

3. Степук, Л.Я. Обоснование шага установки дисков и расстояния между их рядами в адаптере для внутрипочвенного внесения жидкого навоза / Л.Я. Степук, А.А. Жешко, Э.В. Дыба // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2013. – Вып. 47. – Т. 1. – С. 132–140.
4. Жарский, М.А. Гидро- и пневмотранспорт в сельском хозяйстве: учебное пособие для студентов с.-х. вузов / М.А. Жарский, Г.П. Цыганок. – Горки, 1988. – 68 с.
5. Грачева, Л.И. Трубопроводный транспорт на животноводческих фермах / Л.И. Грачева, Н.Н. Шумляк. – М.: Колос, 1979. – 159 с.
6. Васильев, Б.А. Гидравлические машины / Б.А. Васильев, Н.А. Грецов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.

УДК 631.365

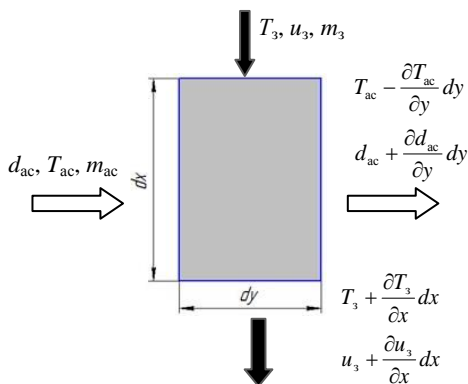
**В.П. Чеботарев**

(РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ПОДВИЖНОГО СЛОЯ ЗЕРНА

### Введение

Имитационная модель для исследования изменения параметров процесса сушки подвижного слоя зерна потоком агента сушки различного направления движения относительно зернового потока строится аналогично расчетным моделям сушки неподвижного слоя зерна. В слое зерна, через который проходит поперечный поток агента сушки (рисунок 71), например, происходят аналогичные процессы теплопередачи и переноса вещества, и для них действительны те же закономерности, что и для неподвижного слоя зерна [1, 2]. Однако если основные параметры сушки неподвижного слоя зерна представляются функцией времени, то параметры сушки подвижного слоя зерна лучше описываются функцией пути движения зерна в сушильном модуле.



**Рисунок 71 – Изменения состояния агента сушки и подвижного элементарного слоя зерна при сушке поперечным потоком сушильного агента**

## Основная часть

Взаимосвязь между сушкой поперечным потоком агента сушки и сушкой неподвижного слоя зерна может быть представлена скоростью движения зерна:

$$v_3 = \frac{dy}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $dy$  – бесконечно малое перемещение агента сушки по оси  $y$ ,  $m$ ;

$d\tau$  – время перемещения,  $c$ .

С учетом взаимосвязи между сушкой поперечным потоком агента сушки и сушкой неподвижного слоя зерна, нашедшей отражение в уравнении (1), можно вывести основные закономерности, действительные для сушки поперечным потоком сушильного агента, непосредственно из дифференциальных уравнений, которые были разработаны для сушки неподвижного слоя зерна [2, 3].

При перемещении потока агента сушки перпендикулярно к направлению движения зерна градиенты влажности и температуры агента сушки и зерна изменяются не только в направлении воздушного потока, но и в направлении потока зерна. Величина изменения этих градиентов по каждому направлению пропорциональна соотношению соответственно их скоростей:

$$\frac{\partial T_{ac}}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 v_3 (T_{ac} - T_3)}{m_{ac} v_{ac} \rho_3 D_3 dx} - c_{pD} T_{ac} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_{ac}}{\partial y} = \frac{6\alpha_3 m_3 v_3 (T_{ac} - T_3)}{m_{ac} v_{ac} \rho_3 D_3 dy} - c_{pD} T_{ac} \frac{\partial d_{ac}}{\partial y}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 v_3 (T_{ac} - T_3) d\tau}{\rho_3 D_3 v_3 (m_3 c_3 + u_3 c_B + r_0) \frac{\partial u_3}{\partial x}}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial y} = \frac{6\alpha_3 m_3 v_3 (T_{ac} - T_3) d\tau}{\rho_3 D_3 v_3 (m_3 c_3 + u_3 c_B + r_0) \frac{\partial u_3}{\partial y}}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial d_{ac}}{\partial x} = \frac{m_3 v_3}{m_{ac} v_{ac}} \frac{\partial u_3}{\partial x}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial d_{ac}}{\partial y} = \frac{m_3 v_{ac}}{m_{ac} v_3} \frac{\partial u_3}{\partial y}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial x} = \frac{m_{ac} v_{ac}}{m_3 v_3} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}; \quad (6)$$

