

КОНТАКТНАЯ СУШКА ЗЕРНА В ЗЕРНОУБОРОЧНОМ КОМБАЙНЕ**Николаев В.А.**, ФГБОУ ВО Ярославский технический университет;**Кряклина И.В.**, ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА;**Шешунова Е.В.**, ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА

Затраты энергии на сушку зерна можно существенно уменьшить, если её начать сразу после извлечения зерновок из колосьев в зерноуборочном комбайне. Для этого целесообразно использовать теплоту, создаваемую в двигателе внутреннего сгорания комбайна. Существует уникальная возможность увеличить коэффициент полезного действия двигателя зерноуборочного комбайна, как тепловой машины, используя энергию отработавших газов и системы охлаждения для сушки зерна. Для осуществления сушки в конструкции предлагаемого зерноуборочного комбайна предусмотрена контактная сушилка. Для преодоления недостатков, свойственных контактной сушке зерна, контактная сушилка предлагаемого зерноуборочного комбайна имеет ряд конструктивных отличий, позволяющих избежать перегрева или закалки зерновок. В то же время при небольших габаритах контактной сушилки удаётся создать большую площадь поверхности нагрева и обеспечить высокую пропускную способность сушилки. При контактном нагреве от влияния и градиента влажности и градиента температуры влага стремится к поверхности зерновки. Происходит её «отпотевание». Проведены расчёты параметров контактной сушки зерна в зерноуборочном комбайне на примере тритикале «Торнадо». В частности определены: период пребывания зерновки в активной части контактной сушилки; количество рядов зерновок, сорентированных продольной осью вдоль активной части контактной сушилки; среднее время контакта зерновки с трубкой в активной части контактной сушилки; массу влаги, проходящей через зерновку и остающейся на поверхности зерновки; массу влаги, остающейся на поверхности всех зерновок, находящихся в контактной сушилке; уменьшение относительной влажности зерна при прохождении через контактную сушилку. Хотя, как показали расчёты, прямой эффект контактной сушки зерна в зерноуборочном комбайне невелик, но весьма значителен последующий эффект. Он заключается в лёгкости последующего за контактной сушкой удаления влаги с «отпотевшего» зерна.

Ключевые слова: затраты энергии, сушка зерна, зерноуборочный комбайн, контактная сушилка, «отпотевание» зерна, уменьшение относительной влажности.

Для цитирования: Николаев В.А., Кряклина И.В., Шешунова Е.В. Контактная сушка зерна в зерноуборочном комбайне // Аграрный вестник Верхневолжья. 2020. № 4 (33). С. 73-77.

Введение. Сушка зерна является очень энергозатратным процессом. Однако затраты энергии можно существенно уменьшить, если начать сушку зерна сразу после извлечения зерновок из колосьев в зерноуборочном комбайне. Для этого целесообразно использовать теплоту, создаваемую в двигателе внутреннего сгорания комбайна. Обычно коэффициент полезного действия дизельного двигателя внутреннего сгорания не превышает 40 %. Существует уникальная возможность увеличить коэффициент полезного действия двигателя зерноуборочного комбайна, как тепловой маши-

ны, используя энергию отработавших газов и системы охлаждения для сушки зерна [1, с.1-15]. Для осуществления сушки в конструкции зерноуборочного комбайна предусмотрена как контактная, так и контактно-конвективная сушилка. В частности, вызывают теоретический и практический интерес особенности контактной сушки зерна в зерноуборочном комбайне.

Цель исследования. Целью исследования является теоретическое определение параметров контактной сушки зерна в зерноуборочном комбайне.

Метод исследования. Анализ взаимодействия зерновки со стенками трубок сушилки при контактной сушке в зерноуборочном комбайне. Для расчёта взяты зерновки тритикале «Торнадо».

Результаты исследования. Теплопроводность зерновой массы в 3...5 раз меньше, чем теплопроводность зерновки. Это связано с наличием воздуха между зерновками. Чтобы влияние воздуха между зерновками свести к минимуму, целесообразна контактная сушка, при которой зерновки контактируют непосредственно с поверхностью нагрева.

Однако контактная сушка не получила большого распространения в связи со следующими ограничениями:

- температуры поверхности нагрева, так как при высокой температуре поверхности нагрева произойдёт перегрев или даже закалка зерновок;
- площади поверхности нагрева, так как при увеличении поверхности нагрева увеличиваются габариты сушилок;
- пропускной способности сушилки.

