Разработка и совершенствование технологий и средств механизации послеуборочной обработки зерна и семян полевых культур Крыма

ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И.Вернадского»
Академия биоресурсов и природопользования
факультет механизации производства и технологии переработки сельскохозяйственной продукции
д.т.н., доцент Завалий А.А.
к.т.н., доцент Воложанинов С.С.
к.физ.-мат.н., доцент Шиян О.В.

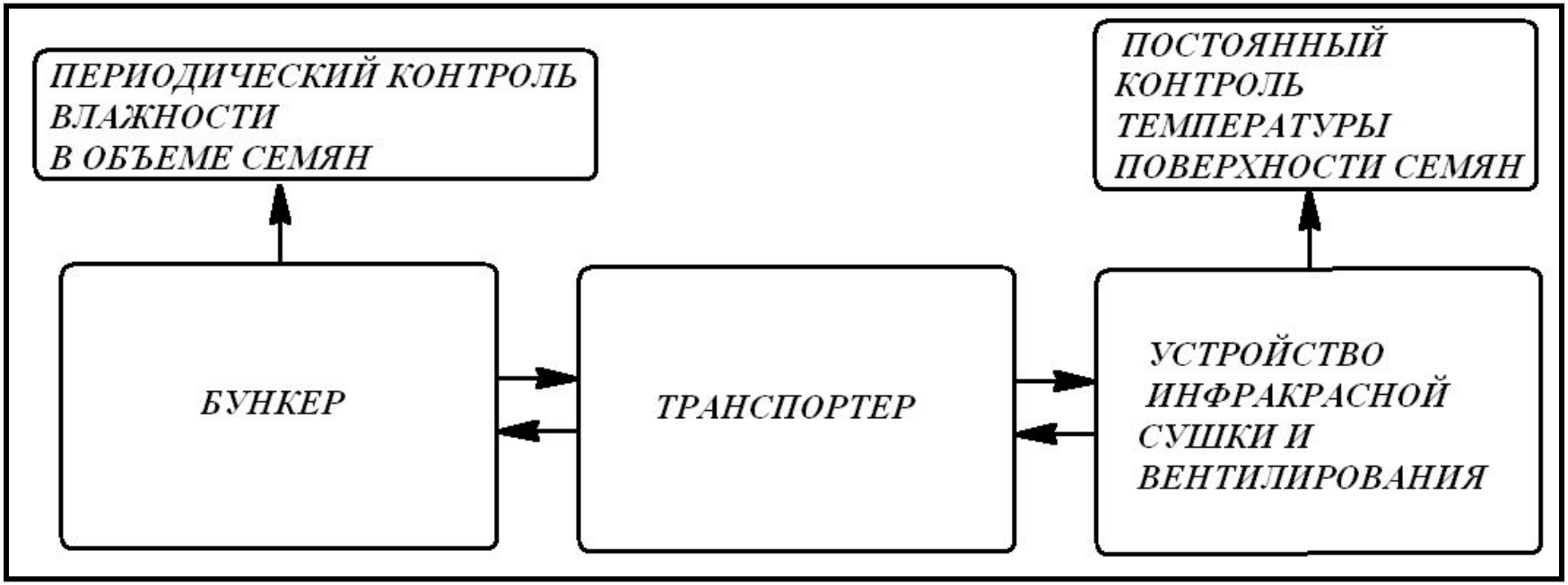
Работа выполняется в рамках инициативной НИР КФУ им. В.И. Вернадского
«Разработка и совершенствование технологий и средств механизации послеуборочной обработки зерна и семян полевых культур Крыма»

Цель работы: создание ресурсосберегающих средств механизации и механизированных экологически безопасных технологий первичной обработки и подготовки к хранению семян сельскохозяйственных культур, производимых в Крыму, в первую очередь элитного семенного материала

Ресурсосбережение+экологическая безопасность

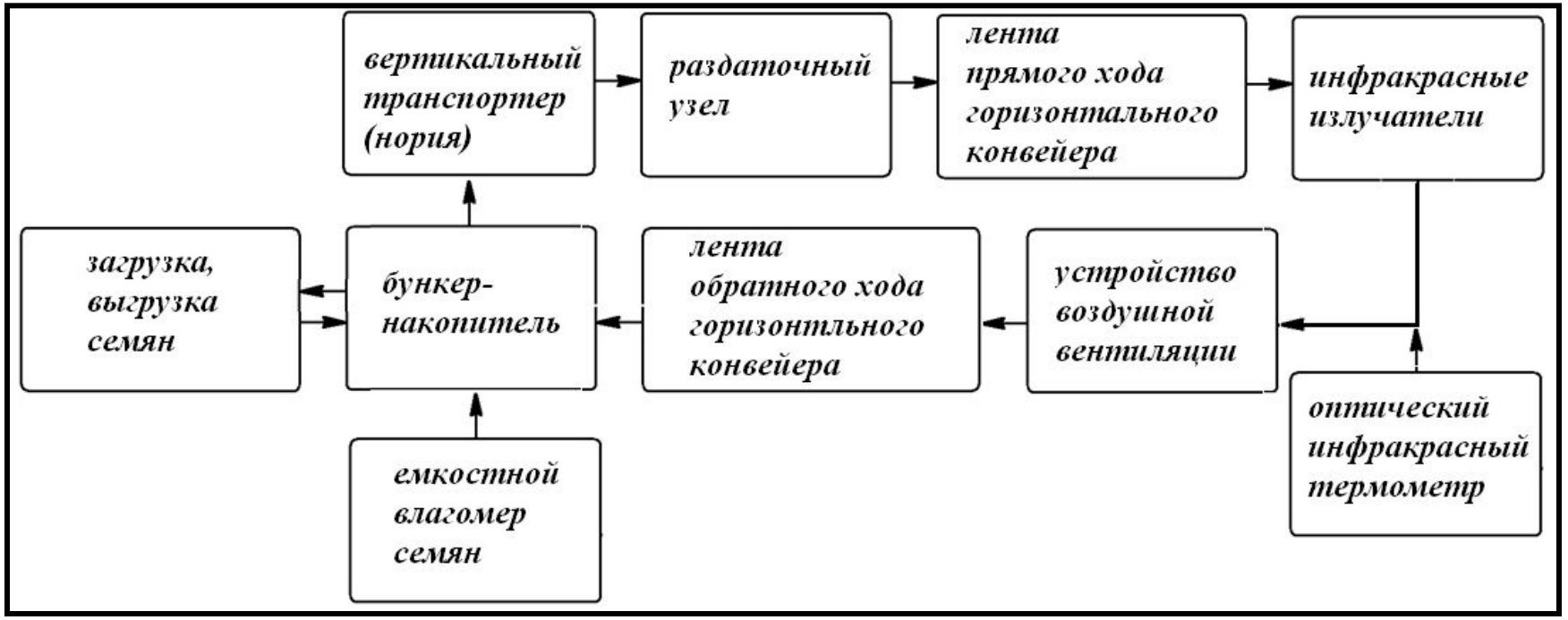
- **максимальная сохраняемость репродуктивной способности семян («атравматичность», «мягкие» режимы обработки)**
- **низкие удельные затраты энергии на обработку (экологически безопасный ИК нагрев)**
- **низкая стоимость оборудования («нежесткие» элементы оборудования и их системы)**
- **универсальность оборудования**
- **низкие эксплуатационные затраты (ремонт, замена узлов, обслуживание)**

