

УДК 631.361.022

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕРНА ИЗ КОЛОСА**

<sup>1,2</sup>Пахомов Виктор Иванович  
д-р техн. наук  
РИНЦ SPIN-код: 5815-4913  
ORCID: 0000-0002-8715-0655  
Scopus Author ID: 57202647293

<sup>1</sup>Брагинетц Сергей Валерьевич  
канд. техн. наук  
РИНЦ SPIN-код: 4849-0287  
ORCID: 0000-0001-7137-5692  
Scopus Author ID: 57202639521  
[sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru)

<sup>1</sup>Бахчевников Олег Николаевич  
канд. техн. наук  
РИНЦ SPIN-код: 3350-9055  
ORCID: 0000-0002-3362-5627  
ResearcherID: S-3312-2016  
Scopus Author ID: 57202648620  
[oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

<sup>2</sup>Рудой Дмитрий Владимирович  
канд. техн. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код: 3297-3460

<sup>1</sup>Чернуцкий Михаил Викторович  
инженер  
РИНЦ SPIN-код: 3010-5441  
<sup>1</sup>ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

Совершенствуя рабочие органы молотильных устройств, осуществляющие непосредственное механическое воздействие на колос и находящиеся в нем зерна, невозможно добиться значительного снижения и полностью исключить травмирование зерна. Необходимо разработать новые методы бесконтактного выделения зерна из колоса при обмо- лоте, исключаящие непосредственное механиче- ское воздействие рабочих органов на зерна. Пер- спективным методом бесконтактного выделения зерна из колоса является сообщение стеблю с ко- лосом колебательного движения, перпендикуляр- ного их оси, что может вызвать резонансные явле- ния в различных частях колоса. В результате экс- периментальных и теоретических исследований установлено, что сообщая стеблю с колосом низ- кочастотные колебания в диапазоне 18...100 Гц, соответствующие собственным частотам его коле-

UDC 631.361.022

Technologies and means of agricultural mechanization

**RESULTS OF RESEARCHES OF THE POSSI- BILITY OF VIBRATION GRAIN SEPARATION FROM THE EAR**

<sup>1,2</sup>Pakhomov Viktor Ivanovich  
Dr.Sci.Tech.  
RSCI SPIN-code: 5815-4913  
ORCID: 0000-0002-8715-0655  
Scopus Author ID: 57202647293

<sup>1</sup>Braginets Sergey Valereyevich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 4849-0287  
ORCID: 0000-0001-7137-5692  
Scopus Author ID: 57202639521  
[sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru)

<sup>1</sup>Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 3350-9055  
ORCID: 0000-0002-3362-5627  
Researcher ID: S-3312-2016  
Scopus Author ID: 57202648620  
[oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

<sup>2</sup>Rudoy Dmitriy Vladivirovich  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 3297-3460

<sup>1</sup>Chernutskiy Mikhail Viktorovich  
engineer  
RSCI SPIN-code: 3010-5441  
<sup>1</sup>Agricultural Scientific Centre Donskoy, Zernograd, Russia  
<sup>2</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rus- sia

Enhancing the operative parts of a threshing mecha- nism which are realizing direct mechanical impact on an ear and being in it grains it is impossible to achieve the considerable lowering and to completely exclude traumatizing grain. New methods of noncontact grain separation from an ear in case of the threshing need to be developed. These methods exclude direct mechani- cal impact of operative parts on grains. A perspective method of noncontact grain separation from an ear is the imposition to a culm with an ear of oscillating mo- tion, perpendicular its axes. It is a resonance in differ- ent parts of an ear can cause. As a result of the pilot and theoretical studies it is set that when impart low frequency oscillations in the range 18...100 Hz corre- sponding to natural frequencies of its oscillations to a culm with an ear, it is possible to achieve corrupting of the ear or its separation from the culm as a result of a resonance. But grain separation, at the same time, does

баний, возможно добиться разрушения колоса либо его отделения от стебля в результате резонанса, но выделения зерен из колоса при этом не происходит, так как диапазон собственных резонансных частот колебаний зерна не совпадает с диапазоном собственных частот стебля с колосом и имеет более высокие значения. Анализ результатов теоретических исследований показывает, что для бесконтактного выделения зерна из колоса без его травмирования перспективным является сообщение ему высокочастотных колебаний в диапазоне 100...14000 Гц, совпадающих с его собственными частотами колебаний. Происходящий в этом случае резонанс вызывает возникновение собственных движений зерна, что приводит к его выделению из колоса

Ключевые слова: ЗЕРНО, ОБМОЛОТ ЗЕРНА, ТРАВМИРОВАНИЕ ЗЕРНА, ВЫДЕЛЕНИЕ ЗЕРНА ИЗ КОЛОСА, ВИБРАЦИЯ, НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, РЕЗОНАНС

not come from an ear as the range of natural resonance frequencies of grain oscillations does not match the range of natural frequencies of a culm with an ear and has higher values. The analysis of results of theoretical researches shows that for noncontact grain separation from an ear without its traumatizing is the imposition to it high-frequency oscillations in the range 100 ... 14000 Hz matching its natural frequencies of oscillations, which is proved to be perspective. The occurring resonance causes origin of own movements of grain that leads to its separation from the ear

Keywords: GRAIN, GRAIN THRESHING, GRAIN DAMAGE, GRAIN SEPARATION FROM AN EAR, VIBRATION, LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS, HIGH-FREQUENCY OSCILLATIONS, RESONANCE

DOI: <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-155-003>

## Введение

В настоящее время в России актуальной проблемой является высокий уровень травмирования зерна зерновых культур, в том числе озимой пшеницы, при обмолоте в процессе уборки, что в последующем отрицательно влияет на всхожесть семян [1]. Значительные механические повреждения получают зерна при взаимодействии с рабочими органами обычного зерноуборочного комбайна [2]. В настоящее время широкое распространение получают роторные комбайны, в которых зерна не подвергаются непосредственному ударному воздействию рабочих органов [3], но вследствие контакта с ними также подвергаются травмированию [4], хотя и в меньшей степени.

