

# ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 636.085.55+631.363.636

## ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ ПРИ КОНСЕРВИРОВАНИИ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА УСТАНОВКОЙ УКЗ-20

*В.А. Шаршунов, А.В. Червяков, С.В. Курзенков*

Представлена методика поисковых экспериментов процесса консервирования зерна в установке предлагаемой конструкции, обоснованы границы варьирования конструктивных параметров оборудования и технологических параметров рассматриваемого процесса.

### Введение

Современное сельскохозяйственное производство характеризуется резким ухудшением фитосанитарной обстановки в растениеводстве. Поэтому проведение мероприятий по обеззараживанию фуражного зерна от патогенной микрофлоры и микотоксинов остро стоит перед комбикормовой промышленностью Республики Беларусь. Решением данной проблемы является обработка зерна жидкими консервантами [1].

Для выполнения данного процесса в условиях сельскохозяйственных предприятий сотрудниками УО «БГСХА» совместно с сотрудниками НПП «Белама плюс» (Орша) разработано оборудование УКЗ-20, предназначенное для нанесения консервантов в виде растворов, эмульсий или суспензий на поверхность зерна. Подробное описание оборудования и принцип его работы рассмотрены в источниках [2, 3]. Это оборудование позволяет произвести подачу, равномерное перераспределение и смешивание потока зерна с жидким компонентом за счёт реализованных в нём конструктивных особенностей [4, 5].

Данная статья посвящена исследованиям, направленным на определение наиболее значимых факторов изучаемого процесса, обоснование опорных границ варьирования этих факторов при многофакторном эксперименте.

### Результаты исследований и их обсуждение

В исследованиях применялся трехстадийный отбор факторов, включаемых в модель.

На первой стадии производился априорный анализ и отбор факторов рассматриваемого процесса. При этом на факторы ограничений не накладывалось. На основании априорной информации и теоретических исследований [5, 6, 7] к таким факторам были отнесены: угловая скорость вращения вала –  $\omega$  ( $\text{с}^{-1}$ ), высота поднятия обечайки –  $h_{об}$  (м), диаметр обечайки –  $D_{об}$  (м), эквивалентный радиус обрабатываемого материала –  $r_ч$  (м), радиус отверстий перфорированной поверхности –  $r_{отв}$  (м), масса дебаланса –  $m_d$  (кг), масса рабочего органа –  $M_{р.о.}$  (кг), расстояние расположения дебаланса по вертикали от центра масс –  $z_d$  (м), расстояние расположения дебаланса от вертикальной оси симметрии системы –  $x_d$  (м). Такие параметры, как коэффициент перфорации  $k_{пер}$  сепарирующей поверхности, ширина сепарирующей поверхности рабочего органа  $H_{перш}$  (м), радиус диска рабочего органа  $r_d$  (м) нами не рассматривались в качестве факторов при проведении экспериментов на основании анализа,

проведённого в источнике [6].

Основными результирующими факторами выступали: производительность установки –  $Q$  (кг/с) и коэффициент неравномерности обработки зерна рабочим раствором  $k_{н.о.}$ . Для проверки рабочей гипотезы о зависимости равномерности обработки зерна консервантом от его распределения по толщине кольцевого потока при постоянных параметрах капельного потока был выдвинут второстепенный показатель – коэффициент неравномерности распределения материала при просыпании его через перфорированную поверхность рабочего органа  $k_{нр.}$ . Для целенаправленного и контролируемого проведения экспериментальных исследований и устранения незначимых факторов проводилось мысленное их осмысление. Цель этого этапа – уменьшение числа факторов, влияющих на результирующие, определение границ варьирования каждого из факторов.