Принципиальная схема конвейерного устройства инфракрасной сушки семян

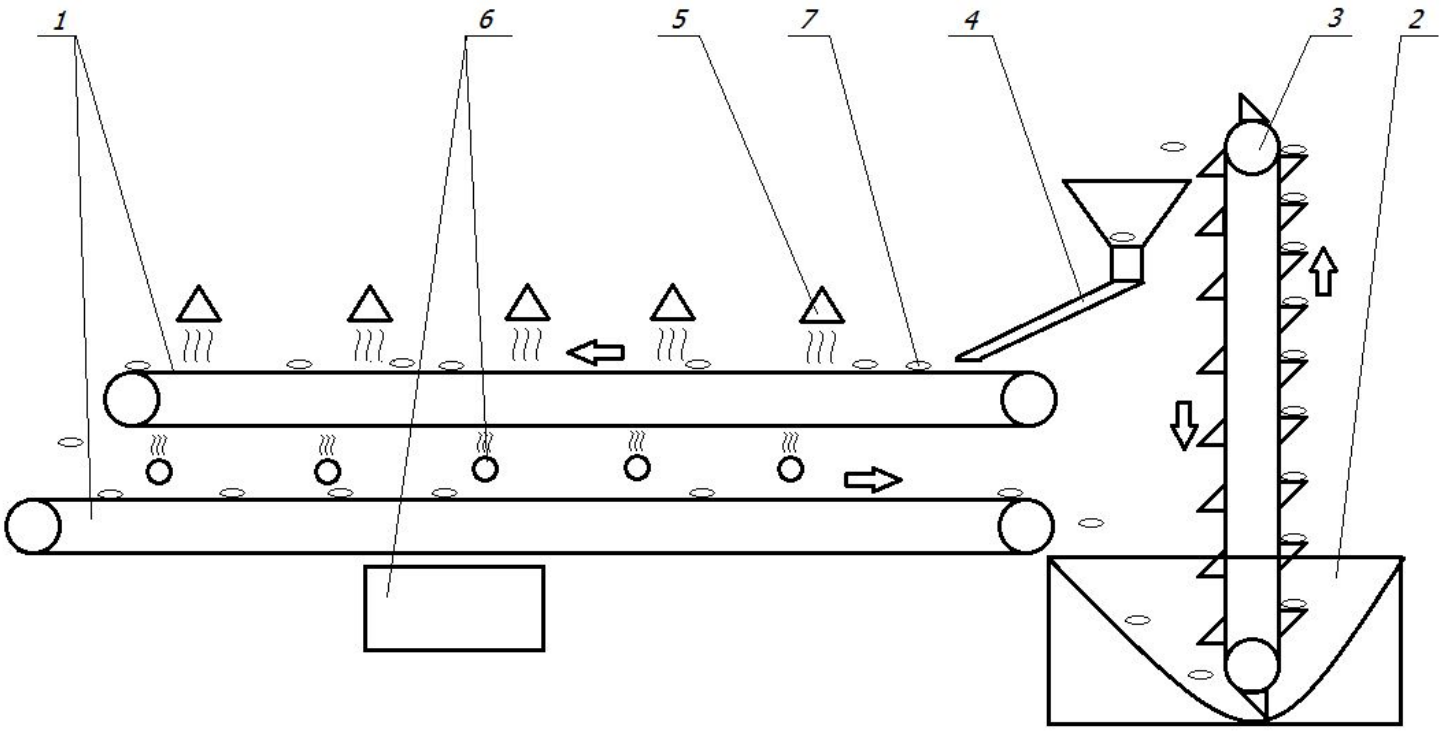


- **непрерывный контроль качества процесса сушки**
- **цикличность процесса обеспечивает универсальность устройства по отношению к сырью и его исходной влажности (различное количество циклов сушки для различного сырья различной исходной влажности)**
- **удобство загрузки семян в устройство и выгрузки семян из устройства**

Функциональная схема конвейерного устройства инфракрасной сушки семян



Конструктивная схема конвейерного устройства инфракрасной сушки и очистки семян



1 – основной конвейер; 2 – бункер-накопитель; 3 – нория; 4 – раздаточный узел;

5 – инфракрасные излучатели; 6 – система вентиляции

7 - семена

Основные конструктивно-технологические решения, положенные в основу разработки конвейера инфракрасной сушки семян

- Использование упруго связанных «нежестких» конструктивных элементов:
- - сетчатая лента – пружина – цепь;
- - поверхность барабана (приводного и натяжного) – ось барабана – звездочка цепи;
- - ветвь цепи нории – узел крепления ковша – ковш («плавающие» ковши)

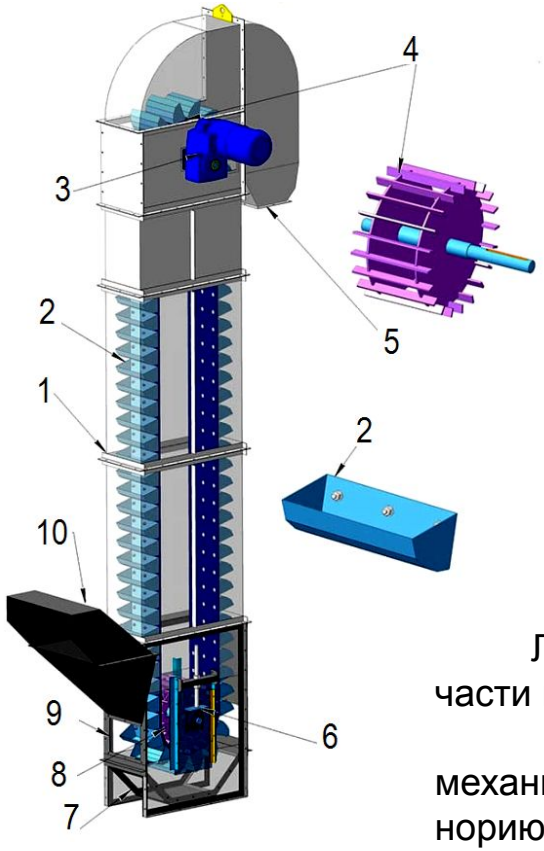
- Импульсное тепловое воздействие на поверхность семян инфракрасным излучением, низкая интенсивность контакта семян с вентилирующим воздухом

- Непрерывный или периодический контроль показателей качества: влажность семян в бункере устройства, температура поверхности семян при тепловой обработке

Преимущества конструкции конвейера инфракрасной сушки семян

- Низкая стоимость
- Модульность конструкции
- Простота и высокая скорость монтажа и пуско-наладки
- Простота и дешевизна обслуживания и ремонта
- Возможность модернизации и модификации
- Возможность использования нории-накопителя как автономного устройства сушки малых объемов семян
- Использование для изготовления деталей устройств 3D-печати
- Большое количество стандартизованных изделий (узлов и деталей)

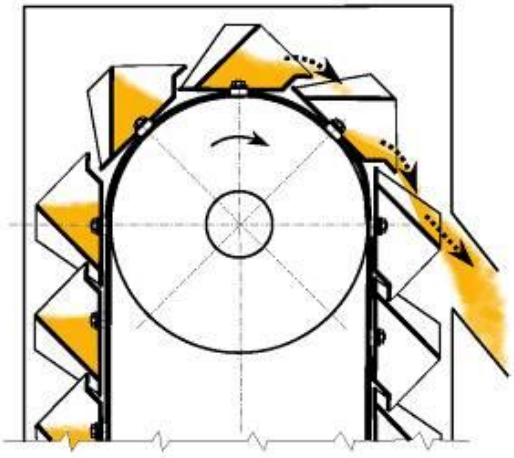
Вертикальные ковшовые конвейеры



1 – корпус; 2 – ковш;
3 – мотор-редуктор;
4 – приводной барабан;
5 – конус выгрузки;
6 – натяжной узел;
7 – инспекционный люк;
8 – натяжной барабан;
9 – инспекционный люк;
10 – загрузочный лоток

Нория ковшовая

Движение зерен
в верхней части нории



Нория поэтапной выгрузки
Л.В.Фадеева

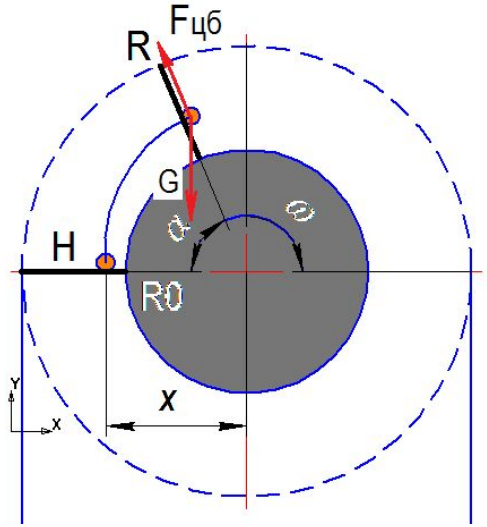
Линейная скорость ковшей составляет от 2,2 м/с до 5 м/с. В верхней части нории зерна вылетают из ковша и ударяются о деку.

В результате зерна получают микротравмы, трещины и могут быть механически разрушены. Прирост микроповреждений за один проход через норию составляет от 2 до 10% в зависимости от свойств семян. Один проход нории увеличивает количество битых зерен на 2%, а количество частиц размером менее 1 мм (мучки) увеличивает в 7 – 10 раз.

