

УДАЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЛАГИ С ЗЕРНОВОК



В.А. Николаев (фото)

д.т.н., доцент, доцент кафедры механизации
сельскохозяйственного производства

И.В. Кряклина

к.т.н., доцент, доцент кафедры механизации
сельскохозяйственного производства
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

*Поверхностная влага,
зерновки, сила
поверхностного
натяжения*

*Surface moisture,
grains, the force
of surface tension*

В литературных источниках мало сведений по определению количества поверхностной влаги, удерживаемой на поверхности зерновки. Удаление поверхностной влаги с зерновок облегчит процесс сушки зерна и потребует меньших энергетических затрат.

Академиком П.А. Ребиндером [1] предложена классификация форм связи влаги с материалом. В основу этой классификации положен энергетический принцип. Оценивается количество энергии, необходимой для удаления влаги из материала. П.А. Ребиндер выделил основные формы связи влаги с материалом: химическая, физико-химическая и физико-механическая. Для изучения сушки зерна основное значение имеют следующие формы связи влаги с материалом:

- физико-механическая: поверхностная влага – влага смачивания и капиллярная влага;
- физико-химическая: осмотическая влага и адсорбированная влага.

Физико-механическая влага может быть удалена механическим способом или испарением. Осмотическая влага проникает внутрь коллоидного материала через полупроницаемые оболочки ячеек зерновок, вызывая их набухание. Ей соответствует малая энергия связи. Адсорбционная влага удерживается на поверхности зерновок. Для удаления этой влаги необходимо сообщить ей соответствующее количество теплоты. При этом адсорбционная влага испаряется внутри материала и перемещается к его поверхности в виде пара.

Зерновки состоят из коллоидов и относятся к коллоидно-капиллярно-пористым телам. На поверхности зерновок, находящихся в колосе, удерживается влага смачивания в результате действия силы поверхностного натяжения воды.

К сожалению, в литературных источниках отсутствуют данные о массе влаги смачивания. Для ее определения был проведен эксперимент с зерновками пшеницы и ржи. Были приготовлены навески из 1000 зерен.

Сначала на лабораторных весах взвешивали чашку с дистиллированной водой. В ситечко насыпали навеску зерен, затем ситечко опускали в чашку с водой. Когда вода полностью покрывала зерна, ситечко вынимали из чашки. Производили взвешивание чашки с

оставшейся водой. Разность массы воды до погружения зерен и после их извлечения соответствовала массе воды, которая осталась на зернах от действия сил поверхностного натяжения воды. Также была определена масса воды, удерживаемой на ситечке силами поверхностного натяжения, она составила 1 г. Поэтому была сделана поправка: из массы воды на зернах вычитали 1

г. Опыт повторяли три раза. Результаты опытов представлены в таблице 1, а демонстрация опытов – на рисунках 1–3.

Средняя масса поверхностной воды на 1000 зернах пшеницы 16 г; средняя масса поверхностной воды на 1000 зернах ржи 12 г. Масса воды на одной зерновке пшеницы $m_{в1} = 0,016$ г; на одной зерновке ржи $m_{в1} = 0,012$ г. Общее количество

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Пшеница			Рожь		
Масса чашки с водой, г	Масса чашки с водой после смачивания зерна, г	Масса воды на зернах, г	Масса чашки с водой, г	Масса чашки с водой после смачивания зерна, г	Масса воды на зернах, г
300,01	282,94	17,01	311,18	296,78	14,4
306,12	289,28	16,84	327,47	314,18	13,29
302,61	285,58	17,02	323,84	310,85	12,89



Рисунок 1 – Дистиллированная вода в чашке перед началом опыта



Рисунок 2 – Зерна пшеницы в ситечке, опущенном в воду



Рисунок 3 – Оставшаяся дистиллированная вода в чашке

зерновок в потоке агента сушки составляет $N = 216000$ шт./с. Следовательно, общая масса воды на зерне, проходящем через комбайн за 1 секунду $M_{в} = m_{в1} \cdot N = 0,016 \cdot 10^{-3} \cdot 216000 = 3,456$ кг/с.