Для преодоления этих недостатков контактная

сушилка зерноуборочного комбайна имеет ряд конструктивных отличий [1, с. 1-15]. Она наклонена под углом 45° к горизонтали и выполнена в виде прямооточного кожухотрубного теплообменника, в трубном пространстве которого перемещается жидкость системы охлаждения двигателя комбайна, а в межтрубном пространстве движется зерно под действием силы тяжести. Эффективность теплообмена между теплоносителем и зерном зависит от площади теплообмена. Опускаясь в межтрубном пространстве, зерно находится в движении. Хотя температура поверхности нагрева весьма высокая, но контакты зерновок с трубками происходят на ограниченной площади, причём в процессе движения площадки контакта зерновок с трубками меняются, исчезают, вновь появляются. То есть время контакта каждой точки зерновки и трубки очень малое. Это позволяет избежать перегрева или закаливания зерновок. В то же время при небольших габаритах контактной сушилки удаётся создать большую площадь поверхности нагрева и обеспечить высокую пропускную способность сушилки.

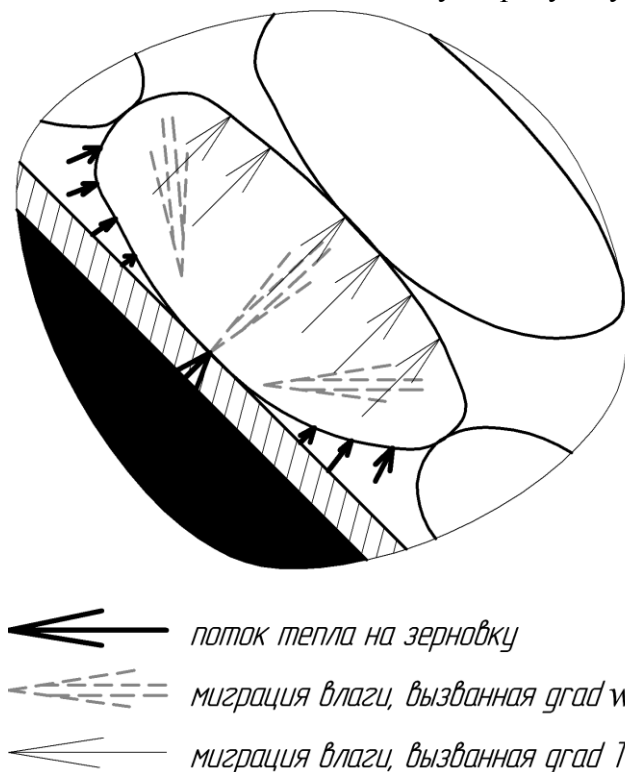


Рисунок 1 – Направления миграции влаги в зерновке во время её контакта с трубкой в активной части контактной сушилки

Контактный нагрев, кроме непосредственной передачи тепла от нагретых трубок к зерновкам, имеет ещё одно преимущество. Когда зерновку нагревают со всех сторон равномерно, проявляются противоположные тенденции управления ми-

грацией влаги. В связи с появлением по мере нагрева градиента влажности между поверхностью и центральной частью зерновок, влага стремится перемещаться от центра зерновки к её периферии. В то же время в связи с появлением по

мере нагрева градиента температуры влага стремится перемещаться от периферии зерновки к её центру. Когда зерновку нагревают неравномерно, преимущественно со стороны поверхности контакта с поверхностью нагрева, градиент влажности заставляет влагу мигрировать к поверхности нагрева от поверхности, противоположной по отношению к ней. Градиент температуры вынуждает влагу мигрировать от поверхности нагрева к поверхности, противоположной по отношению к поверхности нагрева (рисунок 1).

При контактном нагреве от влияния и градиента влажности и градиента температуры влага стремится к поверхности зерновки. Происходит её «отпотевание». Из контактной сушилки зерно попадает в трубу возврата. Допустим, зерновки расположены вдоль контактной сушилки, скорость зерна в контактной сушилке $v_{кс} = 0,12 \text{ м/с}$ [2, с. 89]. Так как длина активной части контактной сушилки, из конструктивной компоновки, $L_a = 1,9 \text{ м}$, период пребывания зерновки в активной части контактной сушилки.

$$\tau_{акс} = \frac{L_a}{v_{кс}}; \tau_{акс} = \frac{1,9}{0,12} \approx 15,8 \text{ с.}$$

Когда активная часть контактной сушилки, после её заполнения, работает в поточном режиме, то из неё выходит $j_p = 216000 \text{ шт/с}$ зерновок. Площадь сечения активной части контактной сушилки, заполненная зерном [2, с. 90],

$$S_{кс} = S_z (n_{тр} + 1) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где площадь сечения одного участка активной части контактной сушилки $S_z = 1628 \text{ мм}^2$ из конструктивной компоновки комбайна; $n_{тр} = 58$ – количество трубок в активной части контактной сушилки.