Избежать травмирования и дробления зерна позволяет снижение скорости движения ленты транспортера до 0,7 м/с и замена бросающего характера выгрузки зерна из нории на высыпающий характер выгрузки.

Это позволяет исключить выход зерна из ковшей при движении на верхнем барабане нории и травмирование при контакте кромки ковша с зерном в нижней его части.

Расчетная модель движения семян в вертикальном конвейере



Уравнение движения семени

$$m \cdot \frac{d^2 x}{d\tau^2} = m \cdot \omega^2 \cdot x - m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

m – масса семени, кг;
x – радиальная координата положения семени, м;
τ – время, с;
ω – круговая частота вращения приводного барабана, рад/с;
g – ускорение свободного падения, м/с^2;
α – угол поворота ковша нории, рад.

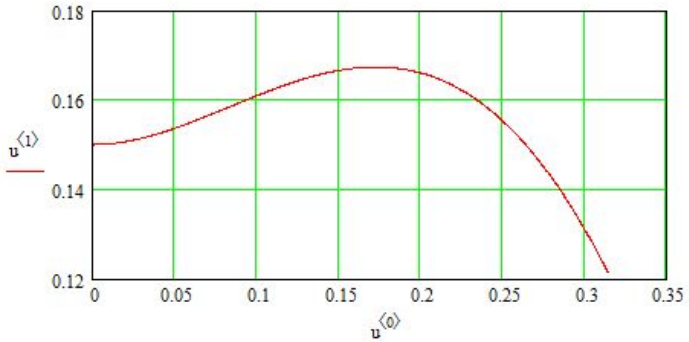
R0 – радиус приводного барабана; H – радиальная высота ковша; R – радиус кромки ковша;
α– угол поворота ковша; ω – угловая частота вращения барабана

Схема движения семени по поверхности ковша

$\tau max := \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\omega}$ $\tau max = 0.314$ $\Omega := \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot 60$ $\Omega = 47.746$ $R0 := 0.150$ $H := 0.05$ $R := R0 + H$ $g := 9.807$

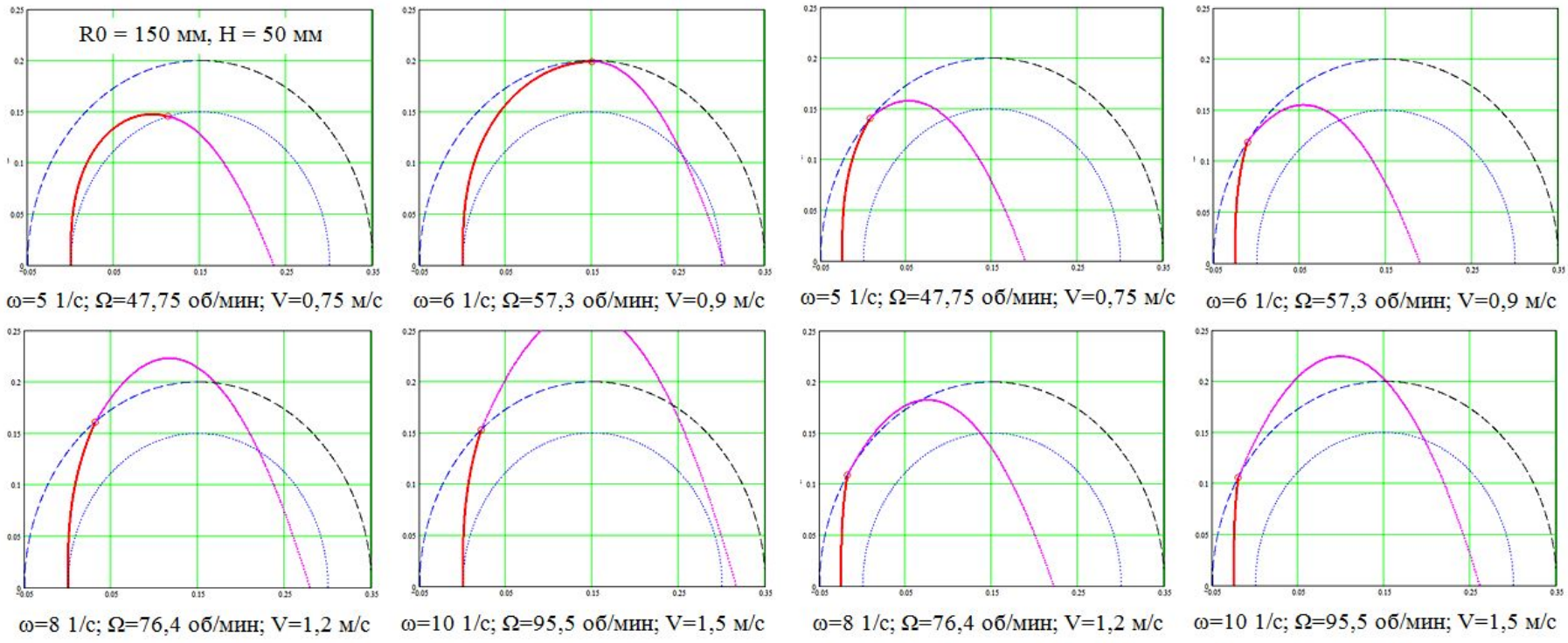
$$D(t, y) := \begin{pmatrix} y_1 \\ \omega^2 \cdot y_0 - g \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{pmatrix} \qquad y0 := \begin{pmatrix} R0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad N := 1000$$

$u := rkfixed(y0, 0, \tau max, N, D)$



Программа решения дифференциального уравнения движения семени

Расчетные траектории движения семени

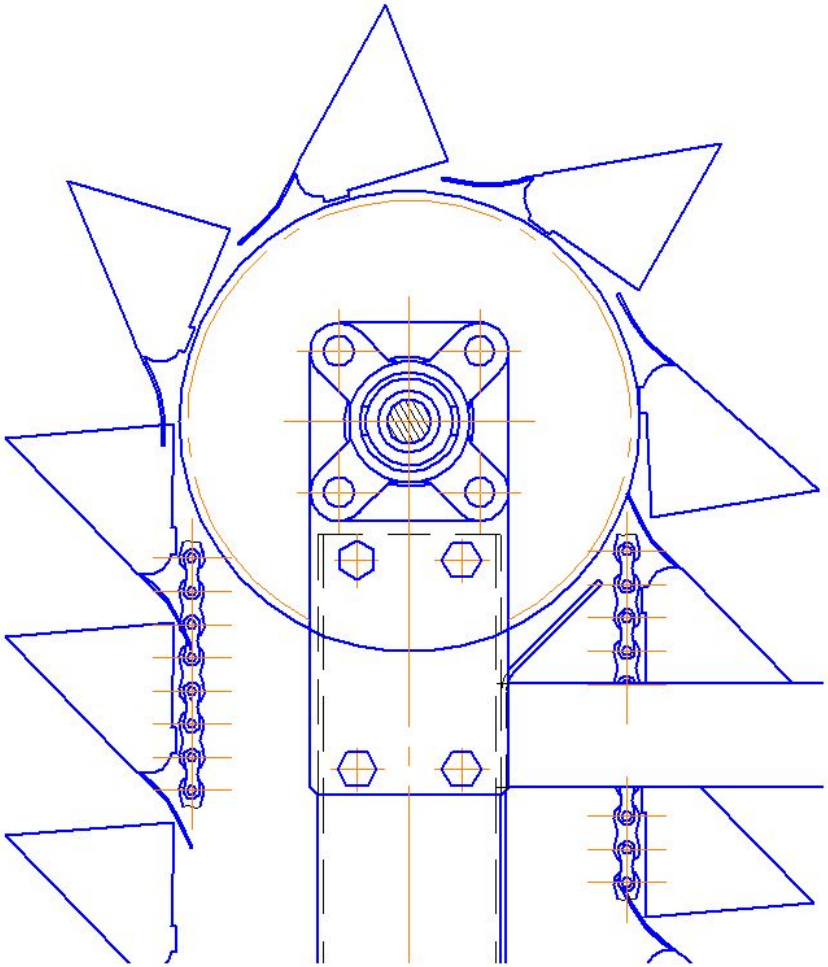


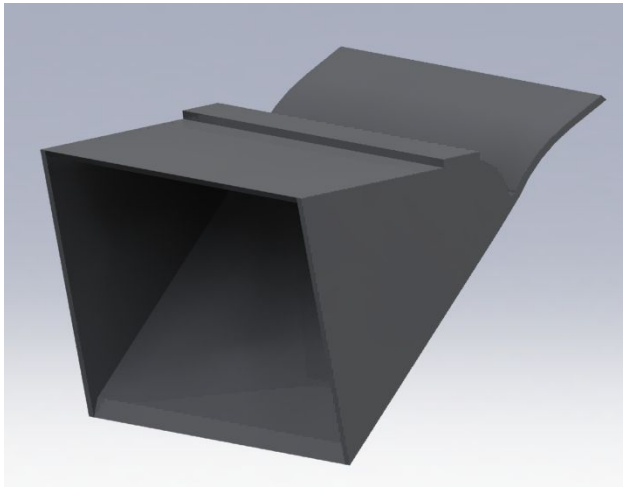
Траектории движения семени при X0=R0

Траектории движения семени при X0=R0+H/2

Расчетный анализ движения семян при поворотном движении ковшей вокруг оси вращения верхнего приводного барабана показал, что окружные скорости вращения барабана не должны превышать 6 1/с, а, соответственно, линейная скорость движения ленты конвейера не должна быть больше 0,9 м/с.