Предлагаем удалять поверхностную влагу с зерновок непосредственно в комбайне с помощью сушки. Воздух нагреем в теплообменнике, используя энергию отработавших газов двигателя комбайна. Поток агента сушки движется со скоростью 10 м/с. Он будет воздействовать на влагу, удерживаемую на поверхности зерновок силой поверхностного натяжения. На поверхностную воду действует сила воздействия потока агента сушки $R_0 = 3,94 \cdot 10^{-4}$ Н. Коэффициент поверхностного натяжения воды при температуре 75°C $\sigma = 6 \cdot 10^{-2}$ Н/м. Определим силу поверхностного натяжения, удерживающую поверхностную влагу на зерновке, по формуле:

$$F_{н} = 2\pi r\sigma, \quad (1)$$

где r – радиус окружности пленки влаги, находящейся на зерновке, м.

Средняя толщина зерновки пшеницы $\delta = 0,002$ м, отсюда $r = \frac{\delta}{2} = \frac{0,002}{2} = 0,001$ м.

$$F_{н} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,001 \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 3,77 \cdot 10^{-4} \text{ Н.}$$

Сила воздействия агента сушки на пленку воды, находящуюся на поверхности зерновки, больше, чем сила поверхностного натяжения. Следовательно, поток агента сушки унесет поверхностную влагу с зерновок. Дальнейшая сушка зерна облегчится и потребует меньших энергетических затрат.

Для расчета сушки зерна используем $H-d$ диаграмму влажного воздуха [2]. Допустим, что атмосферный воздух имеет начальные параметры: температура $t_0 = 20^\circ\text{C}$; относительная влажность

$\varphi_0 = 75\%$. По $H-d$ диаграмме определим энтальпию атмосферного воздуха $H_0 = 11$ ккал/1кг сух. возд. = 46 кДж/1кг сух. возд. и влагосодержание атмосферного воздуха $d_0 = 0,01$ кг/1кг сух. возд.

Атмосферный воздух нагревается в теплообменнике до температуры $t_1 = 500^\circ\text{C}$. Нагрев воздуха характеризуется его постоянным влагосодержанием $d_1 = d_0 = 0,01$ кг/1 кг сух. возд. По $H-d$ диаграмме для воздуха на выходе из теплообменника определим относительную влажность $\varphi_1 = 3\%$ и энтальпию $H_1 = 130$ ккал/1 кг сух. возд. = 544 кДж/1 кг сух. возд. Плотность нагретого воздуха при температуре $t_1 = 500^\circ\text{C}$ [2]

$$\rho_1 = 12,03 \frac{\mu_a \cdot p_{нв}}{T_{2к}}, \quad (2)$$

где μ_a – молекулярная масса нагретого воздуха, $\mu_a = 29$; $p_{нв}$ – давление воздуха, $p_{нв} = 1$ атм; $T_{2н}$ – температура нагретого воздуха на выходе в теплообменника, $T_{2н} = t_{2к} + 273 = 500 + 273 = 773^\circ\text{C}$.

$$\rho_1 = 12,03 \frac{29 \cdot 1}{773} = 0,45 \text{ кг/м}^3.$$

Объемный расход нагретого воздуха на выходе из теплообменника

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1},$$

где G_1 – массовый расход воздуха в теплообменнике, $G_1 = 0,132$ кг/с.

$$V_1 = \frac{0,125}{0,45} = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим массовый расход сухого воздуха с относительной влажностью $\varphi_1 = 3\%$.

$$G_{\text{сух1}} = \frac{0,125 \cdot 97}{100} = 0,121 \text{ кг/с}.$$

Плотность атмосферного воздуха при $t = 20^\circ\text{C}$

$$\rho_0 = 12,03 \frac{29}{293} = 1,19 \text{ кг/м}^3.$$

Необходимо получить агент сушки зерна с объемным расходом $V_{\text{см}} = 4$ м³/с. При работе диаметрального вентилятора происходит процесс смешения двух потоков воздуха. Воздух, нагретый в теплообменнике, смешивается с атмосферным воздухом. Определим объемный расход атмосферного воздуха $V_{\text{атм}} = V_{\text{см}} - V_1 = 4 - 0,278 = 3,722$ м³/с.