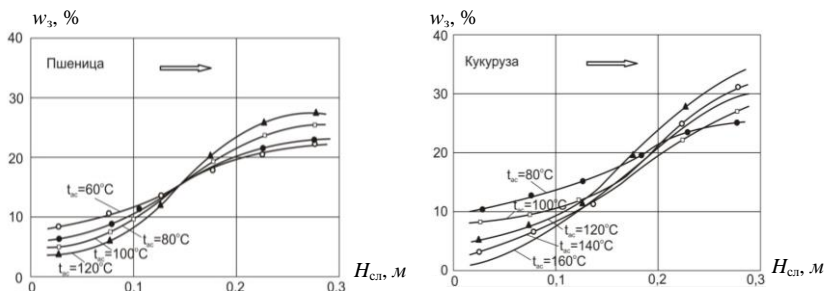
$$\frac{\partial u_3}{\partial y} = \frac{m_{ac} v_3}{m_3 v_{ac}} \frac{\partial d_{ac}}{\partial y}; \quad (9)$$

где  $T_3$  и  $T_{ac}$  – соответственно температура зерна и агента сушки, °С;  
 $u_3$  и  $d_{ac}$  – соответственно влагосодержание зерна и агента сушки, г/кг;  
 $m_3$  и  $m_{ac}$  – соответственно масса зерна и агента сушки, кг;  
 $dy$  – бесконечно малое перемещение по оси  $y$ , м;  
 $c_{pD}$  – удельная изобарическая теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К);  
 $c_{pL}$  – удельная изобарическая теплоемкость агента сушки, Дж/(кг·К);  
 $\rho_3$  – плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v_3, v_{ac}$  – соответственно скорость зерна и агента сушки, м/с;  
 $D_3$  – диаметр зерновки, м;  
 $\alpha_3$  – коэффициент теплообмена зерна, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $r_0$  – удельная теплота испарения (парообразования), Дж/кг;  
 $c_3$  – удельная теплоемкость зерна, Дж/(кг·К);  
 $c_v$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

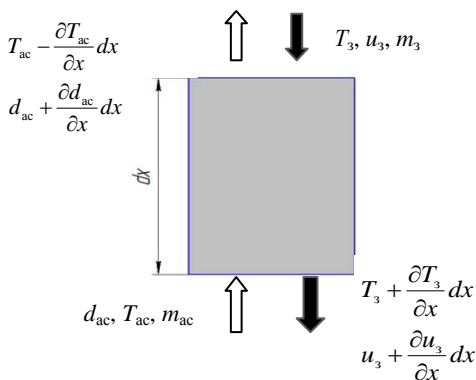
Для решения системы дифференциальных уравнений (2)–(9) должны быть прежде всего известны начальные и граничные условия. Для сушки поперечным потоком агента сушки к ним относятся температура и влажность зерна до начала процесса сушки. Кроме того, вследствие перемещения зерна перпендикулярно направлению потока агента сушки градиенты влажности и температуры изменяются не только в направлении воздушного потока, но и в направлении потока зерна.

По аналогии с сушкой неподвижного слоя зерна при сушке поперечным потоком также больше всего нагревается зерно в месте подвода агента сушки. Вследствие этого зерно в месте подвода агента сушки уже в первой части сушильной зоны отдает основную часть влаги. Затем, по мере продвижения зерна в сушильном модуле, содержание влаги в нем асимптотически приближается к равновесному состоянию. Результатом этого является то, что в сушилках непрерывного действия с поперечным потоком при обычных температурах агента сушки от 80 до 120° зерно в месте его подвода сильно пересушивается. На высокую тепловую нагрузку зерна в месте подвода сушильного агента указывает ход температуры зерна. За резким подъемом температуры зерна в первой части сушильной зоны следует более протяженный участок, в котором его температура асимптотически приближается к температуре агента сушки. Это означает, что температура зерна в месте подвода агента сушки в течение почти всего процесса сушки лишь незначительно меньше его температуры. Данная особенность вносит значительные ограничения для возможного увеличения производительности за счет повышения температуры сушильного агента при сушке поперечным потоком. При сушке поперечным потоком температура отводимого сушильного агента в первой части сушильной зоны при почти постоянном насыщении приближается к граничной температуре охлаждения. С увеличением пути движения материала температура отработанного сушильного агента па-

