

УДК 631.35

## ИННОВАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕРНА ИЗ КОЛОСА

**В. Н. ОЖЕРЕЛЬЕВ**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет», Российская Федерация*

**В. Б. ПОПОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** молотильное устройство, колосовые зерновые культуры, знакопеременное воздействие, зерновка, угол наклона рифов, энергоемкость обмолота, дробление зерна, уравнение регрессии.

### Введение

В условиях преобладания на мировом рынке производителей сельскохозяйственной техники транснациональных компаний (CLAAS, John Deere и др.) конкурентные позиции производителей Союзного государства за последнее десятилетие ухудшились. При этом машиностроители России традиционно ориентируются на финансовую поддержку со стороны правительства, игнорируя возможности конструктивного совершенствования сельскохозяйственной техники, в том числе зерноуборочных комбайнов. В Союзном государстве колосовые зерновые культуры занимают более 80 % площади, убираемой зерноуборочными комбайнами.

Пропускная способность зерноуборочного комбайна обеспечивается надежным выполнением технологического процесса, несмотря на изменения состояния агрофона и урожайности зерновых [1]. Однако параметры и технологические возможности молотильно-сепарирующих и транспортирующих устройств, а также систем очистки могут не вполне соответствовать друг другу, что затрудняет создание эффективной в целом конструкции технологического тракта [2].

В энергетическом аспекте, в первую очередь, это относится к молотильным устройствам, резервы для совершенствования конструкции которых еще далеко не исчерпаны. Решением проблемы в этих условиях становится ориентация на инновации, опирающиеся на нереализованные пока оптимальные алгоритмы воздействия на убираемую культуру и ее отдельные элементы [3].

Целью работы является углубленное изучение физико-механических свойств колосовых зерновых культур и синтез конструкции молотильного устройства (МУ), более эффективно взаимодействующей с убираемой культурой.

### Постановка задачи. Анализ свойств колосовых зерновых культур

Известны три базовых физико-механических свойства колосовых зерновых культур, перспективные для использования их в качестве стартовых точек для совершенствования алгоритма воздействия рабочих органов зерноуборочного комбайна на убираемые растения (рис. 1).

Во-первых, это усилие отрыва зерна от стержня колоса, которое в поперечном направлении существенно меньше, чем при воздействии вдоль зерновки. Реализо-

вать имеющееся различие в максимальной степени позволяет знакопеременное воздействие на колос в перпендикулярном направлении [4], что и составляет основное содержание предлагаемой статьи.

Во-вторых, соотношение зерна и соломы в поступающем в молотилку зерновом ворохе. Уменьшению негативного влияния излишней соломистости на энергоемкость процесса обмолота способствует переход на очесывание растений на корню [5].

В-третьих, у большинства колосовых зерновых культур чешуи, охватывающие каждую зерновку, дополнительно укрепляют ее положение и препятствуют эффективной реализации ударного воздействия на нее в процессе обмолота бичей молотильного барабана. Следовательно, вне зависимости от способа отделения плодосодержащей части растения от земли (срезание традиционной жаткой или очес на корню) целесообразно предварительно разрушить или ослабить чешуйчатое окружение каждой зерновки.