Массовый расход атмосферного воздуха при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$

$$G_{\text{атм}} = V_{\text{атм}} \cdot \rho_0 = 3,722 \cdot 1,19 = 4,43 \text{ кг/с}.$$

Массовый расход агента сушки $G_a = G_{\text{атм}} + G_1 = 4,43 + 0,125 = 4,56$ кг/с.

Массовый расход сухого воздуха при относительной влажности атмосферного воздуха $\varphi_0 = 75\%$ $G_{\text{сух2}} = G_{\text{атм}} \cdot \varphi_0 = 4,43 \cdot 0,25 = 1,1$ кг/с.

Параметры нагретого воздуха: $G_{\text{сух1}} =$

0,121 кг/с, $d_1 = 0,01$ кг/1 кг сух. возд., $t_0 = 500^\circ\text{C}$. Параметры атмосферного воздуха: $G_{\text{сух2}} = 1,1$ кг/с, $d_0 = 0,01$ кг/1 кг сух. возд., $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

По уравнению материального баланса найдем общее количество сухого воздуха в воздушной смеси [1] $G_{\text{см}} = G_{\text{сух1}} + G_{\text{сух2}} = 0,128 + 1,1 = 1,23$ кг/с.

Определим энтальпию воздушной смеси $H_{\text{см}}$ по балансу энтальпии [3]:

$$G_{\text{сух2}} \cdot H_0 + G_{\text{сух1}} \cdot H_1 = G_{\text{сух3}} \cdot H_{\text{см}}, \quad (3)$$

$$H_{\text{см}} = \frac{G_{\text{сух2}} \cdot H_0 + G_{\text{сух1}} \cdot H_1}{G_{\text{см}}} = \frac{1,1 \cdot 46 + 0,128 \cdot 544}{1,23} =$$

$= 98$ кДж/1 кг сух. возд.

Влагосодержание воздушной смеси не изменится: $d_{\text{см}} = 0,01$ кг/1кг сух. возд. По $H-d$ диаграмме влажного воздуха определим температуру воздушной смеси: $t_{\text{см}} = 75^\circ\text{C}$. Плотность воздушной смеси

$$\rho_{\text{см}} = 12,03 \frac{29}{(273+75)} = 1 \text{ кг/м}^3.$$

Так как в пространстве между декой и решетом поток агента сушки сдувает поверхностную влагу с зерен, на жалюзи решета зерна попадают уже без поверхностной влаги. Уравнение теплового баланса для сушки зерна на решетке и в подрешетном пространстве [4]:

$$Q_{a1} + Q_{и} = Q_{м} + Q_{п} + Q_{пр}, \quad (4)$$

где Q_{a1} – теплота, приходящая с агентом сушки, кДж/с; $Q_{и}$ – теплота, приходящая с испарившейся из зерна влагой, кДж/с; $Q_{м}$ – теплота, поглощаемая зерном, кДж/с; $Q_{п}$ – потери тепла в окружающую среду в результате теплопередачи через ограждения сушильной камеры, кДж/с; $Q_{пр}$ – потери тепла с примесями, выдуваемыми агентом сушки из зернового вороха, кДж/с.

Примем допущения:

– примеси составляют 5% от всего зернового вороха, следовательно $Q_{пр} = 0,05 Q_{a1}$;

– потери тепла в окружающую среду в результате теплопередачи через ограждения сушильной камеры $Q_{п}$ составляют $q_{п} = 3 \dots 8$ кДж/кг исп. влаги [4].

