

УДК 620:631.365.22

UDC 620:631.365.22

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В МЕЖЗЕРНОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ СВЧ-РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СУШКЕ ЗЕРНА АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ**

**MODELING OF THE AIR TEMPERATURE CHANGING PROCESS IN INTERGRANULAR SPACE DURING THE MICROWAVE-RECIRCULATION GRAIN DRYING WITH ACTIVE AERATION**

Руденко Нелли Борисовна  
к.т.н.

Rudenko Nelly Borisovna  
Cand.Tech.Sci.

Грачева Наталья Николаевна  
к.т.н.

Gracheva Natalia Nikolaevna  
Cand.Tech.Sci.

*Азово-Черноморский инженерный институт  
ФГБОУ ВПО ДГАУ в г.Зернограде, г.Зерноград,  
Ростовская область, Россия*

*Azov-Black Sea Engineering Institute FSBEI HPE  
DSAU in Zernograd, Zernograd, Rostov region,  
Russia*

Работа посвящена математическому моделированию процесса изменения температуры воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ-рециркуляционной сушке зерна активным вентилированием

The article is devoted to the mathematical modeling of the air temperature changing process in intergranular space during the microwave-recirculation grain drying with active aeration

Ключевые слова: СУШКА ЗЕРНА, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ, АКТИВНОЕ ВЕНТИЛИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, СВЧ, РЕЦИРКУЛЯЦИОННАЯ СУШКА

Keywords: GRAIN DRYING, ENERGY SERVING TECHNOLOGIES, GRAIN CROPS, ACTIVE AERATION, MATHEMATICAL MODEL, MICROWAVE, RECIRCULATION DRYING

Продовольственная безопасность нашей страны в первую очередь зависит от объема и качества заготовленного продовольственного и фуражного зерна. Однако, для того, чтобы зерно хорошо хранилось, его влажность не должна превышать 14-15%, а для этого зачастую необходимо осуществлять его дополнительную сушку. Необходимость совершенствования технологии сушки зерна обусловлена значительным объемом этой операции, большой удельной энергоемкостью процесса и высокими требованиями к сохранению качества зерна. Снизить энергозатраты на сушку можно за счет интенсификации внешнего и внутреннего процессов тепло-массообмена, определяемого режимами и способами сушки, в том числе за счет рециркуляции зерна и воздействия магнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ).

Поскольку на эффективность процесса рециркуляции значительное влияние оказывает конвективный теплообмен между зерновками, была получена математическая зависимость, описывающая изменение температуры воздуха в межзерновом пространстве при воздействии поля СВЧ.

При СВЧ нагреве происходит повышение давления паров воды в центре зерновки. За счет этого происходит более интенсивное перемещение влаги в зерне к его поверхности [1].

В начальный период рециркуляции, когда «влажное» и «сухое» зерно перемешали и поместили в камеру рециркуляции, тепло- и влагообменные процессы будут протекать не интенсивно [3, 5].

Градиенты температур между «сухим» и «влажным» зерном не велики, поскольку процесс сушки зерна активным вентилированием протекает при температурах атмосферного воздуха.

Если допустить, что зерновки имеют одинаковую поверхность в виде шара, то при коэффициенте рециркуляции  $K=1$  и равномерном смешивании «влажная» зерновка будет в 4-х – 5-ти точках контактировать с «сухими» зерновками.

Площадь контакта с воздухом межзернового пространства гораздо больше. Поэтому основные процессы тепло- и влагообмена будут проходить через межзерновое пространство.

Из системы уравнений для конвективного тепло- и влагообмена [2] могут быть получены выражения для температуры и влажности воздуха в межзерновом пространстве.