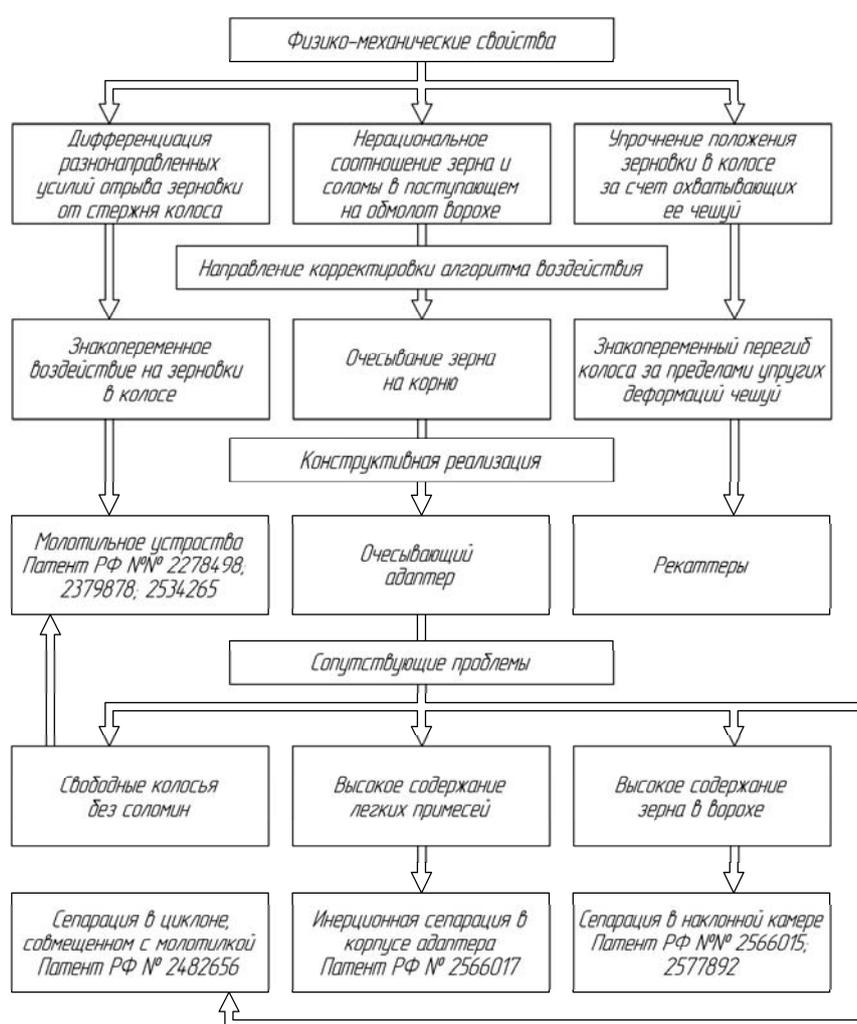


Рис. 1. Стратегия совершенствования конструкции молотильного устройства и зерноуборочного комбайна

С решением вышеупомянутых проблем актуальной становится максимальная адаптация последующих фаз технологического процесса к физико-механическим свойствам полученного вороха. Так, в случае очеса зерна на корню доминирующей проблемой становится чрезмерное содержание в ворохе мелких легких примесей и наличие свободных колосьев разной длины, содержащих различное количество оставшихся в них

зерен. Поэтому целесообразна предварительная сепарация очесанного вороха до поступления его в молотильное устройство. Присутствие в ворохе недомолоченных колосьев, практически лишенных соломины, предполагает, что дальнейшее технологическое воздействие на них связано с выбором типа автономного домолачивающего устройства.

### Синтез молотильного аппарата, обеспечивающего знакопеременное воздействие на колос

Самой энергоемкой технологической операцией при комбайновой уборке зерна является обмолот. Так, например, на привод традиционного молотильного барабана приходится около 40 % от общей мощности двигателя зерноуборочного комбайна. В связи с этим изыскание технических возможностей по уменьшению указанных затрат является актуальной научной и практической задачей.

В качестве одного из наиболее перспективных направлений снижения энергоемкости процесса обмолота может рассматриваться молотильное устройство, реализующее знакопеременный характер нагружения связей зерна с колосом. Существенное улучшение работы таких МУ достигается использованием поперечной нагрузки на зерновку. Установлено, что в поперечном по отношению к стержню колоса направлении прочность связи с ним зерновки существенно меньше, чем в продольном, традиционно используемом в МУ, а сопротивляемость любого материала знакопеременным нагрузкам уменьшается еще в 1,5–2 раза.

Для реализации такого алгоритма воздействия на колос было синтезировано устройство, содержащее два воронкообразных тела вращения 1, 2, сориентированные большими диаметрами вниз (рис. 2). Их рабочие поверхности размещены в пространстве так, что образуют молотильную камеру, внутренняя поверхность которой совершает угловые колебания. Перемещающиеся сверху вниз в молотильном пространстве колосья 5 подвергаются знакопеременным нагружениям ударно-вытирающего типа, вследствие чего происходит отрыв зерновок 6 и их просыпание сквозь решетчатую поверхность внутреннего тела вращения 2. Окончательная сепарация зерна должна осуществляться на перфорированной поверхности 3, выполняющей функцию соломотряса [6], [7].