Выбор верхней границы угловой скорости вращения вала  $\omega$  обосновывался из условия простоты и надёжности конструкции привода, т.е. привод не должен иметь промежуточных передач. Передача вращения от двигателя к валу распылителя и дебаланса должна осуществляться напрямую. Учитывая, что максимальная скорость вращения асинхронных двигателей составляет  $400 \text{ с}^{-1}$ , то данная величина была взята в качестве верхней границы. Надёжность конструкции предполагала исключение из технологического процесса режимов, которые могут повлиять на прочностные характеристики оборудования. Предварительные экспериментальные исследования показали, что увеличение  $\omega$  свыше  $400 \text{ с}^{-1}$  может привести к резонансным эффектам. Выбор нижней границы  $\omega=157,1 \text{ с}^{-1}$  обуславливался качеством работы – резким снижением пропускной способности оборудования. Поэтому рассматриваемый фактор при поисковых экспериментах варьировал в пределах от  $157,1 \text{ с}^{-1}$  до  $400 \text{ с}^{-1}$ .

Анализ теоретических исследований показал, что на пропускную способность питателя зернового материала оказывает влияние как высота открытия обечайки, так и её диаметр. Причём одинаковую подачу при фиксированных режимах работы оборудования можно получить варьируя  $h_{об.}$ , зафиксировав  $D_{об.}$  или варьируя  $D_{об.}$  зафиксировав  $h_{об.}$ . Это означает, что подача зависит от соотношения этих двух параметров. Естественно, в технологическом процессе более целесообразно изменять  $h_{об.}$ , при этом диаметр обечайки  $D_{об.}$  выбирать так, чтобы обеспечить максимальную подачу зерна на рабочий орган [8]. На основании априорной информации и теоретических исследований было установлено, что диаметр обечайки может быть зафиксирован в пределах

$$\sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\lambda \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_m}}} \leq D_{об.} \leq 2 \cdot (r_d - \frac{h_{об.}}{\text{tg}(\varphi)}) \quad , \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент заполнения, определяемый опытным путём,

$h_m$  – высота материала над выпускным отверстием обечайки,

$\varphi$  – угол естественного откоса материала,

$r_d$  – радиус диска распределительного устройства,

$Q_{\max}$  – максимальная подача.

Как правило, величина этого параметра выбирается исходя из конструктивных особенностей оборудования. Таким образом, было установлена целесообразность использования в экспериментальных исследованиях безразмерного параметра  $\delta_{об.} = h_{об.}/D_{об.}$  характеризующего соотношение высоты поднятия обечайки к её диаметру. Диаметр обечайки в экспериментах был зафиксирован на уровне  $D_{об.}=0,18 \text{ м}$ , а диаметр диска распределительного устройства на основании теоретических исследований рассмотренных в работах [6, 7] на уровне  $0,25 \text{ м}$ .

Максимальная величина параметра  $\delta_{об.}$  определялась исходя из условия формирования максимального слоя, устойчивого нахождения его и удержания на диске распределительного устройства в состоянии покоя. Максимальная величина этого параметра при фиксированных диаметрах обечайки и диска составила  $\delta_{об.}=0,22$ .

Наилучшие условия просеивания и равномерного распределения зерна по перфорирован-

ной поверхности рабочего органа обеспечиваются при определённых соотношениях размеров её отверстий и зернового материала [5, 9]. В источнике [9] рекомендуется объединить эти два параметра в единый безразмерный комплекс  $v = r_{\text{отв}}/r_{\text{з.ч.}}$ , характеризующий соотношение радиуса отверстия к эквивалентному радиусу частицы материала. Нижняя граница данного параметра  $v=5,33$  была определена из предварительных экспериментов на основании стабильности и устойчивости технологического процесса сепарации зерна через отверстия решета и равномерности распределения его по поверхности рабочего органа. Верхняя граница  $v=6,70$  характеризовала величину параметра, при котором сохранялась прочность конструкции. Основной силой, побуждающей зерно к движению, является центробежная сила. Она возникает в результате вращения дебаланса с массой  $m$ . В процессе вращения дебаланса силы, действующие на рабочий орган, стремятся уравновесить друг друга. Поэтому, чтобы обеспечить колебания системы необходимо выполнение следующего условия:

$$m \cdot \omega^2 \cdot z_{\text{ц.м.}} \cdot y_d \geq M \cdot g \cdot x_d, \quad (2)$$

где  $x_d, z_{\text{ц.м.}}$  – величины, характеризующие расположение точки подвески колеблющейся части системы соответственно от центра масс и дебаланса, м;

$y_d$  – величины, характеризующие расположения массы дебаланса от оси симметрии рабочего органа, м;

$M$  – масса рабочего органа, кг;

$m$  – масса дебаланса, кг.