$S_{кс} = 1628 \cdot 59 \cdot 10^{-6} \approx 0,096 \text{ м}^2 = 96000 \text{ мм}^2$ Размеры зерновки тритикале: средняя толщина зерновки, $a = 2 \text{ мм}$; средняя ширина зерновки $b = 3 \text{ мм}$; средняя длина зерновки $\ell = 8 \text{ мм}$. Условная площадь поперечного сечения зерновки тритикале $S_{1з} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ мм}^2$. Количество рядов зерновок, если они сориентированы продольной осью вдоль активной части контактной сушилки

$$n_{pz} = \frac{(1-\varepsilon)S_{кс}}{S_{1з}}, \quad (1)$$

где скважность $\varepsilon = 0,55$.

$$n_{pz} = \frac{(1-0,55) \cdot 96000}{6} = 7200 \text{ рядов,}$$

или на одном участке $n_{pz \text{ уч}} = \frac{7200}{59} \approx 122 \text{ ряда.}$

Периметр сечения трубки $P_{тр} = 94 \text{ мм}$. Если допустить, что зерновки расположены продольной осью вдоль трубок, то количество рядов зерновок, контактирующих с трубкой на одном участке, в зависимости от их положения по отношению к поверхности нагрева

$$n_{з \text{ тр уч}} = \frac{94}{3} \approx 31 \text{ шт, или } n_{з \text{ тр уч}} = \frac{94}{2} = 47 \text{ шт.}$$

Примем среднее значение: количество зерновок, контактирующих с трубками, на одном участке $n_{з \text{ тр уч}} = 39 \text{ шт}$. Доля зерновок, контактирующих с трубкой $\frac{n_{з \text{ тр уч}}}{n_{pz \text{ уч}}} = \frac{39}{122} \approx 0,32$, то есть в среднем на одном участке одна зерновка из трёх в любой момент времени контактирует с трубкой.

Так как длина зерновки $\ell = 8 \text{ мм}$, возможная площадь поверхности нагрева на одном участке

$$S_{кс1} = P_{тр} \ell; S_{кс1} = 94 \cdot 8 = 752 \text{ мм}^2.$$

Площадь контакта зерновки с трубкой при заданных на рисунке конструктивных параметрах активной части контактной сушилки зависит от геометрических параметров зерновки, её твёрдости и положения в контактной сушилке. Чем ниже опускается зерновка в активной части контактной сушилки, тем больше расклинивающее воздействие расположенных выше зерновок друг на друга, больше сила прижатия остальных зерновок к зерновкам, в этот момент контактирующим с трубками, больше площадь контакта зерновок с трубками. Для определения более точно площади контакта зерновок с трубками необходима серия экспериментов. Примем для расчёта площадь контакта каждой зерновки с трубкой постоянной: $S_{з-т} = 2 \text{ мм}^2$. Тогда общая площадь контакта зерновок на одном участке

$$S_{з-т1} = S_{з-т} n_{з \text{ тр уч}}; S_{з-т1} = 2 \cdot 39 = 78 \text{ мм}^2.$$

Доля суммарной фактической площади контакта зерновки с трубкой от возможной площади поверхности нагрева на одном участке около 0,1. Остальной нагрев зерновок осуществляется бесконтактным способом, через прослойку воздуха. Это уменьшает эффективность нагрева, поскольку каждую новую порцию воздуха, проникающего в активную часть контактной сушилки, нужно нагреть.

Так как время пребывания зерновки в активной части контактной сушилки $\tau_{акс} = 15,8 \text{ с}$, а лишь одна зерновка из трёх в среднем в любой момент времени контактирует с трубкой, среднее время контакта зерновки с трубкой в активной части контактной сушилки

$$\tau_{3-такс} = 15,8 : 3 = 5,27 \text{ с.}$$

Характеристиками зерна, влияющими на процесс контактной сушки, являются:

- размеры зерновок;
- плотность зерновки ρ ;
- удельная теплоёмкость зерна c ;
- теплопроводность, характеризующая коэффициентом теплопроводности λ , который варьируется от 0,116 до 0,465 Вт/м·град;
- температуропроводность, характеризующая коэффициентом температуропроводности, который устанавливает связь между теплопроводностью и теплоемкостью зерновки

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \text{ м}^2/\text{с.}$$

Расчётная плотность зерновки тритикале

$$\rho = \frac{m}{V_s} = \frac{m}{k_s a b l}, \quad (2),$$

где m – масса зерновки,

$$m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг};$$

k_s – коэффициент, учитывающий форму зерна, для тритикале $k_s = 0,52$;

$$V_s = 0,52 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 8 = 25 \text{ мм}^3 = 25 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

$$\rho = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{25 \cdot 10^{-9}} = 1200 \text{ кг/м}^3.$$