Процесс тепло- и влагообмена при конвективной сушке принято описывать следующей системой уравнений [1, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} - 3600V \frac{\partial T}{\partial \tau} &= - \frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\gamma_n \cdot r'}{\gamma_3 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}; & (1.1) \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= - \frac{\gamma_6 \cdot \varepsilon_3}{10\gamma_3} \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau} \right); & (1.2) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} &= - \frac{\alpha S_v}{\gamma_6 c_6 \varepsilon_3} (T - \Theta); & (1.3) \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= \frac{\beta \cdot S_v}{\gamma_3} (P_3 - P_6), & (1.4) \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $T$  – температура агента сушки, °C;  $F$  – влагосодержание сушильного агента, г/кг;  $W$  – влажность зерна, %;  $\Theta$  – температура зерна, °C;  $V$  – ско-

рость агента сушки, м/с;  $c_6, c_3$  – теплоемкость воздуха и зерна, кДж/кг·°C ;  $\varepsilon$  – порозность зернового слоя;  $S_v$  – удельная поверхность семян, 1/м;  $r'$  – скрытая теплота парообразования воды, кДж/кг;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, кДж/кг·с·°C ;  $\gamma_3$  – объемная масса зерна, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_6$  – удельный вес воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $P_3$  – давление водяных паров в зерновке;  $P_6$  – давление водяных паров в воздухе.

С учетом того, что при СВЧ рециркуляции воздух через активную зону не продувается ( $V=0$ ) система уравнений (1) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -\frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\gamma_n \cdot r'}{\gamma_3 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}; & (2.1) \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= -\frac{\gamma_6 \cdot \varepsilon_3}{10\gamma_3} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau}; & (2.2) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -\frac{\alpha S_v}{\gamma_6 c_6 \varepsilon_3} (T - \Theta); & (2.3) \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= \frac{\beta \cdot S_v}{\gamma_3} (P_3 - P_6). & (2.4) \end{aligned} \right\} (2)$$

Если воздух через зерновой слой, подвергаемый воздействию поля СВЧ, не продувается, то суммарное влагосодержание зернового слоя не изменяется. Происходит перераспределение влаги между зерновками, но средняя влажность смеси зерна должна оставаться постоянной. Если мы сделаем такое допущение, то правомочно утверждать, что  $\frac{\partial W}{\partial \tau} = 0$ . В этом случае система уравнений (2) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -\frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}; & (3.1) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -\frac{\alpha S_v}{\gamma_6 c_6 \varepsilon_3} (T - \Theta); & (2.3) \\ P_3 &= P_6. & (3.2) \end{aligned} \right\} (3)$$

Уравнения (3.1) и (2.3) показывают, что скорость изменения температуры межзернового пространства  $\frac{\partial T}{\partial \tau}$  зависит от скорости изменения тем-

пературы зерна и разности температур воздуха и зерна.

Равенство (3.2) показывает, что в процессе СВЧ рециркуляции в активной зоне, без подачи в нее воздуха, давление паров воды в межзерновом пространстве полностью определяется давлением паров в зерновке. С учетом того, что при выражении размерности давления водяного пара в мм. рт. ст. его величина практически совпадает с абсолютной влажностью воздуха ( $e$ ) правомочна следующая запись

$$e = P_3 \quad (4)$$

Абсолютная влажность воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ рециркуляции без продува определяется давлением пара в зерновках.

В смеси зерна, подвергающегося рециркуляции, находятся зерновки различной влажности. Поэтому под воздействием поля СВЧ они разогреваются до различной температуры, и давление паров в каждой зерновке разное. Следовательно, среднее давление пара в зерновках может быть представлено как:

$$P_3 = \frac{\sum_{i=1}^m P_{3i}}{m}, \quad (5)$$

где  $i$  – номер зерновки;  $m$  – количество зерновок в смеси;  $P_{3i}$  – давление паров в  $i$ -той зерновке.

Если допустить, что в смеси зерна находятся зерновки только двух влажностей («влажные» и «сухие»), то в этом случае среднее давление зерновок может быть найдено как:

$$P_{3cp} = \frac{\sum_{j=1}^z P_{3j} + \sum_{l=1}^n P_{3l}}{m}, \quad (6)$$

где  $j$  – номер «влажных» зерновок;  $z$  – количество «влажных» зерновок;  $l$  – номер «сухих» зерновок;  $n$  – количество «сухих» зерновок;  $m$  – общее количество зерновок, с учетом  $m = n + z$ .