дает при одновременном снижении степени его насыщения. Это указывает на недостаточное использование подводимой тепловой энергии и является причиной повышенного потребления тепла при сушке поперечным потоком. В отличие от других способов сушки повышение температуры сушильного агента также отрицательно воздействует на удельный расход тепла. Удельный расход тепла увеличивается при сушке поперечным потоком с повышением температуры сушильного агента независимо от вида высушиваемого зерна. Увеличение удельного расхода тепла приводит к сильному пересушиванию зерна в месте подвода воздуха, причем происходит съём преимущественно адсорбированной влаги. Чтобы партию зерна высушить до состояния, годного для хранения, необходимо его больше пересушить, что связано со значительным увеличением потребления тепла (рисунок 72).



**Рисунок 72 – Изменение влажности зерна на выходе из зоны сушки в зависимости от толщины слоя и температуры сушильного агента при сушке поперечным потоком [4]**



**Рисунок 73 – Изменение состояния агента сушки и зерна при сушке зерна противотоком**

Имитационная модель для расчета параметров процесса сушки зерна противотоком отличается от модели сушки неподвижного зерна тем, что зерно, подлежащее сушке, во время процесса сушки не находится в неподвижном состоянии, а перемещается по емкости сушильной установки против потока движущегося воздуха. Изменение состояния сушильного агента и зерна при сушке противотоком показано на рисунке 73.

Дифференциальные уравнения, необходимые для расчета параметров процесса противоточной сушки, можно вывести из соотношений для конвективных процессов теплопередачи и переноса вещества, а также их баланс массы и энтальпии для слоя зерна, через который проходят противотоки агента сушки.

$$\frac{\partial T_{ac}}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 (v_{ac} + v_3)(T_{ac} - T_3) - c_{pD} T_{ac} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}}{m_{ac}(v_{ac} - v_3)\rho_3 D_3 dx - c_{pV} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x} dx - c_{pD} d_{ac} - c_{pL}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 (v_{ac} + v_3)(T_{ac} - T_3) d\tau}{\rho_3 D_3 (v_{ac} - v_3)(m_3 c_3 + u_3 c_b + r_0) \frac{\partial u_3}{\partial x}}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial d_{ac}}{\partial x} = \frac{m_3 (v_{ac} + v_3)}{m_{ac}(v_{ac} - v_3)} \frac{\partial u_3}{\partial x}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial x} = \frac{m_{ac}(v_{ac} - v_3)}{m_3 (v_{ac} + v_3)} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}, \quad (13)$$

где  $c_{pV}$  – удельная изохорическая теплоемкость агента сушки, Дж/(кг·К);

Решение этой системы обычных дифференциальных уравнений первого порядка (10), (11), (12) и (13) значительно сложнее по сравнению с решением системы уравнений процессов сушки неподвижного зерна, сушки зерна с помощью поперечных потоков агента сушки, так как при сушке зерна противотоком речь идет о системе с двумя граничными условиями. Решение системы уравнений далее затрудняется за счет того, что зерно как в месте поступления, так и в месте выхода сушильного агента находится в состоянии равновесия с наружным воздухом.

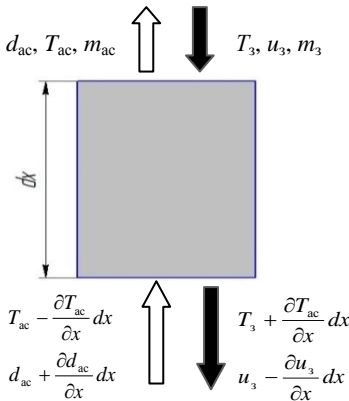


Рисунок 74 – Изменения состояния сушильного агента и зерна при сушке зерна прямотоком

Имитационная модель для расчета параметров процесса сушки зерна прямотоком отличается от модели сушки зерна противотоком тем, что сушильный агент, необходимый для сушки зерна, в этом случае поступает в другом направлении [4, 5]. Так как потоки агента сушки и зерна, в которых происходят процессы теплопередачи и переноса вещества на входе в сушильную установку, известны, можно их рассчитать путем интеграции для одного прохода профилей образующихся температуры и влажности. На рисунке 74 показаны изменения состояния сушильного агента и зерна при сушке зерна прямотоком.

