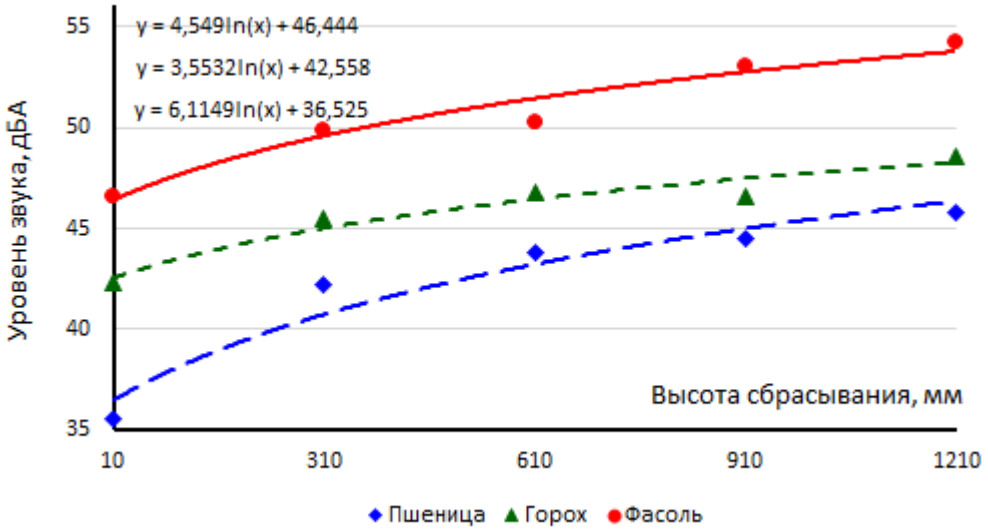
Экспериментально установлено, что независимо от материала ударной поверхности, уровень звука удара повышается с увеличением высоты сбрасывания семян (рис. 4).



а



б



в

Рисунок 4 – Зависимость уровня звука при ударе, от высоты сбрасывания семян на стальную (а), деревянную (б) и резиновую (в) консольную поверхности

В целом, по культурам, с увеличением высоты сбрасывания семян от 10 до 1210 мм, уровень звука повышается в 1,3 раза. Интенсивность изменения уровня звука А взаимодействия семян с ударной поверхностью от высоты Н, снижается с увеличением последней. Характер зависимости A=f(x) подчиняется закону y=a×ln(x)+b.

Масса семян также существенно влияет на уровень звука. Установлено, что уровень звука при ударе о металлическую поверхность семян пшеницы, со средней массой 0,03г., составляет 40,5; 57,3 и 63,8 дБА, при высоте сбрасывания 10, 610 и 1210 мм - соответственно. Семена фасоли, имеющие среднюю массу 0,41 г, при сбрасывании с аналогичной высоты создавали шум, равный 56,8; 68,1 и 72,4 дБА, что, в целом, в 1,2 раза выше уровня звука, от ударного взаимодействия с металлической консолью семян пшеницы. Уровень шума при сбрасывании на металлическую поверхность семян гороха составил 50,8; 64,1 и 68,3 дБА при средней массе семян 0,12 г и высотах падения 10; 610 и 1210 мм.

Уровень звука от ударного взаимодействия семян с поверхностью контакта во многом определяется материалом последнего. Как видно из графиков на рис. 4, наиболее «шумным» является процесс контакта семян с металлической поверхностью. Уровень звука здесь при сбрасывании семян с высоты h=1210 мм, составил 63,8; 68,3 и 72,4 дБА - для пшеницы, гороха и фасоли, соответственно. При сбрасывании семян этих культур на деревянную поверхность, уровень звука равнялся 58,4; 62,5 и 68,3 дБА. Уровень звука при контакте семян с поверхностью резины был минимальным. Так, для семян пшеницы, гороха и фасоли, при сбрасывании с высоты h=1210 мм, зафиксированы значения уровня шума 45,8; 48,6 и 54,2 дБА. Эти значения в 1,31 раза ниже соответствующих показателей уровня звука для тех же культур, при сбрасывании их на металлическую поверхность.

Как видно, акустические параметры процесса взаимодействия семян с ударной поверхностью определяются динамическими характеристиками этого процесса. Для математического описания взаимосвязи акустических и динамических параметров процесса соударения семян с некоторой поверхностью, используем величину D децибел. Известно [13], что отношение двух значений силовой величины, выраженное в децибелах, определяется по формуле:

$$D = 20 \times Lg\frac{F_1}{F_0}, \text{дБ} \qquad (1)$$

где F_0, F_1 – пороговое (базовое) и текущее значения силовой величины, соответственно.