Схема взаимоположения ковшей, обеспечивающая высыпающий характер выгрузки



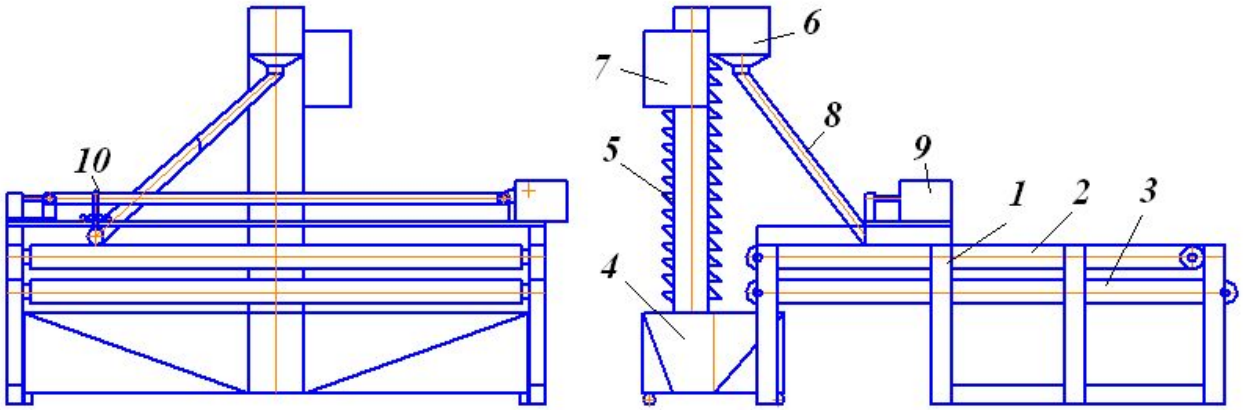


3D-модель ковша для печати на 3D-принтере

Проектирование геометрии и кинематики раздаточного устройства

- установление зависимости равномерности раскладки семян на ленту конвейера от подачи семян и линейных скоростей движения каретки и ленты горизонтального конвейера, определение массы семян на единице площади конвейера в зависимости от указанных величин
- анализ динамических нагрузок на привод механизма раскладки в зависимости от диаметра звездочек цепной передачи, линейной скорости движения и массы каретки, подачи семян
- анализ траектории движения семян на выходе из коаксиального патрубка в зависимости от длины и угла наклона коаксиального патрубка, линейной скорости каретки и подачи семян

Схема механизма раскладки семян



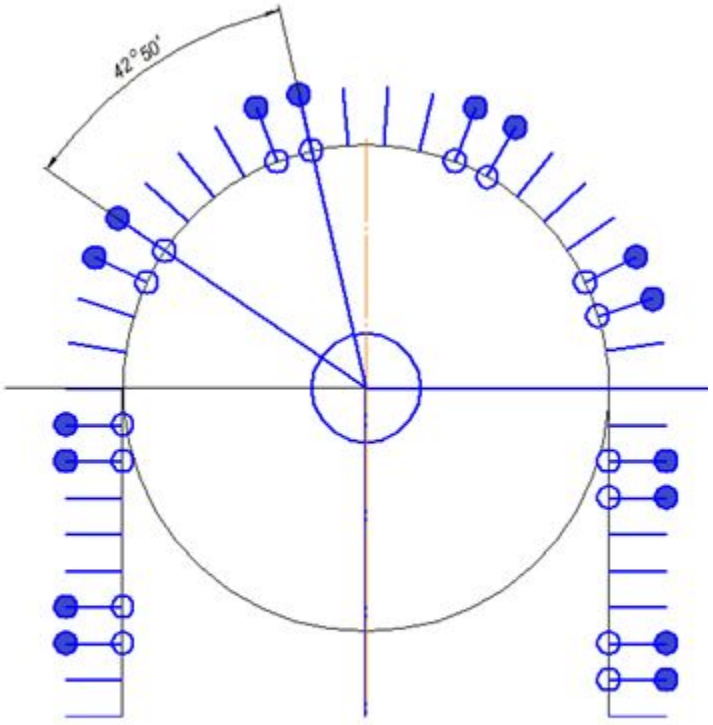
1 – рама конвейера;
2 – лента прямого хода;
3 - лента обратного хода;
4 – бункер-накопитель;
5 – вертикальный конвейер;
6 – питатель;
7 – привод вертикального конвейера;
8 – коаксиальный поворотный патрубок;
9 – привод механизма раскладки семян на ленту конвейера

Схема конвейерного устройства инфракрасной сушки семян
с механизмом раскладки семян на ленту конвейера

1 – рама; 2- цепь привода каретки; 3 – звездочка натяжителя цепи; 4 – натяжитель цепи; 5 – звездочка привода цепи; 6 – привод (мотор-редуктор); 7 – каретка механизма раскладки

Схема привода механизма раскладки семян на ленту конвейера

Методика и программа расчета равномерности раскладки семян на ленту конвейера в зависимости от подачи семян и линейных скоростей движения каретки и ленты горизонтального конвейера



●● – место крепления ковша нории

Схема расположения ковшей нории

Траектория движения каретки

$Lin(t) := w \cdot t$ — путь, пройденный лентой за время t, м

$Lp(t) :=$ — координата положения каретки в мометн времени t, м

$Lp \leftarrow wk \cdot t$

if $Lp \le B$

  $Lpp \leftarrow Lp$

  $ik \leftarrow 1$

if $Lp > B$

  $i \leftarrow \text{floor}\left(\frac{Lp}{B}\right)$

  if $\text{floor}\left(\frac{i+1}{2}\right) = \frac{i+1}{2}$

    $Lpp \leftarrow B - (Lp - B \cdot i)$

    $ik \leftarrow 2$

  if $\text{floor}\left(\frac{i+1}{2}\right) < \frac{i+1}{2}$

    $Lpp \leftarrow Lp - B \cdot i$

    $ik \leftarrow 3$

Lpp

Программа расчета траектории движения каретки на плоскости ленты конвейера

Расчет скорости движения семян на выходе из коаксиального патрубка при его возвратно-поворотном движении