Преобразовав данное выражение, получим

$$\frac{m \cdot \omega^2 \cdot z_{\text{ц.м.}} \cdot y_d}{M \cdot g \cdot x_d} \geq 1. \quad (3)$$

Анализ данного выражения показывает, что от соотношения масс дебаланса и рабочего органа, а также соотношения расстояний от точки подвески до центров масс рабочего органа и дебаланса зависит динамика движения самого рабочего органа, а следовательно, и динамика движения зернового материала на нем.

Учитывая однородность данных параметров, их взаимное влияние на показатель эффективности и отсутствие взаимосвязи между ними, выделим в соотношении (3) соответствующие безразмерные комплексы: 1)  $\delta_M = m/M$ , 2)  $\delta_d = z_{\text{ц.м.}}/x_d$ . Образованные параметры будем рассматривать в качестве параметров подобия конструкции предлагаемой установки.

Поскольку в поисковых экспериментах изменять массу рабочего органа нецелесообразно и затруднительно, то для их проведения данный параметр был зафиксирован исходя из условий прочности конструкции при минимально возможной массе  $M = 14$  кг. Нижняя граница параметра  $\delta_M = 0,00143$  была определена исходя из массы дебаланса  $m = 0,02$  кг, при которой движения зернового материала под действием вибрации по горизонтальной поверхности протекает непрерывно и стабильно.

Анализ теоретических исследований [5, 6] и априорной информации [9] показывает, что амплитуда круговых колебаний подвижной части рабочего органа зависит от расположения его центра масс и дебаланса до точки подвески колеблющейся части системы, а также жесткости самих подвесок. Так как при изготовлении оборудования применялись стандартные кольцевые подвески, то в исследованиях данный параметр не рассматривали в качестве фактора. Исходя из конструкции рабочего органа, расстояние от центра масс до места подвески колеблющейся части системы было зафиксировано на уровне  $x_{\text{ц.м.}} = 0,085$  м, а расстояние от точки подвески колеблющейся части системы до дебаланса  $z_d$  в процессе исследований изменяли от 0,12 м, как минимально возможное расположение дебаланса на подвижном валу. В результате нижняя граница безразмерного параметра  $\delta_d$  равнялась 1,412. Исходя из результатов приведенного анализа для проведения поисковых экспериментов был сформирован окончательный набор факторов и определены границы их варьирования (таблица 1).

В результате изучения априорной информации, проведенного анализа и теоретических

исследований [5, 6, 7] обоснована конструкция рабочего органа и определены основные регулируемые факторы, оказывающие влияние на технологический процесс нанесения рабочего раствора на зерно: угловая скорость вращения вала,  $c^{-1}$ ; высота поднятия обечайки обечайки, м; диаметр отверстия решета, м; масса дебаланса, кг; высота расположения дебаланса от центра масс, м.