Принимая во внимание, что коэффициент рециркуляции зерна может

быть выражен через количество зерновок каждой влажности, как  $K_p = \frac{n}{z}$ , разделим числитель и знаменатель (6) на  $z$ . В результате получим

$$P_{зсп} = \frac{\sum_{j=1}^z P_{зj} + \sum_{l=1}^n P_{зl}}{z \cdot (1 + K_p)}, \quad (7)$$

Из (7) видно, что среднее давление пара в зерновках зерновой смеси обратно пропорционально коэффициенту рециркуляции.

В уравнениях (3.1) и (2.3) температура нагрева зерна  $\Theta_з$  так же зависит от его влажности. Поэтому правильнее использовать среднюю температуру нагрева зерна  $\Theta_{зсп}$ , которая по аналогии с (7) может быть найдена как

$$\Theta_{зсп} = \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{зj} + \sum_{l=1}^n \Theta_{зl}}{z \cdot (1 + K_p)}, \quad (8)$$

Тогда система уравнений, описывающая процесс изменения температуры и абсолютной влажности воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ рециркуляции, будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= -\frac{\gamma_з \cdot c_з}{\gamma_в \cdot c_в \cdot \varepsilon_з} \cdot \frac{d \left( \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{зj} + \sum_{l=1}^n \Theta_{зl}}{z \cdot (1 + K_p)} \right)}{d\tau}; & (9.1) \\ \frac{dT}{d\tau} &= -\frac{\alpha S_v}{\gamma_в c_в \varepsilon_з} \left( T - \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{зj} + \sum_{l=1}^n \Theta_{зl}}{z \cdot (1 + K_p)} \right); & (9.2) \\ e &= \frac{\sum_{j=1}^z P_{зj} + \sum_{l=1}^n P_{зl}}{z \cdot (1 + K_p)}. & (9.3) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Необходимо учитывать, что в данной системе уравнений принято до-

пущение, что температура воздуха в межзерновом пространстве одинакова по всему объему.

Приравняв правые части уравнений (9.1) и (9.2) и выполнив математические преобразования, получим уравнение для расчета температуры межзернового пространства:

$$\frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \epsilon_3} \cdot \frac{d \left( \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{3j} + \sum_{l=1}^n \Theta_{3l}}{z \cdot (1 + K_p)} \right)}{d\tau} = \frac{\alpha S_v}{\gamma_6 c_6 \epsilon_3} \left( T - \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{3j} + \sum_{l=1}^n \Theta_{3l}}{z \cdot (1 + K_p)} \right),$$

$$T = \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{3j} + \sum_{l=1}^n \Theta_{3l}}{z \cdot (1 + K_p)} + \frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\alpha S_v} \cdot \frac{d \left( \frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{3j} + \sum_{l=1}^n \Theta_{3l}}{z \cdot (1 + K_p)} \right)}{d\tau}, \quad (10)$$

Средняя температура нагрева зерновки  $\Theta_{зсп}$  может быть найдена как

$$\Theta_{зсп} = \frac{\Theta_{ц} + \Theta_{п}}{2}, \quad (11)$$

где  $\Theta_{ц}$  – температура нагрева центра зерновки;  $\Theta_{п}$  – температура нагрева поверхности зерновки.

С учетом того, что [1]

$$\Theta_{ц} = \Theta_0 + \frac{2Q_v \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^2} (1 - e^{-K\tau}),$$

$$\Theta_{п} = \Theta_0 + 0,687 \cdot \frac{Q_v \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^3} (1 - e^{-K\tau}),$$

где  $\Theta_0$  – первоначальная температура зерна;  $R$  – радиус зерновки;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Q_v$  – количество тепла, выделяемого в зерновке за счет воздействия поля СВЧ;  $K$  – коэффициент разделения, который вычисляется по формуле

$$K = \left( \frac{\pi \cdot n'}{\beta \cdot R} \right)^2, \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{a}},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $n'$  – количество слоев нагрева в зерновке (используется  $n' = 1$ ),