Удельная теплоёмкость зерна зависит от его влажности. Удельная теплоёмкость сухого вещества зерновки $c_s = 1,32 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$, а удельная теплоёмкость воды

$$c_w = 4,19 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} [3, \text{ с. 76-127}].$$

Удельная теплоёмкость влажного зерна пропорциональна долям сухого вещества и влаги. Так как расчётная начальная влажность зерна 30 %,

$$c = 0,7c_s + 0,3c_w;$$

$$c = 0,7 \cdot 1,32 + 0,3 \cdot 4,19 = 2,18 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

Примем расчётный коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,35 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$. Тогда расчётный коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{0,35}{2,18 \cdot 1200} = 0,134 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Коэффициент температуропроводности характеризует теплоинерционные свойства объекта и, согласно А.В. Лыкову [4, с. 332-334], по физическому смыслу является коэффициентом диффузии тепла. Несмотря на разную физическую сущность, механизмы влагопереноса в объектах сушки можно разделить на три основные группы по общим кинетическим признакам. Пренебрегая влиянием силы тяжести, влагоперенос можно описать градиентами влагосодержания ΔU , температуры ΔT и давления ΔP . Влагоперенос в

объектах сушки в общем виде описывают следующей формулой:

$$j = -D\rho\Delta U - a\rho\Delta T - k\Delta P, \quad (3)$$

где j – удельный поток влаги или пара, кг/(м²·с);

ρ – плотность зерновки,

$$\rho = 1200 \text{ кг/м}^3;$$

D – коэффициент диффузии,

м²/с; a – коэффициент термодиффузии, то есть температуропроводность объекта,

м²/с; k – коэффициент молярного переноса.

Первая составляющая правой части уравнения (3) характеризует диффузионный перенос влаги под воздействием градиента концентраций – концентрационная диффузия, которую выражают законом Фика. Вторая составляющая является выражением закона термодиффузии – эффект Соре. Последняя составляющая характеризует бародиффузию – диффузию массы, вызванную градиентом общего давления парогазовой смеси.

Зерновка относится к коллоидным капиллярно-пористым телам. Влагоперенос в коллоидных капиллярно-пористых телах описывают формулой [3, с. 23-28]:

$$j = -D\rho\Delta U - a\rho\Delta T, \quad (4)$$

В случае сушки зерна в контактной сушилке доминирующей будет термодиффузия, так как существенной будет разность температур между жидкостью системы охлаждения двигателя $t_{охл} = 95^\circ \text{C}$ и температурой зерна на входе в контактную сушилку $t_{s1} = 30^\circ \text{C}$. Поэтому уравнение (4) приобретает вид где $j = -a\rho\Delta T$, (5)

$$\Delta T = (t_{s1} + 273) - (t_{охл} + 273) = (30 + 273) - (95 + 273) = -65\text{K}.$$

$$\text{Откуда } j = -0,134 \cdot 10^{-6} \cdot 1200(-65) = 10,452 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$$

Для расчёта площадь контакта каждой зерновки с трубкой, по которой движется горячая вода системы охлаждения двигателя, принята $S_{s-t} = 2 \text{ мм}^2$, среднее время контакта зерновки с трубкой в активной части контактной сушилки $\tau_{3-такс} = 5,27 \text{ с}$. Следовательно, масса влаги, проходящая через зерновку и остающаяся на поверхности зерновки, то есть «отпотевание зерновки»,

$$m_1 = j \cdot S_{s-t} \cdot \tau_{3-такс}, \quad (6)$$

$$m_1 = 10,452 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 5,27 = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Тогда масса влаги, появляющаяся на поверхности всех зерновок $N_k = 4520000$, одновременно находящихся в контактной сушилке,

$$m = N_k \cdot m_1 = 4520000 \cdot 0,11 \cdot 10^{-6} = 0,497 \text{ кг.}$$

Определим, за какое время наполнится бункер зерноуборочного комбайна:

$$\tau_6 = \frac{V_6}{V_{\text{вор}}}, \quad (7)$$

где V_6 – объем бункера зерноуборочного комбайна из конструктивной компоновки, $V_6 = 10 \text{ м}^3$; $V_{\text{вор}}$ – объем зернового вороха, поступающего в бункер комбайна за 1 с, м^3 .

$$V_{\text{вор}} = \frac{N \cdot V_3}{1 - \varepsilon},$$

где N – число зерновок, попадающих в бункер комбайна за 1 секунду, $N = 216000 \text{ шт.}$; V_3 – объем одной зерновки, $V_3 = 25 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$; ε – скважность тритикале, $\varepsilon = 0,55$.