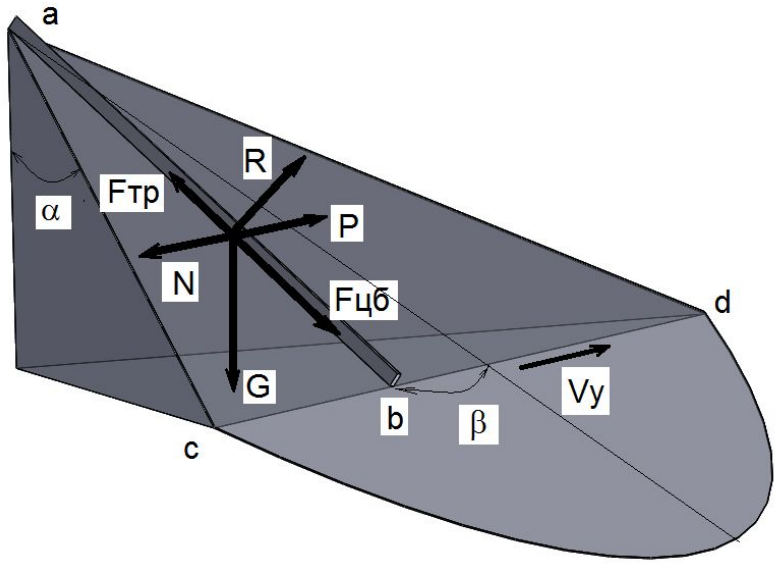


Схема действия сил на

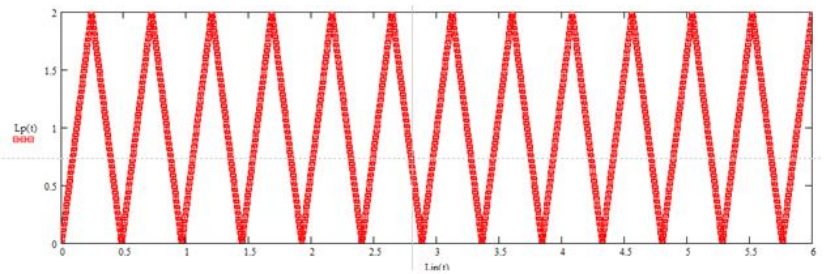
Дифференциальное уравнение движения семени в движущемся патрубке

$$m \cdot \frac{d^2x}{d\tau^2} = m \cdot \omega(\tau)^2 \cdot x + m \cdot g \cdot \cos(\alpha(\tau)) - f \cdot \left(m \cdot g \cdot \sin(\alpha(\tau)) + 2 \cdot m \cdot \omega(\tau) \cdot \frac{dx}{d\tau} \right)$$

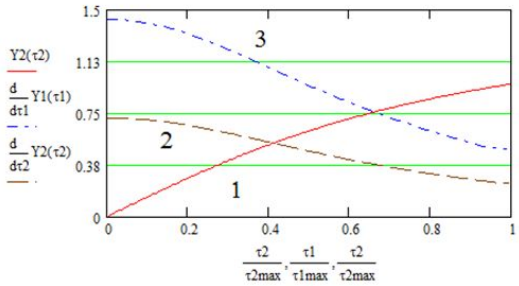
Дифференциальное уравнение движения семени в неподвижном патрубке

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = g \cdot \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} - f \cdot \left(g \cdot \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right)$$

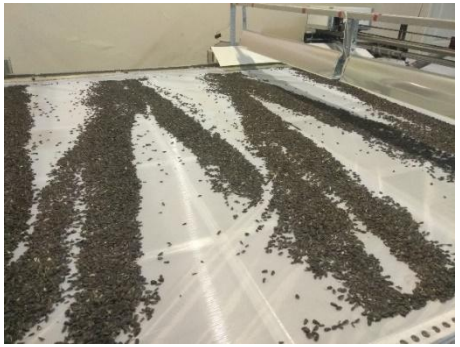
Результаты расчетного анализа и натурных экспериментов

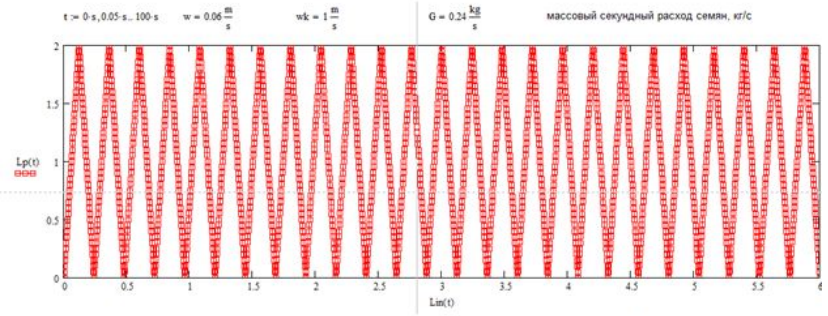


Траектория движения каретки при скорости Vy = 0,5 м/с

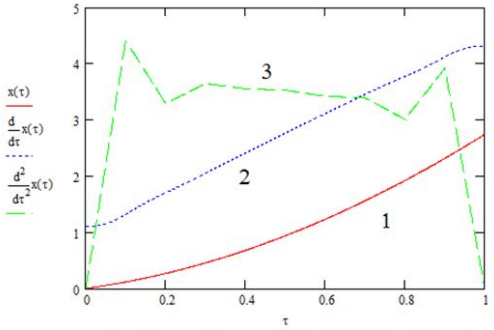


Изменение угловой скорости поворота коаксиального патрубка

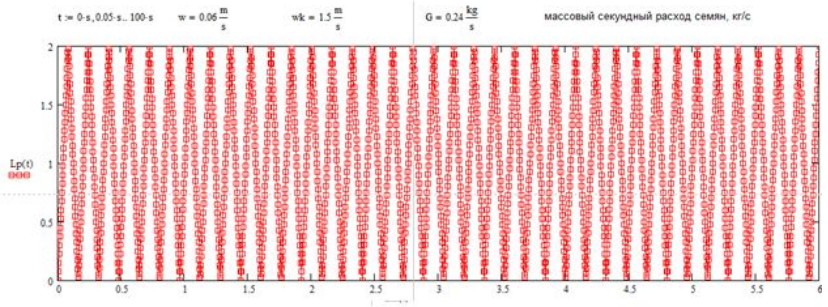




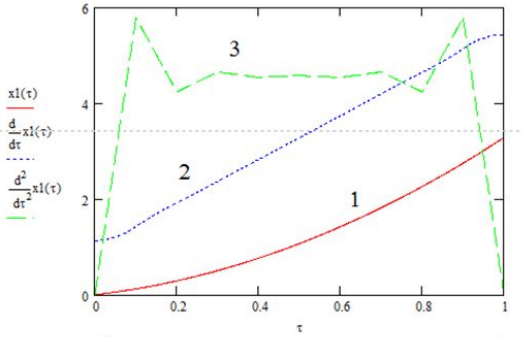
Траектория движения каретки при скорости Vy = 1,0 м/с



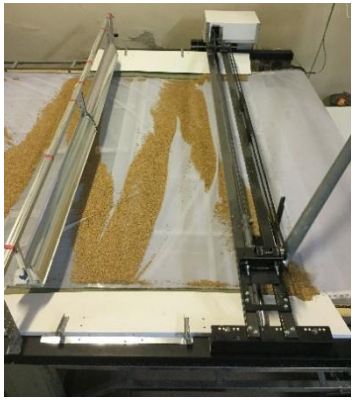
Расчет движения семени в движущемся патрубке



Траектория движения каретки при скорости Vy = 1,5 м/с



Расчет движения семени в неподвижном патрубке



Выводы

Результаты вычислительного эксперимента по определению влияния на равномерность раскладки семян на ленту конвейера подачи семян и линейных скоростей движения каретки и ленты горизонтального конвейера позволяют сделать следующие выводы:

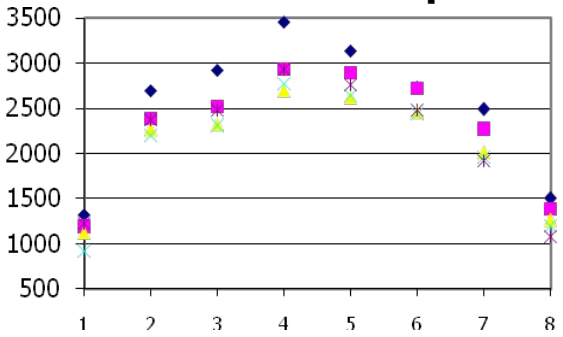
1. При скорости движения ленты конвейера 0,06 м/с скорость движения каретки в диапазоне 1,5 – 2,0 м/с должна обеспечить равномерное покрытие ленты конвейера семенами.

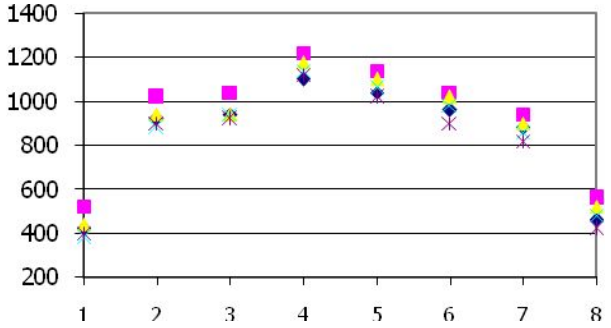
2. Скорость движения каретки в диапазоне от 1 до 2 м/с не приводит к существенным отличиям скорости выхода семян из коаксиального патрубка при различных его угловых положениях.