выражение для нахождения средней температуры нагрева зерновки запишется так:

$$\Theta_{зсп} = \frac{\Theta_0 + \frac{2Q_V \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^2} (1 - e^{K\tau}) + \Theta_0 + 0,687 \cdot \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^3} (1 - e^{K\tau})}{2}. \quad (12)$$

Выполнив определенные математические преобразования, получим:

$$\Theta_{зсп} = \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}). \quad (13)$$

Для всего «влажного» и всего «сухого» зерна это выражение будет иметь следующий вид:

$$\sum_{j=1}^z \Theta_{з-j} = \left( \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}) \right) \cdot z, \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^n \Theta_{з-l} = \left( \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}) \right) \cdot n. \quad (15)$$

Используя (14) и (15), получим:

$$\frac{\sum_{j=1}^z \Theta_{з-j} + \sum_{l=1}^n \Theta_{з-l}}{z \cdot (1 + K_p)} = \frac{\left( \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}) \right) \cdot (z + n)}{z \cdot (1 + K_p)}, \quad (16)$$

Продифференцировав (16) по  $\tau$  получим:

$$\frac{d\Theta_{зсп}}{d\tau} = -0,09 \cdot \frac{Q_V \cdot R^2 \cdot K \cdot e^{K\tau} \cdot (z + n)}{\lambda \cdot z \cdot (1 + K_p)}. \quad (17)$$

Подставляя (17) и (16) в (10), получим уравнение изменения температуры межзернового пространства в смеси «влажного» и «сухого» зерна при воздействии поля СВЧ без продувания слоя воздухом.

$$T = \frac{\left( \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_V \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}) \right) \cdot (z + n)}{z \cdot (1 + K_p)} - 0,09 \cdot \frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \epsilon_3} \cdot \frac{Q_V \cdot R^2 \cdot K \cdot e^{K\tau} \cdot (z + n)}{\lambda \cdot z \cdot (1 + K_p)}. \quad (18)$$

После определенных математических преобразований уравнение 18 примет вид:

$$T = \frac{(z+n)}{z \cdot (1+K_p)} \cdot \left( \Theta_0 + 0,09 \frac{Q_v \cdot R^2}{\lambda} (1 - e^{K\tau}) - 0,09 \cdot \frac{\gamma_3 \cdot c_3}{\gamma_6 \cdot c_6 \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{Q_v \cdot R^2 \cdot K \cdot e^{K\tau}}{\lambda} \right) \quad (19)$$

Система уравнений (9) справедлива и для случая, когда на зерновой слой перестают воздействовать полем СВЧ. К этому моменту температура нагрева центра зерновки, как правило, выше температуры его поверхности. Центр зерновки является источником тепла. Центр зерновки начинает остывать, отдавая тепло остальным слоям. Если температура межзернового пространства ниже температуры поверхности зерна, то поверхность зерновки будет также остывать. Скорость изменения температур зависит от их разности.

Уравнение (19) и уравнения для расчёта изменения температуры в центре и на поверхности зерновок при СВЧ воздействии позволяют выполнить расчёты данных параметров в зависимости от исходной влажности зерна (через удельную мощность СВЧ излучения в зерновом слое), коэффициента рециркуляции.

Следует отметить, что используемые в уравнении (19) значения количества «влажных» и «сухих» зёрен могут быть получены с использованием такой характеристики зернового материала, как вес тысячи семян. Используя данный показатель для различных влажностей зерна и зная объём зоны СВЧ рециркуляции, возможно рассчитать величины  $z$ ,  $n$  и  $m$ .

Используя данные для начальной влажности зерна пшеницы 22%, влажности просушенного зерна 14%, коэффициента рециркуляции 0,3, исходной температуры зерна 25 °С рассчитали изменение температур в центре «влажной» зерновки, на её поверхности и в межзерновом пространстве (рисунок 2).