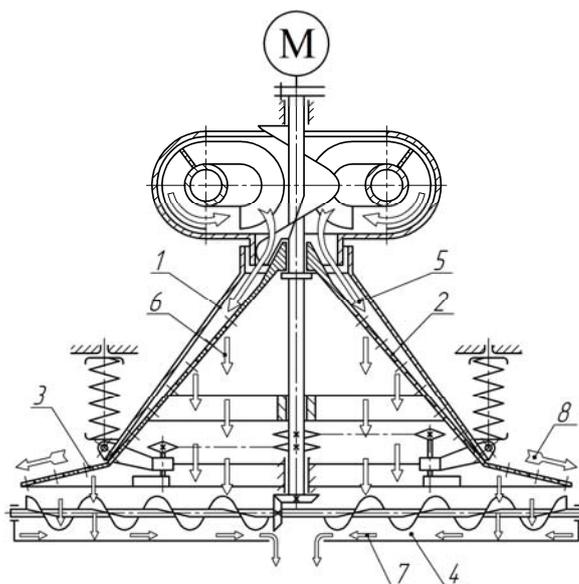


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального

молотильного устройства (патент № 2278498 Российская Федерация):

- 1 – наружное воронкообразное тело; 2 – внутреннее воронкообразное тело;
- 3 – перфорированная поверхность; 4 – выгрузное устройство; 5 – поток хлебной массы;
- 6 – поток основной массы зерен; 7 – поток зернового вороха; 8 – поток соломы

Экспериментальная установка МУ была разработана и изготовлена на заводе «Тихмаш» (г. Тихвин, Ленинградская область). Проведенные в 2010 г. ее предварительные испытания свидетельствуют о том, что принятая концепция выделения зерна себя оправдала. Хлебная масса при совместном действии силы тяжести и угловых колебаний перемещалась вниз по уклону в сторону уменьшающегося зазора молотильной камеры, где и происходил отрыв зерен. Часть из них сквозь отверстия перфорированной поверхности тела вращения 2 просыпалась сразу внутрь на выгрузное устройство 4. Окончательное выделение зерна из соломы происходило на нижней части колеблющегося тела 3. Солома 8 сходила с перфорированной поверхности 3, а зерно вместе с половой 7 просыпалось внутрь выгрузного устройства 4. За счет того, что наружное воронкообразное тело 1 имело возможность перемещаться в вертикальном направлении относительно внутреннего тела 2, происходил надежный контакт обмолачиваемой массы с рабочими поверхностями молотильной камеры без нарушений технологического процесса обмолота.

В результате испытаний установлено, что при принятых параметрах МУ значительная часть (до 10 %) колосьев проходила сквозь перфорированную поверхность тела 2, поэтому полученный зерновой ворох подлежит выделению из него прошедших колосьев и направлению их повторно на домолот.

#### **Экспериментальное определение основных параметров процесса выделения зерна из колоса**

С целью определения минимального числа циклов нагружения, необходимого для гарантированного отделения от стержня колоса всех содержащихся в нем зерен и оценки энергоемкости данного процесса, авторами была разработана экспериментальная установка (рис. 3). Она содержит стойку 1 и закрепленные на ней деку 2 и верхнюю площадку 3, рабочие поверхности которых выполнены рифлеными и размещены в пространстве так, что образуют молотильную камеру с регулируемым зазором [9]. При этом верхняя площадка 3 снабжена приводом 4, за счет чего она может совершать угловые колебания на угол  $\varphi$  (рис. 3, б).

Энергоемкость процесса выделения зерна из колоса оценивали при обмолоте пшеницы сорта «Московская 70». На предварительно откинутую вниз деку 2 укладывали колос 5 и посредством ручки 6 переводили ее в рабочее положение (рис. 3).