Таблица 1 – Границы и направления варьирования факторов

Порядок Исследования	Факторы, размерность	Обозначения	Границы		Направление варьирования факторов
			(-)	(+)	
1.	Угловая скорость вращения вала, $c^{-1}$	$\omega$	157,1	400,0	↑
2.	Безразмерный параметр, характеризующий соотношение высоты поднятия обечайки к её диаметру	$\delta_{об}$	-	0,22	↓
3.	Безразмерный параметр, характеризующий соотношение радиуса частицы обрабатываемого материала к радиусу отверстия	$\nu$	5,33	6,70	↑
4.	Безразмерный параметр, характеризующий отношение массы дебаланса к массе колеблющейся части рабочего органа	$\delta_M$	0,0014	-	↑
5.	Безразмерный параметр, характеризующий расположение дебаланса, относительно центра масс колеблющейся части системы	$\delta_d$	1,412	-	↑

С целью определения степени влияния основных факторов, подтверждения и уточнения установленных ограничений были проведены однофакторные поисковые эксперименты. Объектами исследования служили отобранные параметры (таблица 1), а предметом – лабораторная установка с предлагаемым модулем дозирования-смешивания.

Лабораторная установка повторяла конструкцию модуля дозирования-смешивания с диаметром камеры смешивания 0,6 м (выбор обусловлен характеристиками проникновения капельного потока в плотном слое), с фиксированным диаметром обечайки 0,18 м и диаметром диска распределительного устройства 0,25 м (параметры были зафиксированы на основании теоретических исследований рассмотренных в работах [6, 7]). При варьировании факторов, на основании технологической схемы, зерновой материал в течение времени  $\tau$  (время сбора материала определялось исходя из активности сепарации) собирался в мерный ячеистый поддон, разбитый на сектора, ограничивающиеся дугой  $120^\circ$  (рисунок 1).

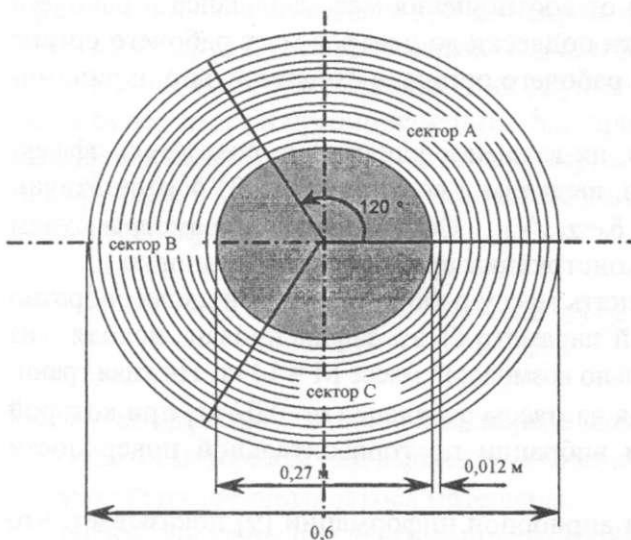


Рисунок 1 - Вид сверху мерного поддона

Ячейки мерного поддона были выполнены в виде кольцевых секций шириной 0,012 м, высотой 0,2 м и пронумерованных цифрами 1–13, начиная с центра. После проведения опыта накопленный материал взвешивался отдельно по кольцевым секциям каждого из секторов и производился статистический анализ результатов. В журнал фиксировалась пропускная способность оборудования на заданном режиме работы. Сравнение результатов опытов производилось путём перехода к единой размерности кг/с.

Опыты проводились на ячмене в 3-кратной повторности. Обсуждались только те результаты, которые были воспроизводимы в каждом опыте. Конструкция лабораторной установки позволяла реализовать намеченную программу исследований и обеспечить варьирование факторов в установленных пределах. В качестве критериев оценки исследований

использовали показатели пропускной способности установки  $Q_3$  и коэффициент неравномерности распределения материала при просыпании его через перфорированную поверхность рабочего органа  $k_{нр}$ . На предварительных этапах экспериментов были выбраны опорные точки:  $\omega=314,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $h_{об}=0,04 \text{ м}$ ,  $r_{отв}=0,008 \text{ м}$ ,  $m=0,08 \text{ кг}$ ,  $z_d=0,12 \text{ м}$  изменения регулируемых параметров, оказывающих влияние на технологический процесс нанесения консерванта на зерно. Схема поисковых исследований подразумевала поэтапное варьирование одного из факторов при фиксированных параметрах остальных на уровнях опорных точек.