По этой причине в процессе создания новых сортов зерновых культур получаемые на небольших делянках в результате гибридизации растения убирают вручную, а полученные снопы обмолачивают на небольших молотильных устройствах, барабан которых вращается с меньшей скоростью, чем молотильный барабан комбайна. Это позволяет снизить травми-

рование зерна, но не исключает его полностью [5], что при небольшом количестве зерен в каждом образце селекционного материала отрицательно влияет на качество и продолжительность исследований по созданию новых сортов зерновых культур.

Результаты исследований [6, 7, 8] показывают, что совершенствуя рабочие органы молотильных устройств, осуществляющие непосредственное механическое воздействие на колос и находящиеся в нем зерна, невозможно добиться значительного снижения и, тем более, полностью исключить травмирование зерна [4]. Поэтому необходимо разработать принципиально новые методы безударного и бесконтактного выделения зерна из колоса, исключаящие непосредственное механическое воздействие рабочих органов на сами зерна [9].

Известно явление механического резонанса, для линейных систем, к которым относится и колос с зернами, заключающееся в значительном увеличении амплитуды стационарных колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с частотами собственных колебаний системы [10]. Предпосылкой для разработки нового метода обмолота является также свойство растений зерновых культур, заключающееся в том, что усилие, необходимое для отрыва зерна от стержня колоса, в поперечном направлении значительно меньше, чем в продольном [9].

Поэтому перспективным методом бесконтактного выделения зерна из колоса является сообщение стеблю с колосом колебательного движения, перпендикулярного его оси. Согласно выдвинутой авторами гипотезе, такое колебательное движение, сообщенное стеблю с колосом, может вызвать возникновение резонанса в различных частях колоса. Это, в свою очередь, может привести к принудительному выделению зерна в результате отделения охватывающих его чешуек от колоса или их разрушения. Возможно также разрушение колоса в целом. При таком способе выделения зерновки, предположительно, не будут подвергаться травмированию.

Для возбуждения механического резонанса необходимо предварительно теоретически определить собственные частоты колебаний стебля с колосом и содержащихся в нем зерен.

Для определения эффективности предлагаемого способа бесконтактного выделения зерна из колоса необходимо провести экспериментальные исследования этого процесса, после чего практически оценить его эффективность и теоретически объяснить механизм процесса и обосновать направления дальнейших исследований.

Цель исследования – изучить процесс бесконтактного разрушения колоса пшеницы и принудительного выделения из него зерен в результате сообщения ему колебательного движения с последующим возникновением резонансных явлений и определить перспективы его применения.

### **Методика**

Оригинальная экспериментальная установка (рис. 1) состояла из электродинамической головки и комплекта электрической аппаратуры.

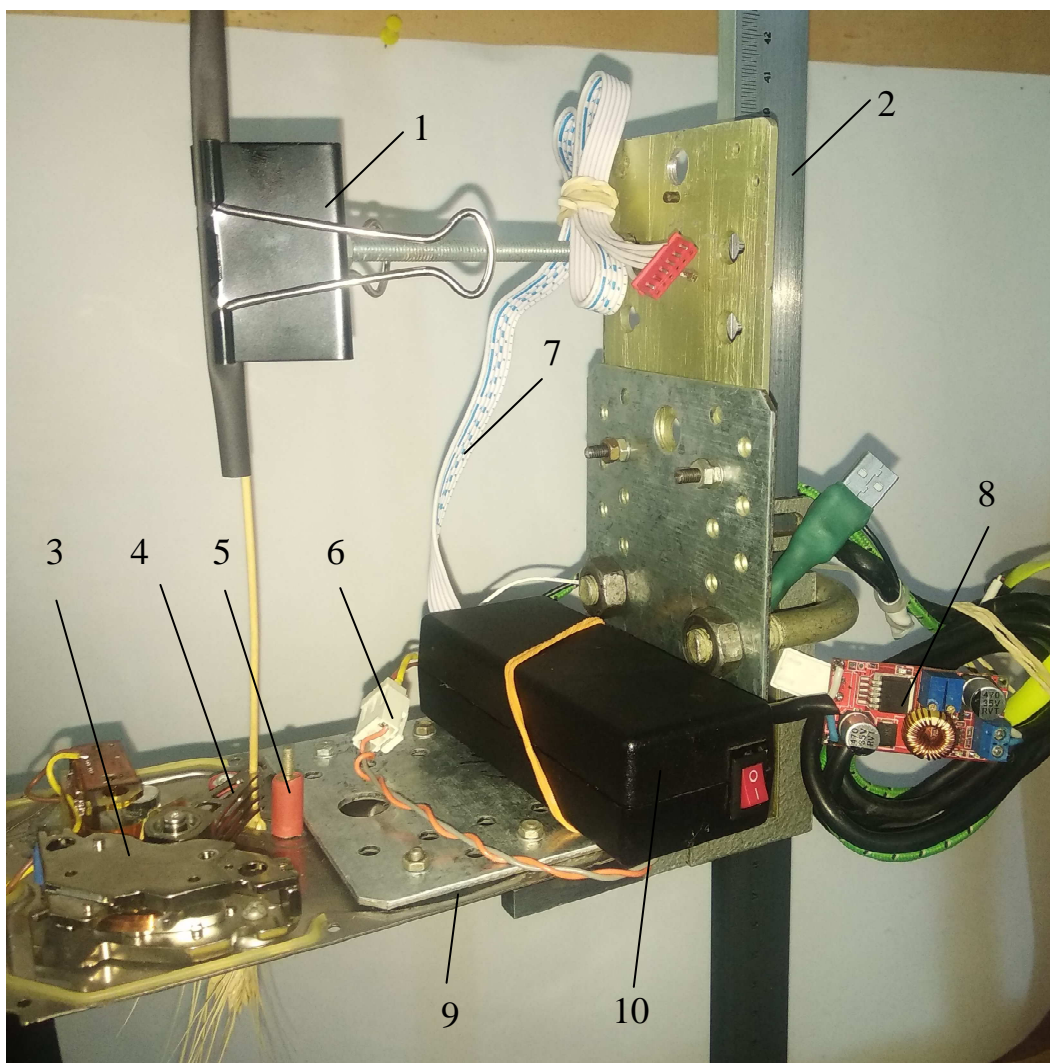


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для изучения способа  
вибрационного выделения зерна из колоса:

1 – зажим для фиксации стебля; 2 – штатив; 3 – электродинамическая головка и магниты; 4 – вибратор; 5 – ограничитель; 6 – разъем для подключения электропитания; 7 – интерфейсный кабель; 8 – преобразователь постоянного тока; 9 – подставка; 10 – программируемый электрический генератор и усилитель

Электродинамическая головка и комплект электрической аппаратуры установлены на подставке, закрепленной на штативе. В подставке выполнен паз в форме сектора окружности для перемещения стебля пшени-

цы.

Электродинамическая головка состоит из катушки, помещенной в магнитное поле, создаваемое неодимовыми магнитами. К катушке прикреплен вибратор, состоящий из четырех параллельных пластин с круглыми отверстиями в наконечнике. С двух сторон от наконечника вибратора размещены ограничители с резиновым покрытием, которые закреплены в пазах с возможностью изменения расстояния между ними.

Комплект электрической аппаратуры состоит из размещенных в одном корпусе генератора (плата «Arduino Pro mini») и усилителя «MX1508». Программирование генератора для получения на его выходе электрического тока с требуемой частотой осуществляется через интерфейс UART с персонального компьютера [11]. Регулируемым источником питания для усилителя служит преобразователь постоянного напряжения на микросхеме XL4005.

Объектом исследования были предварительно срезанные вручную стебли озимой пшеницы с колосьями урожая 2019 года. Длина стеблей составляла 25 см. Использовали стебли с колосьями безостой и остистой озимой пшеницы.

При выполнении экспериментов стебель пшеницы вставляли в паз подставки и отверстия вибратора и жестко закрепляли в держателе колосом вниз. При этом стебель размещали таким образом, что точка крепления колоса к стеблю находилась немного ниже паза подставки.

Через интерфейс UART с персонального компьютера задавали частоту электрического тока, выдаваемого генератором. Под действием электрического тока с заданной частотой катушка приводила в движение вибратор, который перемещался между ограничителями, перемещая часть стебля с колосом по пазу подставки. Расстояние между ограничителями составляло 10 мм.

Стеблю с колосом сообщали колебательное воздействие, перпенди-



кулярное его оси, с частотой, равной частоте электрического тока, выдаваемого генератором. В ходе проведенных опытов частоту колебаний изменяли в диапазоне 1...100 Гц, устанавливая значения, равные предварительно теоретически определенным собственным частотам колебаний с точностью до 0.5 Гц. Для проведения эксперимента с определенным значением частоты колебаний отбирали 5 стеблей остистой и 5 стеблей безостой пшеницы, над которыми последовательно проводили опыт. Колебательное движение сообщалось каждому стеблю пшеницы в течение 3 мин. После этого колос визуально изучали, определяя степень его повреждения или разрушения и наличие выделенных из него зерен.

Теоретические исследования протекания процесса бесконтактного вибрационного воздействия на колос и стебель пшеницы, а также расчет собственных частот их колебаний выполняли на базе положений линейной теории упругости [12, 13] с использованием программного комплекса ACELAN [14, 15]. В качестве исходных данных для анализа использовали полученные в 2018 г. в «АНЦ «Донской» значения силы связи стебля с колосом и отдельного зерна с колосом [16] и их физико-механических характеристик.

### **Результаты исследований**

Ранее на основе положений линейной теории упругости [12] были разработаны математические модели динамики стебля с колосом и отдельного зерна как упругого тела [15]. С использованием метода конечных элементов в программном комплексе ACELAN [13] было выполнено численное решение данных моделей с целью определения собственных частот колебаний, при которых в результате резонанса может происходить бесконтактное выделение зерна из колоса [15]. При этом осуществляли модальный анализ колебаний стебля с колосом и колебаний отдельного зерна.

Была создана численно-аналитическая модель стебля с колосом [15].

Принято граничное условие: основание стебля жестко зафиксировано. Принятые параметры стебля с колосом приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Физические параметры стебля с колосом пшеницы

Наименование	Значение
Плотность стебля, кг/м <sup>3</sup>	490
Плотность колоскового стержня, кг/м <sup>3</sup>	4050
Модуль Юнга стебля, Н/м <sup>2</sup>	1E10
Модуль Юнга колоскового стержня, Н/м <sup>2</sup>	1E8

В результате математического анализа собственных колебаний стебля с колосом пшеницы установлены формы его колебаний с распределением поперечных смещений (рис. 2) и вычислены соответствующие им собственные резонансные частоты стебля с колосом, приведенные в табл. 2. Номера рисунков соответствуют номерам собственных частот колебаний в табл. 2. Различные цвета стебля с колосом на рис. 2 соответствуют различной его деформации (красный – максимальная, фиолетовый – минимальная).