Усилие, затраченное на разрушение связей зерна с колосом в результате угловых колебаний площадки 3, фиксировала тензометрическая пластина 7, снабженная датчиками 8, которые передавали сигнал на ноутбук через АЦП (аналогоцифровой преобразователь) L-Card LTR-212 на всем протяжении рабочего процесса. После осуществления верхней площадкой 3 заданного числа колебаний электромагнит 9, втягивая шток 10, поворачивал защелку 11, резко выводя деку 2 из молотильной камеры вниз. Таким образом, исключалось влияние на результаты измерений процессов разгона и торможения колебательных движений, т. е. замеры осуществлялись в установившемся режиме.

Был спланирован полный факторный эксперимент с тремя уровнями варьирования зазора молотильной камеры (2, 5 и 8 мм) и последовательным увеличением числа колебаний верхней площадки 3 до полного выделения из колоса 5 всех содержащихся в нем зерен. Причем за одно движение верхней площадки принято ее отклонение от своего начального положения на угол поворота  $\varphi = 15^\circ$  (рис. 3, б). Влажность зерна находилась в пределах 9 %. Каждый вариант опыта был проведен в 25-кратной повторности. Всего было обработано и учтено 650 колосьев.

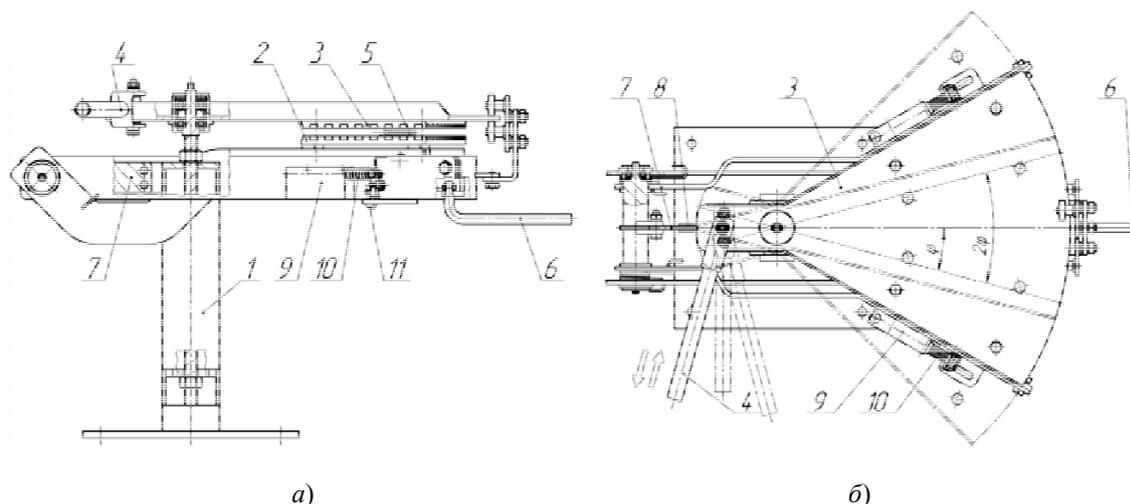


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (патент № 2483525 Российская Федерация):  
 а – главный вид; б – вид сверху: 1 – стойка; 2 – дека; 3 – верхняя площадка; 4 – привод;  
 5 – колос; 6 – ручка; 7 – тензометрическая пластина; 8 – датчики; 9 – электромагнит;  
 10 – шток; 11 – защелка

Полученные данные обработаны в программах «Excel» и «STATISTICA-6». В результате построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли выделенных зерен от параметров процесса (рис. 4). Уравнение регрессии, адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2 = 94,89\%$ ), представляет собой полином второго порядка [8]:

$$y = 93,689 + 2,514x_1 - 5,329x_2 + 0,062x_1^2 + 0,239x_2^2 - 0,025x_1x_2,$$

где  $y$  – доля зерен, выделенных из колоса, %;  $x_1$  – количество колебаний, шт;  $x_2$  – зазор в молотильной камере, мм.