Опыты показали (рисунок 2, а), что увеличение пропускной способности оборудования с  $1,67 \text{ кг/с}$  до  $3,33 \text{ кг/с}$  происходит с изменением угловой скорости вращения вала от  $157,1 \text{ с}^{-1}$  до  $293,2 \text{ с}^{-1}$ . Дальнейшее увеличение угловой скорости с  $293,2 \text{ с}^{-1}$  до  $320 \text{ с}^{-1}$  не приводит к значительному повышению подачи, а её изменение с  $330 \text{ с}^{-1}$  и выше вызывает неустойчивую работу системы и возникновение резонансных эффектов.

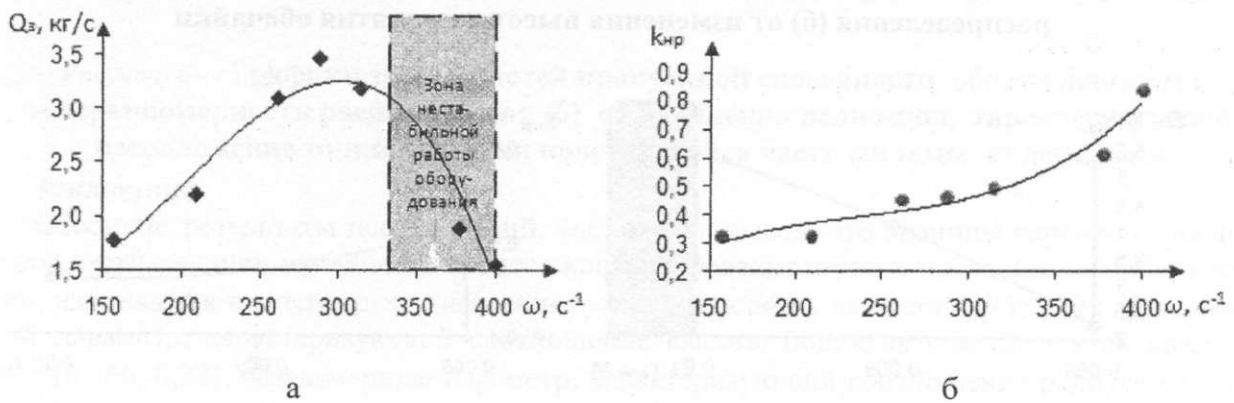


Рисунок 2 – Зависимости пропускной способности оборудования (а) и неравномерности распределения (б) от изменения угловой скорости вращения вала

Объясняется это тем, что при увеличении  $\omega$  свыше  $290 \text{ с}^{-1}$  происходит резкое увеличение горизонтальной составляющей амплитуды  $\alpha_{гор}$  колебательного движения подвижной части системы. В свою очередь, это вызывает уменьшение фиктивной площади отверстий сепарирующей поверхности рабочего органа и замедление просеивания. При этом зерновой материал начинает накапливаться на решетке, что может привести к его завалам или нарушению прочностных характеристик рабочего органа. Такие явления наблюдались на предварительных этапах исследования с увеличением угловой скорости свыше  $320 \text{ с}^{-1}$ . Было установлено, что увеличение угловой скорости вращения вала от  $157,1$  до  $400 \text{ с}^{-1}$  приводит к возрастанию неравномерности распределения зернового материала с  $32 \%$  до  $84 \%$  при прохождении его через перфорированную поверхность рабочего органа (рисунок 2, б).