Параметры процесса сушки зерна прямотоком можно описать с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которая отличается от системы дифференциальных уравнений для сушки зерна противотоком только различными знаками вследствие различных направлений движения сушильного агента (уравнения (14), (15), (16) и (17)).

$$\frac{\partial T_{ac}}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 (v_{ac} - v_3)(T_{ac} - T_3) - c_{pD} T_{ac} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}}{m_{ac}(v_{ac} + v_3)\rho_3 D_3 dx - c_{pV} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x} dx - c_{pD} d_{ac} - c_{pL}}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial x} = \frac{6\alpha_3 m_3 (v_{ac} - v_3)(T_{ac} - T_3) d\tau}{\rho_3 D_3 (v_{ac} + v_3)(m_3 c_3 + u_3 c_B + r_0) \frac{\partial u_3}{\partial x}}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial d_{ac}}{\partial x} = \frac{m_3 (v_{ac} - v_3)}{m_{ac}(v_{ac} + v_3)} \frac{\partial u_3}{\partial x}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial x} = \frac{m_{ac}(v_{ac} + v_3)}{m_3 (v_{ac} - v_3)} \frac{\partial d_{ac}}{\partial x}. \quad (17)$$

Относительно модели, составленной для расчета параметров процесса сушки зерна прямотоком, речь идет о системе с одним граничным условием, которую можно решить с помощью метода Рунге-Кутты [6, 7]. Необходимой предпосылкой для применения имитационной модели является уравнение, которое с достаточной точностью описывает характеристику сушки слоев зерна при высоких температурах агента сушки ( $100^\circ\text{C} < T_{ac} < 200^\circ\text{C}$ ).

### Выводы

При конвективной сушке зерна состояние сушильного агента, необходимого для сушки, изменяется при его прохождении через зерно, подлежащее сушке. Следствием этого является образование градиентов (перепадов) влажности и температуры внутри слоя зерна по направлению прохождения потока агента сушки. При перемещении потока агента сушки перпендикулярно направлению движения зерна градиенты влажности и температуры агента сушки и зерна изменяются не только в направлении воздушного потока, но и в направлении потока зерна пропорционально величине скоростей агента сушки и зерна. При перемещении потока агента сушки относительно движущегося слоя зерна противотоком градиенты температуры и влажности агента сушки и зерна увеличиваются пропорционально сумме скоростей движения агента сушки и зерна, а при прямотоке – уменьшаются пропорционально разности этих скоростей.

18.08.2014

### Литература

1. Чеботарев, В.П. Низкотемпературная сушка и режимное хранение зерна / В.П. Чеботарев; Национальная академия наук Беларуси, РУП «Науч.-практ.

- центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2011. – 202 с.
2. Чеботарев, В.П. Теоретическое исследование процесса сушки неподвижного слоя зерна / В.П. Чеботарев // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / Республиканское унитарное научно-исследовательское предприятие «Институт механизации сельского хозяйства НАН Беларуси». – Минск, 2006. – Вып. 40. – С. 178–182.
  3. Чеботарев, В.П. Сушка зерна. Теория, расчет, эксперимент / В.П. Чеботарев, И.В. Чеботарев; Национальная академия наук Беларуси, РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2012. – 520 с.
  4. Muhlbauer, W. Handbuch der Getreidetrocknung / W. Muhlbauer. – Glenze: Agrimedia, 2009. – 523 s.
  5. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер; сокр. пер. с нем.: В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер; под. ред. В.Г. Евдокимова. – М.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
  6. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке; пер. с нем. С.В. Фомина. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
  7. Матвеев, Н.М. Дифференциальные уравнения / Н.М. Матвеев. – Изд. 4-е, доп. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 368 с.

УДК 631.365

**В.П. Чеботарев, И.В. Барановский**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»),*

*г. Минск, Республика Беларусь);*

**А.В. Новиков, Т.А. Непарко**

*(УО «БГАТУ»),*

*г. Минск, Республика Беларусь)*

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНО- СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВАНИИ ВАЛОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА НА ПРЕДПРИЯТИИ**

### **Введение**

Основное значение при проектировании поточных технологических линий для послеуборочной обработки зерна имеют показатели экономической эффективности в зависимости от производительности, набора и размещения входящих в их состав машин. Кроме того, следует учитывать не только сложившиеся в хозяйстве конкретные условия (валовой сбор зерна, продолжительность уборки, размеры и расположение полей, состояние дорог), но и перспективу развития хозяйства [1, 2]. Производительность и место расположения поточной линии определяются сочетанием значительного числа различных факторов. Выбор типа линии определяется количеством и назначением обрабатываемого зерна и его физико-механическими свойствами (влажностью, засоренностью). Чис-