Таблица 2 – Собственные резонансные частоты стебля с колосом

Номер собственной частоты	Значение собственной частоты, Гц
1	1.57
2	9.34
3	18.12
4	31.68
5	59.03
6	93.79



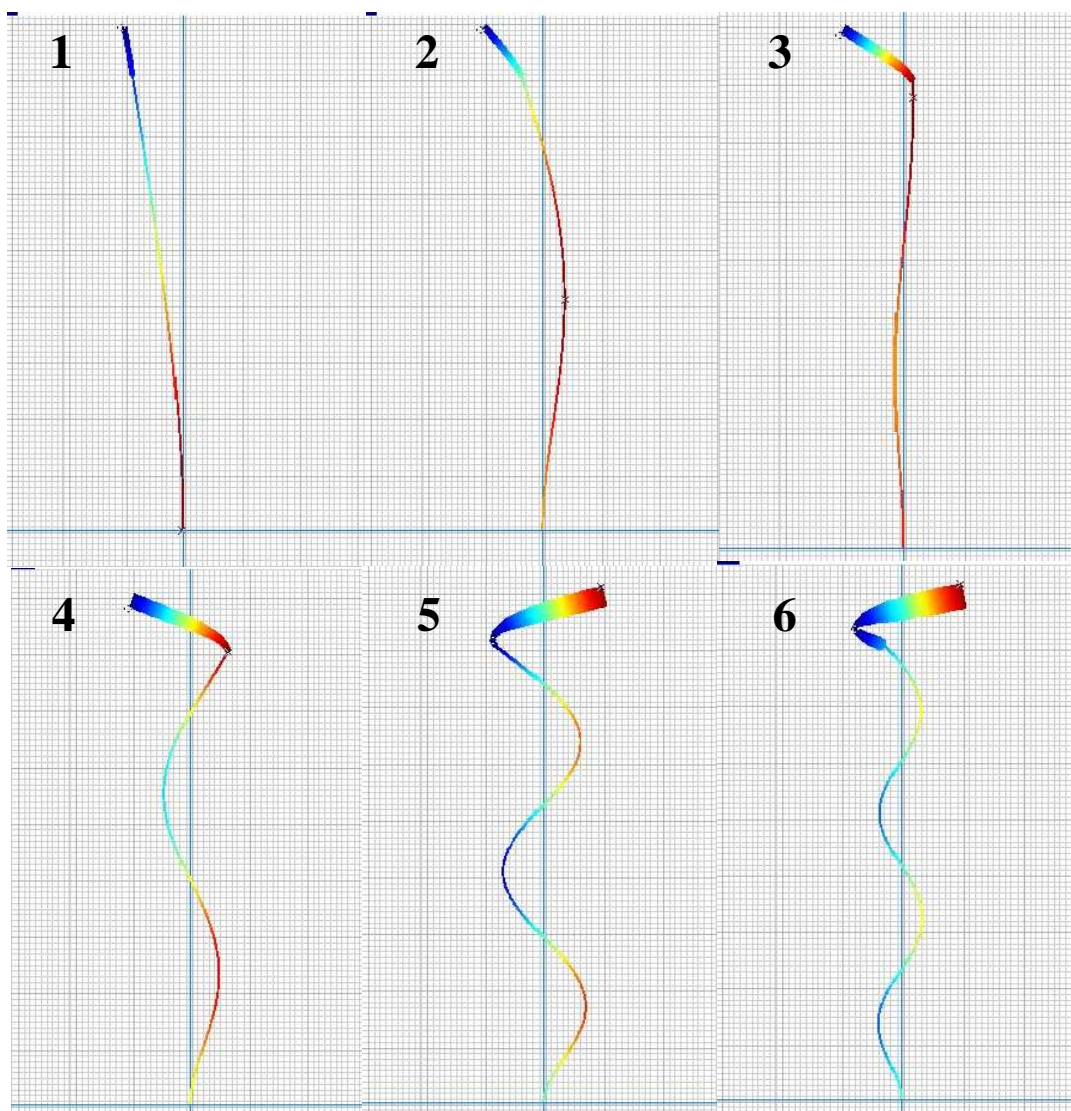


Рисунок 2 – Формы собственных колебаний стебля с колосом, смоделированные в пакете ACELAN

В результате экспериментальных исследований установлено, что под действием сообщаемых стеблю с колосом колебаний с частотами, соответствующими частоте его собственных колебаний, в результате механического резонанса происходит разрушение колоса либо его отделение от стебля (рис. 3).