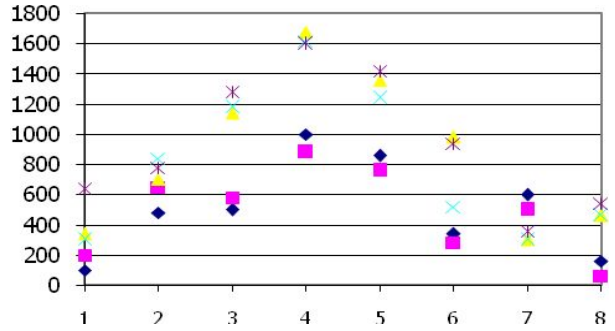
Исследование равномерности распределения семян по ширине ленты основного конвейера

- загрузка семян в бункер-накопитель (масса и объем зависят от обрабатываемой культуры, нами использовались пшеница, подсолнечник и кориандр);
- регулировка частоты вращения ведущего вала раздаточного устройства и ведущего вала транспортера нории обеспечивается с помощью регуляторов с применением датчиков Холла, для данного эксперимента имеют постоянное значение;
- регулировка шиберных заслонок в бункере-накопителе по высоте обеспечивается регулировочным винтами со шкалой;
- частота вращения приводных барабанов транспортерной ленты основного конвейера постоянна;
- после загрузки материала в бункер-накопитель все механизмы приводятся в действие, время непрерывной работы составляло период, за который верхняя ветвь конвейера загружается полностью (при этом нижняя ветвь отключена от привода);
- после заполнения верхней ветви нория и раздаточное устройство отключаются, а семена, находящиеся на транспортере, ссыпаются в лотки, которые разделены по ширине транспортерной ленты перегородками;
- после этого содержимое лотков взвешивается и на основании полученных данных делается вывод о равномерности распределения массы семян по ширине транспортерной ленты.

Результаты измерений и реализация эксперимента по определению равномерности распределения семян







пшеница

подсолнечник

кориандр

- центральная часть транспортерной ленты наиболее загружена;
- равномерность распределения не зависит от вида обрабатываемой культуры;
- равномерность распределения не зависит от количества подаваемого материала;
- равномерность распределения не зависит от кинематических характеристик нории и раздаточного узла;
- использование разравнивателя не оказывает значительного влияния на равномерность распределения;
- равномерность распределения связана с кинематикой движения транспортерной ленты основного конвейера

Определение затрат мощности на привод основного конвейера, нории и раздаточного узла

Измерение затрат мощности осуществлялось визуально по показаниям двух электрических счетчиков, установленных отдельно на приводе раздаточного устройства и нории и основного конвейера при различной загрузке семенами пшеницы, подсолнечника и кориандра. Результаты приведены в таблице 1.

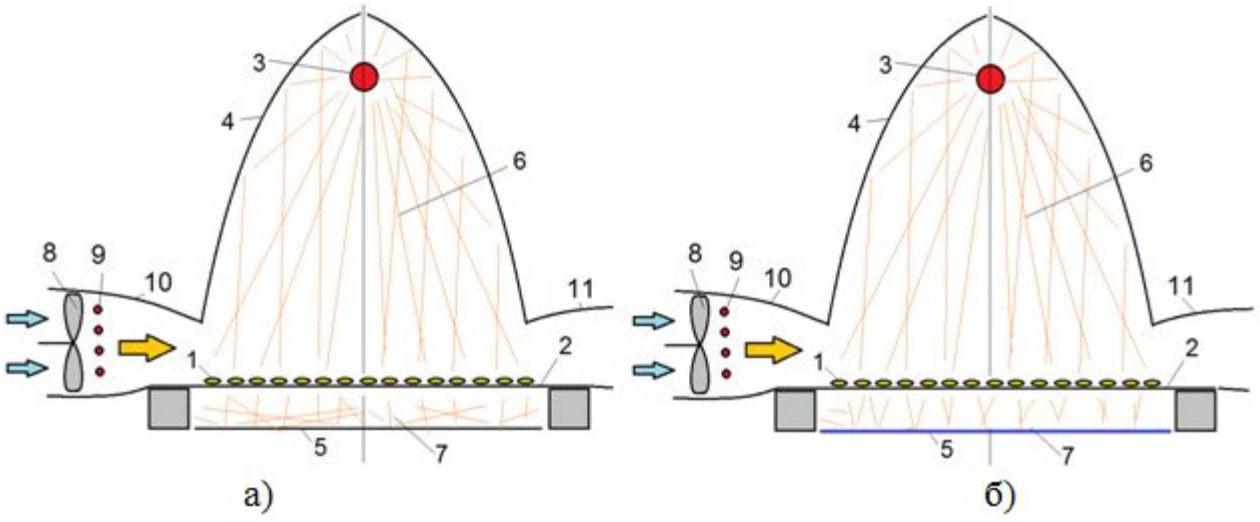
Узел	Культура		
	пшеница	подсолнечник	кориандр
Основной конвейер, кВт·час	0,70	0,25	0,20
Раздаточный узел, нория, кВт·час	0,40	0,50	0,50

Анализируя полученные данные можно отметить, что мощность на привод раздаточного устройства и нории не зависит от обрабатываемой культуры. При этом мощность на привод основного конвейера увеличивается в зависимости от удельного веса семян обрабатываемых культур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ СЕМЯН ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ КОНВЕКЦИЕЙ И ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

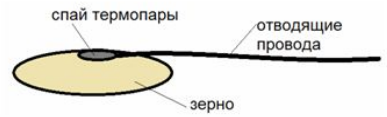
Цель экспериментального исследования - установление зависимости скорости изменения температуры поверхности зерна пшеницы при воздействии инфракрасного и конвективного теплового потока

Схема экспериментальной установки



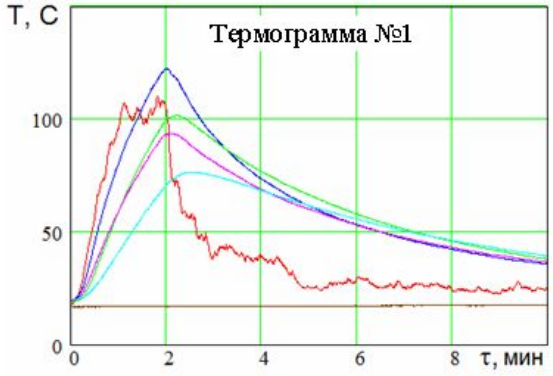
Семена с закрепленными на них термопарами на сетке лотка

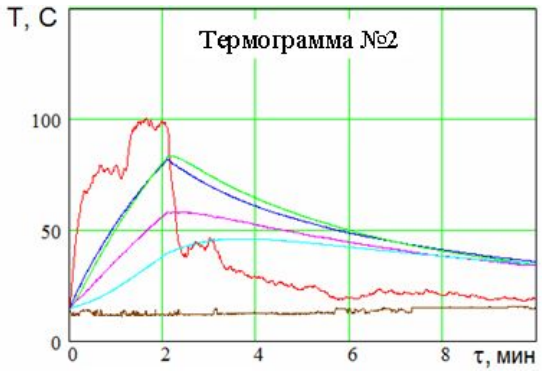
Схема размещения спая термопары на поверхности зерна