Основным показателем, позволяющим оценить энергоемкость МУ, является работа, затраченная на выделение одного зерна из колоса. Для ее вычисления используем полученный в результате эксперимента график, по оси абсцисс которого отложены время цикла и соответствующее ему перемещение верхней площадки, а по оси ординат – усилие, зафиксированное датчиками (рис. 5). Поскольку движения верхней площадки имели характер гармонических колебаний ( $x = A \cdot \sin\varphi$ ), то нижняя шкала (перемещение) оказалась неравномерной.

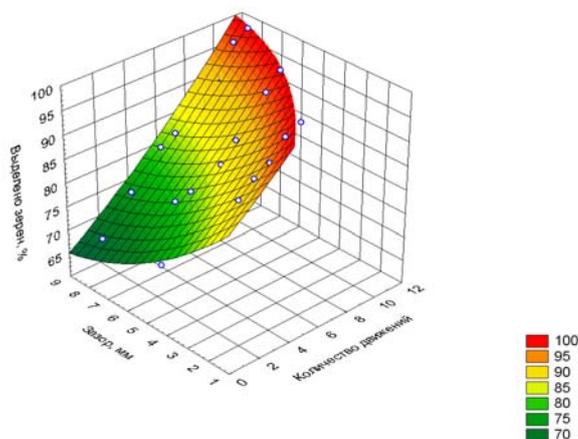


Рис. 4. Поверхность отклика при взаимодействии факторов: количества нагружений связей зерна с колосом и зазора в молотильной камере

После перехода на равномерную шкалу перемещения работа, затраченная на разрушение связей зерна с колосом за одно движение, была вычислена как площадь заштрихованной фигуры  $abc$ . Тогда вычленив кривую  $ac$  из графика и аппроксимировав ее по перемещению (по равномерной шкале), получим следующее уравнение регрессии:

$$y = 1578,9x^2 + 336,31x - 2,216,$$

где  $y$  – сила, Н;  $x$  – линейное перемещение верхней площадки, м.

В результате вычисления площади фигуры  $abc$  с помощью пакета прикладных программ «MathCAD», имеем:

$$A = \int_a^b f(x)dx = \int_0^{0,077} (1578,9x^2 + 336,31x - 2,216)dx = 1,06 \text{ Дж},$$

где  $a$  и  $b$  – пределы интегрирования (рис. 5), м;  $A$  – работа, затрачиваемая на выделение одного зерна, Дж.

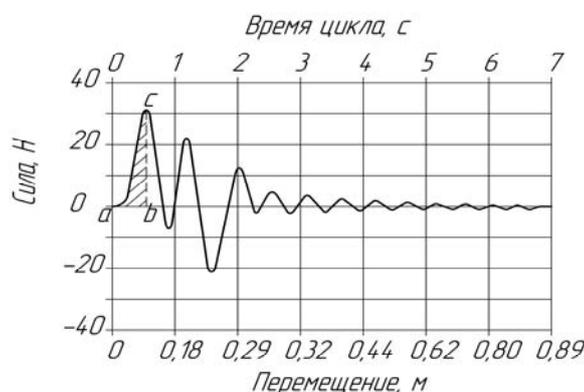


Рис. 5. График регистрации параметров аналого-цифровым преобразователем

Тогда разделив полученную работу на усредненное количество зерен, выделенных за одно движение площадки, окончательно получаем, что при зазоре молотильной камеры – 2, 5 и 8 мм, работа, затрачиваемая на выделение одного зерна из колоса, составит 0,027, 0,030 и 0,035 Дж, соответственно (рис. 6).

Таким образом, минимальная энергоёмкость выделения зерна из колоса соответствует минимальному зазору в молотильной камере, равному 2 мм (рис. 6). При этом обеспечивается снижение энергоёмкости процесса по сравнению с зазором 8 мм в 1,25 раза. Существенной разницы между зазором 2 и 5 мм не установлено.