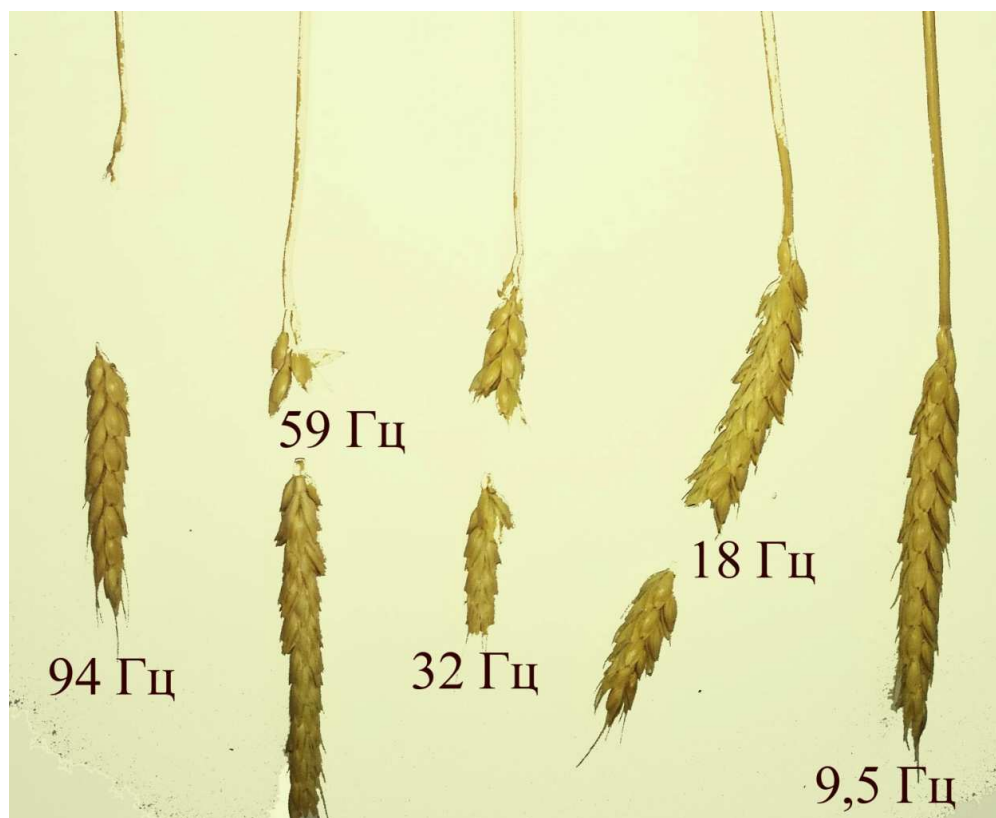


Рисунок 3 – Разрушение колоса озимой пшеницы в результате воздействия колебаний с определенной частотой

При частоте колебаний 1.57 и 9.34 Гц разрушения колоса не наблюдалось. При частоте колебаний 18.12, 31.68, 59.03 и 93.79 Гц происходило разрушение колоса, сопровождающееся его распадом на 2 или 3 части. В единичных случаях происходило отделение целого колоса от стебля. Разрушение колоса происходило как при воздействии на стебли безостой, так и остистой пшеницы. Однако, выделения зерен из колоса при этом не наблюдалось.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что вибрационное воздействие, вызывающее резонанс в стебле с колосом, является перспективным способом обмолота, но для выделения зерен из колоса значения частоты колебаний должны быть значительно увеличены по сравнению с диапазоном 18...100 Гц.

В результате моделирования также установлено, что низкочастотный

интервал колебаний (18...100 Гц) позволяет возбуждать значительные колебания колоса в результате его резонанса, тогда как стебель совершает колебания с относительно небольшой амплитудой. Однако, этот интервал частот колебаний не обеспечивает выделения зерна из колоса, так как не приводит к разрушению чешуек.

Поэтому были проведены теоретические исследования колебательного движения отдельного зерна пшеницы, находящего в колосе [15]. В результате анализа колебаний отдельного зерна пшеницы установлены его собственные резонансные частоты и формы колебаний. При этом расчеты проводились для случаев нахождения зерна на плодоножке со связью с чешуйками и без связи с ними, а также без плодоножки со связью с чешуйками (рис. 4). Различные цвета зерна на рис. 4 соответствуют различной его деформации (красный – максимальная, фиолетовый – минимальная).

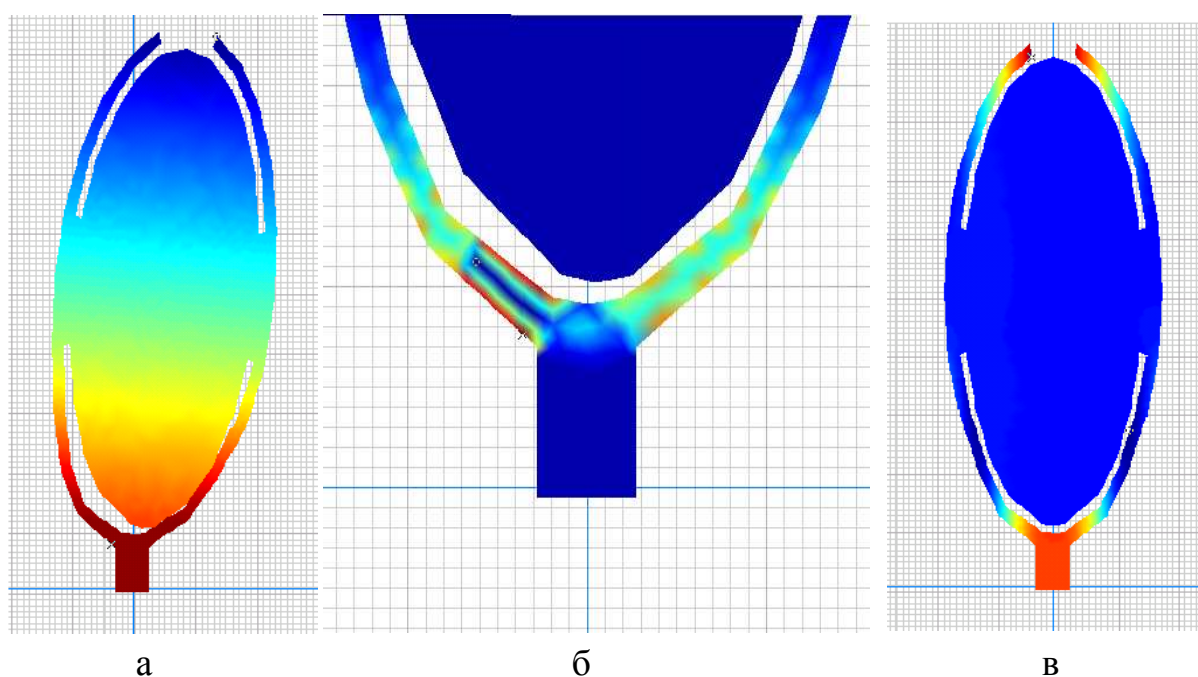


Рисунок 4 – Изгибная форма колебаний зерна без плодоножки со связью с чешуйками:

а – распределение горизонтальных смещений; б – распределение интенсивности напряжений; в – распределение вертикальных смещений

Определяли распределение горизонтальных смещений, вертикальных напряжений и интенсивности напряжений.