В результате поискового эксперимента выявлено, что подача материала увеличивается в пределах от  $0$  до  $3,33 \text{ кг/с}$  при поднятии обоймы дозатора до  $0,04 \text{ м}$  (рисунок 3, а). Дальнейшее увеличение высоты поднятия обечайки не приводило к увеличению подачи. Основная причина – полное заполнение зерном решетной поверхности. Опыты показали, что изменение высоты поднятия обечайки дозатора зернового материала в пределах от  $0,01$  до  $0,04 \text{ м}$  существенно влияет на равномерность прохождения материала через перфорированную поверхность рабочего органа. При поднятии обечайки наблюдалось выравнивание распределения зернового материала (рисунок 3, б), т.е. равномерность увеличивалась на  $37 \%$ . Анализ зависимостей пропускной способности оборудования и неравномерности распределения материала при прохождении перфорированной поверхности рабочего органа от изменения радиуса отверстий этой поверхности показал, что увеличение радиуса отверстий в пределах от  $0,008$  до  $0,01 \text{ м}$  приводит к существенному увеличению пропускной способности рассматриваемого оборудования от  $2,23$  до  $5,43 \text{ кг/с}$  (рисунок 4, а). При этом  $k_{нр}$  изменялся от  $0,52$  до  $0,46$  (рисунок 4, б). Дальнейшее увеличение радиуса отверстий решета приводило к нарушению прочностных характеристик рабочего органа, находящегося под вибрацией, и

выхода его из строя.

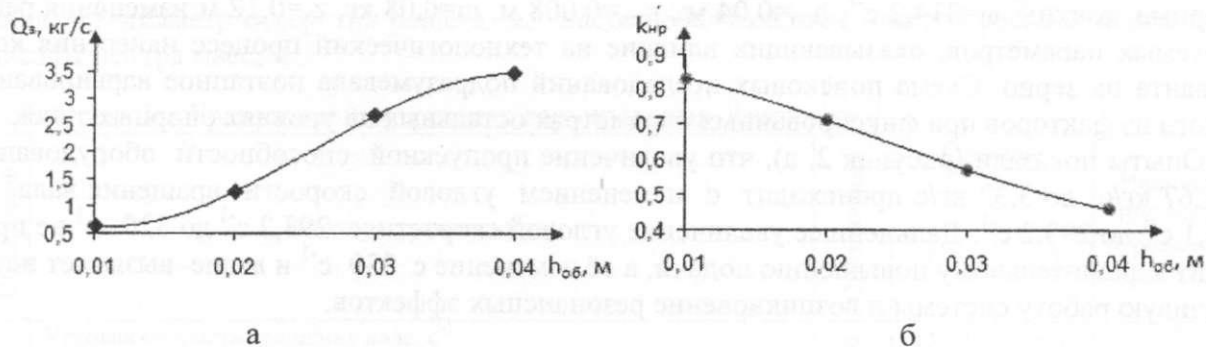


Рисунок 3 – Зависимости пропускной способности оборудования (а) и неравномерности распределения (б) от изменения высоты поднятия обечайки

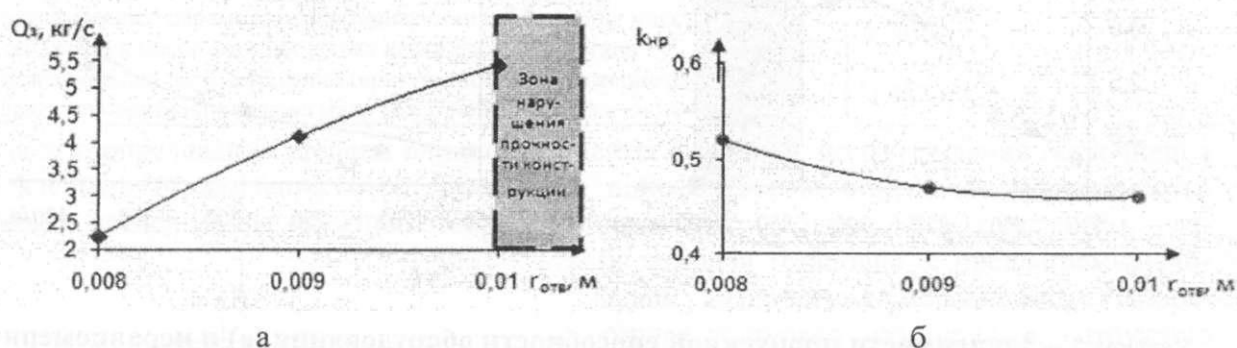


Рисунок 4 – Графики зависимостей пропускной способности оборудования (а) и неравномерности распределения (б) от изменения радиуса отверстий перфорированной поверхности рабочего органа