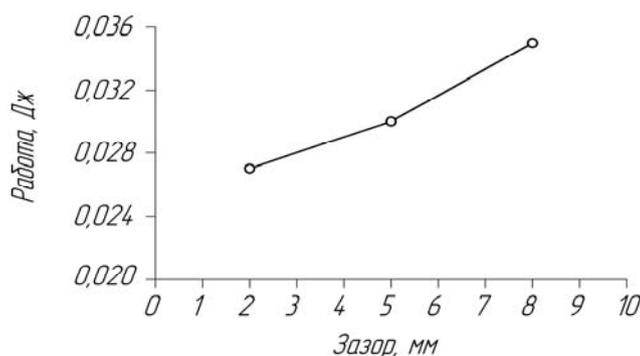


Рис. 6. Зависимость работы, необходимой для выделения из колоса одного зерна, от зазора в молотильной камере

Для сопоставления полученных результатов с энергоемкостью молотильного барабана бильного типа воспользуемся данными, характерными для много лет эксплуатируемого и подробно изученного комбайна Дон-1500Б, также работающего на обмолоте пшеницы «Московская 70».

Согласно методике, предложенной Д. В. Скрипкиным [9], затраты энергии, необходимые для выделения зерна из колоса барабаном бильного типа, могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$A = \frac{KNm}{q\beta},$$

где  $K$  – коэффициент, устанавливающий долю мощности, расходуемой на привод барабана, приходящуюся непосредственно на выделение зерна из колоса,  $K = 0,15–0,18$ ;  $N$  – мощность на валу молотильного барабана (40 % от общей мощности двигателя), кВт;  $q$  – пропускная способность молотилки, кг/с;  $m$  – средняя масса одного зерна, г;  $\beta$  – доля массы зерен в ворохе.

При расчете использованы следующие исходные данные: мощность двигателя – 165 кВт; пропускная способность молотилки – 8 кг/с; мощность на валу молотильного барабана –  $165 \cdot 0,4 = 66$  кВт; доля массы зерна в ворохе – 0,5; масса 1 зерна – 0,055 г (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ).

Подставив указанные данные в формулу, окончательно получаем:

$$A = \frac{0,15 \cdot 66 \cdot 0,055}{8 \cdot 0,5} = 0,14 \text{ Дж.}$$

Таким образом, практическая реализация в конструкции МУ зерноуборочного комбайна знакопеременного характера нагружения связей зерен со стержнем колоса обладает (по сравнению с использованием традиционного барабана бильного типа) высоким потенциалом для снижения энергоемкости комбайновой уборки.

Однако, при кажущейся отработке всех вопросов рассматриваемого технического решения, пока остаются нерешенными большое число конкретных проблем. Например, неизвестным остается оптимальный угол наклона рифов на рабочих органах МУ, обеспечивающий полноту выделения зерна из колоса при минимуме энергозатрат. Кроме того, отсутствуют исчерпывающие данные о дроблении зерна рабочими органами молотилки. Это существенно осложняет оптимизацию режимов ее работы.

В связи с этим был произведен лабораторный эксперимент, спланированный как полнофакторный, с пятью уровнями варьирования угла наклона рифов  $\alpha$  (0, 15, 30, 45 и 60°) верхней площадки (рис. 7) и последовательным увеличением числа ее колебаний до полного выделения из колоса всех содержащихся в нем зерен.

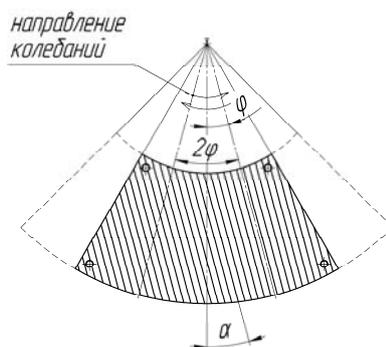


Рис. 7. Схема расположения рифов на верхней площадке

При проведении серии экспериментов последовательность изменения угла наклона рифов была случайной. Угол наклона рифов деки был равен  $\alpha = 0^\circ$ . Зазор в молотильной камере составлял 2 мм. Выбор данного параметра обусловлен минимальной энергоемкостью процесса обмолота, полученного при проведении предварительных экспериментов, и соответствует зазору на выходе из молотильной камеры большинства современных зерноуборочных комбайнов. За одно движение верхней площадки по-прежнему принято ее отклонение от своего начального положения на угол поворота  $\varphi = 15^\circ$ . Влажность зерна находилась в пределах 10,3 %, а масса 1000 зерен составляла 48,94 г (определяли весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ). Каждый вариант опыта проведен в 25-кратной повторности. Всего было учтено и обработано 800 колосьев.