Была создана численно-аналитическая модель отдельного зерна с колосковыми чешуйками с учетом их контактного взаимодействия без плодоножки и рассчитаны собственные частоты и собственные формы колебаний [15]. На рис. 5 представлено графическое отображение математической конечноэлементной модели зерна. Принятые параметры зерна пшеницы приведены в табл. 3 [16]. Приняты следующие граничные условия: ножка зерна жестко зафиксирована вдоль линии А, между зерном и чешуйками существует контакт без трения.

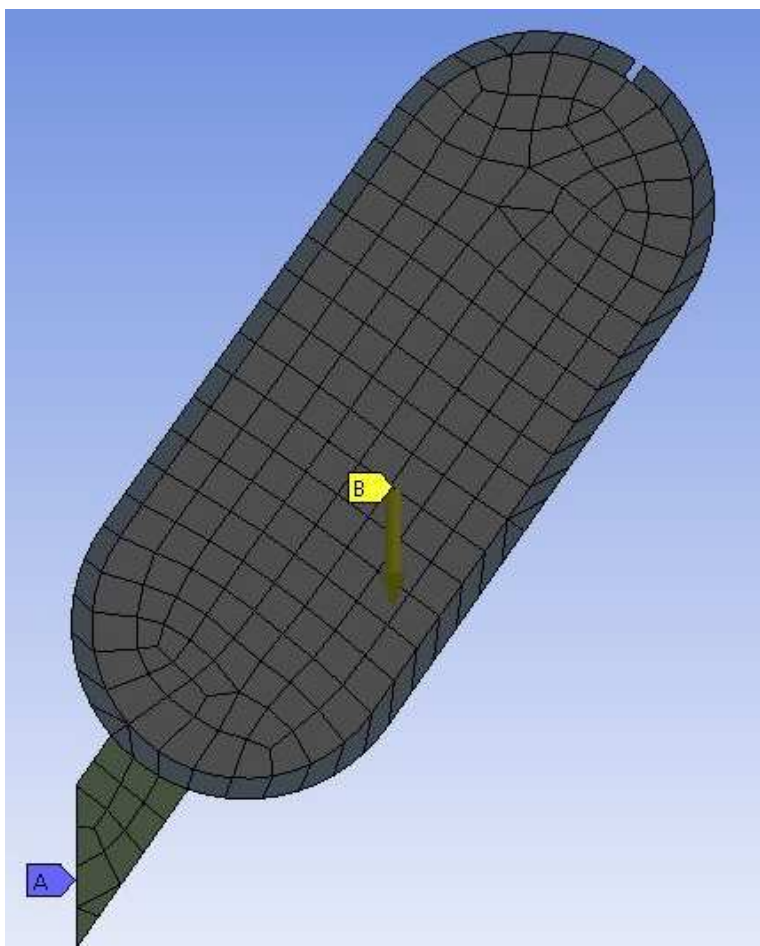


Рисунок 5 – Конечноэлементная модель зерна пшеницы



Таблица 3 – Физические параметры зерна пшеницы

Наименование	Значение
Плотность зерна, кг/м <sup>3</sup>	1470
Плотность чешуек, кг/м <sup>3</sup>	490
Плотность ножки, кг/м <sup>3</sup>	490
Модуль Юнга зерна, Н/м <sup>2</sup>	1E10
Модуль Юнга чешуек, Н/м <sup>2</sup>	1E10
Модуль Юнга ножки, Н/м <sup>2</sup>	1E10

В табл. 4 представлены определенные в результате расчетов на основе математической модели собственные частоты колебаний отдельного зерна с чешуйками.

Таблица 4 – Собственные частоты колебаний зерна пшеницы

№	Частота колебаний, Гц
1	131.59
2	1274.9
3	1622.8
4	7367.3
5	9396
6	13491

Установлено, что собственные резонансные частоты зерна соответствуют высокочастотному диапазону 100...14000 Гц, т.е. значительно выше собственных частот колебаний стебля с колосом, что объясняет отсутствие выделения зерен из колоса при экспериментах с воздействием в низкочастотном диапазоне 18...100 Гц.

На рис. 6 представлены собственные формы колебаний отдельного

зерна пшеницы, соответствующие вычисленным согласно математической модели собственным частотам (табл. 4). Номера рисунков соответствуют номерам частот колебаний в табл. 4. Различные цвета зерна на рис. 6 соответствуют различной его деформации (красный – максимальная, фиолетовый – минимальная).