Количество тепла, приходящее с агентом сушки [4]:

$$Q_{a1} = H_{\text{см}} \cdot G_{\text{см}}, \quad (5)$$

$$Q_{a1} = 98 \cdot 1,23 = 120,5 \text{ кДж/с},$$

Тогда $Q_{пр} = 0,05 \cdot 120,5 = 6,03$ кДж/с.

Процесс сушки протекает при $H_{\text{см}} = \text{const}$. Это объясняется тем, что тепловая энергия агента сушки, расходуемая при испарении влаги из высушиваемого зерна, немедленно возвращается

агенту сушки вместе с влагой в виде скрытой теплоты парообразования.

С другой стороны, количество тепла, передаваемого агентом сушки:

$$Q_{a1} = c_{cm} \cdot G_a (t_{cm}^H - t_{cm}^K), \quad (6)$$

где c_{cm} – теплоемкость агента сушки, $c_{cm} = 0,25$ ккал/кг·град = 1,05 кДж/кг·град [2];

t_{cm}^H – начальная температура агента сушки, $t_{cm}^H = 75^\circ\text{C}$ – температура отработавшего агента сушки, $^\circ\text{C}$.

Отсюда температура отработавшего агента сушки

$$t_{cm}^K = t_{cm}^H - \frac{Q_{a1}}{c_{cm} \cdot G_a} = 75 - \frac{120,5}{1,05 \cdot 4,43} = 49^\circ\text{C}.$$

По $H-d$ диаграмме влажного воздуха определяем влагосодержание отработавшего агента сушки $d_1 = 0,02$ кг/1 кг сух. возд. Определим количество испаренной влаги

$$W = G_{cm} \cdot (d_1 - d_0), \quad (7)$$

$$W = 1,23 \cdot (0,02 - 0,01) = 0,0123 \text{ кг/с}.$$

Теплота, приходящая с испарившейся из зерна влагой [4]:

$$Q_{и} = c_b \cdot W \cdot \theta_1, \quad (8)$$

где c_b – теплоемкость воды, $c_b = 4,187$ кДж/кг·град; θ_1 – начальная температура зерна, примем $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$. $Q_{и} = 4,187 \cdot 0,0123 \cdot 20 = 1,03$ кДж/с.

Потери тепла в окружающую среду в результате теплопередачи через ограждения сушильной камеры $Q_{п} = W \cdot q_{п} = 0,0123 \cdot 8 = 0,1$ кДж/с.

Из уравнения теплового баланса (4) определим теплоту, поглощаемую зерном

$$Q_m = Q_{a1} + Q_{и} - Q_{п} - Q_{пр},$$

$$Q_m = 120,5 + 1,03 - 0,1 - 6,03 = 115,4 \text{ кДж/с}.$$

С другой стороны [4]

$$Q_m = G_3 c_3 (\theta_2 - \theta_1), \quad (9)$$

где G_3 – масса зерна, поступающего на сушку, кг; c_3 – теплоемкость зерна, кДж/кг·град; θ_2 – конечная температура зерна, $^\circ\text{C}$.

Допустим, что уборка происходит в сложных погодных условиях и влажность зерна, поступа-

ющего на сушку, $\omega_1 = 30\%$. Оптимальная равновесная влажность зерна, обеспечивающая длительное хранение, $\omega_2 = 14\%$ при относительной влажности воздуха $\phi_2 = 70\%$.