Энергоемкость процесса выделения зерна из колоса оценивали при обмолоте пшеницы сорта «Московская 70». По результатам научных исследований построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли выделенных зерен от параметров процесса (рис. 8, а). Уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2 = 84,04\%$ ), представляет собой полином второго порядка [8]:

$$y = 80,0561 + 0,1435x_1 + 4,5382x_2 - 0,0059x_1^2 + 0,0302x_1x_2 - 0,2773x_2^2,$$

где  $y$  – доля зерен, выделенных из колоса, %;  $x_1$  – угол наклона рифов, град;  $x_2$  – количество колебаний, шт.

Анализ полученных зависимостей (рис. 8, а) свидетельствует о том, что наиболее интенсивное выделение зерна из колоса происходит при угле наклона рифов верхней площадки, равном  $\alpha = 30-45^\circ$ . В таком положении она обеспечивает стопроцентное выделение зерна из колоса за 6 движений. Существенной разницы между углами наклона рифов 0, 15 и  $60^\circ$  не установлено.

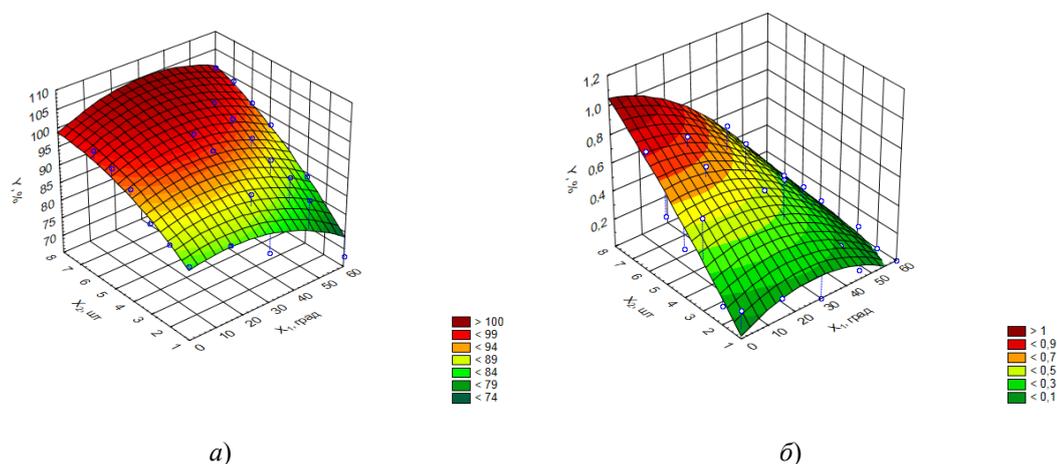


Рис. 8. Поверхность отклика при взаимодействии факторов: угла наклона рифов (а) и количества нагружений связей зерна с колосом (б)

Максимальное значение дробления зерна по результатам исследований находилось в пределах 0,85 %, что соответствовало  $x_1 = 0^\circ$  и  $x_2 = 6$  (рис. 8, б). При этом величина указанного параметра не превышала агротехнических требований для семенного зерна, равного 1 %. Наиболее адекватной моделью (с  $R^2 = 91,44\%$ ) является нелинейная регрессия с точкой разрыва. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{cases} y = 0,105 + 0,002x_1 + 0,029x_2 - 7,9 \cdot 10^{-5}x_1^2 - 0,0036x_2^2 + 2,3 \cdot 10^{-4}x_1x_2, \\ \text{при } y \leq 0,301; \\ y = 1,465 + 0,0155x_1 - 0,553x_2 - 0,00025x_1^2 + 0,074x_2^2 - 0,0013x_1x_2, \\ \text{при } y > 0,301, \end{cases}$$

где  $y$  – дробление зерна, %;  $x_1$  – угол наклона рифов, град;  $x_2$  – количество колебаний, шт.

Аналогичным образом (рис. 5) определена работа, затрачиваемая на выделение одного зерна из колоса. Так, при угле наклона рифов верхней площадки – 0, 15, 30, 45 и 60°, работа составляет, соответственно 0,031, 0,029, 0,028, 0,027 и 0,032 Дж (рис. 9).