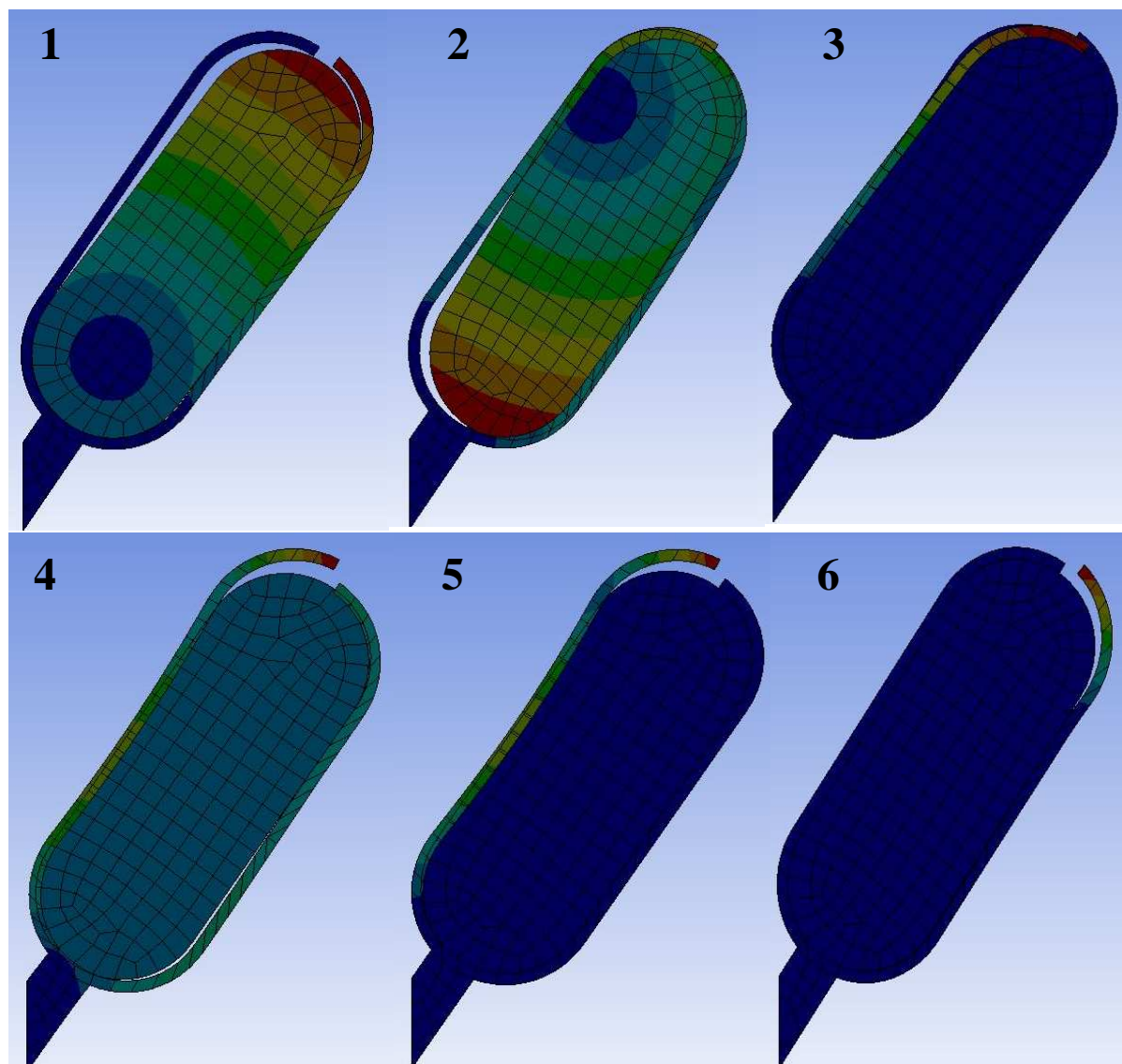


Рисунок 6 – Собственные формы колебаний зерна пшеницы

Из изображений зерна на рис. 6 видно, что при собственных частотах 1 и 2 колеблется преимущественно само зерно, а при частотах 3-6 колеблются чешуйки. Таким образом, можно сделать вывод, что сообщая колосу



колебания с заданной частотой, возможно регулировать колебания зерна и чешуек отдельно. Но для эффективного выделения зерна из колоса возбуждение колебаний чешуек более перспективно, так как позволяет нарушить их связь с зерном при меньших затратах энергии.

Анализ результатов расчетов показывает, что для бесконтактного выделения зерна из колоса перспективным является сообщение ему высокочастотных колебаний в диапазоне 100...14000 Гц, совпадающих с его собственными частотами колебаний, в результате чего происходит механический резонанс. В ходе резонанса происходят интенсивные движения самого зерна: изгибные движения зерна с плодоножкой и чешуйками, что может привести к выделению зерна вследствие отлома чешуек от колоса; движения зерна вдоль камеры, что может привести к его выделению без разрушения чешуек, что более перспективно с точки зрения снижения энергозатрат на осуществление процесса.

### **Заключение**

В результате экспериментальных и теоретических исследований установлено, что сообщая стеблю с колосом низкочастотные колебания в диапазоне 18...100 Гц, соответствующие собственным частотам его колебаний, возможно добиться разрушения колоса либо его отделения от стебля в результате резонанса, но выделения зерен из колоса при этом не происходит, так как диапазон собственных резонансных частот колебаний зерна не совпадает с диапазоном собственных частот стебля с колосом и имеет более высокие значения.

Анализ результатов теоретических исследований показывает, что для бесконтактного выделения зерна из колоса без его травмирования перспективным является сообщение ему высокочастотных колебаний в диапазоне 100...14000 Гц, совпадающих с его собственными частотами колебаний. Происходящий в этом случае резонанс вызывает возникновение собственных движений зерна, что приводит к его выделению из колоса.