На основании закона подобия, используемого при расчете акустических характеристик источников шума [14], запишем выражение для аналитического описания зависимости уровня шума L_H, создаваемого в натурном процессе ударного взаимодействия системы “семена-кожух” от силы ударного взаимодействия:

$$L_н = L_M + (\psi \times log\frac{F_H}{F_M}), \text{дБ} \qquad (2)$$

где L_M – уровень шума при ударном взаимодействии в модельном процессе, дБ;

ψ – коэффициент, учитывающий условия натурного динамического процесса;

F_H, F_M – сила ударного взаимодействия семян с поверхностью контакта, при натурном и модельном процессах, Н.

Принимая, что недеформированное состояние соударяющихся тел восстанавливается не полностью, а центр тяжести семени после удара и до удара движется с разными скоростями, имеем классический случай центрального не вполне упругого удара. Для теоретического определения входящей в формулу (2) величины F_H, используем теорему об изменении количества движения материальной точки в интегральной форме, в приложении к мгновенным силам [15].

В применение к рассматриваемой задаче, единственной мгновенной силой является реакция пластины, описываемая формулой:

$$F_н = \frac{m\sqrt{2gh_1}(k-1)}{\tau}, \qquad (3)$$

где m – масса семени, кг;

g – ускорение свободного падения, м $с^{-2}$;

h - высота сбрасывания, м;

k – коэффициент восстановления семян при ударе;

τ – продолжительность удара, с.

Используя (3), формула (2) окончательно запишется в виде:

$$L_н = Lм + \left(\psi \times \log \frac{m\sqrt{2gh_1}(k-1)}{Fм \times \tau} \right), \quad (4)$$

Вывод. При найденных в модельном эксперименте параметрах Fм и Lм, а также имеющихся справочных величинах k и τ, зависимость (4) позволяет рассчитать ожидаемый уровень шума при взаимодействии семян с элементами конструкции технологического оборудования. Это дает возможность планировать организационно-технические мероприятия, по улучшению условий труда на рабочих местах, на участках обработки растениеводческой продукции, в зависимости от условий выполнения технологических операций, а также физико-механических свойств и состояния объекта обработки.

Список используемой литературы:

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2016 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2017.

2. Илькаева Е.Н., Волгарева А.Д., Шайхлисламова Э.Р. Оценка вероятности формирования профессиональных нарушений органа слуха у работников, подвергающихся воздействию производственного шума // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 9. С. 27-30.

3. Погонышева И.А., Погонышев Д.А., Крылова А.А. Влияние шума на психофизиологические параметры и работоспособность организма человека // Вестник НВГУ. 2015. № 1. С. 87-93.

4. Состояние условий труда работников, осуществляющих деятельность по сельскому хозяйству, охоте, лесному хозяйству, добыче полезных ископаемых, в обрабатывающих производствах, по производству и распределению электроэнергии, газа и воды, в строительстве, на транспорте и в связи Российской Федерации в 2016 году. М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2016. Том 1.

5. Шапенкова А.А., Родимцев С.А., Патрин Е.И. Анализ условий и безопасности труда операторов молотильных устройств в процессе производства новых сортов сельскохозяйственных культур // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. тр. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2017. С. 49-51.

6. Родимцев С.А., Патрин, Е.И., Кузнецов Ю.А., Гончаренко В.В., Денисьев С.А. Исследование параметров шума при работе колосовой молотилки и разработка шумовой карты в свободном звуковом поле // Техника и оборудование для села. 2016. № 2(225). С. 20-24.

7. Rodimtsev S.A., Kuznetsov Yu.A., Goncharenko V., Patrin E., Kalashnikova L.V. Investigation of noise parameters at head thresher operation and noise map development in free sound field // Poljoprivredna tehnika. 2016. T. 41. № 4. C. 21-26.

8. Родимцев С.А., Патрин Е.И., Тимохин О.В., Шапенкова А.А. Оценка шумовых характеристик при работе колосовой молотилки в сопоставимых условиях // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 10. С. 9-14.

9. Rodimtcev S.A., Timokhin O.V., Patrin E.I., Shapenkova A.A., Kulakova E.V. Improvement of labor conditions as a factor of agro-industrial complex development under the wto conditions // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51. № 6. С. 87-95.

10. Родимцев С.А., Патрин Е.И. Определение шумовых характеристик при работе малогабаритной молотилки // Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства: сб. мат. науч.-практич. конф. Орел: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2013. С. 422-430.

11. ГОСТ Р 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности. Взамен ГОСТ 12.1.003-76; введ. 1984-07-01. М. (Система стандартов безопасности труда).

12. ГОСТ 12.1.050-86 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Методы измерения шума на рабочих местах. введ. 1987-01-01. М. (Система стандартов безопасности труда).

13. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. М.: Логос, 2008.

14. ГОСТ 12.2.028-84 Система стандартов безопасности труда. Вентиляторы общего назначения. Методы определения шумовых характеристик. введ. 1984-08-17. М. (Система стандартов безопасности труда).

15. Маркеев А.П. Теоретическая механика: Учебник. 2-е изд., доп. М.: ЧеРо, 1999.

References:

1. O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossiyskoy Federatsii v 2016 godu: Gosudarstvennyiy doklad. M.: Federalnaya slujba po nadzoru v sfere zaschityi prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka, 2017.

2. Ilkaeva E.N., Volgareva A.D., Shayhlislamova E.R. Otsenka veroyatnosti formirovaniya professionalnyih narusheniy organa sluha u rabotnikov, podvergayuschihsya vozdeystviyu proizvodstvennogo shuma // Meditsina truda i promyishlennaya ekologiya. 2008. № 9. S. 27-30.

3. Pogonyisheva I.A., Pogonyishev D.A., Kryilova A.A. Vliyanie shuma na psihofiziologicheskie parametryi i rabotosposobnost organizma cheloveka // Vestnik NVGU. 2015. № 1. S. 87-93.

4. Sostoyanie usloviy truda rabotnikov, osuschestvlyayuschih deyatelnost po selskomu hozyaystvu, ohote, lesnomu hozyaystvu, dobyiche poleznyih iskopaemyih, v obrabatyivayuschih proizvodstvah, po proizvodstvu i raspredeleniyu elektroenergii, gaza i vodyi, v stroitelstve, na transporte i v svyazi Rossiyskoy Federatsii v 2016 godu. M.: Federalnaya slujba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat), 2016. Tom 1.

5. Shapenkova A.A., Rodimtsev S.A., Patrin E.I. Analiz usloviy i bezopasnosti truda operatorov molotilnyih ustroystv v protsesse proizvodstva novyih sortov selskohozyaystvennyih kultur // Molodej i sistemnaya modernizatsiya stranyi: sb. tr. nauch. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga", 2017. S. 49-51.

6. Rodimtsev S.A., Patrin E., Kuznetsov Yu.A., Goncharenko V., Denisev S.A. Issledovanie parametrov shuma pri rabote kolosovoy molotilki i razrabotka shumovoy kartyi v svobodnom zvukovom pole // Tehnika i oborudovanie dlya sela. 2016. № 2 (225). S. 20-24.

7. Rodimtsev S.A., Kuznetsov Yu.A., Goncharenko V., Patrin E., Kalashnikova L.V. Investigation of noise parameters at head thresher operation and noise map development in free sound field. Poljoprivredna tehnika. 2016. T. 41. № 4. C. 21-26;

8. Rodimtcev S.A., Patrin E.I., Timokhin O.V., Shapenkova A.A.Otsenka shumovyih harakteristik pri rabote kolosovoy molotilki v sopostavimyih usloviyah // Bezopasnost jiznedeyatelnosti. 2014. № 10. S. 9-14.

9. Rodimtcev S.A., Timokhin O.V., Patrin E.I., Shapenkova A.A., Kulakova E.V. Improvement of labor conditions as a factor of agro-industrial com plex development under the wto conditions // Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. T. 51. № 6. S. 87-95.

10. Rodimtsev S.A., Patrin E.I. Opredelenie shumovyih harakteristik pri rabote malogabaritnoy molotilki // Osobennosti tehnicheskogo i tehnologicheskogo osnascheniya sovremennogo selskohozyaystvennogo proizvodstva: sb. mat. nauch.-praktich. konf. Orel: FGBOU VO Orlovskiy GAU, 2013. S. 422-430.

11. GOST R 12.1.003-83. SHum. Obschie trebovaniya bezopasnosti. Vzamen GOST 12.1.003-76; vved. 1984-07-01. M. (Sistema standartov bezopasnosti truda);

12. GOST 12.1.050-86 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Metodyi izmereniya shuma na rabochih mestah. vved. 1987-01-01. M. (Sistema standartov bezopasnosti truda).

13. Ivanov N.I. Injenernaya akustika. Teoriya i praktika borbyi s shumom: Uchebnik. M.: Logos, 2008.

14. GOST 12.2.028-84 Sistema standartov bezopasnosti truda. Ventilyatoryi obschego naznacheniya. Metodyi opredeleniya shumovyih harakteristik. vved. 1984-08-17. M. (Sistema standartov bezopasnosti truda).

15. Markeev A.P. Teoreticheskaya mehanika: Uchebnik. 2-e izd., dop. M.: CHeRo, 1999.