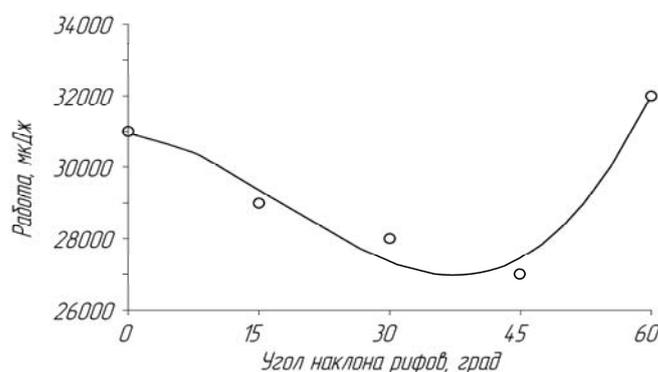


Рис. 9. Зависимость работы, затраченной на выделения одного зерна пшеницы, от угла наклона рифов

Уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с  $R^2 = 95,93\%$ ), представляет собой полином третьего порядка:

$$A = 0,124x^3 - 6,667x^2 - 27,778x + 30900,$$

где  $A$  – работа, мкДж;  $x$  – угол наклона рифов, град.

### Заключение

На основе проведенного анализа физико-механических свойств зерновых колосовых культур выделены три их базовых физико-механических свойства, перспективные для использования в качестве стартовых точек для совершенствования воздействия рабочих органов зерноуборочного комбайна.

Для молотильного устройства сформулирована задача снижения энергоемкости процесса обмолота зерновых колосовых культур.

Представлена инновационная конструкция молотильного аппарата, обеспечивающего в поперечном по отношению к стержню колоса направлении знакопеременное воздействие на колос. Анализ полученных на экспериментальной установке МУ данных свидетельствует о том, что минимальная энергоемкость процесса выделения зерна из колоса соответствует углу наклона рифов верхней площадки, равному 45°.

В связи с этим в настоящее время проводится уточнение отдельных конструктивных параметров элементов МУ. После уточнения постановки и решения задачи оптимизации параметров МУ его конструкция будет подвергнута соответствующей модернизации и на стационарной установке будут продолжены лабораторные испытания.

**Литература**

1. Доронин, Е. Ф. Зерноуборочные комбайны и их производительность / Е. Ф. Доронин // Тракторы и с.-х. машины. – 2007. – № 4. – С. 12–18.
2. Попов, В. Б. К вопросу повышения пропускной способности технологического тракта комплекса зерноуборочного роторного КЗР-10 / В. Б. Попов, В. Н. Пархоменко, А. С. Щетников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 5–12.
3. Ожерельев, В. Н. Перспективные направления совершенствования конструкции зерноуборочного комбайна / В. Н. Ожерельев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ. – Брянск : Брянский ГАУ, 2016. – С. 19–25.
4. Ожерельев, В. Н. Перспективные направления снижения энергоемкости процесса выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин // Тракторы и с.-х. машины. – 2012. – № 8. – С. 30–31.
5. Савин, В. Ю. Обоснование рациональных параметров и режимов работы прицепного очесывающего устройства для уборки зерновых культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Савин. – Воронеж, 2011. – 22 с.
6. Исследование параметров очесанного зернового вороха / В. Н. Ожерельев [и др.] // Техника в сел. хоз-ве. – 2013. – № 1. – С. 7–9.
7. Молотильное устройство : пат. № 2534265 Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 7/06, А 01 F 12/18 / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин ; заявка № 2013137025/13 от 06.08.2013 ; опубл. 2014, Бюл. № 33.
8. Ожерельев, В. Н. Энергоемкость выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин // Техника в сел. хоз-ве. – 2013. – № 4. – С. 22–24.
9. Скрипкин, Д. В. Совершенствование молотильно-сепарирующего устройства и технологии обмолота зерновых колосовых культур на корню: дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Скрипкин. – Волгоград, 2005. – 143 с.

*Получено 11.10.2017 г.*