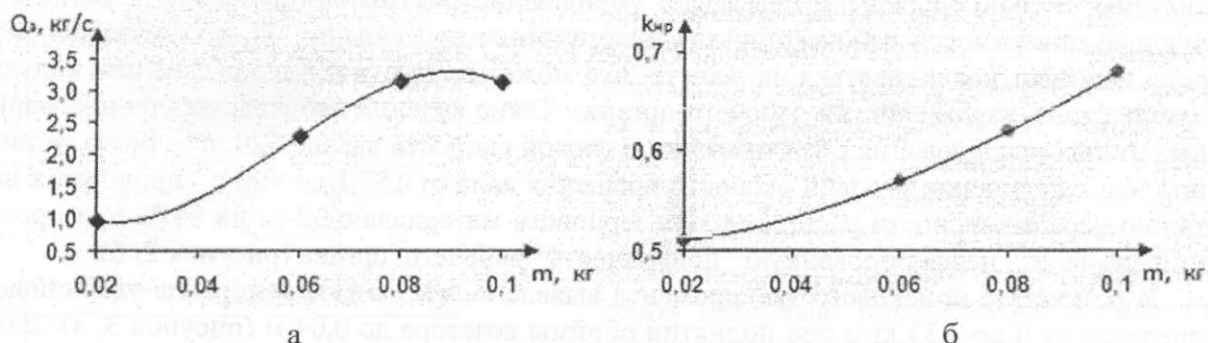


Рисунок 5 – Графики зависимостей пропускной способности оборудования (а) и неравномерности распределения (б) от изменения массы дебаланса

Эксперименты по варьированию массы дебаланса (рисунок 5) выявили, что пропускная способность оборудования увеличивается от 0,96 до 3,14 кг/с с изменением массы дебаланса от 0,02 до 0,08 кг. Увеличение этого параметра приводило к стабилизации пропускной способности, а в некоторых случаях и её снижению. Данные опыты показали, что с увеличением массы дебаланса возрастает неравномерность распределения материала при прохождении его через перфорированную поверхность распределительного устройства. При увеличении массы дебаланса свыше 0,1 кг наблюдались нежелательные эффекты, связанные с нарушением прочности конструкции и вызванные резонансными явлениями. Графики зависимостей пропускной способности оборудования (рисунок 6, а) и неравномерности распределения (рисунок 6, б) от изменения величины, характеризующей расположение точки подвески колеблющейся части системы от дебаланса показали, что данный параметр несущест-

венно влияет на пропускную способность оборудования, однако значим для распределения зернового материала в камере смешивания. Так, при изменении величины  $z_d$  от 0,12 до 0,16 м пропускная способность оборудования увеличилась лишь на 5,3 %, тогда как изменение неравномерности распределения материала в камере смешивания составило 25 %, причём в сторону её увеличения.