Объем вороха

$$V_{\text{вор}} = \frac{216000 \cdot 25 \cdot 10^{-9}}{1 - 0,55} = 0,012 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Тогда время наполнения бункера комбайна

$$\tau_6 = \frac{10}{0,012} = 883 \text{ с} = 14 \text{ мин.}$$

Определим количество зерновок в бункере комбайна

$$N_6 = N \cdot \tau_6 = 216000 \cdot 14 \cdot 60 = 181440000 \text{ шт.}$$

Масса влаги, появляющейся на поверхности всех зерновок, проходящих через контактную сушилку

$$M = N_6 \cdot m_1 = 181440000 \cdot 0,11 \cdot 10^{-6} = 2 \text{ кг.}$$

Эта поверхностная влага удаляется с зерновок в трубе возврата в результате сдувания ее воздушным потоком, транспортирующим зерно в контактно-конвективную сушилку.

Определим, насколько уменьшится относительная влажность зерна при прохождении через контактную сушилку. При относительной влажности $\omega_2 = 14 \%$ масса зерновки $m_{32} = 0,00003 \text{ кг}$.

Масса сухого вещества зерновки

$$m_3 = m_{32} \cdot (100 - \omega_2) = 0,00003(100 - 14) = 25,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Если исходная влажность зерна $\omega_1 = 30 \%$, масса зерновки из пропорции

$$m_{31} = m_{32} \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1};$$

$$m_3 = 0,00003 \frac{100 - 14}{100 - 30} = 0,000037 \text{ кг.}$$

Определим массу влаги, находящейся в зерновке с относительной влажностью $\omega_1 = 30 \%$:

$$m_{\text{в1}} = \frac{m_3 \cdot \omega_1}{100} = \frac{0,000037 \cdot 30}{100} = 11,1 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Отсюда масса влаги, оставшаяся в зерновке после удаления поверхностной влаги в трубе возврата $m_{32} = m_{31} - m_3 = 11,1 \cdot 10^{-6} - 0,173 \cdot 10^{-6} = 0,93 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$

Определим массу зерновки после трубы возврата $m_{33} = m_{32} + m_c = 10,93 \cdot 10^{-6} + 25,8 \cdot 10^{-6} = 36,73 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$

Относительная влажность зерновки, покидающей трубу возврата

$$\omega_3 = \frac{m_{\text{в2}} \cdot 100}{m_{33}} = \frac{10,93 \cdot 100}{36,73} = 29,76 \%.$$

Следовательно, относительная влажность зерна при прохождении через контактную сушилку уменьшится на

$$\Delta \omega = \omega_1 - \omega_3 = 30 - 29,76 = 0,24 \%$$

при начальной влажности зерна $\omega_1 = 30 \%$.

Вывод. Для реализации возможности увеличения коэффициента полезного действия двигателя зерноуборочного комбайна путём использования энергии отработавших газов и системы осуществления сушки зерна следует изменить конструктивную компоновку комбайна. Одним из этапов съёма избыточной влаги, содержащейся в зерновках, является контактная сушка. Хотя, как показали расчёты, прямой эффект контактной сушки зерна в зерноуборочном комбайне невелик, но весьма значителен последующий эффект. Он заключается в лёгкости последующего за контактной сушкой удаления влаги с «отпотевшего» зерна.

Список используемой литературы

1. Патент РФ №2486737. Зерноуборочный комбайн. / В.А. Николаев. Заявка № 2011139738; заявл. 29.09.2011; опубл. 10.07.2013. Бюл. № 10.
2. Николаев В.А., Кряклина И.В. Очистка зерна от примесей и его предварительная сушка. Ярославль: изд-во ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, 2017.
3. Атаназевич В.И. Сушка зерна. М.: Агропромиздат, 1989.
4. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978.

References

1. Patent RF № 2486737. Zernoubochnyy kombayn. / V.A. Nikolaev. Zayavka № 2011139738; zayavl. 29.09.2011; opubl. 10.07.2013. Byul. № 10.
2. Nikolaev V.A., Kryaklina I.V. Ochistka zerna ot primesey i ego predvaritelnaya sushka. Yaroslavl: izd-vo FGBOU VO Yaroslavskaya GSKhA, 2017.
3. Atanazevich V.I. Sushka zerna. M.: Agropromizdat, 1989.
4. Lykov A.V. Teplomassoobmen. Spravochnik. M.: Energiya, 1978.