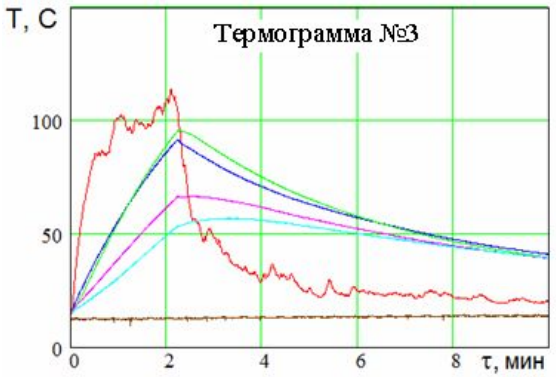


Общий вид экспериментальной установки

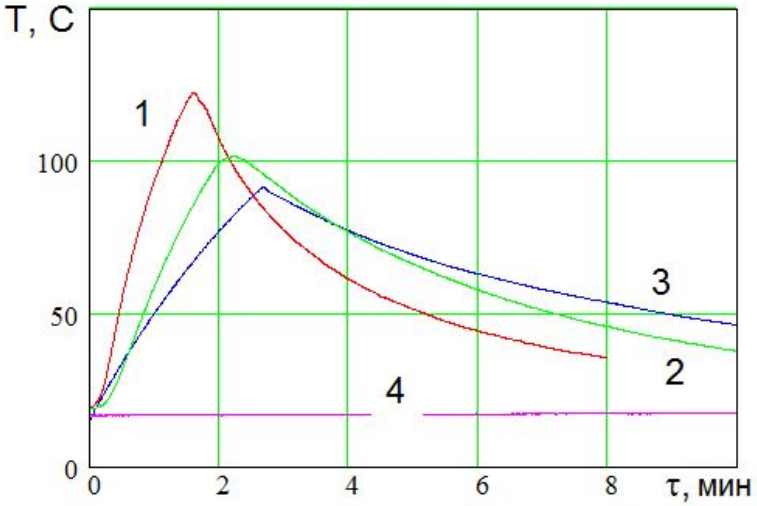
Результаты экспериментального исследования







Нагрев слоя зерна тепловым излучением



Сравнение кривых разогрева поверхности зерна

Термограммы №1 – 3 диффузной поверхности стола

Выводы по результатам эксперимента

1. Тепловое излучение совместно с нагретым потоком воздуха позволяет существенно ускорить процесс разогрева зерен;

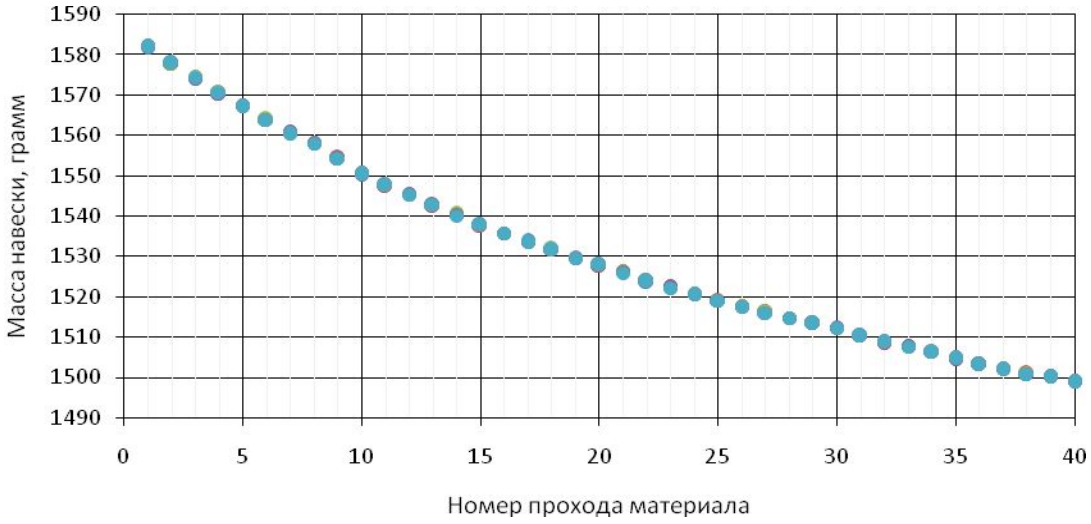
2. Значительные тепловые потоки от источников инфракрасного излучения могут приводить к чрезмерно высокому темпу нагрева зерна, что может негативно сказаться на его кондициях из-за возможного растрескивания оболочки зерна;

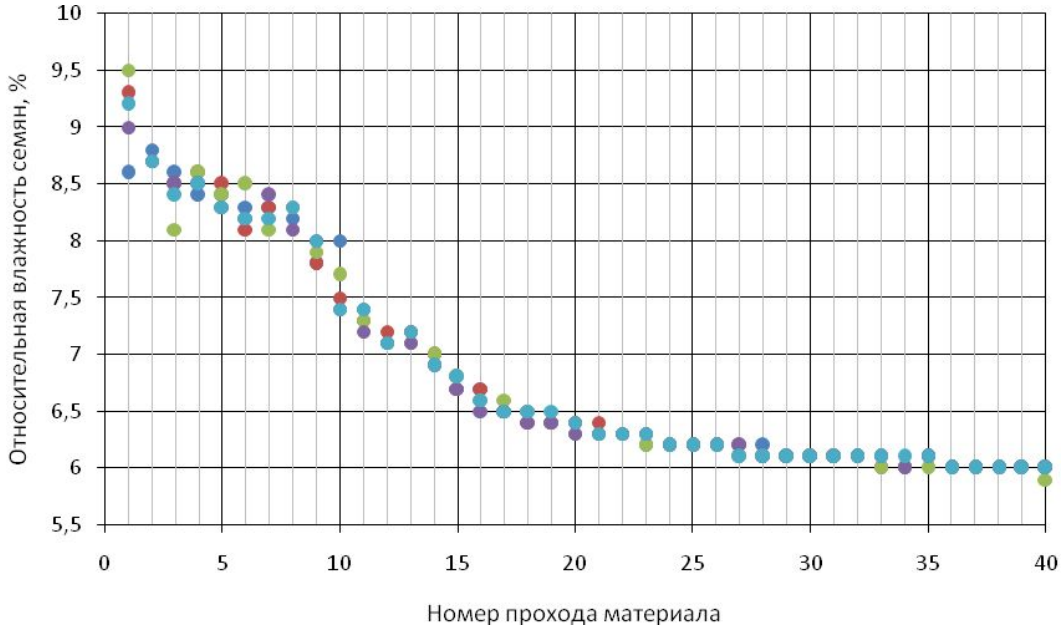
3. Малая инерционность источников теплового излучения и возможность управления тепловой мощностью источников позволяет управлять тепловым воздействием на зерно в ходе сушки, обеспечивая как требуемый температурный режим при стационарном режиме сушки, так и необходимую скорость разогрева зерен, не допуская перегрева поверхности зерна.

Исследования динамики изменения массы и влажности семян за один проход по основному конвейеру

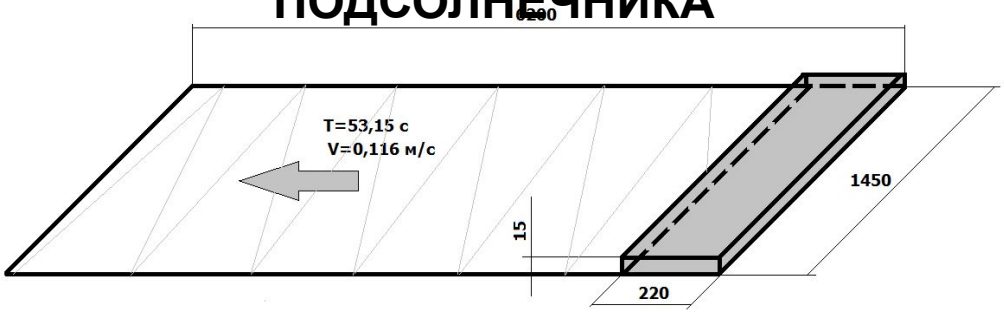
- берут навеску семян подсолнечника массой 1500 грамм относительной влажностью 5,9 %;
- семена увлажняют водой бытовым распылителем до относительной влажности 10,3%, при этом масса навески составляет 1586,1 грамм;
- увлажненную навеску помещают на верхнюю ленту транспортера основного конвейера в рамку, при этом длина слоя по ширине ленты составляет 1450 мм, ширина слоя – 220 мм, толщина 15 мм;
- после включения инфракрасных излучателей и системы вентиляции верхнюю ленту приводят в движение и семена перемещают под тепловым и воздушным воздействием к сборному лотку, т.е. осуществляют один проход семян при тепловом и воздушном воздействии;
- собранные в лоток семена взвешивают на аналитических весах и определяют их относительную влажность;
- далее процесс повторяют до тех пор, пока не будет достигнута исходная влажность и масса навески;
- температуру семян замеряют в точках загрузки и выгрузки верхней ленты основного конвейера с помощью бесконтактного пирометра, она составила соответственно 18 и 25 ºС, что удовлетворяет требованиям температурного режима обработки семенного материала не выше 40 ºС

Динамика изменения массы и относительной влажности семян





РАСЧЕТНАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СУШКИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА



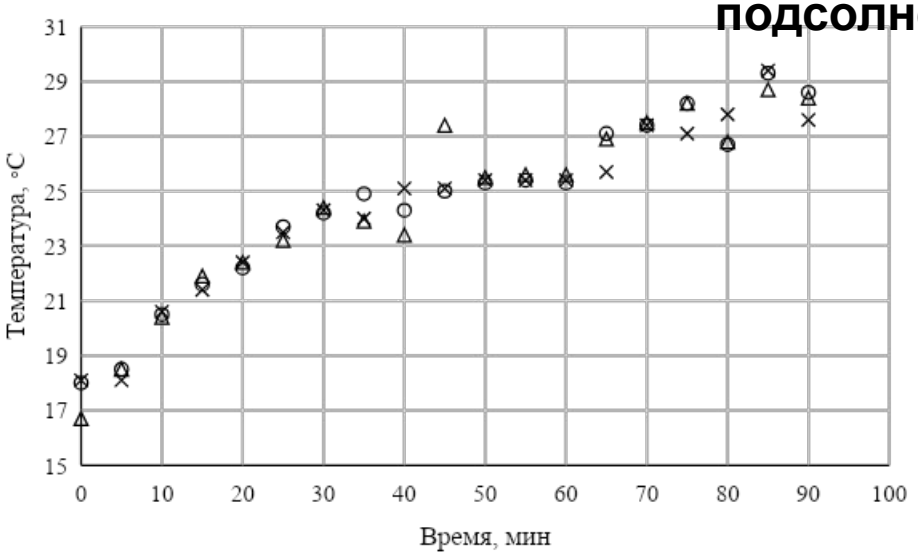
Семена движутся от точки загрузки до конца ленты 53,15 с, расстояние 6200 мм (6,2 м).
Скорость движения семян составляет 6,2/53,15=0,116 м/с.
Слой подсолнечника на ленте:
высота – 15 мм; ширина – 1450 мм; длина – 220 мм; масса – 1500 г.
Длина ленты – 6200 мм.
Масса подсолнечника на ленте:
плотная загрузка: 6200/220·1500 = 42 кг; загрузка 50% ленты – 20 кг.
Количество проходов для сушки – 40, время прохода – 1 мин.

Показатель	Масса подсолнечника, кг	Снижение относительной влажности, % количество проходов			
		10,5 … 6,0 40	10,5 … 8,5 6	8,5 … 6,5 12	6,5 … 6 22
Время сушки, мин (час)	20	40	6	12	22
	120	240 (4)	36	72 (1,2)	132 (2,2)
	1200	2400 (40)	360 (6)	720 (12)	1320 (22)
Расход энергии, кВт·час	20	6,7	1	2	3,7
	120	40	6	12	22
	1200	400	60	120	220
Расход энергии, кВт·час/кг	20	0,33	0,05	0,1	0,8
	120				
	1200				

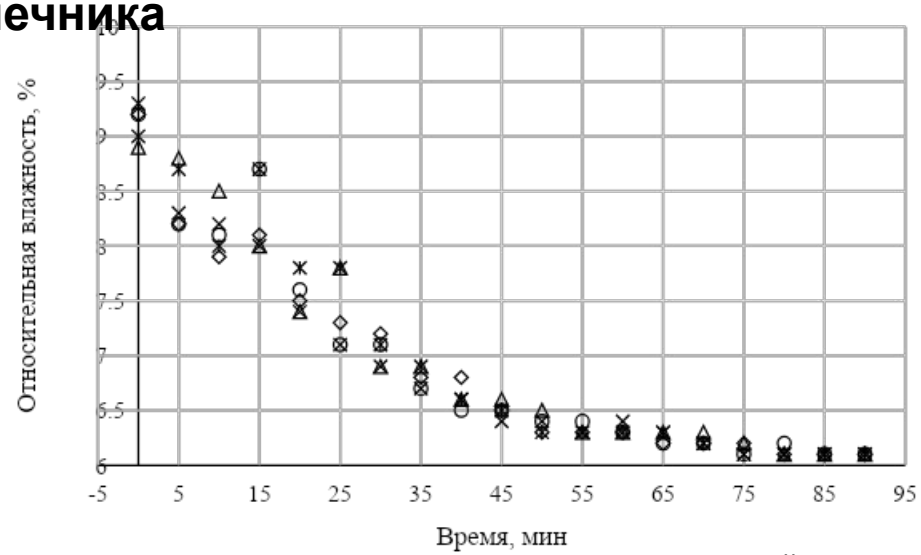
Экспериментальные исследования сушки подсолнечника

- берут семена подсолнечника массой 100 кг относительной влажностью 6,0 %;
- семена увлажняют водой бытовым распылителем до относительной влажности 9,0%;
- увлажненный подсолнечник загружают в бункер;
- включают последовательно основной конвейер, инфракрасные излучатели, систему вентиляции, раздаточный узел, норию;
- контролируют температуру семян на входе в зону и при выходе из зоны действия инфракрасных излучателей с помощью бесконтактных пирометров через каждые 5 мин.;
- контролируют относительную влажность семян в бункере каждые 5 мин с помощью экспресс-измерителя;

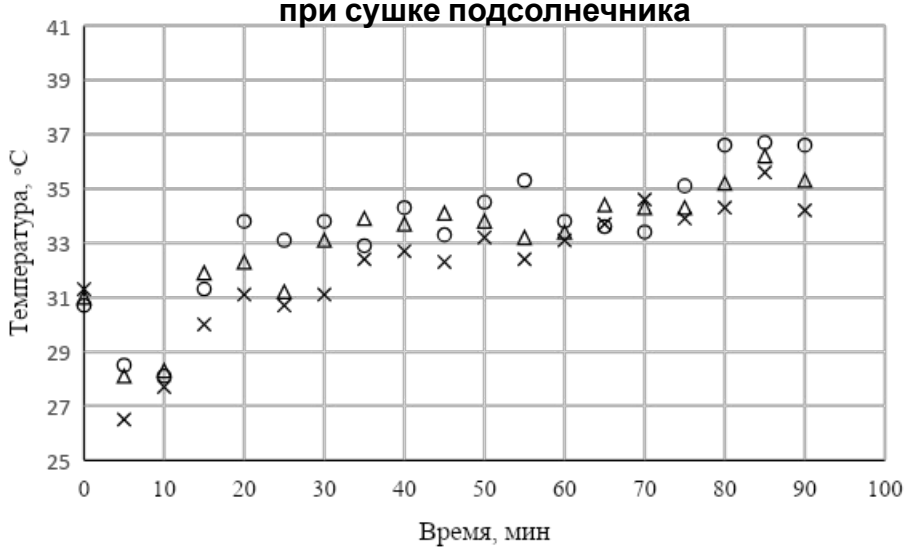
Результаты экспериментальных исследований при сушке подсолнечника



Динамика изменения температуры на входе
при сушке подсолнечника



Динамика изменения относительной влажности
при сушке подсолнечника



Динамика изменения температуры на выходе
при сушке подсолнечника

ВЫВОДЫ

- время сушки 100 кг подсолнечника относительной влажностью 9,5% до относительной влажности 6,0% составило 90 мин., что согласуется с расчетными данными;

- максимальная температура на входе и выходе из зоны теплового воздействия инфракрасных источников не превышает 40 °С.

Выводы:

-расчетный анализ движения семян при поворотном движении ковшей вокруг оси вращения верхнего приводного барабана показал, что окружные скорости вращения барабана не должны превышать 6 1/с, а, соответственно, линейная скорость движения ленты конвейера не должна быть больше 0,9 м/с;

-необходимо изучить влияние равномерности распределения семян на качественные и количественные показатели сушки;

-в зависимости от обрабатываемой культуры и загрузки устройства затраты мощности на привод механической части составляют 0,70 – 1,10 кВт·час;

-выбранная компоновочная схема обеспечивает необходимые условия для обеспечения теплового воздействия на семена не выше 40ºС.

-затраты энергии на ИК сушку семян в диапазоне влажности от 10,5% до 6% составляют 0,335 кВт·час/кг семян. При сушке в диапазоне влажности от 10,5% до 8,5% (снижение влажности на 2%) затраты снижаются до 0,05 кВт·час/кг. Дальнейшая сушка от 8,5% до 6,5% влажности требует затрат 0,1 кВт·час/кг, а от 6,5% до 6% влажности - 0,185 кВт·час/кг.