Определим массу зерна с влажностью $\omega_2 = 14\%$

$$m_{31} = N \cdot m_3,$$

где N – количество зерновок в потоке агента сушки, $N = 216000$ шт.; m_3 – масса зерновки тритикале, $m_3 = 0,00003$ кг.

$$m_{31} = 216000 \cdot 0,00003 = 6,48 \text{ кг/с}.$$

Определим массу зерна, поступающего на сушку, с влажностью $\omega_1 = 30\%$

$$m_3 = m_{31} \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}, \quad (10)$$

$$m_3 = 6,48 \frac{100 - 14}{100 - 30} = 7,96 \text{ кг/с}.$$

За теплоемкость влажного зерна c_3 принимаем теплоемкость механической смеси сухого вещества зерна и воды, которую определяем по формуле [1]:

$$c_3 = \frac{\omega_1}{100} + \frac{100 - \omega_1}{100} c_c, \quad (11)$$

где c_c – теплоемкость сухого вещества зерна, $c_c = 1,55$ кДж/кг·град.

$$c_3 = \frac{30}{100} + \frac{100 - 30}{100} 1,55 = 1,39 \text{ кДж/кг·град}.$$

Из формулы (9) определим температуру зерна после сушки в потоке агента сушки

$$\theta_2 = \frac{Q_m}{c_3 \cdot G_3} + \theta_1,$$

$$\theta_2 = \frac{115,4}{1,39 \cdot 7,96} + 20 = 30^\circ\text{C}.$$

Вывод

Поток агента сушки с заданными параметрами, движущийся со скоростью 10 м/с, позволяет полностью удалить непосредственно в комбайне поверхностную влагу с зерновок.

Литература

1. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст] / В.И. Атаназевич. – М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.
2. Перри, Джон Г. Справочник инженера-химика [Текст]. Т. 1 / Джон Г. Перри; пер. с англ. под ред. акад. Н.М. Жаворонкова и чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – М.: «Химия», 1969. – 640 с.
3. Циборовский, Я. Основы процессов химической технологии [Текст] / Я. Циборовский; пер. с польского под ред. П.Г. Романкова. – Л.: «Химия», 1967. – 720 с.
4. Захаров, А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве [Текст] / А.А. Захаров. – М.: Агропромиздат, 1986. – 288 с.

References

1. Atanazevich, V.I. Sushka zerna [Tekst] / V.I. Atanazevich. – M.: Agropromizdat, 1989. – 240 s.

2. Perri, Dzhon G. Spravochnik inzhenera-himika [Tekst]. T. 1 / Dzhon G. Perri; per. s angl. pod red. akad. N.M. Zhavoronkova i chl.-korr. AN SSSR P.G. Romankova. – M.: «Himija», 1969. – 640 s.

3. Tsiborovskij, Ya. Osnovy processov himicheskoy tehnologii [Tekst] / Ya. Tsiborovskij; per. s pol'skogo pod red. P.G. Romankova. – L.: «Himija», 1967. – 720 s.

4. Zakharov, A.A. Primenenie teploty v sel'skom hozjajstve [Tekst] / A.A. Zakharov. – M.: Agropromizdat, 1986. – 288 s.

ОБЪЯВЛЕНИЕ

В издательстве ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА в 2017 г.
вышла монография

В.А. Николаева, И.В. Кряклиной
«ОЧИСТКА ЗЕРНА ОТ ПРИМЕСЕЙ
И ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СУШКА»

Монография направлена на совершенствование обработки зерна. В ней теоретически исследованы процессы сепарации зернового вороха и предварительной сушки зерна в новом комбайне. В работе также произведен расчет полуавтоматической зерноочистительной машины, теоретически исследованы процессы очистки зернового вороха после сушки в машине с вертикально колеблющимися решётами.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов, студентов агроинженерных специальностей и специалистов сельского хозяйства.

УДК 621.436.018; ББК 40.722; ISBN 978-5-98914-180-7; 212 стр.

ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:

150042, Г. ЯРОСЛАВЛЬ, ТУТАЕВСКОЕ ШОССЕ, 58,
ФГБОУ ВО ЯРОСЛАВСКАЯ ГСХА
e-mail: e.bogoslovskaya@yarcx.ru