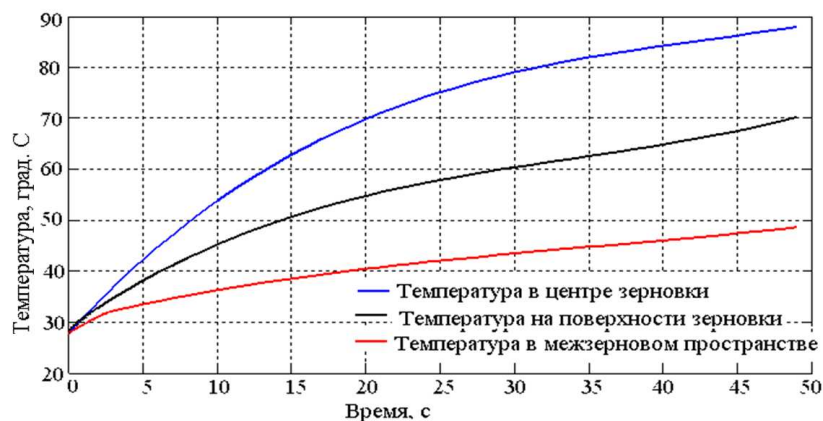


Рисунок 2 – Расчётные кривые изменения температуры в центре, на поверхности «влажной» зерновки и в межзерновом пространстве

Следует отметить, что данные графики носят, в большей степени, качественный характер, но позволяют судить о динамике температур в зерновом слое. Так представленные графики позволяют говорить, что при первом воздействии СВЧ поля на «влажную» зерновку температура в её центре и на поверхности изменяется в соответствии с ранее описанными закономерностями. Центр зерновки греется больше, поскольку имеет большую, чем поверхность влажность. Температура в межзерновом пространстве увеличивается не столь значительно, как в центре и даже на поверхности зерновки. Это в определённой степени подтверждает высказанное ранее предположение о том, что за один приём СВЧ воздействие не представляется возможным добиться равномерного распределения температуры межзернового пространства и выравнивания температур между зерновками.

Также графики позволяют говорить о том, что объективно контролировать процесс СВЧ рециркуляции только измеряя температуру в межзерновом пространстве невозможно. Для получения достоверной информации о ходе процесса необходимо контролировать хотя бы два параметра – температуру поверхности зерна и температуру в межзерновом пространстве.

## Выводы

1. Полученное уравнение, описывающее изменение температуры воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ рециркуляции зерна, при его сушке активным вентилированием, позволяет отслеживать изменение динамических свойств межзернового пространства в процессе СВЧ рециркуляции.

2. Полученные с помощью теоретических исследований графики изменения температуры зерна и межзернового пространства при СВЧ нагреве показали, что контролировать протекание процесса возможно по двум параметрам – температуре зерна и межзернового пространства.

### Литература

1. Будников, Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.02 / Будников Дмитрий Александрович. – Зерноград, 2008. – 164 с., ил.
2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – Москва: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Мельник, Б.Е. Активное вентилирование зерна: справочник / Б.Е. Мельник. – Москва: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
4. Руденко, Н.Б. Использование поля СВЧ при рециркуляционной сушке зерна активным вентилированием: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.02 / Руденко Нелли Борисовна. – Зерноград, 2011. – 136 с., ил.
5. Сакун, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В.А.Сакун. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Колос, 1974. – 216 с.

### References

1. Budnikov, D.A. Intensifikacija sushki zerna aktivnym ventilirovanijem s ispol'zovaniem jelektromagnitnogo polja SVCh: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskix nauk: 05.20.02 / Budnikov Dmitrij Aleksandrovich. – Zernograd, 2008. – 164 s., il.
2. Lykov, A.V. Teorija sushki / A.V. Lykov. – Moskva: Jenergija, 1968. – 472 s.
3. Mel'nik, B.E. Aktivnoe ventilirovanie zerna: spravocnik / B.E Mel'nik. – Moskva: Agropromizdat, 1986. – 159 s.
4. Rudenko, N.B. Ispol'zovanie polja SVCh pri recirkuljacionnoj sushke zerna aktivnym ventilirovanijem: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskix nauk: 05.20.02 / Rudenko Nelli Borisovna. – Zernograd, 2011. – 136 s., il.
5. Sakun, V.A. Sushka i aktivnoe ventilirovanie zerna i zelenyh kormov / V.A.Sakun. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Kolos, 1974. – 216 s.