### Литература

1. Пехальский И.А. Травмирование внутренних структур зерновок как фактор снижения продуктивности семян зерновых культур / И.А. Пехальский, В.М. Кряжков, А.А. Артюшин, В.Ф. Сорочинский // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 117. – С. 783–792.
2. Lashgari M. Qualitative analysis of wheat grain damage during harvesting with John Deere combine harvester / M. Lashgari, H. Mobli, M. Omid, R. Alimardani, S.S. Mohtasebi // International Journal of Agriculture and Biology. – 2008. – Т. 10. – № 2. – С. 201–204.
3. Sotnar M. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses / M. Sotnar, J. Pospisil, J. Marecek, T. Dokukilova, V. Novotny // Acta technologica agriculturae. – 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 105–108.
4. Benaseer S. Impact of harvesting and threshing methods on seed quality - A review / S. Benaseer, P. Masilamani, V.A. Albert, M. Govindaraj, P. Selvaraju, M. Bhaskaran // Agricultural Reviews. – 2018. – Т. 39. – № 3. – С. 183–192.
5. Patel S.K. Effect of operational speed and moisture content of wheat crop on plot combine harvester / S.K. Patel, B.P. Varshney // Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America. – 2007. – Т. 38. – № 4. – С. 51.
6. Shahbazi F. A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage / F. Shahbazi // Journal of Agricultural Science and Technology. 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 505–512.
7. Govindaraj M. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties / M. Govindaraj, P. Masilamani, D. Asokan, P. Selvaraju // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2017. – Т. 6. – С. 2375–2383.
8. Shahbazi F. Mechanical Damage to Corn Seeds / F. Shahbazi, R. Shahbazi // Cercetari Agronomice in Moldova. – 2018. – Т. 51. – № 3. – С. 1–12.
9. Ожерельев В.Н. Инновации процесса выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, В.Б. Попов // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2017. – № 4 (71). – С. 26–35.
10. Попов И.П. Разновидности резонансов в механике / И.П. Попов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2019. – Т. 51. – № 1. – С. 88–95.
11. Горочный В.В. Цифровой блок интерфейса UART Single Wire / В.В. Горочный // Academy. – 2018. – № 12 (39). – С. 38–40.
12. Федоров Л.В. О решении динамической задачи линейной теории упругости / Л.В. Федоров // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2018. – № 6. – С. 13–20.
13. Чистяков А.Е. Математическое моделирование деформации стержня / А.Е. Чистяков, Е.А. Костырко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8. – С. 57–61.
14. Соловьев А.Н. Разработка конечноэлементного пакета ACELAN и его применение в научных исследованиях и образовании / А.Н. Соловьев, П.А. Оганесян, Д.В. Криворотова, А.А. Соловьева // В сборнике: Инновационные технологии в науке и образовании – ИТНО-2014. Сборник научных трудов международной научно-методической конференции. – 2014. – С. 110–112.
15. Разработка математических и компьютерных моделей зависимостей и условий выделения зерна из колоса при различных способах физико-механического воздействия на него на основе аналитических, численных методов и CAD-CAE комплексов: отчет по контракту № 0358100001618000013-0001658-01 / А.Н. Соловьев, А.А. Матросов, И.А. Панфилов, Д.В. Рудой. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический

университет, 2018. – 87 с.

16. Бурьянов А.И. Методы и результаты определения естественной силы связи зерна с колосом в период созревания и полной спелости / А.И. Бурьянов, И.В. Червяков, А.А. Колинько, В.И. Пахомов, Е.В. Ионова, В.Ф. Хлыстунов // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 6 (60). – С. 21–25.

### References

1. Pekhal'skij I.A., Krjazhkov V.M., Artjushin A.A., Sorochinskij V.F. Travmirovanie vnutrennikh struktur zernovok kak faktor snizhenija produktivnosti semjan zernovykh kul'tur. Politematicheskij setevoj ehlektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2016, No. 117, pp. 783–792.

2. Lashgari M., Mobli H., Omid M., Alimardani R., Mohtasebi S.S. Qualitative analysis of wheat grain damage during harvesting with John Deere combine harvester. International Journal of Agriculture and Biology, 2008, Vol. 10, No. 2, pp. 201–204.

3. Sotnar M., Pospisil J., Marecek J., Dokukilova T., Novotny V. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. Acta technologica agriculturae, 2018, Vol. 21, No. 3, pp. 105–108.

4. Benaseer S., Masilamani P., Albert V.A., Govindaraj M., Selvaraju P., Bhaskaran M. Impact of harvesting and threshing methods on seed quality - A review. Agricultural Reviews, 2018, Vol. 39, No. 3, pp. 183–192.

5. Patel S.K., Varshney B.P. Effect of operational speed and moisture content of wheat crop on plot combine harvester. Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 2007, Vol. 38, No. 4, pp. 51.

6. Shahbazi F. A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, Vol. 14, No. 3, pp. 505–512.

7. Govindaraj M., Masilamani P., Asokan D., Selvaraju P. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, Vol. 6, pp. 2375–2383.

8. Shahbazi F., Shahbazi R. Mechanical Damage to Corn Seeds. Cercetari Agronomice in Moldova, 2018, Vol. 51, No. 3, pp. 1–12.

9. Ozherel'ev V.N., Popov V.B. Innovacii processa vydelenija zerna iz kolosa. Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo, 2017, No. 4 (71), pp. 26–35.

10. Popov I.P. Raznovidnosti rezonansov v mekhanike. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Matematika. Fizika, 2019, Vol. 51, No. 1, pp. 88–95.

11. Gorochnyj V.V. Cifrovoj blok interfejsa UART Single Wire. Academy, 2018, No. 12 (39), pp. 38–40.

12. Fedorov L.V. O reshenii dinamicheskoy zadachi linejnoy teorii uprugosti. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela, 2018, No. 6, pp. 13–20.

13. Chistjakov A.E., Kostyrko E.A. Matematicheskoe modelirovanie deformacii sterzhnja. Izvestija JUFU. Tekhnicheskie nauki, 2011, No. 8, pp. 57–61.

14. Solov'ev A.N., Ogenesjan P.A., Krivorotova D.V., Solov'eva A.A. Razrabotka konechnoehlementnogo paketa ACELAN i ego primenenie v nauchnykh issledovanijakh i obrazovanii. V sbornike: Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii – ITNO-2014. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii, 2014, pp. 110–112.

15. Razrabotka matematicheskikh i komp'yuternykh modelej zavisimostej i uslovij vydelenija zerna iz kolosa pri razlichnykh sposobakh fiziko-mekhanicheskogo vozdejstvija na

nego na osnove analiticheskikh, chislennykh metodov i CAD-CAE kompleksov: otchet po kontraktu № 0358100001618000013-0001658-01 / A.N. Solov'ev, A.A. Matrosov, I.A. Panfilov, D.V. Rudoj. – Ros-tov-na-Donu: Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2018, 87 p.

16. Bur'janov A.I., Cheryjakov I.V., Kolin'ko A.A., Pakhomov V.I., Ionova E.V., Khlystunov V.F. Metody i rezul'taty opredelenija estestvennoj sily svjazi zerna s kolosom v period sozrevanija i polnoj spelosti. Zernovoe khozjajstvo Rossii, 2018, No. 6 (60), pp. 21–25.