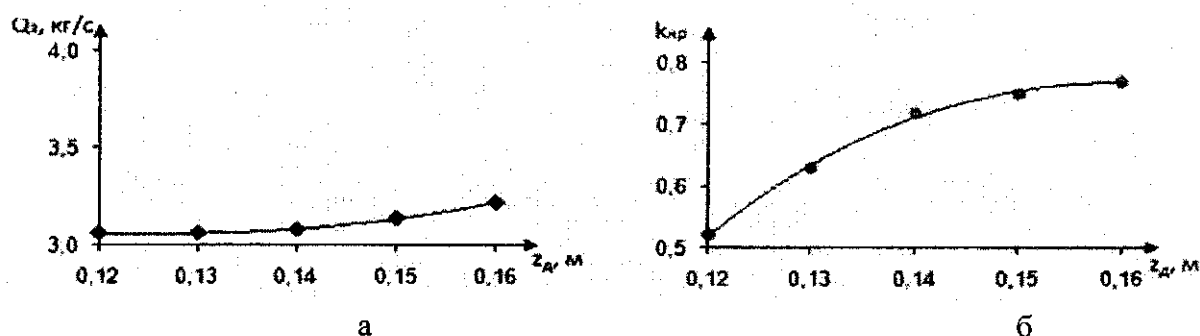


Рисунок 6 – Графики зависимостей пропускной способности оборудования (а) и неравномерности распределения (б) от изменения величины, характеризующей расположение точки подвески колеблющейся части системы от дебаланса

#### Заключение

Обобщив результаты исследований, был сделан вывод, что границы варьирования факторов, оказывающих влияние на процесс консервирования зерна в предлагаемом оборудовании, изменяются в следующем диапазоне: угловая скорость вала  $\omega \in [195; 320]$ ; безразмерный параметр, характеризующий соотношение высоты поднятия обечайки к её диаметру  $\delta_{об} \in [0,056; 0,22]$ ; безразмерный параметр, характеризующий соотношение радиуса частицы обрабатываемого материала к радиусу отверстия  $\nu \in [5,30; 6,70]$ ; безразмерный параметр, характеризующий отношение массы дебаланса к массе колеблющейся части рабочего органа  $\delta_M \in [0,0014; 0,0071]$ ; безразмерный параметр, характеризующий расположение дебаланса, относительно центра масс колеблющейся части системы  $\delta_d \in [1,41; 1,88]$ . Результаты работы будут использованы при проведении многофакторного эксперимента для определения рациональных параметров процесса нанесения консервантов на поверхность зерна.

#### Литература

1. Киров, Н. Консервирование влажного зерна / Н. Киров, О. Божинова, Л. Недялков. – М.: Колос, 1982. – 159 с.
2. Шаршунов, В.А. Состояние и тенденции применения новых ресурсосберегающих технологий при производстве комбикормов/ В.А. Шаршунов [и др.] – М.: Девятка Принт, 2004. – 136 с.
3. Червяков, А.В. Повышение эффективности хранения фуражного зерна при производстве комбикормов/ А.В. Червяков. Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства: материалы науч. - практ. конф., (г. Горки, 15 сентября 2006 г.) – Горки: БГСХА, 2007. – С. 126–134.
4. Червяков, А.В. Результаты испытаний установок консервирования зерна УКЗ – 20 и УКЗ – 50. /А.В. Червяков, С.В. Курзенков, Л.М. Иващенко. Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства: материалы науч. - практ. конф., (г. Горки, 15 сентября 2006 г.) – Горки: БГСХА, 2007. – С. 152–156.
5. Червяков, А.В. Теоретические исследования динамики движения точки распределительного устройства питателя-дозатора оборудования для внесения консервантов/ А.В. Червяков, С.В. Курзенков, С.И. Козлов // Вестник БГСХА. – № 2.– Горки: БГСХА, 2007. – С. 132–138.
6. Шаршунов, В.А. Изучение параметров потока сыпучего материала в камере смешивания установки консервирования зерна / В.А. Шаршунов, А.В. Червяков, С.В. Курзенков // Известия НАН Беларуси. Серия аграрных наук – № 4. – Минск: Белорус. наука, 2008. – С. 94–102.
7. Шаршунов, В.А. Обоснование конструктивных параметров рабочего органа оборудования для внесения консервантов в поток зернового материала / В.А. Шаршунов, А.В. Червяков, С.В. Курзенков // Вестник МГУП. – № 1(4). – Могилёв: МГУП, 2008. – С. 74–81.
8. Степук, Л.Я. Механизация дозирования в кормоприготовлении / Л.Я. Степук. – Минск: Ураджай, 1986 г. – 152 с.
9. Заика, П.М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин. / Заика П.М. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.

Поступила в редакцию 15.05.2009